



SZENT ISTVÁN EGYETEM

Napenergia hasznosítás légkondicionálási  
rendszerekben

Doktori (PhD) értekezés  
Szilágyi Attila

Gödöllő

2018

**A doktori iskola  
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

**tudományága:**

Agrárműszaki tudományok

**vezetője:**

Prof. Dr. Farkas István  
egyetemi tanár, DSc  
SZIE, Gépészmérnöki Kar

**Témavezető:**

Prof. Dr. Farkas István  
egyetemi tanár, DSc  
SZIE, Gépészmérnöki Kar,  
Környezetipari Rendszerek Intézet

**Társ-témavezető:**

Dr. Seres István  
egyetemi docens, PhD  
SZIE, Gépészmérnöki Kar,  
Környezetipari Rendszerek Intézet

.....  
az iskolavezető jóváhagyása

.....  
a témavezető jóváhagyása

## TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK.....	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK.....	6
<b>1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2. Célkitűzések.....</b>	<b>7</b>
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	8
<b>2.1. A napenergia hasznosítása.....</b>	<b>8</b>
2.1.1. Napenergetikai mérések.....	9
2.1.2. A napenergia hasznosításának módjai.....	10
<b>2.2. Hűtéstechnika és légkondicionálás.....</b>	<b>19</b>
2.2.1. Abszorpciós hűtés.....	19
2.2.2. Adszorpciós hűtés.....	22
2.2.3. Párolgató hűtés.....	24
2.2.4. Építészeti megoldások.....	29
2.2.5. Hűtés levegőáramlással.....	29
<b>2.3. A hagyományos légkondicionáló rendszerek hatásai.....</b>	<b>32</b>
<b>2.4. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése.....</b>	<b>35</b>
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	37
<b>3.1. Napkollektoros mérőkör.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2. Kísérleti abszorpciós hűtőberendezés.....</b>	<b>38</b>
<b>3.3. Párolgató hűtés kerámiákkal.....</b>	<b>41</b>
3.3.1. Párolgás során elvont hőenergia meghatározása.....	41
3.3.2. Párolgató hűtés vizsgálata agyagedényekkel.....	42
<b>3.4. Hűtés palackok felhasználásával.....</b>	<b>44</b>
4. EREDMÉNYEK.....	47
<b>4.1. Napkollektorral működtetett abszorpciós hűtés.....</b>	<b>47</b>
<b>4.2. Napelemmel működtetett abszorpciós hűtés.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3. A párolgató hűtés.....</b>	<b>55</b>
<b>4.4. Alternatív hűtés palackokkal.....</b>	<b>62</b>
<b>4.5. Új tudományos eredmények.....</b>	<b>70</b>
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	72
6. ÖSSZEFOGLALÁS.....	73
7. SUMMARY.....	74
8. MELLÉKLETEK.....	75
<b>M1: Irodalomjegyzék.....</b>	<b>75</b>
<b>M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk.....</b>	<b>79</b>
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	81

## JELÖLÉSJEGYZÉK

### Jelölések:

A	felület	[m <sup>2</sup> ]
A	függvény együttható	[W/m <sup>6</sup> s <sup>2</sup> ]
A <sub>p</sub>	párolgási felület	[m <sup>2</sup> ]
C	függvény együttható	[s/m <sup>3</sup> ]
E	energia	[ J ]
I	napsugárzás intenzitása	[W/m <sup>2</sup> ]
I	áramerősség	[A]
I <sub>a</sub>	adszorbeálódott intenzitás	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>h</sub>	hasznos intenzitás	[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>r</sub>	reflektálódott intenzitás	[W/m <sup>2</sup> ]
L <sub>p</sub>	párolgáshő	[J/kg]
M	moláris tömeg	[g/mol]
P	teljesítmény	[W]
P <sub>h</sub>	hűtőteljesítmény	[W]
R	ellenállás	[Ω]
R	korrelációs együttható	[ - ]
Q	hőenergia	[J]
Q <sub>1</sub>	térfogatáram (primer kör)	[m <sup>3</sup> /s]
Q <sub>2</sub>	térfogatáram (szekunder kör)	[m <sup>3</sup> /s]
P <sub>fh</sub>	fajlagos hűtési teljesítmény	[W/m <sup>2</sup> ]
P <sub>h</sub>	hűtési teljesítmény	[W]
R	gázállandó	[J/mol K]
T <sub>k</sub>	külső (környezeti) hőmérséklet	[°C]
T <sub>s</sub>	felületi hőmérséklet	[°C]
T <sub>v</sub>	víz (mint munkaközeg) hőmérséklete	[°C]
T <sub>1</sub>	(kollektor) bemenő hőmérséklet	[°C]
T <sub>2</sub>	(kollektor) kimenő hőmérséklet	[°C]
T <sub>11</sub>	belépő közeg hőmérséklete (hőcserélő primer oldala)	[°C]
T <sub>12</sub>	kilépő közeg hőmérséklete (hőcserélő primer oldala)	[°C]
T <sub>21</sub>	belépő közeg hőmérséklete (hőcserélő szekunder oldala)	[°C]
T <sub>22</sub>	kilépő közeg hőmérséklete (hőcserélő szekunder oldala)	[°C]

U	feszültség	[V]
V	térfogat	[m <sup>3</sup> ]
c	fajhő	[J/kg K]
d	átmérő	[mm]
h	entalpia	[ J/kg]
h	magasság	[m]
k	Boltzmann állandó	[J/K]
m	tömeg	[kg]
$\dot{m}$	tömegáram	[kg/s]
p	nyomás	[Pa]
p	nyomás	[bar]
t	idő	[s]
v	szélsébség	[m/s]
$\alpha_k$	hőátadási együttható	[W/m <sup>2</sup> K]
$\varepsilon_{ir}$	felületi kisugárzás	[W/m <sup>2</sup> K]
$\eta$	hatásfok	[%]
$\varphi$	relatív páratartalom	[%]
$\rho$	sűrűség	[kg/m <sup>3</sup> ]

# 1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésem e fejezetében a téma jelentőségét és aktualitását fogalmazom meg, illetve a munkám célkitűzéseit mutatom be.

## 1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

A megújuló energiák, és azon belül a napenergia hasznosítása napjainkban egyre nagyobb jelentőséget kap, egyrészt az energiaárak folyamatos emelkedése miatt, másrészt a környezetvédelem, a környezettudatosság felértékelődése, és az ezt erősítő hivatalos tendenciák (pl. EU direktívák) miatt. Bár a napenergia hasznosítás a világ egyre több régiójában kap kiemelkedő szerepet (Németország, USA, Kína), a technológia nagy hátránya a termelés és fogyasztás időbeli eltérése, ami a megtermelt energia tárolását teszi szükségessé. Bár erre a tárolásra egyre jobb hatásfokú, kiforrott módszerek állnak rendelkezésre, a napenergiás légkondicionálás - a tárolási veszteségek hiánya miatt - a napenergiás technológiák közül különösen nagy fejlődés előtt áll. Ezen alkalmazás esetén a legnagyobb energia igény (a legnagyobb hűtőkapacitás) pont akkor keletkezik, amikor a legtöbb a beeső szoláris energia (hisz ez hozza létre a hűtés igényt).

A kutatási téma jelentőségét erősíti, hogy egyes források szerint a civilizált világ országaiban a légkondicionálás miatti nyári fogyasztási csúcserőterek immár vetekszenek az eddig hagyományosan télen jelentkező energiafogyasztási maximumokkal, vagyis a napenergiás légkondicionálás igen komoly teljesítményeket válthat ki a hagyományos energiahordozókkal történő energiatermelésből. A klímaváltozás nagymértékben megváltoztatja életünket, kapcsolatunkat a természettel. Az utóbbi években egyre nagyobb számban találkozhatunk hőhullámokkal, aszályos időszakokkal, és kánikulával. A 35 °C feletti hőmérséklet -árnyékban mérve- igen megviseli az emberi szervezetet. A több napon át tartó magas hőmérséklet negatív hatását megpróbáljuk valahogy elviselni, átvészelni. Erre a célra megfelelően szigetelt lakóépületekben való tartózkodással és megfelelő hűtési rendszerrel próbáljuk meg a külső hőhatást csillapítani. A hűtési rendszerünk lehet passzív (energia bevitel nélküli, mely többnyire természetes vagy mesterséges árnyékolás alkalmazása) vagy aktív (ügynevezett gépi) hűtés. A hőérzetünk függ a hőmérséklettől és a levegő páratartalmától, így ezek kontrollálására alkalmazunk légkondicionáló berendezéseket. A háztartási igények kielégítésére alkalmazott légkondicionáló berendezések döntően villamos energiával működnek, melyek működtetése egy több napos kánikulai időszak esetén jelentős mértékben megterheli az országos villamos energiatermelő és ellátó rendszert. Ennek lehetnek negatív hatásai: például túlterhelés esetén áramszünet, fosszilis hőerőművek esetén nagyobb mértékű erőművi emisszió. Az adott ország erőművi összetételétől függően nőhet az üvegházhatású gázok légkörbe jutása ebben a periódusban. Magyarország esetén a fosszilis tüzelőanyaggal működő erőművek a villamos energia előállításuk során nagy mennyiségű szén-dioxidot bocsátanak ki, ami a környezet globális felmelegedésének hatását növeli. Az energiahordozók nagyobb mértékű felhasználása külső forrásból egy energiabiztonsági kérdést vet fel, hogy mennyire függ egy ország az energiahordozók beszerzésétől.

Nyáron a napenergiával működtetett klímaberendezések kiváltképp előnyösek, mivel közvetlen energiafelhasználásúak, hálózattól függetlenül működtethetők, költségcsökkentő és környezetbarát megoldások. A napkollektorokkal működtetett hűtőrendszerek használata egyre inkább előtérbe fog kerülni mindennapi életünk során.

### 1.2. Célkitűzések

Kutatásom célja az, hogy hogyan alkalmazhatóak a napenergiával működtetett hűtőrendszerek kisteljesítményű (néhány kW), lakossági igényeket kielégítő légkondicionáló rendszereknél. Kutatómunkám ennek érdekében két fő területre terjed ki: a napenergia hasznosításának lehetőségeinek vizsgálatára és a megfelelő hűtési technológia kiválasztására.

A napenergia-hasznosítással kapcsolatos kutatási célok

A napenergia-hasznosításnak két alapvető formáját választhatjuk: az egyik a napkollektoros hőenergia hasznosítás, a másik a napelemes villamos energia előállítás. A napkollektor esetén kedvezőbb hatásfokú energiahasznosítás illetve teljesítmény-átvitel hozható létre. Napelemek esetén alacsonyabb hatásfokú energiahasznosítás érhető el, mely a nyári hőmérséklet-emelkedés hatására tovább csökken. Kutatási céljaim napenergia-hasznosítás témakörben:

- A napkollektor által hasznosítható energia meghatározása mérések és numerikus modell alapján (adott helyszínen, adott típusú napkollektorral).
- Megállapítani a napkollektor által biztosítható energia értékét a hűtőberendezés működtetése céljából.
- Megvizsgálni a napsugárzás által létrejött levegőmozgások felhasználhatóságát hűtési célra.

A hűtéstechnika és a légkondicionálás területével kapcsolatos kutatási célok

A lehetséges hűtési megoldások közül az abszorpciós és a párologtató hűtést vizsgálom meg részletesen. Az abszorpciós hűtés előnye, hogy hőenergiával és villamos energiával is működtethető, így napkollektorral és napelemmel is lehet üzemeltetni. A párologtató hűtés alkalmazása egyszerűsége és környezetbarát hűtőközege miatt célszerű megoldási lehetőség. Kutatásom céljai hűtéstechnika és légkondicionálás témakörben a következők:

- Abszorpciós hűtés alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata napkollektorral és napelemmel különböző hőátadó közegek alkalmazásával.
- Párologtató hűtés légkondicionáló rendszerekben való alkalmazásának vizsgálata porózus anyagok felhasználásával.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Értekezésem ezen fejezetében a hazai és nemzetközi szakirodalom segítségével bemutatom a napenergia-hasznosítás lehetőségeit, azok elméletét, valamint azon kutatások eredményeit, amelyek a napenergiával történő hűtés elemzésével foglalkoznak.

### 2.1. A napenergia hasznosítása

A földi élet szempontjából nagyon fontos a napsugárzás, a Nap, mint energiaforrás nagymértékben hozzájárult az élet kialakulásához és a különböző életformák kifejlődéséhez. A földi élet létezése szempontjából nélkülözhetetlen elemek létrejötte is fontos volt, úgy mint a levegő, a víz, az ózonréteg, stb. A növények klorofilja segítségével ezek együttesen hozzák létre a fotoszintézis folyamatát: a szén, az oxigén (és egyéb elemek) körforgását idézi elő, mely egy teljes életciklust hoz létre; megteremtve a földi élet egy fontos alappillérét. Az emberi tevékenység, leginkább az utóbbi száz év intenzív ipari és mezőgazdasági tevékenysége, nagymértékben hatással volt a földi élet egyensúlyára. A monokultúrás földhasználat, az erdőirtások, a fosszilis tüzelőanyagok nagymértékű felhasználása, a bányák, fűtő kutak, a közlekedés mind-mind több új folyamatot, hatást indítottak el a Föld több szintjén (sztratoszférájában). Egyes kutatások szerint a globális felmelegedést, mint egyik fő problémát az emberi tevékenység okozza, a légkörbe jutó ún. üvegházhatású gázok miatt, úgy mint a szén-dioxid, a metán, vagy a dinitrogén-oxid, stb. A vízgőzt is az üvegházhatású gázokhoz sorolják, mely légkörben okozott nedvességtartalom-növelő hatása miatt növeli a felmelegedést illetve a hőérzet hatását.

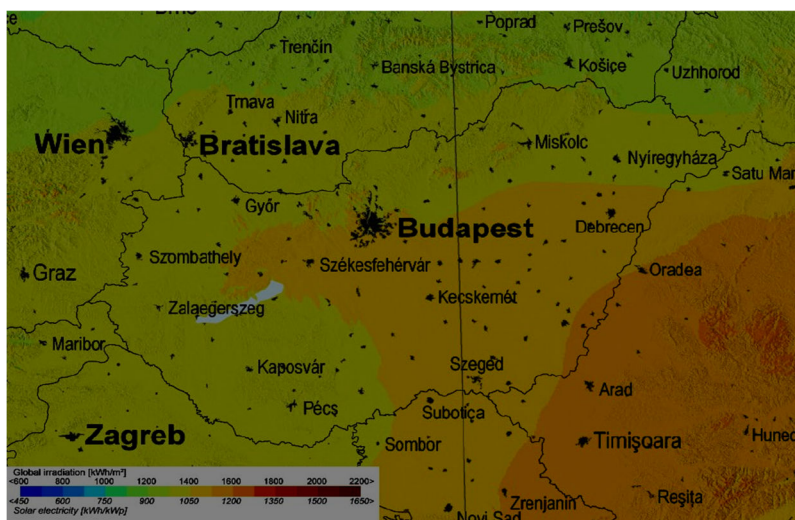
A globális felmelegedés (global warming) ami a klímaváltozásunk vagy más szóval éghajlatváltozásunk egyik oka kétféle okból jöhet létre. Az egyik ok lehet a természetes folyamatok hatásai, a másik az emberi tevékenység hatásai. Természetes folyamat lehet csillagászati: a Föld pálya mozgás periodikus változásai (Milankovic-Bacsák-elmélet), fizikai: a Nap sugárzó energiájának hosszú periódusú változása (Simpson-féle elmélet), geológiai okai: kontinensek helyzetének változásai, hegységképződési folyamatok (Wegener elmélete). Az emberi tevékenység lehet üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátása, a földfelszín és a természetes élőhelyek megváltoztatása, a lakossági és az ipari hőtermelés (Kiss és tsai, 2016).

Az éghajlat megváltozása számos negatív hatást jelent életünkre. Az évszakok határai összemossódnak, megváltoznak. Az emberi mértéktelenséghez hasonlóan a természet is mértéktelen mennyiségben fejt ki hatásait, ezáltal igen szélsőséges jelenségekkel szembesülhetünk. Ilyenek például a nagymértékű csapadék rövid idő alatt, a jégeső jó időben illetve nyáron, a nagy szélereősség, a forgószél vagy tornádó, az aszály és a kánikula, az erős napsugárzás. Mindezek az energiaellátás biztonságát is veszélyeztetik, legyen az primer vagy szekunder energiaforrás. A mezőgazdaságnak speciális szerepe van a klímaváltozással szemben. Egyrészt kibocsátó (szén-dioxid, metán pl. állattartó telepeken), másrészt nyelő is hiszen a növények fotoszintézise során szén-dioxidot kötnek meg és oxigént termelnek (lágyszárú növények, gyümölcsösök, erdők) (Kovács és tsai, 2018).



### 2.1.1. Napenergetikai mérések

A Föld légkörének felső határára érkező napsugárzás teljesítmény-sűrűsége (intenzitása), azaz a Napállandó értéke átlagosan  $1360 \text{ W/m}^2$ . A napsugárzás egy kis részét a földi légkör visszaveri, nagyobb része közvetlen és szórt sugárzás formájában jut el a Föld felszínére, melynek átlagos intenzitása a sugárzás irányára merőleges felületre körülbelül  $1000 \text{ W/m}^2$ . A szórt sugárzást a felhők, por-, pára- és ködfoltok okozzák. A napsütéses órák száma földrajzilag változó, Magyarországon átlagosan 2000-2500 óra évente, energia-sűrűségének értéke Magyarországon  $1200 \dots 1400 \text{ kWh/m}^2$  évente (2.1. ábra) (Kacz és Neményi, 1998).



2.1. ábra Napsugárzás értéke Magyarországon  
(<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/>)

A napsugárzás mérése a következő eszközökkel történhet:

- pirheliométerrel (direkt sugárzás: Abbot-féle ~, Angström-féle pirheliométer),
- aktinométerrel (relatív sugárzás: Michelson-Martin-féle ~, Linke-Feussner-féle aktinométer),
- piranométerrel (rövid hullámú sugárzás, direkt és szórt sugárzás: Kipp&Zonen-féle ~, Moll-Gorczyński-féle piranométer),
- pirgeométerrel (hosszú hullámú sugárzás),
- pirradiométerrel (teljes sugárzás), és
- Campbell-Stokes-féle napfénytartam mérővel (<http://meteor.geo.klte.hu/hu/doc/>).

A napsugárzás értékeit (direkt és szórt sugárzás, napfénytartam mérése, stb.) Magyarországon sok helyeken mérik, melyek közül az alábbi szervezetek adataira támaszkodtam a munkám során:

- az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) adatai,

- 2004 óta a Naplopó Kft. (Budapest) egy Kipp & Zonen gyártmányú, CM-5 típusú piranométerrel végzi, a mért adatokat egy adatgyűjtő dolgozza fel és ezeket az adatokat a honlapjukon elérhetővé teszik;
- a Szent István Egyetem Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén (Gödöllő) szintén egy Kipp & Zonen gyártmányú, CM-11 típusú piranométerrel történik a mérés, mely adatok rögzítése számítógépen történik (2.2. ábra).



2.2. ábra Kipp & Zonen CM-11 típusú piranométer  
direkt és szórt napsugárzás mérésére (SZIE)

### 2.1.2. A napenergia hasznosításának módjai

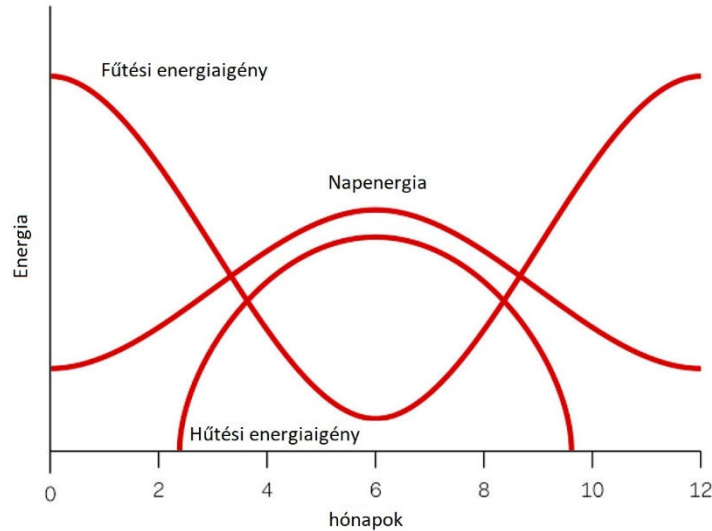
A Nap energiáját használjuk fel leginkább energia-szükségletünk kielégítésére, ugyanakkor az élet is elképzelhetetlen lenne Nap nélkül. A napenergia-hasznosítás során törekednünk kell arra, hogy minél nagyobb hatásfokkal hasznosítsuk a beérkező energiát. Ez a Föld tengelyferdesége miatt eltérő értékeket jelent, pl. az Északi féltéken nyáron több energia érkezik a felszínre, mint télen.

A napenergia hasznosítása történhet aktív (napsugárzás-hasznosító berendezésekkel) vagy passzív módon (épületszerkezeti kialakításokkal), illetve közvetlen (hőenergia hasznosítása) vagy közvetett (légáramlások kialakításával) formában.

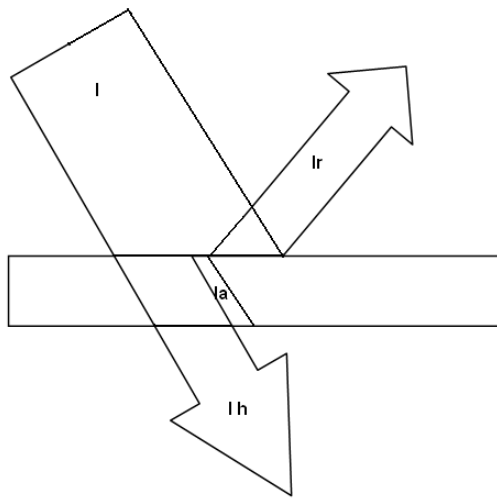
A passzív energiátárolás esetén fontos egy tárgy hőtároló képessége, ha nagy a hőkapacitása, akkor sok hőt képes tárolni. Mindez függ az anyag fajhőjétől és tömegétől. A nagy mennyiségű napenergia képes az épületek határoló falait, szerkezeteit felmelegíteni, ezáltal a belső hőmérséklet növekszik, ami kánikula idején az emberi szervezetre kedvezőtlen hatással lehet. Napelemek és napkollektorok telepítése segítségével növelhető a hőelvitel az adott felületről, ezáltal az nem melegszik fel akkora mértékben. Az épületek tájolása, kialakítása nagyban meghatározza az épület belsőjében a hőérzetet. A tájolás fontos az energiahasznosítás során is, mind az égtáj szerinti elhelyezés, mind a dőlésszög figyelembe vétele.

A napenergia hőenergiává alakítása napkollektorok segítségével történhet. Az elektromágneses sugárzás hőenergiává való átalakítása különféle kialakítású napkollektorok, illetve különböző munkaközegek felhasználásával történhet. A hasznosítható energia mennyisége függ a Nap helyzetétől, melyet egész évre a nappálya-diagram segítségével tudunk megadni az adott földrajzi helyre. A hasznosítható hőenergia mennyiségét befolyásolják a külső levegő hőmérséklete, a levegőmozgás mértéke, a felhősödés és a légköri szennyeződések, üzemi jellemzőként az alkalmazott közegáramlás sebessége, azaz a térfogatáram értéke. A napkollektor elnyelő felületére érkező pillanatnyi sugárzás értéke mellett annak beesési szöge

is befolyásolja a hasznosítható energia mennyiségét. A beesési szöget befolyásolja a földrajzi helyzet, a napmagasság és az azimutszög, de a napkollektor dőlésszöge is hatással van a hasznosítható energiamennyiségre. Ideális helyzet, ha a kollektor abszorber felületére merőlegesen érkeznek a napsugarak. Fix rögzítés esetén ez csak rövid ideig tapasztalható. Az energiaigényeket és a napenergia kínálati görbéjét éves szinten a 2.3. ábra szemlélteti.



2.3. ábra A napenergia kínálat és az energiaigények időbeli értékei  
( www.sortech.de alapján szerkesztve)



2.4. ábra A napsugárzás modellje

A 2.4. ábrán látható a napsugárzás átlátszó felülettel való találkozása. A teljes sugárzás intenzitásának ( $I$ , [J/s]) egy része áthalad a felületen ( $I_h$ : hasznos intenzitás), egy részét elnyeli a felület ( $I_a$ : adszorbeálódott intenzitás), és egy része visszaverődik a felületről ( $I_r$ : reflektálódott intenzitás). A sugárzás mellett fontos a belső és a külső tér között a hővezetéssel kapcsolatos hőcsere, amely a belső és külső hőmérséklet különbségétől és a felület nagyságától, anyagi minőségétől (hvezetési tényező) és a vastagságától is függ. Napkollektoroknál a jobb

hőhasznosítás érdekében hőszigeteléssel lehet javítani a hatásfok értékét. Sík kollektoroknál üvegfedéssel és keretbe foglalt szilárd hőszigetelő anyaggal oldják meg a hőelnyelő felület hőszigetelését, míg vákuumcsöves kollektornál a hőelnyelő felületet egy dupla falú üvegcsőbe helyezik, ahol a két fal között vákuumot hoznak létre, ami megakadályozza a konvektív hővesztéséget (Kreider és Kreith, 1982).

A egységnyi felületen hasznosítható teljesítmény ( $P_h$ ) a következő változóktól függ:

- a napsugárzás pillanatnyi értékétől ( $I \rightarrow$  tájolás, dőlésszög),
- a külső levegő hőmérsékletétől ( $T_k \rightarrow$ szigetelés),
- a konvekciós veszteségtől ( $\alpha_{koll}$ : kollektor felület hőátadási együtthatója),
- a sugárzási veszteségtől ( $\varepsilon_{ir}$ : átlagos felületi kisugárzás),
- a napkollektor pillanatnyi hőmérsékletétől ( $\rightarrow T_{koll}$ ) és
- a munkaközeg (szolárfolyadék pillanatnyi hőmérsékletétől ( $\rightarrow T_k$ )).

$$P_h = I - \varepsilon_{ir} \cdot \sigma \cdot T_{koll}^4 - \alpha_{koll} \cdot (T_{koll} - T_k) + \alpha_k \cdot \sigma \cdot T_k^4 \quad (2.1)$$

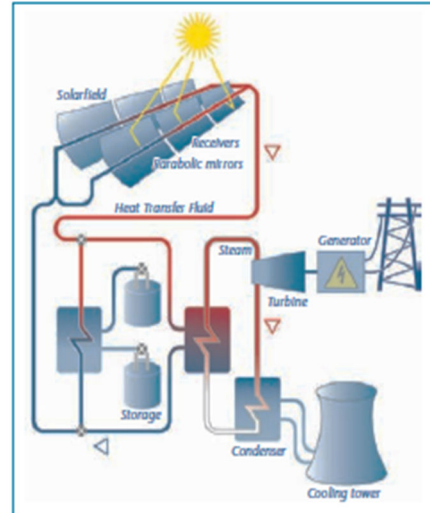
A 2.1. egyenlet állandója a Stefan - Boltzmann állandó ( $\sigma$ ). A kollektor és környezeti hőmérséklet között kialakuló különbség hatással van az energiahasznosítás mértékére, azaz a hatásfokra.

$$\eta = \frac{Q_h}{I} \quad (2.2)$$

Aktív napenergia-hasznosítás során a legnagyobb mértékű energiát koncentrált napsugárzás-hasznosító berendezésekkel (CSP: concentrated solar power) tudjuk megvalósítani. Többféle típusa létezik, ilyen például a CPC: compound parabolic concentrating collector, a parabolic trough collectors, és a Linear Fresnel kollektorok. A Nap sugarait egy pontra (felületre) vagy vonalra fókuszáljuk változtatható állású vagy fix helyzetű tükrök segítségével, így magasabb hőmérséklet (90-400 °C) érhető el. A környezeti hőmérséklettől független hőhasznosító berendezés a vákuumcsöves napkollektor (vacuumtube collector). Kétféle típusa van: a direct flow collectors és a heat pipe collectors. A hagyományos hőhasznosító napkollektor (solar thermal collector) lehet folyadék (flat plate collectors) vagy gáz (air collectors) munkaközegű. A napelem (solar cell, vagy PV) és a napkollektor ötvözésével jött létre az ún. hibrid napkollektor (PVT: photovoltaic-thermal collectors), mely hő- és villamos energiát képes előállítani. A napelem a villamos energia termelés során felmelegszik, ezen folyamat során a hatásfok értéke csökken. Az így keletkező hő hasznosítható a napkollektor-rész segítségével (Kohlenbach P. et al., 2014).

A napenergia erőművi szintű felhasználása a következő technológiák szerint történhet.

A napteknő (solar trough) teknő alakú tükrök gyűjtik össze a Nap sugarait és egy gyűjtőcsőbe fókuszálják, amiben hőátadó folyadék áramlik (2.5. ábra). A folyadékban felhalmozott hő egy gőzfejlesztőt működtet, és ezzel működtetnek egy gőzturbinát, mely villamos energiát állít elő. A keletkezett hőt pl. használati melegvíz előállítására felhasználhatják. Hatásfokuk 6...12 %.



2.5. ábra Napteknő energiatermelési kapcsolási rajzzal  
(<http://www.schottsolar.com>)

A naptányér (solar dish) több, egymás mellett elhelyezkedő homorú korong alakú tükröt (tányért) mozgat egy Napkövető szerkezet, mely az összegyűjtött Napenergiát egy közös pontba sugározza (2.6. ábra). A közös pontban egy Stirling-motor a hőenergiát villamos energiává alakítja egy generátort hajtva. Hatásfokuk 8...30 %.



2.6. ábra Naptányér  
(<http://www.stirlingengines.org.uk/sun/sola3.html>)

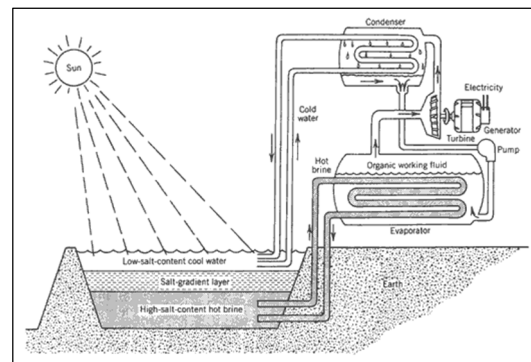
A naptorony (solar tower) koncentrikus körökben telepített napkövető tükrök irányítják a visszavert fényt a középpontban álló torony tetejére (2.7. ábra). Itt egy tartályban található a hőtároló folyadék, ami felveszi a hőt és továbbítja egy hőcserélőn keresztül egy hagyományos gőzkörfolyamatnak, ahol villamos energiát állítanak elő. Hatásfokuk 15-25 %.



2.7. ábra Naptorony

(<http://ecolounge.hu/upload/gallery/944/Crescent-Dunes-naptorony.jpg>)

A naptó (solar ponds) mesterségesen kialakított sós vizű tó alsó rétegeiben az oldott só koncentrációja nagyobb, ezáltal a napsugárzás által felmelegedett réteg hőenergiáját nem engedi a felszín felé, ott a hőt eltárolja (2.8. ábra). Az így keletkezett 70-85°C-os hőt hasznosítják villamos energia-termelésre vagy fűtési célra.



2.8. ábra Naptó energiatermelési kapcsolási rajzzal

([http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue\\_number=07.08.01&article=ponds](http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=07.08.01&article=ponds),  
[http://climatelab.org/Solar\\_Ponds](http://climatelab.org/Solar_Ponds) )

A napkémény (solar updraft tower) kör alakban nagy területet borítanak be üveggel vagy műanyaggal, mely a kör közepén található kémény felé enyhén emelkedik (2.9. ábra). A Nap hatására az üveg vagy műanyag alatt felmelegedett levegő a kémény felé áramlik, mely mozgási energiáját a kéményben található szélturbinák hasznosítják. Generátoron keresztül villamos energiát állítanak elő.



2.9. ábra Napkémény Manzanares mellett  
([www.sbp.de](http://www.sbp.de))

Az első napkéményt Spanyolországban, a Madridtól délre található Manzanares-ben építették fel, mely 1982 és 1989 között, 7 évig üzemelt folyamatosan. Az 50 kW teljesítményű erőmű kollektorának átmérője 240 méter volt, 46 000 m<sup>2</sup> felülettel, a kémény átmérője 10 m, magassága 195 m volt. A kísérleti üzem eredményesnek tekinthető. A kollektor fajlagos tömege 5,5 kg/m<sup>2</sup> volt, a kémény össztömege 125 t. Az erőmű építését és üzemeltetését a stuttgarti székhelyű Schlaich Bergermann és Társa végezte. Épületeknél passzív szellőztetésként használják ezt az elvet.

A legáltalánosabban elterjedt napenergia-hasznosító berendezés a napelem. Számos kutató eredményei, felfedezései után 1946-ban Russell Ohl felfedezte, hogy ha egy szilíciumlapot fény ér, váratlanul sok szabad elektron keletkezik. 1957-ben Gerald Pearson, Calvin Fuller és Daryl Chapin szilícium lapkákat kötöttek elektromosan össze és napsugárzásnak tették ki, a felszabaduló szabad töltéshordozókra külső feszültséget kapcsoltak és így elektromos áram indukálódott. Ez volt az első napelem, melynek hatásfoka (csupán) 6% volt. 1962-ben 3600 napelem látta el elektromos energiával a világ első kommunikációs műholdját, a Telstar-t. Napjainkban számos helyen alkalmazzák a napelemeket, pl. háztartásoknál, erőműveknél, műholdaknál, stb. A kísérleti napelemek hatásfoka 42% körüli. A kereskedelemben kaphatóké maximum 22%.

A hőenergia hasznosítására használt berendezés a napkollektor (solar collectors), mely a Nap sugárzása révén hőenergiát hasznosít. Ez az energia felhasználható melegvíz-előállítására, fűtés(rásegítés)re, vagy gőz előállítására.

A kollektoroknak fő típusai a következők:

- a már az előző részben bemutatott, elsősorban erőművi hasznosítású koncentrált napenergia hasznosító kollektorok, de használatos még napkohóknál (fémek olvasztására) és tűzgyújtásra vagy sütésre, főzésre. Ezeknél a berendezéseknél a jobb hatásfok és kihasználtság érdekében napkövető (tükör)rendszereket is használnak.
- síkkollektorok, és
- vákuumcsöves kollektorok.

A síkkollektorok elsősorban a lakossági használatra készülnek. Előnyük a kialakításukból adódik, a modulszerűen, táblákból felépíthető napenergia-hasznosító rendszer egyszerűen összeállítható és később akár bővíthető is. Főként használati melegvíz-előállításra használják, de fűtés-rásegítésre és hűtésre is alkalmazható.

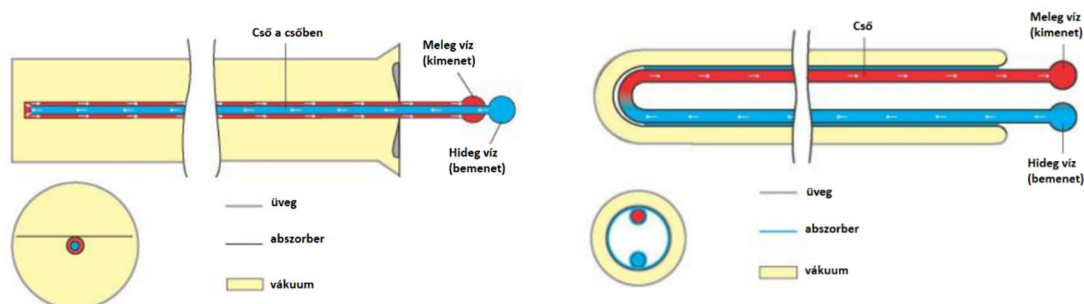
A vákuummal szigetelt napkollektor csövek esetén a környezeti hőmérséklettől függetlenül hasznosítható a hőenergia, így magasabb hőmérséklet érhető el a munkaközeggel (2.10. ábra). A vákuumcsöves napkollektornál a csövek egymástól függetlenül cserélhetők sérülés esetén. A magas hőmérséklet kedvező a hűtőrendszerek hűtőközegének elpárologtatásához.



2.10. ábra Vákuumcsöves napkollektor (SZIE)

A vákuumcsöves napkollektoroknak két különböző modellje érhető el: a közvetlen áramlású és az ún. heat pipe rendszerű kialakítású kollektorok (2.11. ábra).





2.11. ábra Vákuumcsöves napkollektor kialakítások közvetlen áramlás esetén (Kohlenbach P. et al., 2014 alapján szerkesztve)

A napenergia hőhasznosító berendezéseinek főbb jellemzőit a 2.1. táblázat foglalja össze.

2.1. táblázat A napenergia hőhasznosító berendezések jellemzői

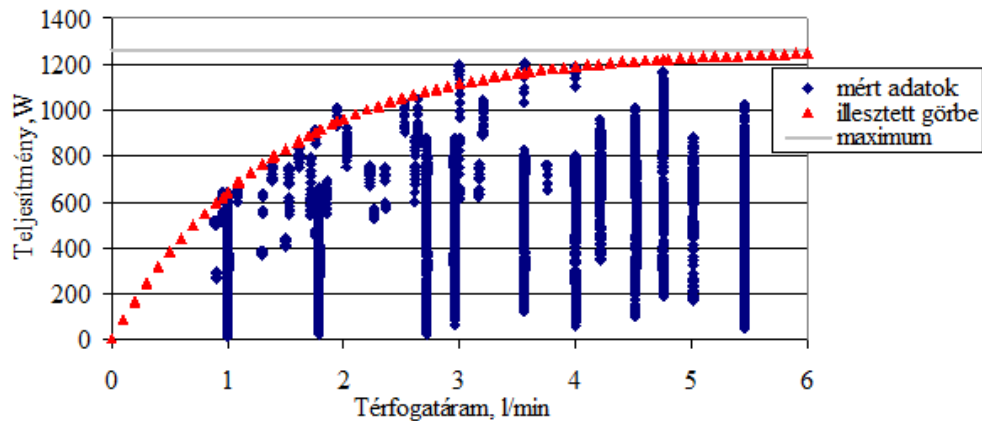
A napenergia-hasznosító berendezés	előny	hátrány	max. (és átlagos) üzemi hőmérséklet	munkaközeg
sík napkollektor	egyszerű és bevált technológia, nincs mozgó alkatrész, könnyű telepíthetőség	érzékeny a környezeti hőmérsékletre	kb. 120 (50-90)°C	víz, propilén glikol-víz
vákuumcsöves napkollektor	bevált technológia, nincs mozgó alkatrész, magas hőmérséklet hamar elérhető jó hatásfokkal, könnyű független csövek	érzékeny a mechanikai hatásokra (pl. jégeső, sérülésveszély szerelés, szállítás során)	kb. 200 (70-150) °C	víz, propilén glikol-víz
légkollektor	egyszerű kialakítás, könnyű telepíthetőség	korlátozott a felhasználhatósága	kb. 120 (30-70)°C	levegő
koncentrált napkollektor	magas hőmérséklet elérhető	nagy területigény, magas költség, fényvisszaverő elemek és a hőhasznosító cső felületének tisztán tartása	kb. 400 (90-250)°C	termoolaj
hibrid napkollektor	egyidejű hő- és villamos energia termelése	komplex telepítés	kb. 70 (40-60)°C	víz, propilén glikol-víz

Az első síkkollektort 1770 körül a svájci De Saussure készítette el, több rétegű üveglemez használatával.

A napkollektorokban alkalmazott hőhordozó közeg lehet: levegő, víz, termoolaj, vagy propilénlikol vizes oldata. A kollektoros rendszer lehet gravitációs kialakítású vagy keringtető szivattyúval ellátott tetszőleges térbeli elrendezésű.

Azt a kérdést, hogy egy napkollektorból legfeljebb mekkora teljesítmény vehető ki, már több kutató vizsgálta. Közülük ebben az esetben azért érdemes a Víg – Farkas 2013. évi Magyar Energetika publikációját beidézni, mert ők ugyanazzal a típusú vákuumsöves kollektorral végezték a vizsgálataikat, mint amivel én is.

A vizsgálatok során megállapították, hogy a vizsgált 15 vákuumsöves kollektor maximális hőteljesítményének függése a térfogatáramtól egy exponenciális függvénnyel jellemezhető (2.12. ábra).



2.12. ábra: A kollektor által leadott hőteljesítmény függése a térfogatáramtól (Víg és Farkas, 2013)

A munka során nem csak a függvény grafikonját határozták meg, hanem a mért adatok analízise alapján a függvény matematikai alakját is felírták az alábbi alakba, ami a telítési függvények szokásos alakja:

$$P(\dot{V}) = 1264(1 - e^{-\dot{V}/1,4}) \quad (2.3)$$

Az itt megadott függvényalak jó kiindulási alap, de azért nem mérvadó, mert én a kollektorból klimatizációs célra kivehető maximális teljesítményt keresem, és nem a melegvíz készítésre vonatkozó maximumot, mint az említett szerzők.

Míg ez utóbbi esetben a kollektorból közvetlenül kivehető teljesítmény szinte közvetlenül hasznosítható vízmelegítésre (bár egy adott tartályhőmérséklet esetén a túl nagy térfogatáram ott is korlátot jelent, hiszen a munkaközeg nem tud eléggé felmelegedni a kollektorban), a klimatizációs céllal használt kollektor esetén mindenképpen kell egy hőcserélő, és ebben az esetben a hőcserélő szekunder oldalán kivehető teljesítmény az optimalizálási cél. Az ezen a téren elért eredményeimet a 4. fejezetben mutatom be.

## 2.2. Hűtéstechnika és légkondicionálás

A nyári időszak hőterheléseinek megfelelő klímaberendezés megválasztásánál figyelembe vehető az adott országrészre jellemző (várható) nyári középhőmérsékleti értékek, a hőterhelések számításánál pedig felhasználható az egyenértékű hőmérséklet-különbség módszere. A külső levegő hőmérsékletének meghatározása árnyékolt, sugárzásmentes helyen történhet meg kellő pontossággal. A hűtőberendezés méretezésénél célszerű figyelembe venni az elmúlt évek maximum értékeit is. A hőmérséklet mellett fontos a páratartalom is, mely jellemzők kölcsönhatásban vannak egymással. A levegő nedvességtartalma kifejezhető abszolút (g/kg) és relatív (%) páratartalommal. Nyári időszakban a relatív érték 50-60% közötti. A hőterhelések számításánál fontos a szélmozgások figyelembevétel, azaz adott épületnél milyen irányból fúj a szél, milyen gyakorisággal és milyen sebességgel. A légmozgás hűtő hatását figyelembe lehet venni a számításoknál. A nyári szélesebesség középértéke 1,8-5 m/s hazánkban (Bakos, 1987).

Adott zárt tér klimatizálása során célunk egy mesterségesen létrehozott és fenntartott ún. egyedi mikroklímával ellátott környezet, amit mi magunk tudunk szabályozni. Ez a szabályzás lehet állandó kimeneti értékekkel rendelkező vagy adott céloknak megfelelő változó kimeneti értékekkel működtetett rendszer. Egy klímarendszer főbb részei ennek megfelelően a következő:

- egy ellenáramú hővisszanyerős levegő-levegő hőcserélő (friss levegő bejuttatása, elhasznált levegő elszívása),
- egy hűtő,
- egy fűtő és
- egy párasító berendezés,
- szűrő több helyen is elhelyezve, adott esetben pedig
- szárító berendezés.

A mesterségesen létrehozott párasítás akkor szükséges, ha a külső levegő száraz és a belső térben nem elegendő az élőlények által elpárologtatott víz mennyisége. A párasítás történhet porlasztással, párologtatással vagy téli időszakban gőz-befúvással. A porlasztás történhet nagy nyomással, normál nyomással, ultrahang segítségével vagy centrifugális módon.

A porlasztott vízcseppek mérete minél kisebb annál nagyobb a levegőbe jutó vízhányad aránya. Ezért célszerű minél finomabb porlasztást végezni, erre lehetőség az ultrahangos párasítás. Az ultrahangos párasítás közel 100%-os hatásfokkal történik, alacsony energiafogyasztás mellett (Henning et al., 2013).

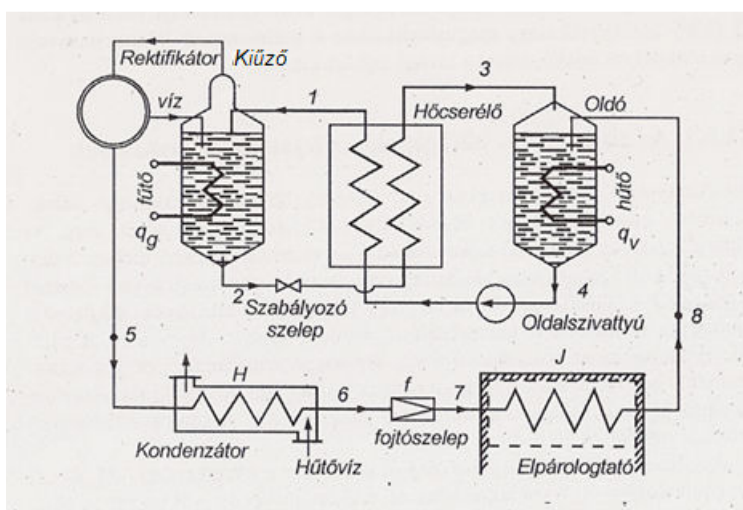
### 2.2.1. Abszorpciós hűtés

Hűtésre két leggyakrabban alkalmazott technológia használatos: a kompresszoros és a szorpciós hűtés. Előbbinél mechanikai munkával utóbbinál hő bevitellel érjük el a kívánt hűtést. A jobb hatásfok miatt előbbi technológia terjedt el jobban, utóbbi csak azokon a helyeken ahol van hulladékhő vagy egyéb speciális körülmény indokoltá teszi. A szorpciós hűtés kétféle lehet: abszorpciós vagy adszorpciós attól függően, hogy a hűtőközeget folyadék vagy szilárd anyag nyeli el. Egyes abszorpciós hűtőköröknél a keringtető szivattyúk végeznek minimális mechanikai munkát.

Az abszorpciós hűtőgép kifejlesztése a francia Carré testvérek nevéhez fűződik. 1850-ben Edmund Carré kénsav-víz keverékkel, majd 1859-ben Ferdinand Carré ammónia-víz

keveréssel oldotta meg a hűtést (Eicker, 2003).

Az abszorpciós hűtőkörben hűtőközeget és valamilyen oldó folyadékot használnak, többnyire ammóniát vízzel. A kiűzőben (kazánban) található gazdag oldatot (ammónia és víz) hőbevitellel felmelegítjük, ebből az ammónia elgőzölög, majd a rektifikátorban a vizet cseppleválasztóval és visszahűtéssel leválasztjuk és visszavezetjük a kazánba (2.13. ábra szerint). Ezután a tiszta ammónia a kondenzátoron és egy fojtón keresztül eljut az elpárologtatóba (hűtendő tér), ahol hőt vesz, majd bekerül a vízzel teli oldóba, ahol elnyelődik, azaz abszorbeálódik, innen a hűtés elnevezése. Az oldó víz minél hidegebb, annál több hűtőközeget tud elnyelni. Az ammónia vizes oldata egy szivattyú segítségével újra visszajut a kiűzőbe. A kazánban felgyülemlett vizet egy hőcserélőn és egy szabályozószelepen (nyomáskülönbség miatt) keresztül visszavezetjük az oldóba. Ezen a hőcserélőn keresztül a kiűző felé áramló gazdag oldatot felmelegíti az oldóba visszatérő víz (szegény oldat), mely lehül. A kiűzőben a nyomás nagy, az oldóban alacsony (Beke, 2000).



2.13. ábra Abszorpciós hűtőkör  
(Beke, 2000 alapján szerkesztve)

Az ammóniás hűtőközeg mellett igen elterjedt a lítiumbromid vizes oldatának alkalmazása. Erre a Carrier cég (USA) készített saját fejlesztésű hűtőköröket, melyek két fekvő edényből állnak és nem tartalmaznak rektifikátort. A felsőben a kazán és a kondenzátor, az alsóban az elpárologtató és az oldó található. A hűtőben több szivattyú is biztosítja az áramlást.

Komolyabb előrelépést jelentett a technológiában az oldatszivattyú nélküli folytonos működésű abszorpciós hűtőgép kifejlesztése, mely H. Geppert nevéhez köthető (1899.). Ezt tökéletesítették 1922-ben Baltzar von Platen és Carl Munters svéd mérnökök. A gáz abszorpciós hűtési technológia hőforrása propán, villamos energia vagy petróleum (kerozin) volt. A szivattyú nélküli folyamatos áramlást azonos nyomású, de eltérő hőmérsékletű gáz-gőz eleggyel érték el, s egy semleges közeget is használtak, a hidrogéngázt. További tökéletesítés a kondenzátor és az oldó külső levegővel való hűtésének megoldása volt. Ezt a szabadalmat vásárolta meg az Electrolux és ez alapján készültek el az első abszorpciós hűtő- és fagyasztó szekrények (Komondy és Halász, 1970).

A hűtésre jellemző, hogy nincs mozgó alkatrésze, így a meghibásodás lehetősége minimális. Zárt körben történik a hűtőközeg, a segédközeg és az elnyelő közeg mozgatása hőbevitellel

hatására. A rendszer határoló szerkezetének fizikai sérülése esetén válik működésképtelenné a hűtőaggregát.

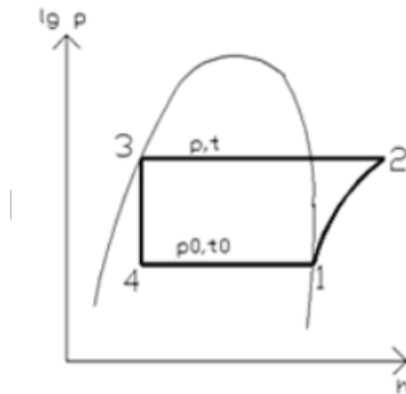
A működtetés során a következő esetekben tapasztalható nem megfelelő üzem:

- a függőleges helyzettől való eltérés leállítja a hűtő működését,
- alacsony áramerősségnél (névleges érték alatt) leáll a hűtő működése,
- a párologtató külső felületénél víz munkaközeg folyamatos hőelvonása leállítja a hűtést.

A hűtés hatásfokát COP értékkel fejezzük ki (COefficient of Performance), azaz a teljesítmény tényezővel, mely a következőképpen fejezhető ki:

$$COP = \frac{Q_{\text{hűtés}}}{Q_{\text{bevitt}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (2.4)$$

A bevitt energia ( $Q_{\text{bevitt}}$ ) lehet mechanikai munka vagy hőenergia. A hőenergia származhat napenergiából napkollektorok segítségével, vagy földgáz elégetéséből, vagy villamos energiát felhasználva fűtőpatron működéséből. Az entalpia értékekkel is kifejezhető a COP értéke, azaz a felfűtő előtti entalpia ( $h_1$ ) és a fűtő utáni érték ( $h_2$ ) különbségének és az elpárologtató előtti entalpia ( $h_4$ ) és utáni érték ( $h_1$ ) különbségének hányadosa (2.14. ábra).



2.14. ábra A hűtés lg p – h diagramja (Tóth, 2011)

A hűtőközeg és abszorber a következők lehetnek:

- ammónia és víz, ahol az elpárologtatáshoz szükséges hőmérséklet 121-148 °C között van,
- víz és lítium bromid, ahol az elpárologtatáshoz szükséges hőmérséklet 87-93 °C között van.

Utóbbi kedvezőbb napkollektoros felfűtés esetén, előbbinél a koncentrált napsugárzás-hasznosító és a leírt hőmérséklet-értékeket biztosítani tudó vákuumcsöves kollektorok alkalmazása jelent üzembiztos megoldást.

A berendezés előnyei:

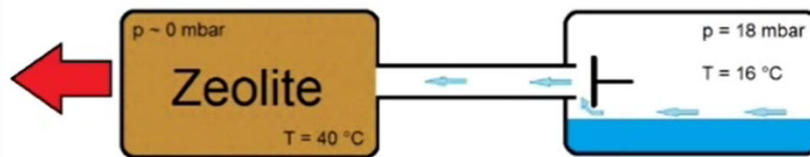
- csendes,
- nincs mozgó alkatrész,
- hosszabb élettartam,

- rezgésmentes üzemmód,
- többféle energiaforrásról üzemeltethető.

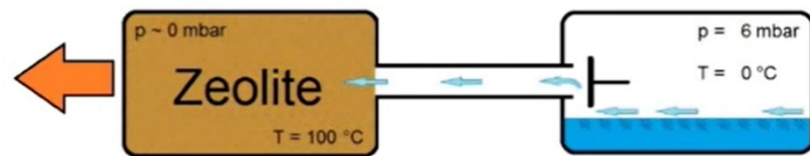
Ez utóbbi miatt használják a kempingekben (földgáz, villamos energia), csendessége miatt pedig a szállodai szobák alaptartozéka. Magyarországon Jászberényben a Dometic cég gyárt abszorpciós hűtőket, fagyasztókat és hűtőtáskákat (az Electrolux csoport tagjaként). A hűtőtáskák Peltier elemekkel hűtött verziói is kaphatók. Az első légkondicionálási alkalmazása 1958-ban történt Watts és Gulland által.

### 2.2.2. Adszorpciós hűtés

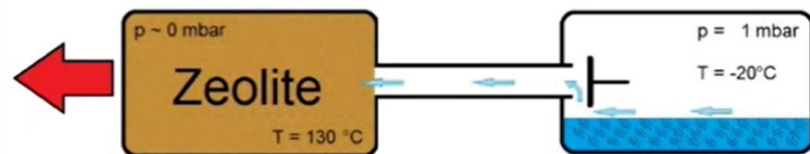
Az adszorpciós hűtés egy környezetbarát hűtési technológia. Japánban foglalkoztak először a szilikagél-víz párosítással, Németországban pedig a zeolit-víz által létrehozható hűtéssel értek el jó eredményeket az utóbbi években (2.15. ábra).



2.15.a. ábra A zeolitos hűtés folyamata 16 °C-ról  
(forrás: Zeolith Technik, [www.zeo-tech.de](http://www.zeo-tech.de))

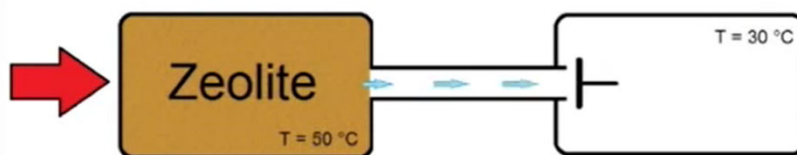


2.15.b. ábra A zeolitos hűtés folyamata 0 °C-ra  
(forrás: Zeolith Technik, [www.zeo-tech.de](http://www.zeo-tech.de))

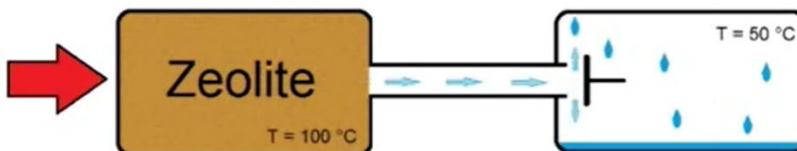


2.15.c. ábra A zeolitos hűtés folyamata -20 °C-ra  
(forrás: Zeolith Technik, [www.zeo-tech.de](http://www.zeo-tech.de))

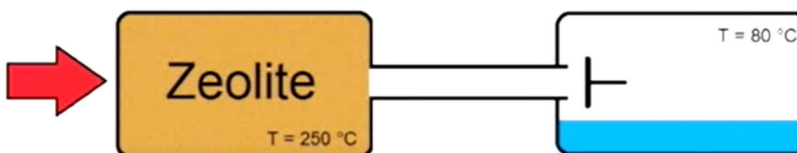
Vákuumot hozunk létre a zeolitos térben, majd egy szelepen keresztül összenyitjuk a vizet tartalmazó térrel. A víz a folyamat során jéggé hűl le. A víz párolgása során hőelvonás történik, a zeolit adszorbens anyagként elnyeli a vízgőz molekulákat, és a folyamat során felmelegszik. A folyamat addig folytatható, ismételhető meg, amíg a zeolit telítetté nem válik. Ekkor a zeolit víztartalmát el kell párologtatni 250 °C-on, 2 órán keresztül hőn tartva (deszorpciós folyamat, a zeolit regenerációja) (2.16. ábra). A zeolitból vízgőzként távozó molekulák zárt térbe juttatva lekondenzálhatók (cseppfolyósíthatók), ezáltal újra felhasználhatók a következő hűtési folyamatokhoz.



2.16.a. ábra A zeolit deszorpciós folyamata 50 °C-ról  
(forrás: Zeolith Technik, [www.zeo-tech.de](http://www.zeo-tech.de))



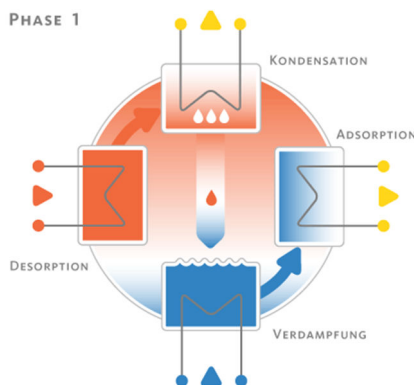
2.16.b. ábra A zeolit deszorpciós folyamata 100 °C-nál  
(forrás: Zeolith Technik, [www.zeo-tech.de](http://www.zeo-tech.de))



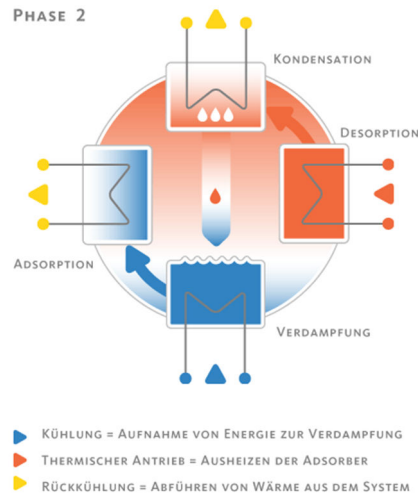
2.16.c. ábra A zeolit deszorpciós folyamata 250 °C-nál  
(forrás: Zeolith Technik, [www.zeo-tech.de](http://www.zeo-tech.de))

Az adszorpciós hűtő folyamatos működtetéséhez az elnyelésnek (adszorpciónak) és a kiűzésnek (deszorpciónak) egy azonos időszakaszban kell megvalósulnia, hogy az abszorbens anyag telítetté válása után legyen egy újabb abszorbens anyag a folyamat ismétléséhez. A 2.17. ábrán látható az adszorpciós hűtő folyamatos működése, mely 2 fázison keresztül valósítható meg. A kék nyilakkal jelölt folyamat a hűtés, azaz energia-felvétel az elpárologtatóból (Verdampfung) és a hűtőközeg adszorpciója (elnyelés), a piros nyilakkal jelölt folyamat a hőközlés, azaz a deszorpció (kiűzés), az adszorber anyag kifűtése, és a sárga nyilakkal jelölt folyamat a visszahűtés, mely a hő kivezetése a rendszerből a kondenzátor segítségével.

A 2.17.a-b ábrákon a feliratok magyarázata a következő: Kondensation - kondenzáció, Adsorption - elnyelés, Desorption - kiűzés, Verdampfung - párologtatás, Kühlung - hűtés, Termisher Antrieb - hőbevitel, Rückkühlung - visszahűtés.



2.17.a. ábra Adszorpciós hűtő működésének 1. fázisa  
(forrás: Invensor hűtéstechnika, [www.invensor.de](http://www.invensor.de))



2.17.b. ábra Adszorpciós hűtő működésének 2. fázisa  
(forrás: Invensor hűtéstechnika, [www.invensor.de](http://www.invensor.de))

A zeolit vízzel használt kombinációja környezetbarát hűtési technológia, többféle energiaforrásról működtethető és alacsony energiafelhasználású (pl. 33 literes hűtőszekrény 5 °C-os belső hőmérsékletének biztosításához 0,75 kWh villamos energia szükséges 24 h alatt, ha a külső hőmérséklet 25 °C). (Meyer, 2016)

Hátrányai közt említendő a nagy térfogat és súly a zeolit anyagából adódóan; továbbá a jelenleg magas beruházási költsége (közel 3 millió Ft egy 5 kW teljesítményű adszorpciós hűtő).

### 2.2.3. Párolgató hűtés

A legrégebbi hűtési technika a természetes hó és jég elvermelése volt a nyári időszakra. Már az ókori Görögországban alkalmazták ezt a technikát. A túl nagy hőmérséklet-különbség hirtelen alkalmazása károsan hathat ezen eljárás során az emberi szervezetre – vélték abban az időben is felfedezni. Viszont ezen hűtéstechnika megfelelő alkalmazása jó hűtési lehetőséget biztosított a forró nyári napok elviselésére. Időszámításunk előtti 2500 körülre tehető azon egyiptomi falfreskók megjelenése, melyek a zománc nélküli agyagkorsókban történő folyadékűtést ábrázolják. Az agyagkorsó pórusain a víz átszivárog és a külső felületen elpárolog. A párolgás hőelvonással jár, így a korsóban lévő folyadék lehűlt. A párolgás intenzitását legyezők segítségével növelték (Komondy és Halász, 1970).

A párolgás olyan folyamat, mely során a közeg folyékony halmazállapotból gáz halmazállapotúvá válik. A folyamat a folyadék felszínén bármely hőmérsékleten végbemegy. Zárt edényben a párolgás addig tart, amíg a folyadék felszíne feletti tér telítetté nem válik a közeg gőzével. Nyitott edény esetén a párolgás a közeg teljes gőzzé alakulásáig (gáz halmazállapotúvá válásáig) tarthat.

A párolgási folyamat sebessége nyitott edény esetén függ a következő tényezőktől (Hall et al, 1984):

- a közeg felett kialakuló légáramok sebességétől,
- a folyadék szabad felszínétől,
- a hőmérsékletétől,



- a külső nyomástól,
- a közeget körülvevő levegő páratartalmától,
- a közeg anyagi minőségétől,
- a közeg felszínén létrejövő kohéziós erőtől.

Ha növeljük az első három tényezőt és csökkentjük a nyomást és a páratartalmat, akkor növeljük a párolgás sebességét. Az anyagi jellemzőt figyelembe véve tudjuk, hogy például az alkohol gyorsabban párolog, mint a víz. A párolgás következtében a folyadék lehül, amennyiben külön hőenergia nem növeli a hőmérsékletét. Ha a víz túl gyorsan párolog, akkor az erős hűtés hatására megfagy.

Gyakorlati példák:

- porózus nyitott agyagedényben a folyadék lehül,
- nyári időszakban az öntözött úttest felülete lehül,
- a fürdés vagy zuhanyzás után vizes állapotban fázunk, főleg ha légmozgás éri a testfelületünket,
- a forró leves levegő fújással gyorsabban lehűthető.

A természet megoldásai:

- természetvárnál a belső hűtést levegő átáramoltatásával oldják meg,
- például a kutyák a nyelvükön keresztül párologtatnak, ezáltal hűtik a testüket.
- növényeknél például a fák, bokrok esetén a gyökereiken keresztül szívják fel a talajból a vizet és a leveleiken keresztül párologtatják el a vizet, ami hűti őket.

A porózus edényekben tárolt folyadék a közvetlen napsugárzás hatására párologni fog, azonban a folyamat során hőbevitel is történik, a környezetnek melegítő hatása lesz. A hőelvonás mértékét és a folyadék hőmérsékletét meghatározza a környezeti hőmérséklet. A porózus edényekben lévő folyadék a közvetlen levegőmozgás hatására is párologni fog. A párolgás intenzitása függ a folyadék típusától és jellegétől: homogén folyadék gyorsabban párolog, mint egy oldat. A munkafolyadék kiválasztásánál tehát célszerű olyan folyadékot választani, ami gyorsan párolog, nagy a párolgáshője, homogén és a környezetre nem veszélyes. A párolgás intenzitását tekintve az alkoholok kedvező paraméterekkel rendelkeznek, de alkalmazásuk veszélyt jelenthet. A célnak leginkább megfelelő folyadék a víz, melyhez viszonylag könnyen hozzáférhetünk.

Víz esetén érdemes megvizsgálni a természetben előforduló vizeket, az ivóvizet és kémiailag tiszta vizet, a desztillált vizet illetve az ionmentes vizet.

A párologtató kerámiahűtés főbb jellemzői:

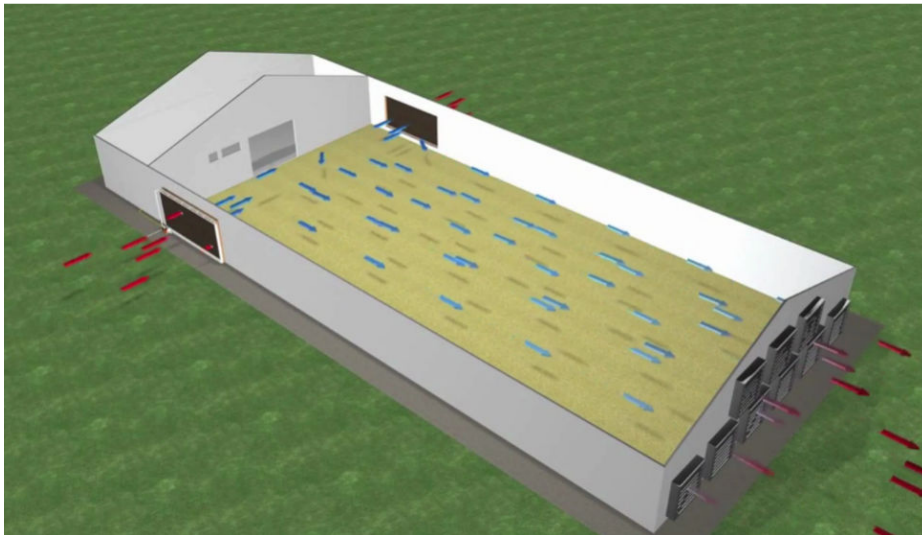
- nincs mesterséges hőbevitel,
- a víz mint munkaközeg környezetbarát és könnyen hozzáférhető,
- alacsony energia-felhasználással üzemeltethető (pl. napelemtől közvetlenül egyenárammal),
- működése nem függ a villamos energia hálózattól, mely energiabiztonságot és könnyen mobilizálhatóságot jelent,
- könnyen szabályozható (a légáramlás sebességének és a felület nagyságának változtatásával), és
- gyors reagálású.

Kerámia-edényekben tárolt folyadék hőmérséklete csökken a környezethez képest. Mindez porózus szerkezetüknek köszönhető, melyen a folyadék el tud párologni. A kerámiák alapanyaga az agyag vízzel keverve formázhatóvá válik, száradás után alaktartó lesz. Kiegetés során irreverzibilis folyamat játszódik le az anyagban. Az agyag, mint alapanyag összetételét tekintve eltérő lehet lelőhelytől függően (De Angelis et al, 2017).

A kiegetett agyag porózus szerkezetű, azaz mikropórusokat tartalmaz (helyenként tartalmazhat üregeket, azaz makropórusokat), melyen keresztül gázok és folyadékok tudnak átdiffundálni. A pórusok kapcsolatban lehetnek az anyag külső felületével, ekkor nyitott, ún. kapilláris pórusokról beszélünk. Ezek a párolgás illetve a szellőzés szempontjából kedvezőek. A zárt pórusokat légpórusoknak nevezzük. A folyadékba (többnyire vízbe) mártott száraz porózus anyag pórusai megtelnek folyadékkal, mely térfogat mérések alapján számítással meghatározható. Összegezve egy porózus szerkezetű edényben tárolt folyadék párolgása a nyitott kapilláris mikropórusokon keresztül fog megvalósulni (Balázs, 1984).

A nyitott edényben tárolt folyadék idővel teljes mértékben el fog párologni. A felületi párolgást növelhetjük mesterségesen létrehozott légáramlással. A folyadék felszínén található részecskéket ezzel az erővel kiszakíthatjuk a vonzó kötésből, ami a létrejött nyomáscsökkenés révén könnyen megvalósítható (Szalay, 1966).

A párologtatással bevitt víznek hűtő hatása is van, ha a víz hőmérséklete alacsonyabb a levegőnél. A külső levegő egy nedves felületen keresztül áramlik be a belső térbe, mely felületen hideg víz csepeg le, ezáltal a belső térbe jutó levegő hőmérséklete csökken, páratartalma növekszik. A lecsepegő víz az áteresztő felület alatti kádban összegyűlik és a szivattyú visszajuttatja a körfolyamat elejére. Csarnokok hűtését lehet ezzel a legegyszerűbben megoldani (2.18. ábra). Száraz külső levegő esetén ideális megoldás. Az áteresztő felület készülhet nyírfából vagy más növényi anyagból.

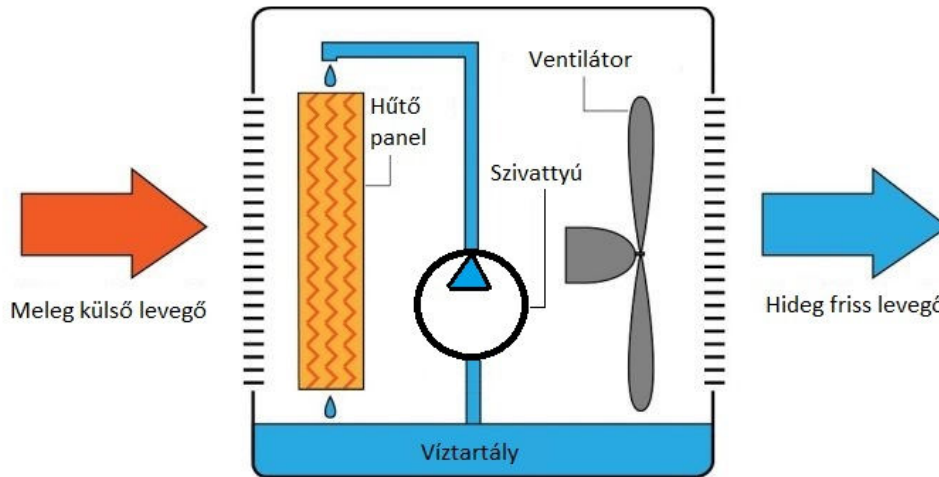


2.18. ábra Párologtató hűtés csarnoknál

( [https://www.youtube.com/watch?v=S6HH\\_IeAHlY](https://www.youtube.com/watch?v=S6HH_IeAHlY), [www.perfectcool.hu](http://www.perfectcool.hu))

A párologtató hűtés egyszerű módja, amikor a külső levegő egy folyadék-levegő hőcserélőn keresztül jut be a belső térbe. A levegő mozgását egy ventilátor segítségével oldjuk meg. A külső meleg levegő a hőcserélőben áramoltatott hideg víz hatására lehűl. Párologtató hűtés lehet közvetlen és közvetett. Közvetlen párologtató hűtés esetén a vizet mint munkaközéget

(hűtőközeget) egy párologtató felületen (padon) keresztül áramoltatjuk, melyen keresztül a levegő átáramlik, ezáltal lehül; másik lehetőségként vizet porlasztunk a levegőbe (2.19. ábra). Közvetett párologtató hűtés esetén a vizet egy másodlagos körben párologtatjuk jellemzően porózus anyagon keresztül, s az így lehűtött vízzel egy hőcserélőn keresztül tudjuk hűteni a hűtendő teret (Kunz et al, 2012).



2.19. ábra Párologtató hűtés modellje  
(<https://www.breezair.com.au/how-evaporative-works/>  
alapján szerkesztve)

A csepegtető hűtők (drip coolers) a legegyszerűbb és a legolcsóbb megoldások. A csepegtető hűtők nyárfából (aspen pad) készültek az 1960-as években, később erős cellulóz anyagból (papír felhasználásával). Utóbbin nagyobb mennyiségű levegő tudott keresztül-áramlani, ezáltal jobb hűtőtéljesítményt értek el. Nagyobb mennyiségben az USA dél-nyugati államaiban terjedtek el.

A párologtató (evaporatív) léghűtők alkalmazása a meleg éghajlatú országokban elterjedt megoldás. A külső, jellemzően száraz (alacsony páratartalmú) levegő nagy felületű párologtató paneleken keresztül áramlik át a berendezés belsejében elhelyezett ventilátor hatására. Így a levegő az elpárolgott víz hatására lehül és páratartalma növekszik, a helyiségbe jutva javítja a hőérzetet. A párologtató panelek jó vízmegtartó anyagból készülnek, mint például préselt celluloid, vagy fagyapot. A légcsereszám emelésével növelhető a párolgás intenzitása. A panelek kiszűrik a levegőben lévő szennyeződések, így a helyiségbe friss, tiszta levegő jut, mely megfelelő páratartalmú. A paneleken átáramló levegő nyomása csökken, sebessége növekszik, mely szintén hűtő hatású. Ezen megoldás beruházási és üzemeltetési költsége alacsonyabb, mint egy hagyományos léghűtőnek (Kostyák, 2013).

A párologtató léghűtők esetén érdemes lenne a víztartályt kerámia edényre cserélni, melyben a víz további porózus anyagon való elpárolgása során alacsonyabb hőmérsékletre tudna hűlni (mielőtt újra a csepegtető panelra jutna). A léghűtőkben használt ventilátor és szivattyú működtetéséhez szükséges villamos energia biztosítását leginkább napelemekkel célszerű közvetlenül megoldani, így az energifüggetlen rendszer megvalósítható és az energiatárolás is minimális lesz, ugyanakkor a szabályozás is könnyebben megoldható.

A természetes hűtés energiabevitel nélkül könnyen kialakítható. Épületek esetén két ellentétes oldalon megnyitott ajtó vagy ablak kinyitásával huzat hozható létre, mellyel kb 1 m/s-os légmozgás hozható létre. A napsugárzás hatása révén (többnyire a déli oldalon) az épület üvegfelületein keresztül felmelegített belső levegő hőmérséklete növekszik, így kialakul egy levegő-áramlás. A meleg levegő kisebb sűrűsége miatt felfelé áramlik, melyet egy kéményen átvezetve egy légáramot, huzatot tudunk létrehozni. A külső hideg levegő bevezetésével, a belső meleg levegő kiengedésével egy konvekciót hozhatunk létre, mely a felületek párolgását növeli meg, ezáltal javul a hőérzet. Mesterségesen is létrehozhatunk légmozgást, pl. ventilátor segítségével. A hűtési technológiák jellemzőit a 2.2. táblázat foglalja össze.

A nyári hőterhelés mérséklése lakóépületeinknél megoldható természetes vagy mesterséges módon. Ezek lehetnek energiabevitel nélküliek (passzív) vagy energiabevitel segítségével (aktív hűtési rendszer) működőek. Az egyik legegyszerűbb megoldás az árnyékolás alkalmazása, mely történhet természetes elemekkel: lombhullató fák, bokrok (nyáron felfogják a Nap sugarait, télen átengedik azokat), szőlőlugas, borostyán, vadszőlő felfuttatása adott felületre, stb. vagy mesterséges elemekkel: előtető, relaxa, függöny, napkollektor, napelem stb.

Mindezek alkalmazásával jelentős mértékben tudjuk csökkenteni az adott épület vagy tárgy felmelegedését, ez akár 10 °C hőmérséklet-csökkentést is jelenthet (Kószó, 2003).

A napelemek, napkollektorok tetőre vagy egyéb felületre történő elhelyezésével csökkenthető az adott épület felmelegedése. A napkollektor ill. napelem a hőenergia egy nagy részét elviszi, mely hőelvezetés mérsékli az adott felület felmelegedését. Fázisváltó anyagok (PCM: phase change materials) épületfalban való alkalmazása is csökkenti az épület felmelegedését. Épületek hűtésére a víz párolgását a '60-as években használták az Egyesült Államokban. Az épület lapos tetején elhelyezett vízréteggel, ez volt az ún. „Sky-Therm” rendszer (Sabady, 1980).

2.2. táblázat Hűtési technológiák jellemzői

Hűtési technológia	hűtőközeg	szorbens közeg	hőbevitel hőmérséklet-tartománya	hűtési hőmérséklet-tartomány	COP érték
kompresszoros hűtő	többféle pl. R143a, R600a, stb., olajok vagy ammónia	-	-	-30 ... 20 °C	4-5
abszorpciós hűtő	ammónia	víz	75 ... 150 °C	-30 ... 20 °C	0,5-0,7
abszorpciós hűtő	víz	lítium-bromid	75 ... 160 °C	6 ... 20 °C	0,6-1,8
adszorpciós hűtő	víz	szilika-gél	55 ... 100 °C	6 ... 20 °C	0,5-0,65
adszorpciós hűtő	víz	zeolit	45 ... 95 °C	6 ... 20 °C	0,5-0,6
termoelektromos hűtő	levegő	-	-	-30 ... 20 °C	
szárító-elpárologtató hűtő	levegő	-	75 ... 150 °C	-30 ... 20 °C	0,7-1

### 2.2.4. Építészeti megoldások

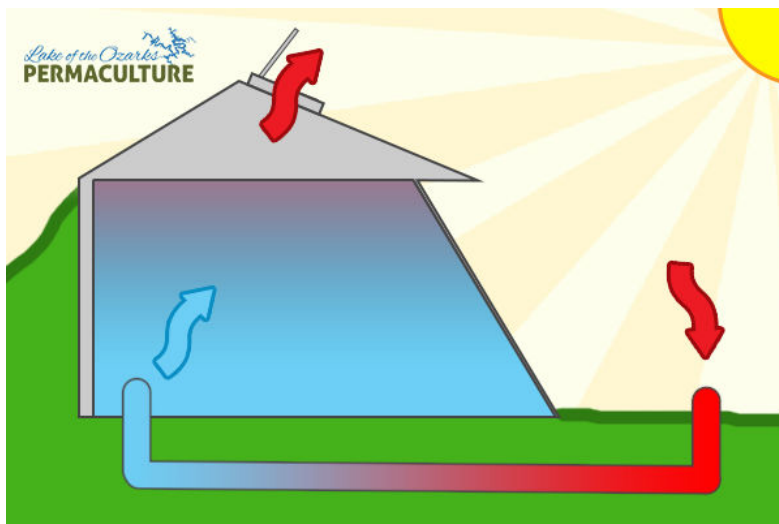
Az emberiség története során számos alkotás született a nap- és szélenergia használatának hűtési célú felhasználására.

A természetes ventilációt alkalmazzák szárító házaknál, melyek alkalmasak mazsola, dohány stb. szárítására (Turpan város).

A széltornyok (szélfogók) alkalmazásával természetes ventiláció alakul ki az épületekben, pl. a perzsa és egyiptomi építészetben. A házak vastag agyag (kerámia, vályog) falakból épültek a magas hőszigetelési értékük miatt. A magas falak a köztér árnyékolása miatt épültek, a közvetlen napfény besugárzásának minimalizálását kisméretű ablakokkal oldották meg, a vályog alkalmazása falként jó ellenállást jelent a hőáramlással szemben.

A napkémény szélmentes és vízmentes helyeken kiválóan alkalmazható, nyomáskülönbség alapján a meleg levegő a kéményen keresztül áramlik felfelé. A kémény által kialakított szívó hatás miatt ventiláció alakul ki, mely hűti az épületet.

Hűtőcsővel történő levegőbevezetés során meg tudjuk oldani a friss levegő bejuttatását az épületbe (légcseré), és le tudjuk hűteni a belső teret. A nyári kánikulai időszakban a külső meleg levegő 2.20. ábrán látható módon történő felhasználásával megoldható az épületek belső komfortjának biztosítása. A meleg levegő beszívása egy föld alatti csőbe lehetővé teszi az épületbejutás előtt a levegő lehűtését. A földben elhelyezett csőszakasz hőmérséklete alacsony, így a levegő áramlása során hőelvonás történik, melynek hatására a levegő lehűl. Így az épületbe a környezeti levegőtől hidegebb érkezik, mely a belső melegebb levegőt kifelé, azaz felfelé szorítja az épületből. Ezáltal létrehozható egy természetes légcseré hőmérséklet-csökkenéssel. A csőben elhelyezett ventilátor segítségével felgyorsítható a folyamat.



2.20. ábra Hűtőcső alkalmazása (Gist, 2016)

### 2.2.5. Hűtés levegőáramlással

Banglades Rajbari megyéjének Daulatdia városában - ahol 28 000 ember él villamos energia nélkül, bódékban - a hőmérséklet nyáron eléri a 45 °C-ot. Az elviselhetetlen hőségre egy egyszerű példa ad megoldást. Ez a villamos energia felhasználás nélkül működő hűtő: az EcoCooler.

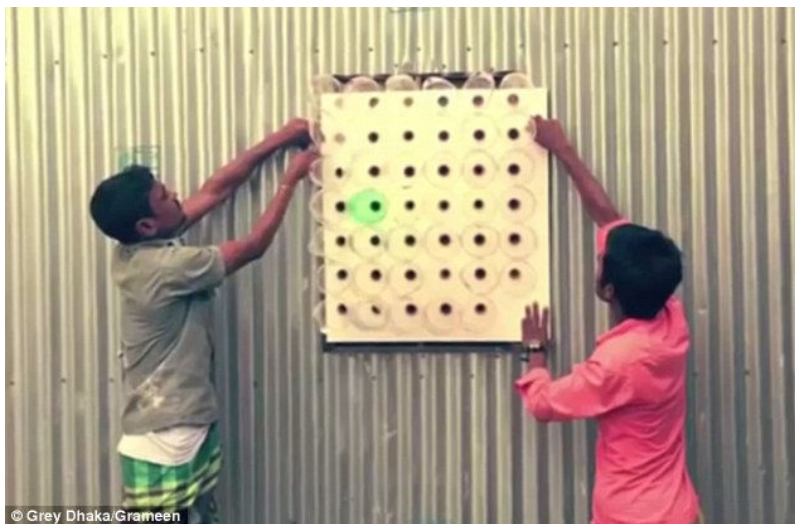
Egy lemezre - az ablak méretének megfelelően – elhasznált műanyag (pet)palackokat helyeznek fel a kiöntőnyílásuk és a kupakjuk segítségével. A palackok alját levágják, itt áramlik be a meleg levegő. A táblát a ház falára (ablakára) helyezik a 2.21. ábra szerint.

Az EcoCooler elkészíthető az alábbi műveletek szerint (Grey Dhaka szerint 6 lépésben):

1. gyűjtünk össze elhasznált üdítős és vizes pet palackokat, a méret szempontjából a palack fő átmérője és a palack karimája közötti különbség legyen a nagyobb, ez a kedvezőbb;
2. mérjük meg az ablak szélességét és magasságát, ahová a hűtőt szeretnénk felhelyezni;
3. vágjunk ebben a méretben egy 2 mm vastag erős táblát;
4. a táblába vágjunk lyukakat a palack karimamérete alapján ügyelve arra, hogy a vágásokkal a palackok a legjobban töltsék ki a rendelkezésre álló helyet;
5. ollóval vágjuk félbe a palackokat a hossz tengelyükre merőlegesen;
6. vágjuk le a palack kupakjának tetejét; majd
7. rögzítsük a palackokat a kupakkal a táblába;
8. toljuk a kettévágott palackokat a tábla külső felébe, csavarjuk a kupakot a belső oldalon a palackra és szorítsuk a táblához, ami a palackot ebben a helyzetben fogja tartani, ismételjük meg ezt a műveletet a maradék palackokkal;
9. az így elkészült Eco-Cooler-t helyezzük az ablak külső felületére.

A levegő keresztuláramlik a palackon, a belső térben hűtő hatást fejt ki. Az Eco-Cooler-ről közzétett video szerint működése során a belső hőmérséklet 10 °C-ot esik, így a szoba hőmérséklete 35 °C lesz, ami már elviselhetőbb.

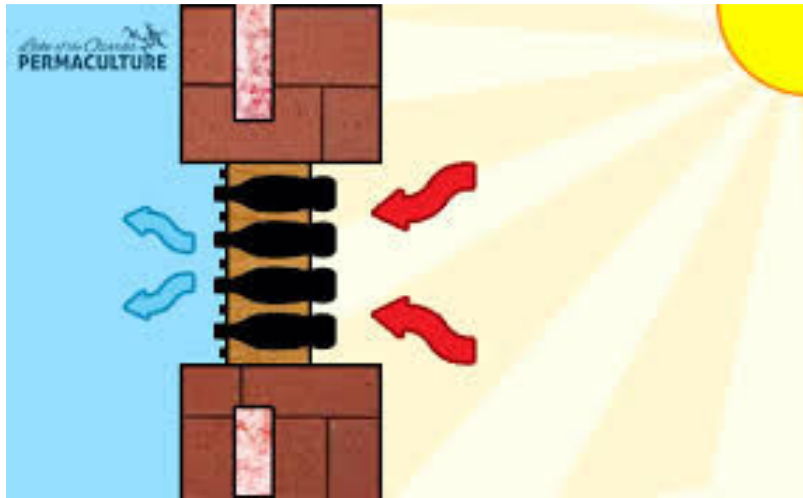
Ez egy egyszerű megoldás, amivel élhetőbbé tehetjük környezetünket. (Grameen, 2016).



2.21. ábra Petpalackos hűtés bádogházon  
(Grameen, 2016)

Már 25 000 lakos használja a régi műanyag palackokból készített villamos energia nélkül működő (DIY) alternatív hűtőt, az EcoCooler-t. Ezzel az eszközzel 9 Fahrenheit fokkal csökkenthető a belső hőmérséklet. (Liberatore, 2016)

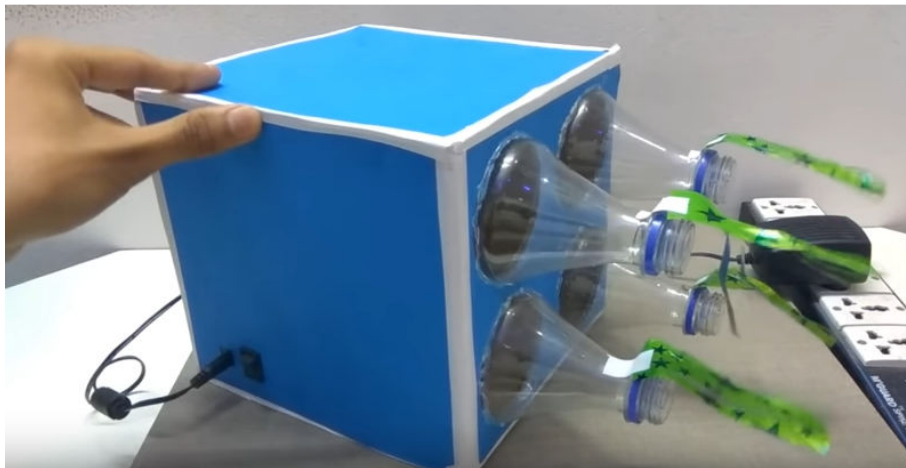
Egy szűkülő keresztmetszetű csőben a levegő áramlása felgyorsul és onnan kilépve a környezetéből további légrétegeket mozgat meg, szív magához, ezzel megnövekszik a légáramlás sebessége és keresztmetszete (2.22. ábra).



2.22. ábra Palackos hűtés (Gist, 2016)

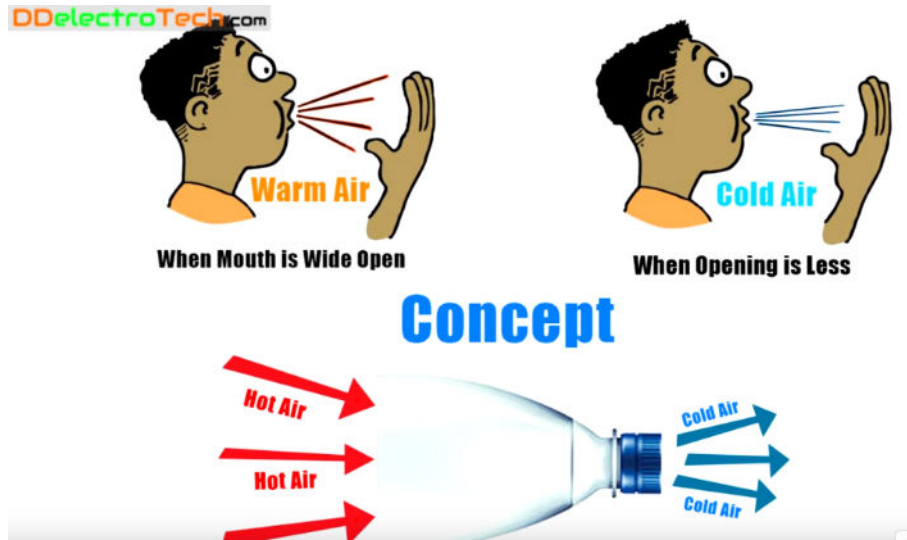
Mivel a módszer a fejlődő országok egy részében nagyon elterjedt, úgy éreztem, hogy tudományos igénygel is érdemes vizsgálni a kérdést, hiszen bizonyos körülmények között Magyarországon is érdemes lehet megfontolni a használatát (pl. állattartó telepek).

Fontos még megjegyezni, hogy a módszernek kétféle, mérnöki szempontból elkülönülten vizsgálható megoldása van. Az egyik, az előző részben bemutatott megoldás, ami csak a napenergia, illetve az adott helyszíneken nagyon gyakori légmozgás/szél hatását használja fel, de létezik egy olyan megoldás is, ahol a fent vázolt rendszeren ventilátor segítségével mesterséges légáramot hoznak létre (2.23. ábra).



2.23. ábra Az eredeti EcoCooler átalakított verziója  
(<https://www.youtube.com/watch?v=hCJtjGxtrew>)

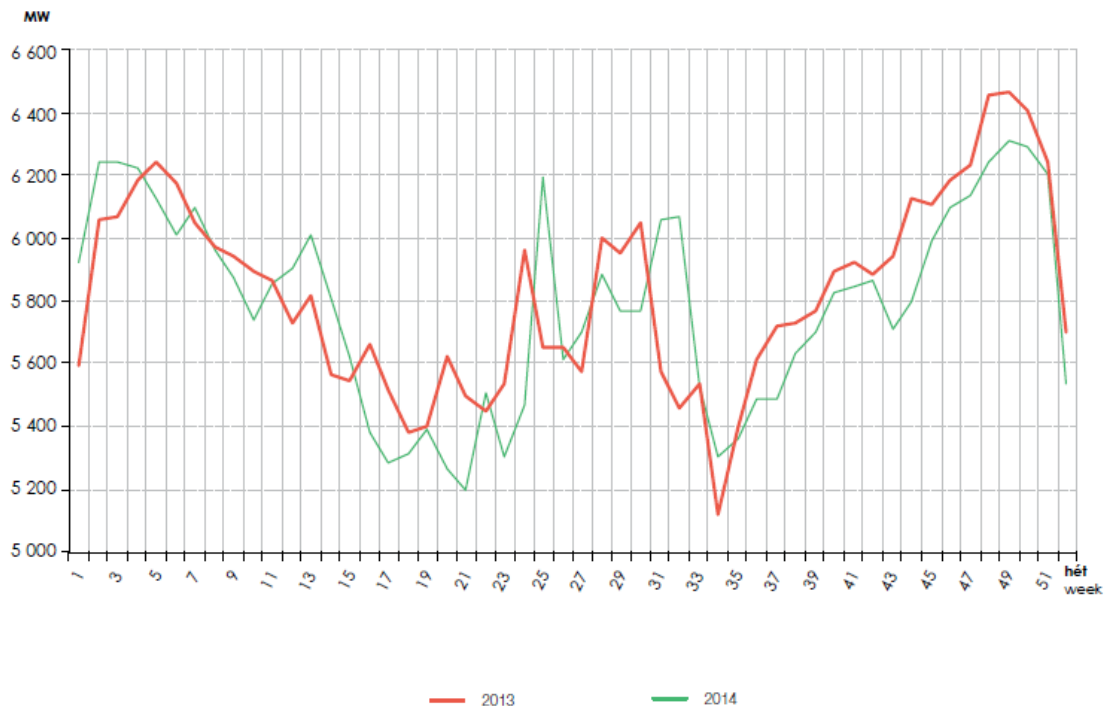
Ez utóbbi esetben a hűtő hatást azzal magyarázzák, hogy hasonlóan ahhoz, hogy ha rálehelünk a kezünkre, melegnek érezzük a levegőt, míg ha ráfújunk hidegnek, a szűk résen átáramoltatott, és emiatt gyorsan áramló levegő hidegebb érzetet kelt (2.24. ábra). Az ezzel kapcsolatos vizsgálataim az Eredmények részben kerülnek bemutatásra.



2.24. ábra Az átalakított EcoCooler működését magyarázó ábra (<https://www.clipzui.com/video/l3e4f4g3d4w5p3k375g513.html>)

### 2.3. A hagyományos légkondicionáló rendszerek hatásai

A hazai villamos energia-termelésben a nyári teljesítmény csúcserkékek közel azonos értékűek, mint a téli értékek (2.25. ábra). Ezt a villamos energiaigényt tározós vízerőmű hiányában csak a földgáz üzemű hőerőművek gyors indításával lehet biztosítani.



2.25. ábra Heti villamos teljesítmény csúcscok 2013-ban és 2014-ben (Hackl, MAVIR, 2015)



A 2.26. ábrán látható 1990-től 2014-ig a hazai villamos energia-termelés téli és nyári napi teljesítmény csúcserkéi. A több mint két évtizednyi adatsorból látszik, hogy a nyári csúcserké értéke drasztikusan növekszik és megközelíti a téli csúcserkéket.

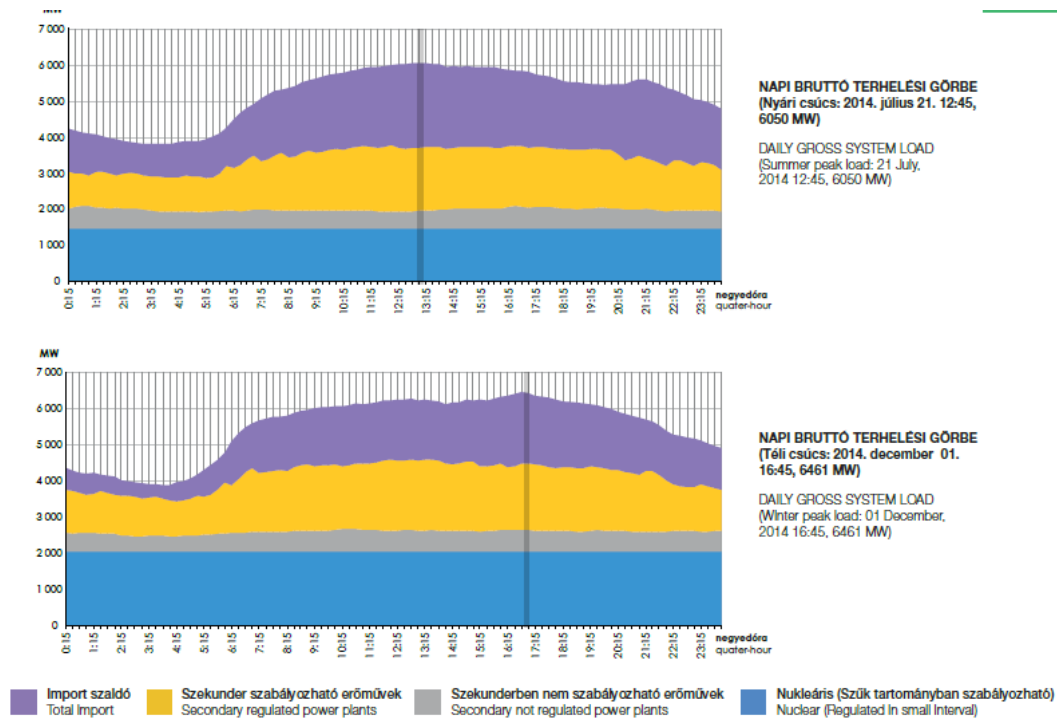


2.26. ábra Téli és nyári villamos energia-fogyasztási csúcserké 1990-2014 között (Hackl, MAVIR, 2015)

A nyári növekedés mögött az egyre nagyobb számban beüzemelt klímaberendezések energiafogyasztása áll. Az elmúlt 10 évben ez a teljesítmény-igény legalább 6000 MW. A tavaszi és őszi értékekkel összevetve a nyári igényt a különbség akár 800 MW is lehet. Ennek pótlására egy 700-800 MW-os erőműre van szükség.

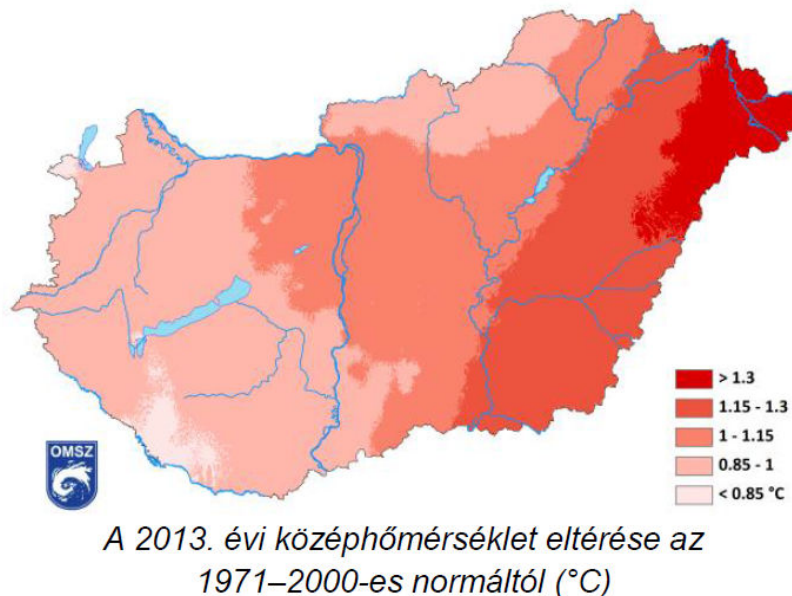
A 2.27. ábra két grafikonjának összehasonlítása során látható, hogy nyáron a csúcsteljesítmény-igény délelőtt, 12 óra körül jelentkezik, ezzel szemben télen a csúcsteljesítmény-igény reggel 7-től este 7-ig folyamatosnak tekinthető, maximuma azonban 18 óra felé jelentkezik. Ha napi szinten nézzük a pillanatnyi teljesítmény-igényeket, akkor a völgy és csúcsidezőszak között közel 2000 MW teljesítménykülönbség is adódhat.

## 2. Szakirodalmi áttekintés

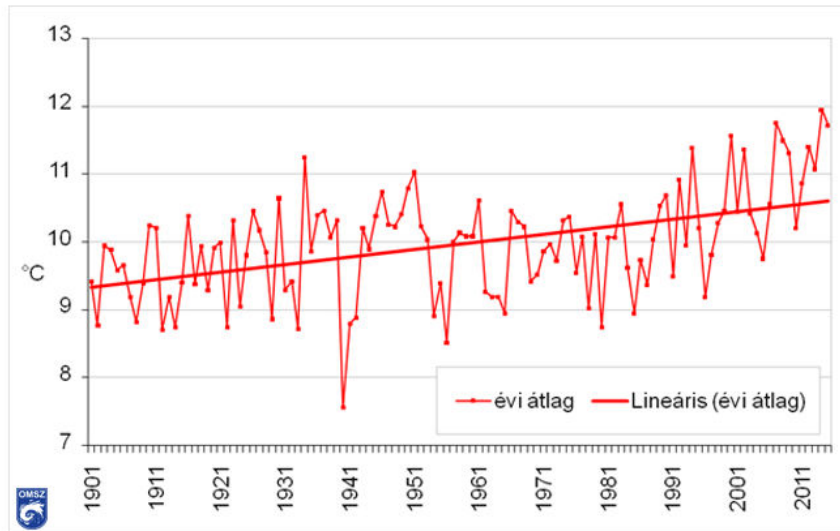


2.27. ábra A téli és a nyári maximum napi villamos teljesítmény görbéje erőművenként 2014-ben (Hackl, MAVIR, 2015)

2013-ban például az átlaghőmérséklet  $+1,08^{\circ}\text{C}$ -kal volt magasabb az 1971-2000-es normától (2.28. ábra). Az elmúlt évek nyarai az elmúlt száz év legforróbb nyarai közé sorolhatók. A hazánkban mért évi középhőmérséklet-értékek lineáris növekedést mutatnak, ez az elmúlt 115 év alatt  $+1,28^{\circ}\text{C}$ -os növekedést mutat (2.29. ábra).



2.28. ábra A 2013. évi középhőmérséklet eltérése az 1971-2000-es normától Magyarországon (OMSZ, 2014)



2.29. ábra Az évi középhőmérsékletek 1901 és 2015 között Magyarországon (OMSZ, 2016)

#### 2.4. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A kutatási témát megalapozó hazai és nemzetközi szakirodalmak áttekintése kiterjed a napenergia-hasznosító berendezések bemutatására (elsősorban a napkollektor, napelem alkalmazási lehetőségeire), az egyes hűtési technikák jellemzőire (kiemelve a szorpciós eljárásokat) és a légkondicionálás főbb alapjainak ismertetésére.

A napenergia kutatása nagy múltra tekint vissza, azonban a felhasználása időszakonként és földrajzi helyenként eltérő. A hűtéstechnika számos lehetőséget kínál különböző energiaforrások felhasználásához és különféle energiaigények kielégítésére. A napenergiával történő hűtés napjainkban egyre inkább előtérbe kerül elsősorban a klímaváltozás hatásainak és az energiaforrásokhoz való hozzájutás nehézségeinek köszönhetően. Mindezek hatásaként a gazdaságosság is egyre inkább fontos lesz. A napenergia nyári felhasználása hűtési célra mérsékli az időszakra jellemző plusz energiatermelés kérdését. Így az energiatárolással is kevésbé kell foglalkozni. A hűtőrendszer működtetéséhez szükséges energia időben pont akkor jelentkezik, amikor szükséges. Napkollektoros rendszer esetén folyamatos működés biztosítható a nyári időszakban a hűtőrendszer alkalmazásával. Ezáltal javítható az energiafelhasználás hatékonysága. Napenergiával történő hűtésre számos ipari méretű technológia található a szakirodalmakban, a lakossági igények kiszolgálására alkalmas rendszerrel azonban nem lehet találkozni. Ennek a lehetőségnek a vizsgálata a közeljövőben fontos kérdés lesz, hogy kisméretű rendszereket, hogyan lehet üzemeltetni. A napkollektorokkal működtetett hűtőrendszerek használata hazánkban is kezd előtérbe kerülni, mindez még nagyobb rendszerek esetén (Zsebik és tsai, 2010).

A környezetbarát hűtési lehetőségek közül kiemelendő a párologtató hűtés, melynek többféle megoldási lehetőségével lehet találkozni. Ezek közül a kerámiákkal megvalósított párologtató hűtés kiemelendő, ugyanis a különböző történelmi korokban fel-felbukkan e technika, de alkalmazása nem terjedt el széleskörően. A mai klimatizálásban pedig van létjogosultsága. E tekintetben alig találni szakirodalmi forrást. Porózus anyagok hűtési célú felhasználhatóságára, méretezésére példát szakirodalmi kutatásaim során nem találtam.

A kánikula mint hőterhelés új kihívásokat jelent az emberiség számára. A villamos hálózatoktól távoli és egyéb energiaforrások felhasználási lehetőségitől mentes helyeken új alternatív klimatizálási lehetőségeket kell felhasználni. A sivatagi népeknél számos e célnak megfelelő építészeti megoldást alakítottak már ki. A médiában megjelent trópusi környezetben alkalmazott újrahasznosított anyagokból készített megoldást (palackos hűtés) a szakirodalmak nem tárgyalják. Az Interneten található bemutató video azt szemlélteti, hogy a palackon átáramló levegő lehűl. Ez számos ellentmondást okoz a fizikai ismereteink szerint, mely folyamat pontos leírásával szakirodalomban nem találkoztam. Ezen pozitív jelenséggel bíró technika fizikájának a leírásával és felhasználásával tovább szélesíthető a környezetbarát klimatizálás lehetőségei.

A szakirodalmi feldolgozás során szerzett információk jelentősen hozzájárultak a dolgozat célkitűzéseinek véglegesítéséhez.

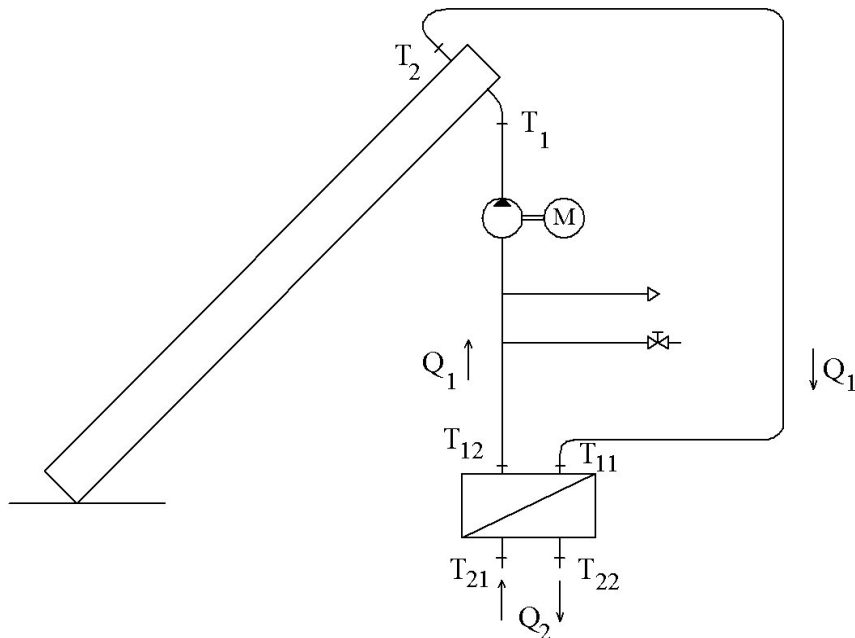
### 3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az értekezésem e fejezetében bemutatom a kutatási céljaim megvalósításához használt kísérleti módszereket és eszközeit. Első lépésben a napkollektoros hőhasznosítás vizsgálatára hoztam létre egy vizsgáló kört megfelelő mérőpontokkal. Ezt követően egy kísérleti rendszert építettem fel a napkollektor által működtetett abszorpciós hűtő és egy szigetelt doboz alkalmazásával. Napelemmel működtetve is megvizsgáltam az abszorpciós hűtő üzemi jellemzőit. Másik lehetséges megoldásként porózus edényekbe töltött víz hűtőhatását vizsgáltam. Továbbá megvizsgáltam egy napenergiával működtethető levegőmozgáson alapuló klimatizálási lehetőséget.

#### 3.1. Napkollektoros mérőkör

A kísérleti berendezés összeállítása a Szent István Egyetem Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén történt. A rendszer egy napkollektor és egy abszorpciós hűtőkör összekapcsolásából áll (egy lemezes hőcserélő segítségével). Ehhez kapcsolódnak a továbbiakban a légkondicionáló berendezések egységei. A rendszer működtetéséhez szükséges villamos energia megtermelése napelemekkel történik.

Az első mérés egy kiválasztott napkollektor által biztosított hőteljesítmény meghatározása volt. A vizsgált egység egy vákuumcsöves napkollektor volt, melyhez egy mérőkört terveztem és állítottam össze, aminek a kapcsolási rajza a 3.1. ábrán látható a mérési pontokkal és paraméterekkel.



3.1. ábra A napkollektor kapcsolási rajza a mérőeszközökkel

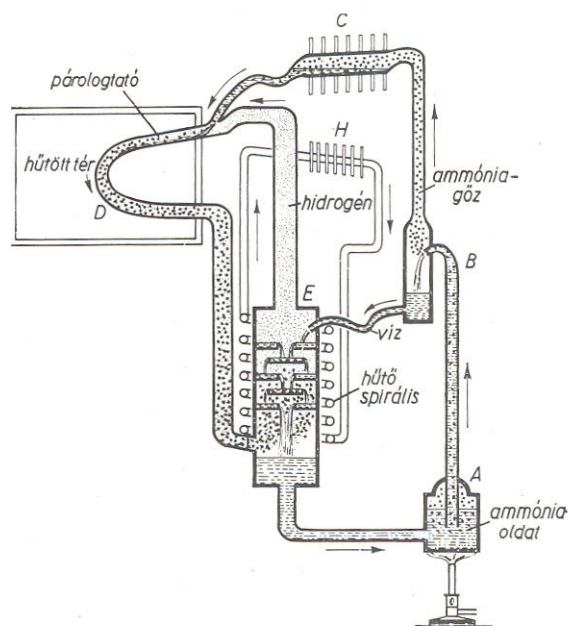
A napkollektor hasznos felülete  $1,485 \text{ m}^2$  (15 csöves vákuumcsöves kollektor, ami  $5,8 \text{ cm}$  átmérőjű,  $180 \text{ cm}$  hosszúságú abszorber-felületű csövekből áll), a kollektor által begyűjtött napenergia egy lemezes hőcserélőn keresztül került hasznosításra. A hőhordozó munkafolyadék desztillált víz volt (mindkét körben). A 3.1. ábrán jelölt mérési pontok a következők:  $T_1$  és  $T_2$  a kollektor bemenő és kimenő hőmérsékletei,  $T_{11}$ ,  $T_{12}$  a belépő és kilépő

hőmérsékletek a hőcserélő kollektor felőli ágán,  $T_{21}$  és  $T_{22}$  a belépő és kilépő hőmérsékletek a hőcserélő szekunder oldalán. A két kör térfogatáramai  $Q_1$  és  $Q_2$  értékűek. A hőmérsékletmérés négy ponton PT1000 típusú szenzorokkal történt. További mért értékek voltak az elsődleges és másodlagos kör térfogatáramai. A mérés során rögzítésre került még a kollektorra beeső besugárzás (teljesítménysűrűség), amit a kollektor síkjában elhelyezett sugármérővel mértünk, ennek az adataiból határoztam meg a kollektorra beeső teljesítményt. A mérés során a kollektor kör (primer kör)  $Q_1$  térfogatáramát szabályoztam. A térfogatáram szabályozása úgy történt, hogy a keringető szivattyú villamos betáplálását egy fázishasításos kapcsolóval szabályoztam. A fázishasítás mértékének változtatásával a tápszivattyú teljesítménye volt szabályozható, ami meghatározta a fordulatszámát és így a primer kör térfogatáramot.

A pillanatnyi direkt és szórt napsugárzási értékek a vízszintes síkra és a kollektor síkra is egy Kipp & Zonen CM-11 típusú piranométer segítségével kerültek rögzítésre a Szent István Egyetem Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén.

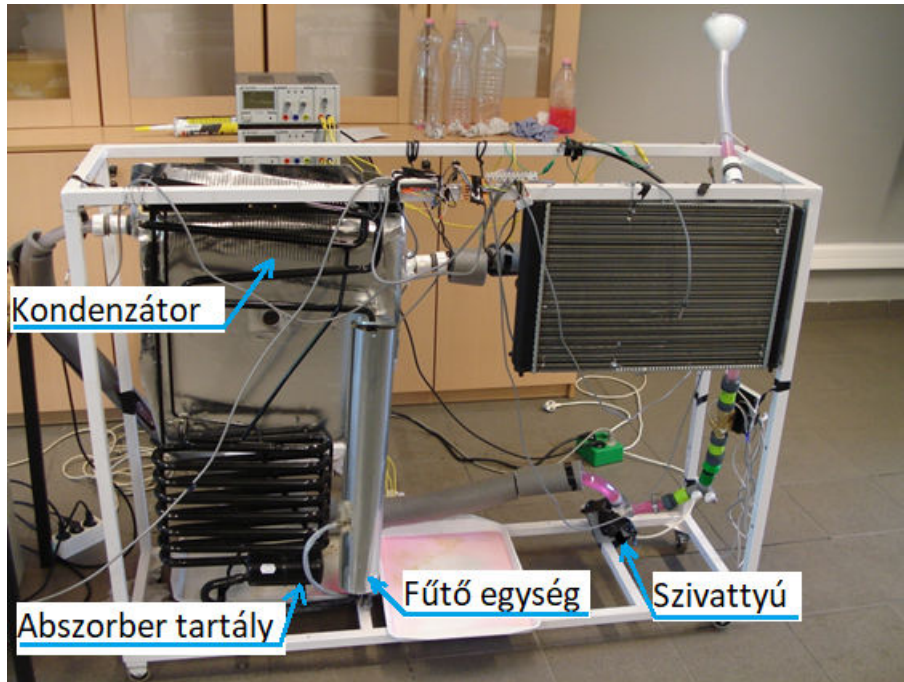
### 3.2. Kísérleti abszorpciós hűtőberendezés

A kísérletekhez egy kereskedelemben kapható hűtőszekrény hűtőaggregátját használtam fel. A hűtőkör a 3.2. ábrán látható. A vizsgált hűtő aggregát ammónia vizes oldatával van feltöltve.



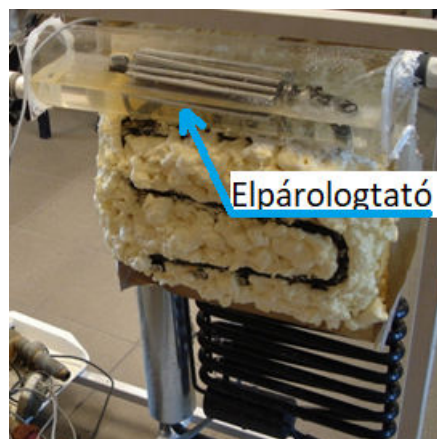
3.2. ábra Az abszorpciós hűtő működése  
(Budó, 1978)

A kísérleti hűtőberendezés (3.3. ábra) megépítésekor az abszorpciós hűtőaggregáthoz egy egyedi készítésű hőcserélő lett kialakítva (3.4. ábra), mely flexibilis csővel lett összekötve egy ventilátorral felszerelt hőcserélővel (belsőégésű motoroknál használt motorhűtő-egység). A visszatérő ágban egy ultrahangos hőmennyiségmérő és egy keringető szivattyú lett elhelyezve. Az így kialakított hűtőkört szekunder körnek is nevezhetjük, mely az abszorpciós hűtő és a légkondicionáló hőcserélője közt található. A szekunder kör hőcserélője egy egyedileg készített, külső része flexihenger, a belső részében az elpárologtatóra felszerelt alumínium lemezekből hajtogatott bordákból áll.



3.3. ábra A kísérleti hűtőrendszer szigeteléssel (SZIE)

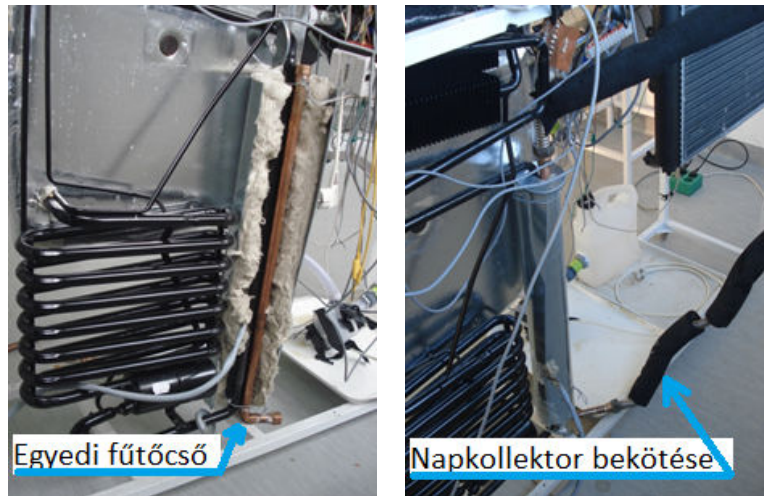
Az abszorpciós hűtőkör felfűtése során megvizsgáltam, hogy mekkora hűtőteljesítményt tud leadni. A vizsgált hűtő aggregát működtethető villamos felfűtéssel vagy egyéb hő bevitellel. Előbbi eset vizsgálatára egy napelem által termelt villamos energiát használtam, ezzel lett felfűtve a hűtőegység. A felfűtési idő elég hosszú, kb. 2 órát vett igénybe, mire üzemkész állapotba került a hűtő. Innentől számítva tudtam mérni a pillanatnyi felvett villamos és leadott hűtési teljesítmény-értékeket. A hűtő maximális villamos teljesítménye 170 W.



3.4. ábra Abszorpciós hűtő egyedi építésű hőcserélővel (SZIE)

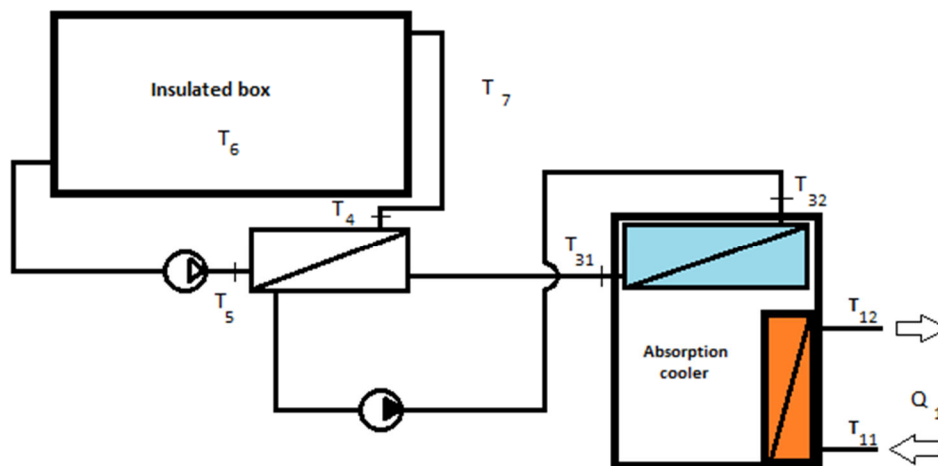
A mérés szintén a Szent István Egyetem Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén történt, egy 1 kWp névleges teljesítményű napelem segítségével. A napelem által termelt villamos energia egy 24V/12V DC/DC konverteren át jutott el a hűtő aggregáthoz, miközben a pillanatnyi felvett feszültség és áramerősség értékek rögzítve lettek (a plusz energia akkumulátorokban lett tárolva). A hűtő által leadott hűtőteljesítmény egy hőcserélő segítségével lett hasznosítva, ahol a munkaközeg víz, etilén- és propilén glikol volt. A hőmérséklet mérése két ponton PT1000 típusú szenzorokkal történt. A hűtőteljesítményt két paraméter határozza meg: a rendszeren átáramoltatott munkaközeg térfogatárama és a hőmérséklet-különbsége.

Az abszorpciós hűtőkör a következő mérésekhez össze lett kötve egy vákuumcsöves napkollektorral. Mindez a hűtő felfűtő részéhez kötött rézcső segítségével történt (3.5. ábra).



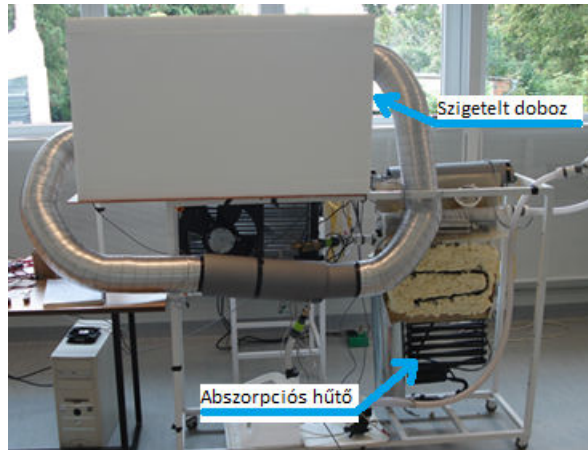
3.5. ábra Abszorpciós hűtő összekapcsolása a kollektor körrel (SZIE)

Az abszorpciós hűtő felől szivattyú szállítja a hőátadó folyadékot a hőcserélőhöz. A folyadék-levegő hőcserélőn keresztül történik a szigetelt dobozban lévő levegő hűtése. A hűtéshez szükséges segédberendezés egy ventilátor volt. A kísérleti hűtőrendszer kapcsolási rajza a 3.6. ábrán látható, valós elrendezése pedig a 3.7. ábrán.



3.6. ábra A kísérleti rendszer kapcsolási rajza





3.7. ábra Kísérleti hűtőrendszer (SZIE)

### 3.3. Párolgató hűtés kerámiákkal

A vizsgálat célja, hogy megvizsgáljam porózus anyagú edények hőelvonási értékeit párolgatózás során víz munkaközeg felhasználásával. A mérések során azt vizsgáltam, hogy kerámia edények párolgatózás során elegendő hűtőhatást fejtenek-e ki, és alkalmazhatók-e légkondicionáló berendezéseknél, mivel napjainkban egyre fontosabbá válik az alacsony energiafelhasználású hűtőrendszerek és a környezetbarát hűtőközegek alkalmazása (Gaál és tsai, 2016).

#### 3.3.1. Párolgás során elvont hőenergia meghatározása

Porózus anyagok esetén a folyadékok a szilárd anyagon keresztül tudnak diffundálni. Ennek megfelelően párolgás jön létre, mely hőelvonással jár. Zománc nélküli kerámiák esetén az agyagedényben lévő víz párolgás során eltávozik az edény külső felületén, melynek hatására a víz hőmérséklete csökken. A párolgás során hőelvonás történik, aminek az az oka, hogy a párolgás során a folyadék fázis nagy energiájú részecskéi tudnak kilépni a folyadék fázisból, s emiatt a visszamaradó folyadék részecskéinek átlagos energiája, s ezzel együtt a hőmérséklete, kisebb lesz. A párolgási folyamatot szabályozhatjuk egy mesterségesen létrehozott légáramlással, például ventilátorral (Porumb et al, 2016).

A párolgás sebessége (pontosabban az elpárolgó víz tömegárama) szabja meg, hogy mennyire képes lehűlni a párolgás következtében a párolgó közeg. A folyamat energia-mérlegét felírva (a kialakuló egyensúlyi állapotban a párolgás során elvont hőt a környezetből a felületi hőátadással felvett hő pótolja) a következő egyenlettel írható fel (Porumb et al, 2016):

$$L_p \cdot \dot{m} = \alpha \cdot A \cdot (T_k - T_v), \quad (3.1)$$

ahol:  $L_p$  a párolgáshő [J/kg],

$\dot{m}$  a tömegáram [kg/s],

$\alpha$  a felületi hőátadási tényező [W/K m<sup>2</sup>],

$T_k$  a környezeti hőmérséklet [°C],

$T_v$  a víz mint munkaközeg hőmérséklete [°C].

Az egyenletből kifejezve a víz hőmérséklete:

$$T_v = T_k - \frac{L_p \cdot \dot{m}}{\alpha \cdot A} \quad (3.2)$$

Természetesen a párolgásos hűtéssel elérhető hőmérséklet csökkenés kisebb lesz, ha a lehűlt vízzel  $P_h$  hűtőteltjesítménnyel egy közeget (pl egy légteret) hűtünk. Ebben az esetben a hűtővíz hőmérséklete

$$T_v = T_k - \frac{L_p \cdot \dot{m} - P_h}{\alpha \cdot A} \quad (3.3)$$

egyenlettel írható le, értelemszerűen az  $L_p \cdot \dot{m} \geq P_h$  tartományban. Ezen egyenletek segítenek annak megtervezésében, hogy adott környezeti feltételek mellett egy adott hűtőteltjesítmény eléréséhez mekkora párolgási tömegáramot kell megvalósítani.

Fenti összefüggésből látszik, hogy a víz hőmérséklet állandó párolgási tömegáram esetén egy adott értékkel (8-10 °C) alacsonyabb a környezeti hőmérsékletnél, azaz a környezeti hőmérséklet változásával a kialakuló vízhőmérséklet együtt mozog. Ez azért szerencsés, mert a klimatizálás egyik fontos feltétele, hogy limitált hőmérséklet-különbség legyen a hűtött és a külső tér között, ami ezen rendszer esetén a fentiek alapján automatikusan teljesül.

### 3.3.2. Párolgató hűtés vizsgálata agyagedényekkel

A fazekas edények közül a legáltalánosabban használt edény a virágcserep-edény, mely nagy sorozatban gyártva költséghatékony megoldás. Előállítási költsége akár tizedannyi, mint egy egyedi készítésű agyagedényé. A fazekas agyagedények agyag és víz felhasználásával készülnek. A formázás során kialakítják az edény alakját, majd ezt követően kemencében kiégetik. A hőkezelési eljárás során 980 °C-ra melegítik fel a kemence belső terét 8-10 óra alatt, mely hőmérséklet elérésekor az agyag víztartalmát elveszítve képlékeny állapotát megváltoztatva szilárd állapotú kerámia lesz (megfordíthatatlan folyamat). Ezt követően energiát már nem közlünk az anyaggal, és a kemencében körülbelül 8-10 óra alatt hagyjuk lehűlni a kész kerámiát. A mérés tárgya máztalan, csiszolatlan agyagedények vizsgálata volt vízzel feltöltve. A mérés során a párolgáskor jelentkező hőmérséklet-változás értékei lettek rögzítve, mellyel a jelentkező hőelvonás értéke határozható meg. A mérések a Szent István Egyetem KÖRI Napenergiás laboratóriumában történtek. A mérések zárt edényekkel, és nyitott edényekkel történtek (3.8., 3.9. és 3.11. ábrák).



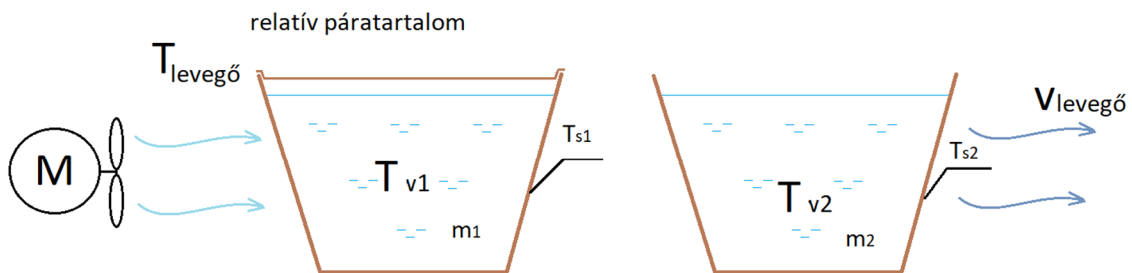
3.8. ábra Nyitott agyagedény víztartalmának párolgatótása ventilátorral (SZIE)

A hőelvonás vizsgálata természetes és mesterséges párologtatással történt, utóbbi esetben egy 12 V-os egyenáramú 12 cm járókerék-átmérővel rendelkező ventilátort használtam. A mérések során különböző méretű (térfogatú) és alakú edényeket vizsgáltam meg.



3.9. ábra Zárt agyagedények vizsgálata (SZIE)

Mivel a kisminta teljesítménye limitált, a laborépület méretéhez képest kicsi volt, a lehűtött víz hűtő hatását egy szigetelt dobozban lévő levegő lehűtésével vizsgáltam. A felhasznált eszközök egy folyadék-levegő alumínium hőcserélő és egy 6 V-os egyenáramú szivattyú voltak. A mérések a 3.10. ábra szerinti elrendezés alapján történtek.



3.10. ábra Kísérleti párologtató hűtés mérési paramétereit (zárt és nyitott kerámia edények vízzel töltve)

A mérések előtt megmértem az agyagedények száraz és vízzel feltöltött tömegét, majd a mérés végén újra megmértem az össztömegüket. Ezek alapján kiszámolható az edény által felvett víz tömege és a párolgás során elveszített folyadék tömege. A vizsgálatok 45-48 %-os páratartalmú helyiségben zajlottak. Átlagosan 46%-os volt a labor levegőjének mért páratartalma.



3.11. ábra Agyagedények méréshez (SZIE)

Szigetelt doboz belső terének hűtése egy hőcserélővel történő, a hűtött víz keringtetése egyenáramú szivattyú segítségével lett megvalósítva (3.12. ábra). A méréshez használt eszközök Pt1000-es hőmérséklet-szenzorok, NEC H2640 típusú infravörös hőkamera, Peakmeter MS6252A típusú szélesség-mérő, digitális mérleg. A mérési eredmények kiértékelése a Report Generation Lite és az Excel programok segítségével történt.

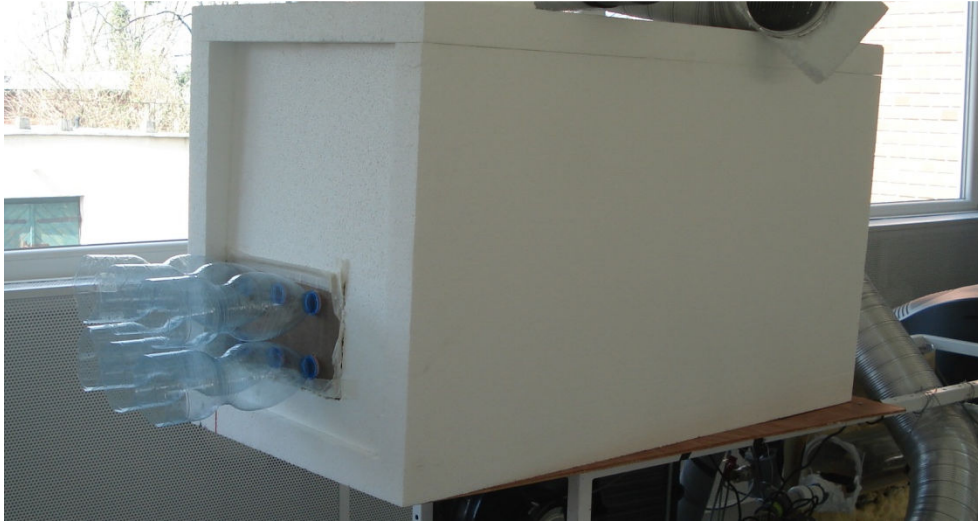


3.12. ábra Szigetelt doboz belső hőcserélővel (bal oldali kép) és hűtött víz keringtetése egyenáramú szivattyú segítségével (jobb oldali kép) (SZIE)

#### 3.4. Hűtés palackok felhasználásával

A szakirodalmi fejezetben ismertetett bangaldesi megoldást vizsgáltam meg saját készítésű kísérleti berendezéssel. Különböző méretű petpalackokat használtam fel a mérésekhez, melyeket egy farostlemezre szereltem fel (3.13. ábra). A palackok alját levágtam, a kupakokat

kifűrtam. Az átfűrt farostlemezre így könnyen felhelyezhetőek lettek a palackok (3.14. ábra). Egy részben zárt dobozt használtam fel mérési helynek. A palackokon keresztül áramlott be a levegő és a doboz másik végén távozott.



3.13. ábra Palackos kísérleti alternatív hűtő (SZIE)

A doboz elé egy hőszugárzót helyeztem el, mellyel az intenzív nap- és hőszugárzást szimuláltam. A hőmérséklet értékeket PT1000 típusú szenzorokkal mértem, a palack előtt és a doboz belsejében. A mérések a Szent István Egyetem KÖRI Napenergiás laboratóriumában történtek. A mérési eredményeket Excel program segítségével dolgozta fel.



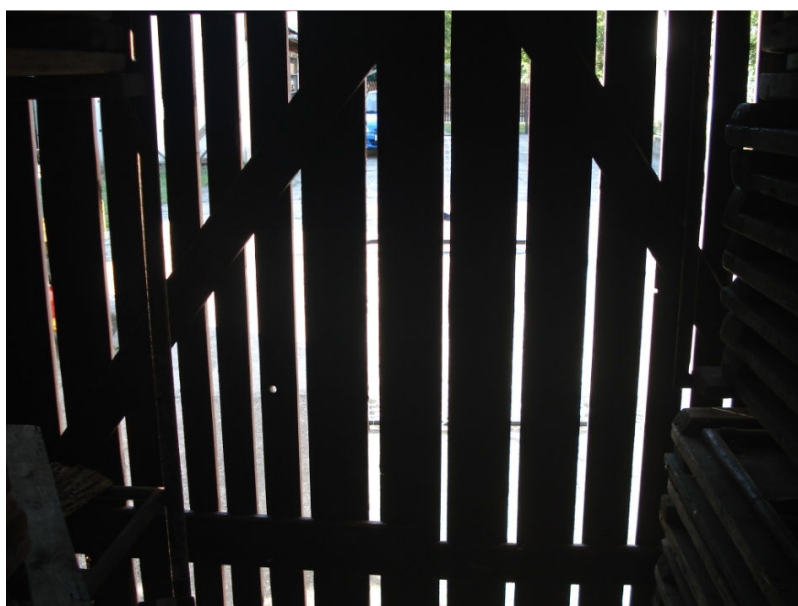
3.14. ábra A palackok elhelyezkedése (SZIE)

A petpalackok kupakjainak kifűrésével különböző átáramlási keresztmetszeteket vizsgáltam. 4, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35 mm átmérőjű furatokat használtam ugyanannál a palacknál.

A 3.15. és 3.16. ábrán látható szerkezetnél hasonló hűtőhatás tapasztalható, mint a palackos hűtésnél. A deszkák közötti réseken a levegő beáramlik a részben zárt térbe. A levegőmozgás intenzitása akkor a legnagyobb, amikor a külső felületet napsugárzás éri. Ilyenkor a külső felületi hőmérséklet elérheti a 40 °C körüli értéket, a belső tér ezzel szemben 24-25 °C-os. A légáramlás sebességét a deszkák közötti távolság határozza meg, mely ebben az esetben átlagosan 25 mm.



3.15. ábra Részben zárt tároló kapujának külső felülete



3.16. ábra Részben zárt tároló kapujának belső felülete

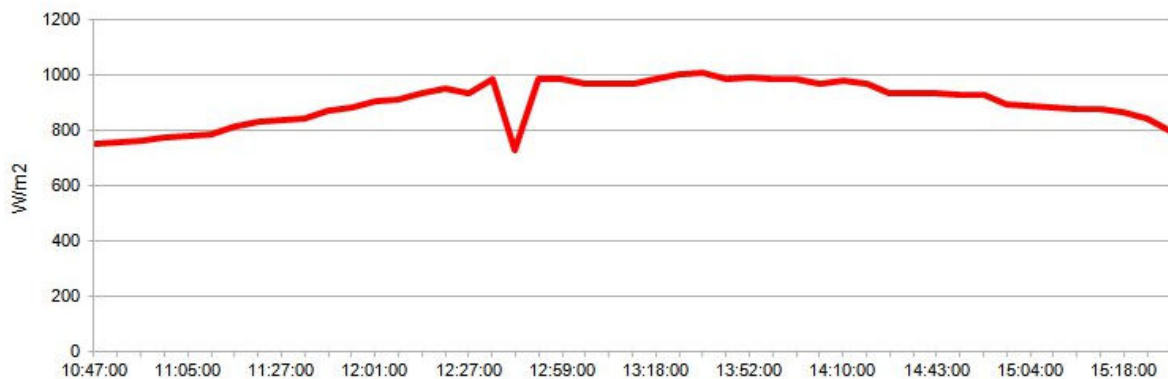
## 4. EREDMÉNYEK

Az értekezésem e fejezetében bemutatom a kutatómunkám során elért új tudományos eredményeket, amelyek a napenergia felhasználásával működtetett hűtőrendszerek alkalmazásában nyújtanak segítséget.

### 4.1. Napkollektorral működtetett abszorpciós hűtés

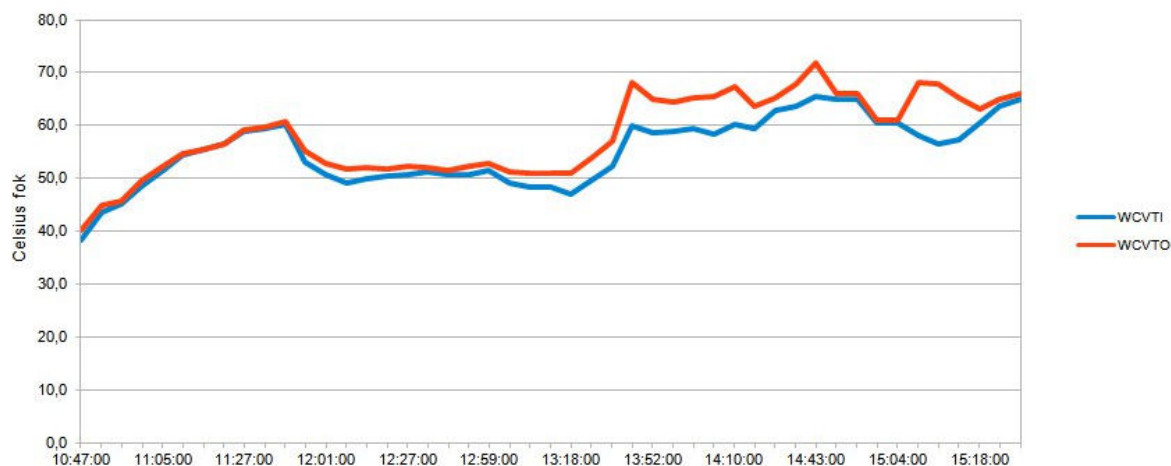
A mérések alapján meghatároztam egy vákuumcsöves napkollektor által leadott hőteljesítmény értékeit egy tipikus nyári napon, és egy napelem segítségével felfűtött abszorpciós hűtőkör hűtőteljesítményét. Minden esetben a hőcserélőknél alkalmazott munkaközeg víz volt. A leadott teljesítmények meghatározásánál (mindkét esetben) két paraméter befolyásolta a kimenő értékeket: a térfogatáram és a hőmérséklet-különbség. Az alacsony térfogatáram kedvezőbb volt a leadott teljesítményt figyelembe véve. Megállapítható, hogy napkollektorral illetve napelemmel közvetlenül biztosítható a szükséges energia az abszorpciós hűtő illetve a légkondicionáló berendezések számára (keringető szivattyú, ventilátor).

A kollektor síkban mért besugárzási értékek alakulását a 4.1. ábra mutatja egy átlagos nyári napon a mérés időtartamában.



4.1. ábra Napsugárzási értékek egy tipikus nyári nap Gödöllőn

A vákuumcsöves kollektor bemenő ( $T_1$ , WCVTI) és kimenő ( $T_2$ , WCVTO) ágán mért hőmérsékletek értékei a 4.2. ábrán láthatóak.



4.2. ábra Vákuumcsöves kollektor bemenő és kimenő hőmérsékleti értékei egy átlagos nyári napon

A napkollektor hőteljesítménye az alábbi egyenlettel határozható meg:

$$P = \dot{Q} = \frac{c \cdot m \cdot \Delta T}{dt} = c \cdot \dot{m} \cdot \Delta T = c \cdot \rho \cdot \frac{dV}{dt} \cdot \Delta T = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T, \quad (4.1)$$

ahol:  $c$  a munkaközeg fajhője [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ],  $m$  a tömeg [ $\text{kg}$ ],  $\rho$  a sűrűség [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $\Delta T$  a hőmérséklet-különbség [ $^{\circ}\text{C}$ ], és  $Q$  a térfogatáram [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]. A víz munkaközeg főbb paraméterei:  $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (bár a víznél ezen értékek valamennyire hőmérsékletfüggők, ezen legegyszerűbb modellben konstans értékekkel számoltam). A 4.1. egyenlet alapján látható, hogy a kollektor hőteljesítménye két paramétertől függ: a térfogatáramtól és hőmérséklet-különbségtől.

A kollektorból kivett hőteljesítményt leíró folyamatra elméleti modellt állítottam fel (a modellben a 3.1. ábra jelöléseit használtam, azaz a kollektorba belépő munkaközeg hőmérséklete  $T_1$ , a kilépő hőmérséklet  $T_2$ . A hőcserélő primer oldalán a munkaközeg belépő és kilépő pontjának hőmérséklet  $T_{11}$  illetve  $T_{12}$ , míg ugyanez a szekunder oldalon  $T_{21}$  illetve  $T_{22}$ .

A teljes modell azt fejezi ki, hogy a kollektorból felvett, és a csővezetéknek illetve a hőcserélőben a szekunder kör hűtőfolyadékának átadott energia különbsége a munkaközéget melegíti (energiamegmaradás elve).

A modell első egyenlete a kollektor energia mérlegét írja le. Itt a bemenő energia a napsugárzásból származik. Az  $I$  teljesítménysűrűségű (intenzitású) sugárzás a kollektor  $A_h$  hasznos felületén ( $A_h = A \cdot \cos(\varphi)$ , ahol  $\varphi$  a napsugárzás irányának a beesési merőlegessel bezárt szöge)  $\eta$  hatásfokkal alakul hővé. A napsugárzás formájában bejövő, és a kollektoron átáramló munkaközeg által elvitt energia különbsége melegíti fel a kollektort (a kollektorfej tömege  $m_k$ , átlagos fajhője  $c_k$ ).

$$I \cdot A_h \cdot \eta \cdot dt + U_k \cdot A_k \cdot (T - T_k) \cdot dt = c_{mk} \cdot m_{mk} \cdot dT_{mk} + c_k \cdot m_k \cdot dT_k. \quad (4.2)$$

Állandósult állapotban (ami a klimatizálási igény esetén feltételezhető, mivel a hűtési igény egyenletesen magas besugárzás esetén jelentkezik) a kollektor hőmérséklet konstansnak



tekinthető, azaz ilyenkor a kollektor által hővé konvertált energia mennyiség teljes egészében a munkaközeget melegíti.

$$I \cdot A_h \cdot \eta \cdot dt + U_k \cdot A_k \cdot (T - T_k) \cdot dt = c_{mk} \cdot m_{mk} \cdot dT_{mk}. \quad (4.3)$$

Innét a munkaközegnek a kollektor fejen való áthaladása során a hőmérséklet-növekedés meghatározható.

A következő egyenlet a kollektor és a munkaközeg közötti energiamérleget adja ki, nevezetesen hogy a kollektorból a felületi hőátadással kivett hő a munkaközeg belső energiáját növeli:

$$U_k \cdot A_k \cdot (T - T_k) \cdot dt = c_{mk} \cdot m_{mk} \cdot (T_2 - T_1). \quad (4.4)$$

A munkaközeg ezután, míg eljut a hőcserélőig, hőveszteséget szenved, aminek mértékét a következő összefüggés tartalmazza:

$$U_{cs} \cdot A_{cs} \cdot (T - T_k) \cdot dt = c_{mk} \cdot m_{mk} \cdot (T_2 - T_{11}). \quad (4.5)$$

Utolsó lépésként a hőcserélő energiamérlegét illesztjük a modellbe, ahol (megfelelő szigetelés esetén) feltételezzük, hogy a primer körü munkaközeg által szállított hő energiája a szekunder körü közegnek adódik át. Nem megfelelően szigetelt rendszer esetén a hőátadásnak van egy  $\eta_{hcs}$  hatásfoka:

$$c_{mk} \cdot m_{mk} \cdot (T_{11} - T_{12}) \cdot \eta_{hcs} = c_{szk} \cdot m_{szk} \cdot (T_{22} - T_{21}). \quad (4.6)$$

Az utolsó tag adja nekünk a dt időlépés alatt a rendszerből kivehető energiát, így a hasznosítható teljesítmény a modellből a (4.1) egyenletben megadott módon kapható:

$$P = \frac{c_{szk} \cdot m_{szk} \cdot (T_{22} - T_{21})}{dt} = c_{szk} \cdot \rho_{szk} \cdot \dot{V} \cdot (T_{22} - T_{21}). \quad (4.7)$$

A modell alapján kapott eredményeink és a mérési tapasztalataink is azt mutatják, hogy a térfogatáram ( $Q = \dot{V}$ ) változtatásával egy fizikai eloszlásfüggvény-szerűen változik a kollektorból a hőcserélőn keresztül kivehető teljesítmény, azaz a térfogatáram növelésével kezdetben nő, majd a térfogatáram további növelésére ismét csökken.

Ennek az oka az, hogy kis térfogatáram esetén a munkaközeg magas hőmérsékletre melegszik a kollektorban, de mivel lassan mozog, a kollektor és a hőcserélő közötti szakaszon nem tökéletes szigetelés esetén nagy a környezet felé a konvektív hővesztesége. A térfogatáram (vagyis az áramlási sebesség) növelésével ez a hatás csökken, hiszen a közelítőleg azonos hűtőteljesítményű környezetben nagyobb sebesség mellett kevesebb időt tölt el a munkaközeg. Ugyanakkor a térfogatáram növeléssel logikusan csökken a munkaközeg átlaghőmérséklete (nagyobb áramlási sebesség mellett rövidebb idő alatt áramlik át a kollektorfejen, és a rövidebb idő azonos fűtőteljesítmény mellett kisebb energiabevitelt, azaz kisebb hőmérsékletnövekedést eredményez). Ez a kollektorból kivett teljesítményt még nem feltétlenül rontja (ha a  $\Delta T$  csökken, de a tömegáram nő, akkor a kettő szorzata nem kell, hogy csökkenjen, de a hőcserélő szekunder oldalán kivett hőben már megmutatkozik). Ugyanis a hőcserélő szekunder oldalában levő folyadék hőmérséklete és a hőcserélőbe belépő munkaközeg hőmérséklete közötti különbség szabja meg, hogy mekkora a hőátadás a két közeg között.

Tehát a Szakirodalmi áttekintés részben megadott 2.12. ábra, és a hozzá tartozó mérési adatokra illesztett exponenciális

$$P(\dot{V}) = 1264(1 - e^{-\dot{V}/1.4}) \quad (4.8)$$

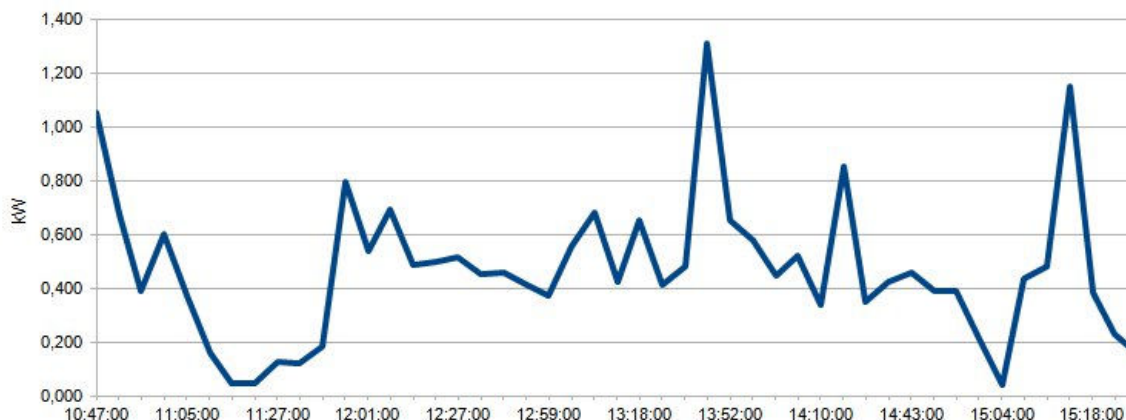
egyenlet jól leírhatja a kollektorból kivett teljesítményt, de a hőcserélő szekunder oldalából kivett teljesítmény az elmondottak miatt nem lehet szigorúan monoton növekvő. Annak egy adott térfogatáram felett csökkennie kell (extrém esetben a kollektorban olyan gyorsan áramoltatom a közeget, hogy elenyésző a felmelegedése, akkor a munkaközeg és a hőcserélő szekunder oldalának közege is közelítőleg azonos hőmérsékletű, azaz a kivethető teljesítmény 0). Különösen igaz ez azon határfeltétel mellett, hogy a kollektorból kivett hő egy hűtőegységet kell, hogy üzemeltessen, s emiatt a kimenő hőmérséklet ( $T_{22}$ ) magas (technológiától függően 80 – 130 °C) kell, hogy legyen.

Az elmondottak alapján a hőcserélőből kivethető teljesítményre egy kezdetben növekvő, később csökkenő függvény alakot keresünk. Fizika tanulmányainkból ismerős, hogy a hasonló alakkal leírható függvények (például az energiaeloszlás függvények Maxwell - Boltzmann, vagy az elektromágneses sugárzását leíró Planck törvény) sokszor

$$f(x) = A x^n \cdot e^{-cx} \quad (4.9)$$

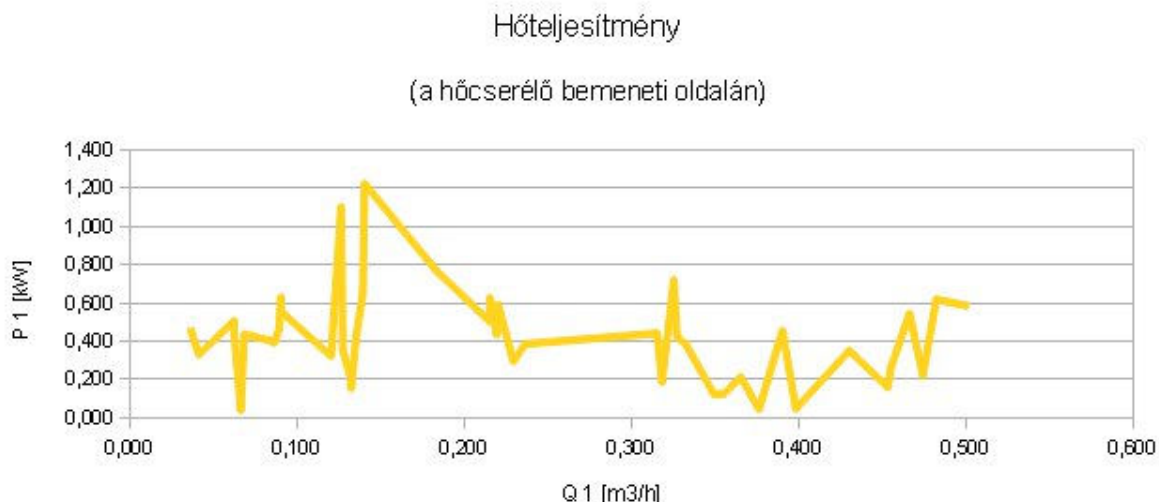
alakú függvények, ahol kicsi  $x$  esetén a hatványfüggvény a domináns ( $\lim_{x \rightarrow 0} e^{-x} = 1$ ), míg nagy  $x$  értékek esetén az  $e^x$  exponenciális sokkal gyorsabban nő, mint az  $x^n$  hatványfüggvény, azaz a megadott függvényalak végtelenben vett határértéke a fizikai háttérnek megfelelően zérus lesz.

A vákuumsöves kollektor leadott hőteljesítmény az 4.3. ábrán látható az idő függvényében. (A teljesítmény a térfogatáram és a kollektor be és kilépő hőmérséklet adatok alapján került meghatározásra.)



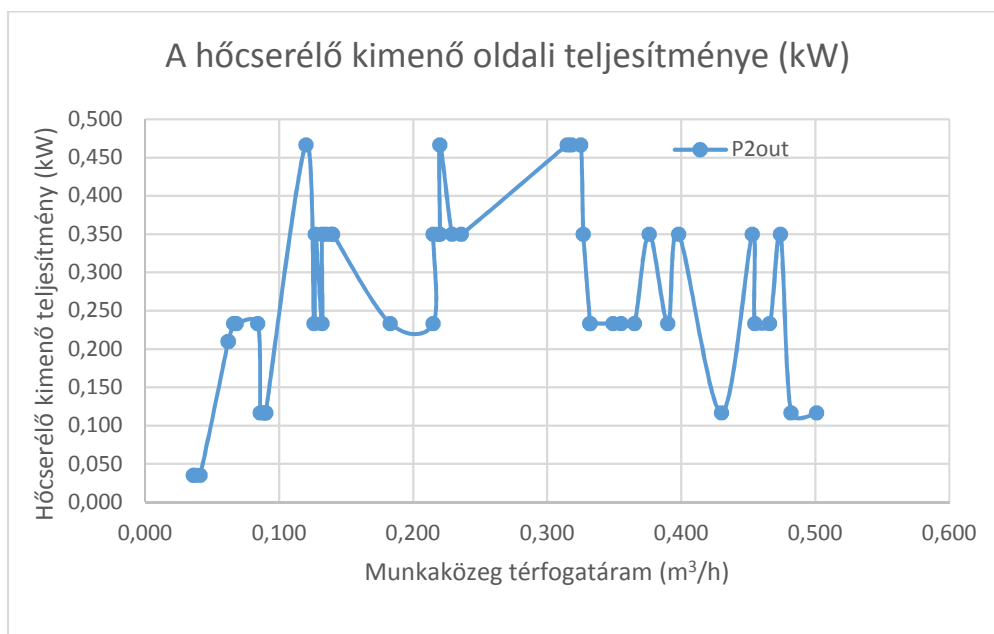
4.3. ábra A vákuumsöves kollektor hőteljesítménye egy átlagos nyári napon

Az adott beállítások mellett a beérkező napsugárzás kb. 50%-át hasznosítja átlagosan a vákuumsöves napkollektor. Mindez alacsonyabb érték más kollektor-típusokhoz viszonyítva, a relatív magas kimenő hőmérséklet érték miatt, azonban a magas hőmérséklet fontos az abszorpciós hűtőkör hatékony működtetéséhez. A hőcserélőn keresztül átlagosan 300 W hőteljesítmény hasznosítható (ami a beérkező napsugárzás kb. 25%-a), így a hőcserélő hatásfoka 50%. A hőhasznosítás hatásfoka függ a térfogatáramtól (4.4. ábra), az alacsonyabb áramlási értékek magasabb hasznosítási értékeket jelentenek, melyek a mérések alapján 0,1 és 0,2  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  térfogatáram értékek között találhatóak.



4.4. ábra A hőcserélő hőhasznosítása

Míg a 4.4. ábrán a primer körű térfogatáram függvényében a primer oldali teljesítmény látható, a klimatizálás szempontjából fontosabb, hogy a szekunder oldali teljesítmény hogyan függ a primer oldali térfogatáramtól. Ez a 4.5. ábrán látható.

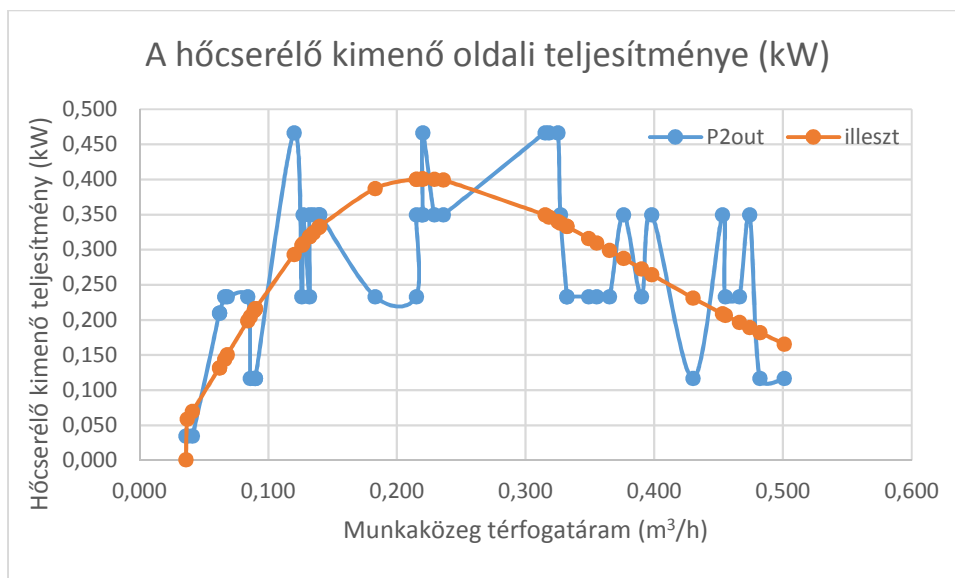


4.5. ábra A hőcserélő kimenő oldali teljesítménye a primer körű térfogatáram függvényeként

A modellalkotás részben bemutatott  $f(x) = A \cdot x^n \cdot e^{-cx}$  alakú közelítést a mért adatokra illesztve az alábbi függvényt kapjuk:

$$P(\dot{V}) = 60 \cdot \dot{V}^2 \cdot e^{-9 \cdot \dot{V}}.$$

A kapott függvény  $R=0,7$  -es korrelációs együtthatóval illeszkedik az adatsorra (4.6. ábra). A korrelációs együttható alacsonyabb voltában szerepet játszhat, hogy a mérés során a térfogatáram mérése nem elég érzékeny térfogatáram-mérővel történt.



4.6. ábra A hőcserélő kimenő oldali teljesítmény adatokra történő függvény-illesztés

A kísérletek során a vizsgált vákuumsöves napkollektor össze lett kapcsolva egy egyedi hőcserélő segítségével az abszorpciós hűtővel a 3.5. ábra szerint. A mérések során a kollektor által biztosított minimális hőmérséklet a hűtőaggregát megfelelő működtetéséhez nem volt elegendő. A kollektor leadott hőteljesítménye nagyobb volt, mint a szükséges hűtőaggregát igény, azonban az állandó hőmérséklet a hűtőközeg elpárologtatásához nem volt biztosítva.

## 4.2. Napelemmel működtetett abszorpciós hűtés

A második mérés célja egy adott abszorpciós hűtőkör hűtőteljesítményének meghatározása volt. A vizsgálathoz egy a Dometic által gyártott hűtőkört vizsgáltam. A hűtőkör felfűtése villamos energiával történt napelemek segítségével.

A második lépésben megvizsgáltam, hogy az abszorpciós hűtőkör felfűtése során mekkora hűtőteljesítményt tud leadni. A vizsgált hűtő aggregát működtethető villamos felfűtéssel vagy egyéb hő bevitellel. Előbbi eset vizsgálatára egy napelem által termelt villamos energiával lett felfűtve a hűtőegység. A felfűtési idő elég hosszú, 2 órát vett igénybe, mire üzemkész állapotba került a hűtő. Innentől számítva mutatja a 4.7. ábra a pillanatnyi felvett villamos és leadott hűtési teljesítmény-értékeket.

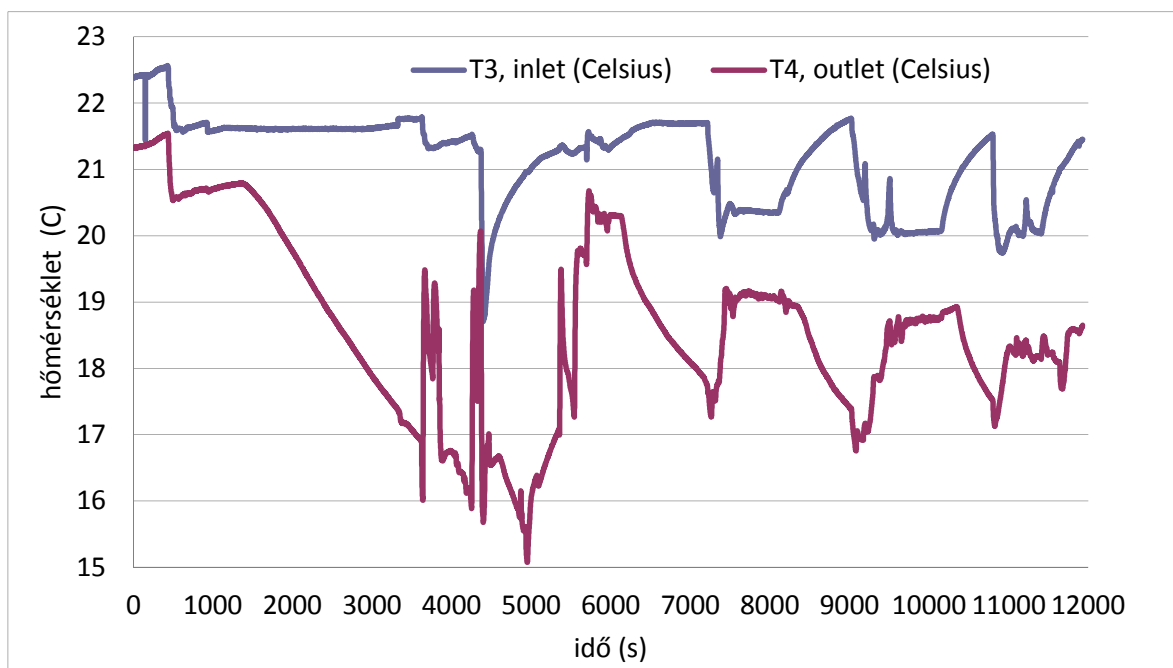
A mérés szintén a Szent István Egyetem Fizika és Folyamatirányítási Tanszékén történt, egy 1 kWp névleges teljesítményű napelem segítségével. A napelem által termelt villamos energia egy DC/DC 24V/12V konverteren át jutott el a hűtő aggregáthoz, miközben a pillanatnyi felvett feszültség és áramerősség értékek rögzítve lettek (a plusz energia akkumulátorokban lett tárolva). A hűtő által leadott hűtőteljesítmény egy hőcserélő segítségével lett hasznosítva, ahol a munkaközeg víz volt. A hőmérséklet mérése két ponton PT1000 típusú szenzorokkaltörtént. Az abszorpciós hűtő által leadott hűtőteljesítmény meghatározása a 4.1. egyenlet alapján történt. A hűtőteljesítményt szintén két paraméter határozza meg: a rendszeren átáramoltatott víz térfogatárama és a hőmérséklet-különbsége.



4.7. ábra Az abszorpciós hűtőkör teljesítménye

A hűtő maximális villamos teljesítménye 170 W, az átlagos érték 130 W körül alakult. A hűtőt teljesítmény 20 és 80 W között mozgott (átlagos értéke 55 W volt)  $0,006$  és  $0,020 \cdot 10^{-3} \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  térfogatáram-tartományon belül. A hűtő átlagos hatásfoka kb. 45% (a felvett villamos és a leadott hűtő teljesítmény alapján).

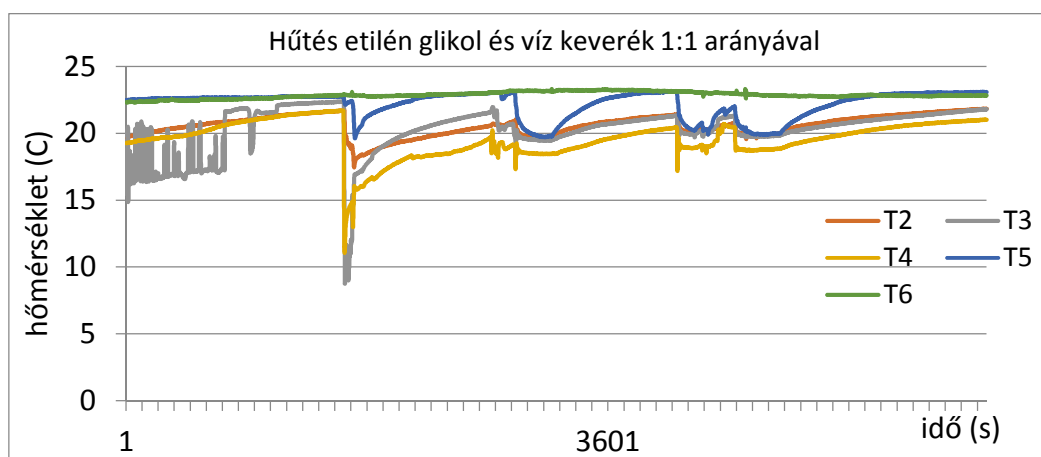
A víz alkalmazása során a folyamatos üzem esetén azt tapasztaltuk, hogy a hosszú ideig tartó hő csere hatására az abszorpciós hűtőaggregát hűtése leállt. Ez a túlzott hőelvonás miatt lehet, amit a víz magas fajhő okozhatott. Így a vízzel csak rövid idejű méréseket tudtunk végezni. A mérési eredmények alapján az átlagos hűtési teljesítmény víz munkaközeg esetén 55 W volt  $0,006$ - $0,020 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$  térfogatáram mellett, a hűtés hatásfoka 32% volt (4.8. ábra).



4.8. ábra Hűtés víz munkaközeggel

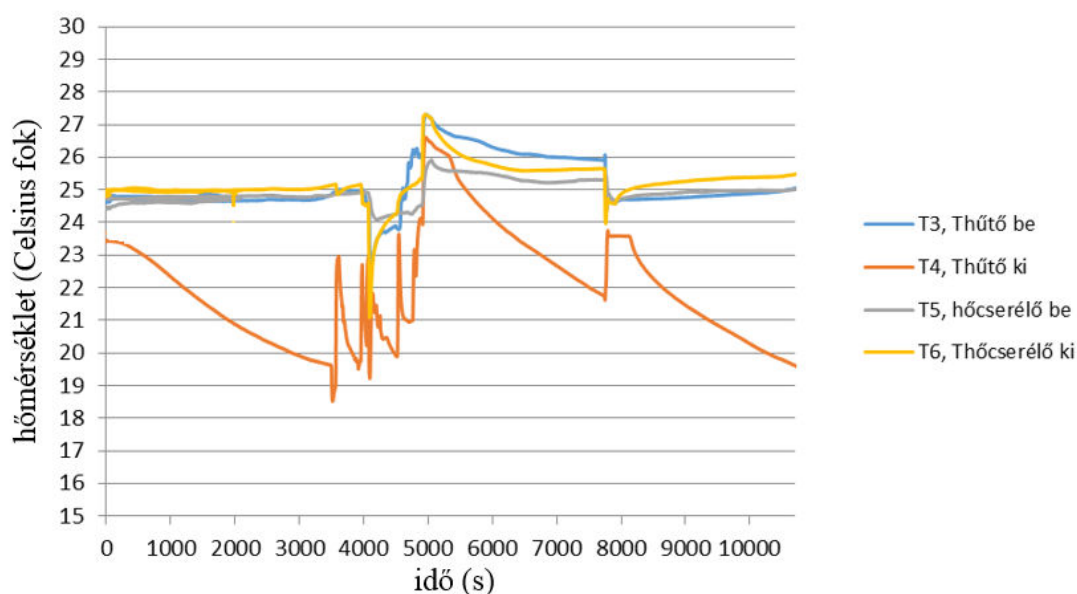
Az etilén glikol vízzel keverve 1:1 arányban lett felhasználva. Az így alkalmazott munkaközeg kiválóan alkalmas volt a folyamatos üzemre. A mérések alapján az átlagos hűtési teljesítmény 66 W volt  $0,006-0,078 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$  térfogatáram mellett, a hűtés hatásfoka 38% volt. A szekunder kör ebben az esetben szigetelve volt, ami a teljesítmény és hatásfok értékekben megmutatkozik, például a vízhez képest.

A 4.9. ábra hőmérsékletgörbéin láthatóak a hűtési folyamatok.  $T_2$  a külső hőmérséklet,  $T_3$  a hengerbe belépő munkaközeg hőmérséklete,  $T_4$  a hengerből kilépő közeg hőmérséklete,  $T_5$  a ventilátoros hőcserélőbe belépő közeg hőmérséklete, és  $T_6$  az onnan távozó közeg hőmérséklete. A többi ábrán a jelölések megegyezők. A hőmérséklet értékek Celsius fokban az idő függvényében vannak ábrázolva minden ábrán, az időegység 1 másodperc.



4.9. ábra Hűtés etilén glikol és víz 1:1 arányú keverékével

A propilén glikol vízzel keverve 1:1 arányban lett felhasználva. Az így alkalmazott munkaközeg kiválóan alkalmas volt a folyamatos üzemre. A mérések alapján az átlagos hűtési teljesítmény 53 W volt  $0,006-0,020 \cdot 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$  térfogatáram mellett, a hűtés hatásfoka 31% volt (4.10. ábra).



4.10. ábra Hűtés propilén glikol és víz 1:1 arányú keverékével

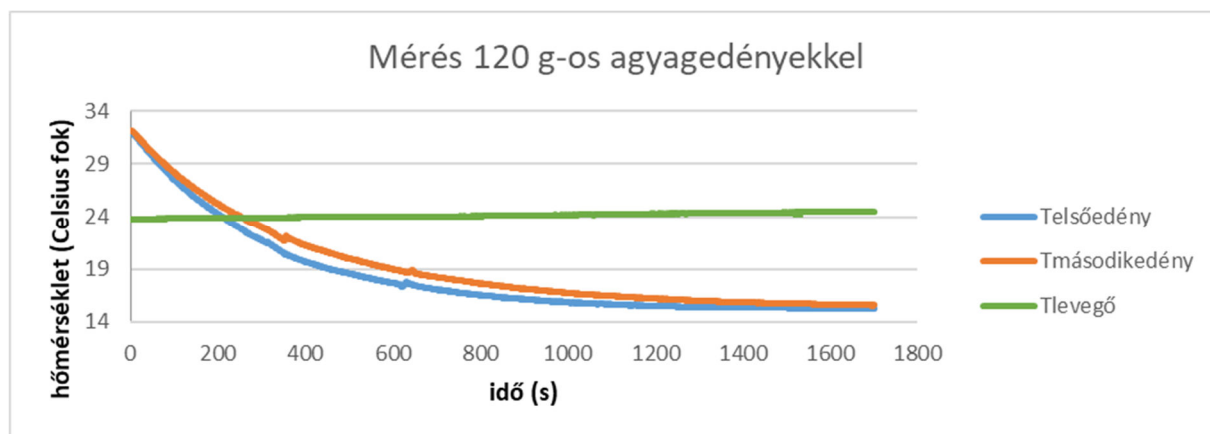
Napelemek alkalmazásával megoldható a légkondicionáló rendszer segéd berendezéseinek működtetése (keringtető szivattyú, ventilátor) akár a pillanatnyi napsugárzási értékekkel azonos mértékben.

### 4.3. A párologtató hűtés

A fazekasagyagból készült kerámiák porózus szerkezete miatt könnyen átteresztik a folyadék munkaközegét, mely párolgása során gáz halmazállapotúvá alakul át. A párolgás ezáltal pedig hőelvonással jár.

A ventilátor által keltett légáramlás a távolság függvényében 1,57 – 1,15 – 0,8 – 0,4 m/s értékű volt. A ventilátor által felvett villamos teljesítmény 12,0 V és 0,16A értéknél 1,92 W volt.

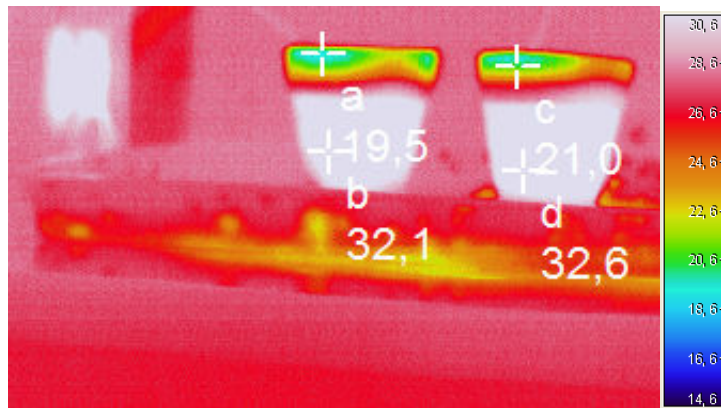
A szivattyú által felvett villamos teljesítmény 6,0 V és 1,5A értéknél 9 W volt. Az indításhoz szükséges teljesítményszinten a térfogatáram  $30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  volt. Alacsonyabb térfogatáramnál  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  értéknél 2,5 V és 0,8A esetén 2 W volt.



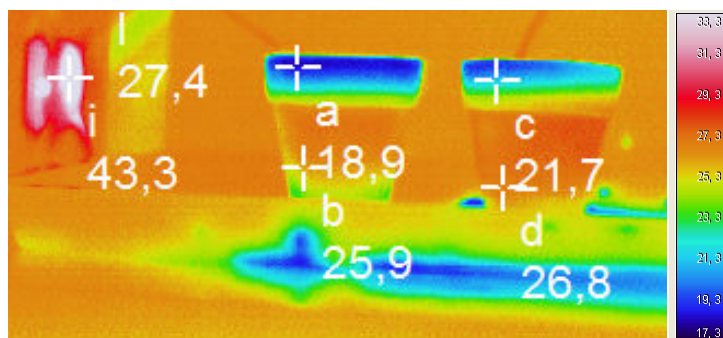
4.11. ábra 120 g-os agyagedények hűtési értékei

Az első mérés alkalmával 120 g-os száraz agyagedényeket vizsgáltam meg (4.11. ábra). A vízbe történő beáztatás után 16 és 18 g vizet vettek fel az edények egyenként. Az edényekbe töltött víz hőmérséklete magasabb volt, mint a környezeti levegőé, 32 °Celsius-ról indult a víz hűtése. A párologtatás nyitott edényekkel történt. Az edényekbe töltött víz tömege 145 g volt. A levegő hőmérséklete 23,7 °Celsius volt és a mérés végén 24,4 °Celsius lett. Az első edény, mely a ventilátorhoz közelebb helyezkedett el 56 perc elteltével 15,2 °Celsius-ra hűlt le, a második edény mely távolabb volt 15,5 °Celsius-ra hűlt le. A hőmérséklet-eloszlás változását a hőképek jól mutatják (első képen a mérés elején jellemző hőmérsékleti értékek Celsius fokban, a második képen a mérés közben jellemző hőmérsékleti értékek, és a harmadik képen a mérés végén jellemző hőmérsékleti értékek láthatók) (4.12. ábra).

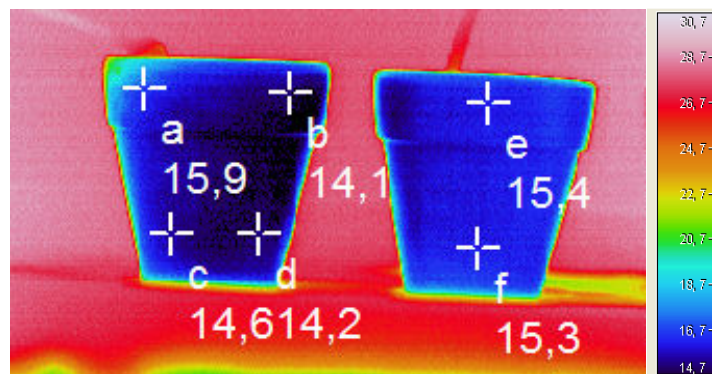
A mérés végén megállapítható volt, hogy a vízveszteség 7 g (-4,8%) volt. Az elért hőmérséklet-különbség a levegőhöz képest közel -9 °Celsius lett.



4.12. a. ábra 120 g-os agyagedények hőkamerás felvételei (hőmérsékleti értékek °C-ban) (SZIE)



4.12. b. ábra 120 g-os agyagedények hőkamerás felvételei (hőmérsékleti értékek °C-ban) (SZIE)



4.12. c. ábra 120 g-os agyagedények hőkamerás felvételei (hőmérsékleti értékek °C-ban) (SZIE)

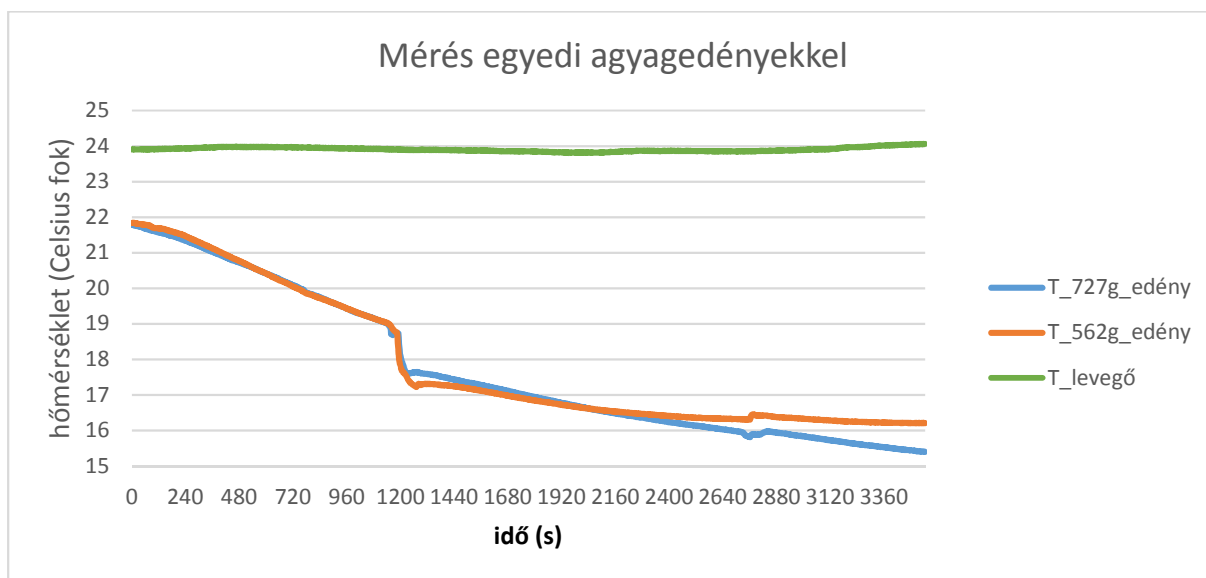
A második mérés alkalmával két egyedi készítésű henger alakú agyagedényt vizsgáltam meg (4.13. ábra). Az egyik 562 g-os, a másik 727 g-os száraz állapotban. Geometriai méretre hasonlóak, eltérés elsődlegesen a falvastagságukból adódik. A kisebb tömegű átlagos falvastagsága 3,5 mm, míg a nagyobb tömegűé 4,5 mm. A vízbe történő beáztatás után a vékonyabb falú edény 40 g vizet, a vastagabb falú edény 50 g vizet vett fel.





4.13. ábra Előtérben a két egyedi készítésű agyagedény, háttérben egy borhűtő agyagedény

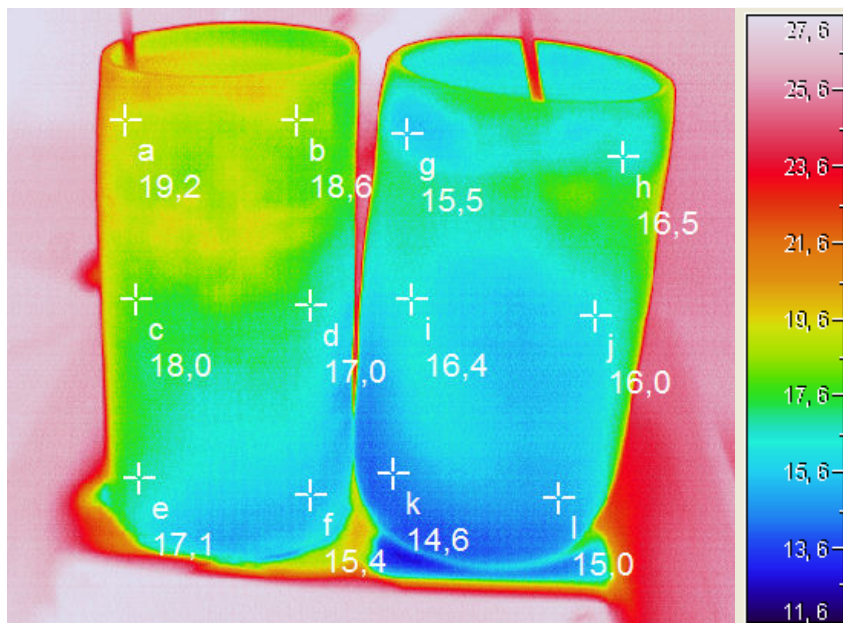
Az edényekbe töltött víz hőmérséklete alacsonyabb volt kb. 2 °C fokkal, mint a környezeti levegőé. A párologtatás nyitott edényekkel történt. Mindkét edénybe 1 liter víz lett beletöltve. A levegő hőmérséklete a mérés során közel állandó értékű, azaz 24,0 °C volt. Mindkét edény a ventilátortól ugyanakkora távolságban volt elhelyezve. 59 perc elteltével a vékonyabb falú edényben lévő víz hőmérséklete 15,4 °C-ra hűlt le, a vastagabb falú edényé 16,2 °C-ra hűlt le. Az elpárolgott víz tömege 31 g és 36 g (-3,1% és -3,6%) volt (4.14. ábra).



4.14. ábra Párolgás során létrejött hőmérséklet-változás az idő függvényében egyedi nyitott agyagedényeknél

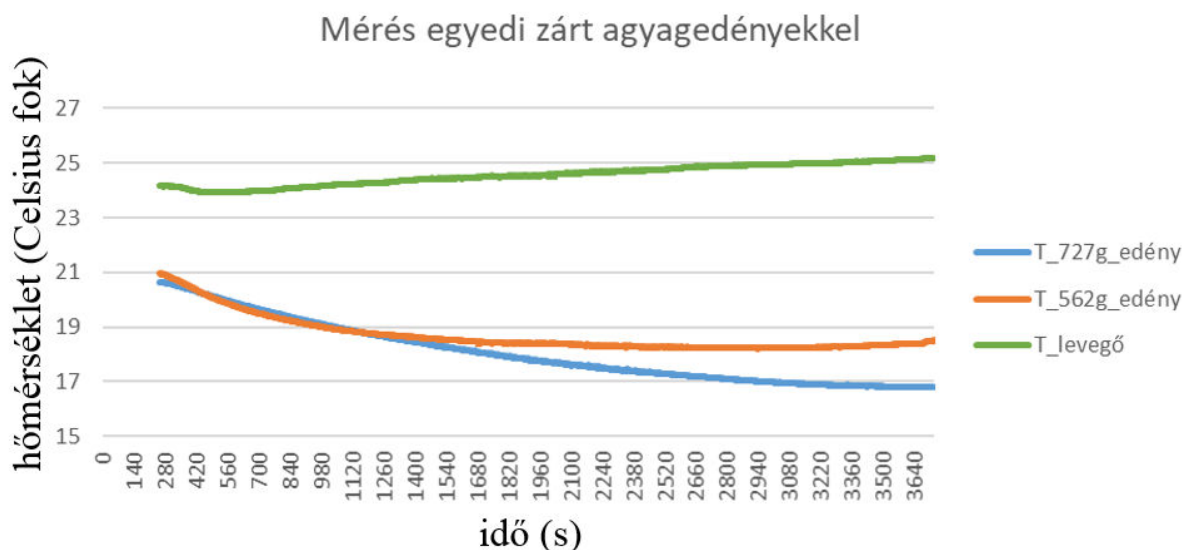
Az edényekben létrejött hőmérséklet-eloszlás változását a hőképek jól mutatják. A hőmérséklet-görbéknél jól látszik, hogy először a vékonyabb falú edényben lévő víz hőmérséklete ért el alacsonyabb értéket, majd később a vastagabb falúé. A hőmérséklet-

különbség a víz és a levegő között elérte 8,6 °C és 7,8 °C értéket, azaz átlagosan -8 °C-ot (4.15. ábra).



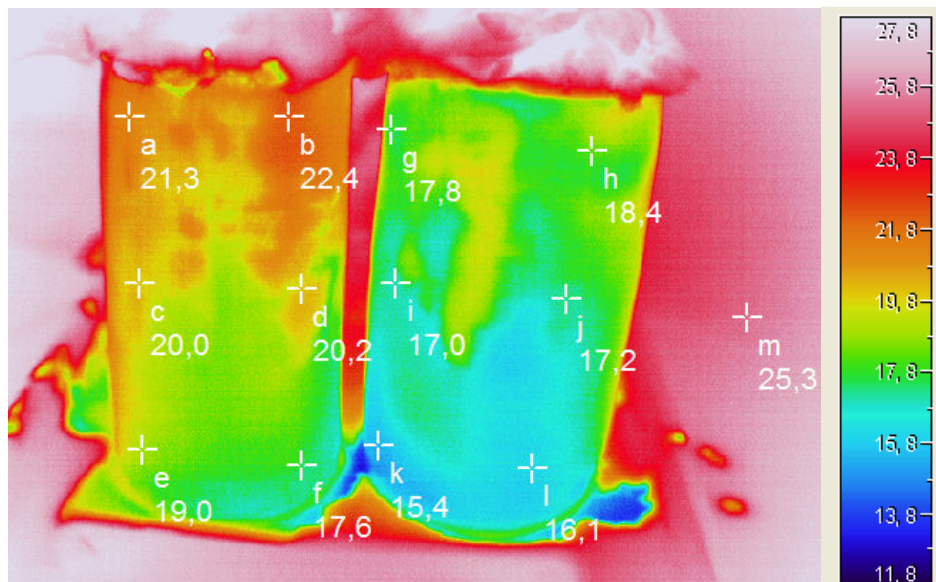
4.15. ábra Az egyedi agyagedények hőkamerás felvétele (hőmérsékleti értékek °C-ban) (SZIE)

A harmadik mérés során az előbb használt két egyedi készítésű henger alakú agyagedényt vizsgáltam meg. A vékonyabb falú 562 g-os, a vastagabb falú 727 g-os volt száraz állapotban (4.16. ábra). Mindkét edénybe 1-1 liter 21 °C-os víz került. A környezeti levegő 24 °C-os volt. A párologtatás zárt edényekkel történt. A levegő hőmérséklete a mérés során kis mértékben változott, a mérés végére 25,1 °C lett. Mindkét edény a ventilátortól ugyanakkora távolságban volt elhelyezve. 58 perc elteltével a vékonyabb falú edényben lévő víz hőmérséklete 18,5 °C-ra hűlt le, a vastagabb falú edényben lévő víz 16,8 °C-ra hűlt le. Az elpárolgott víz tömege 66 g és 61 g (-4,2% és -3,5%) volt.

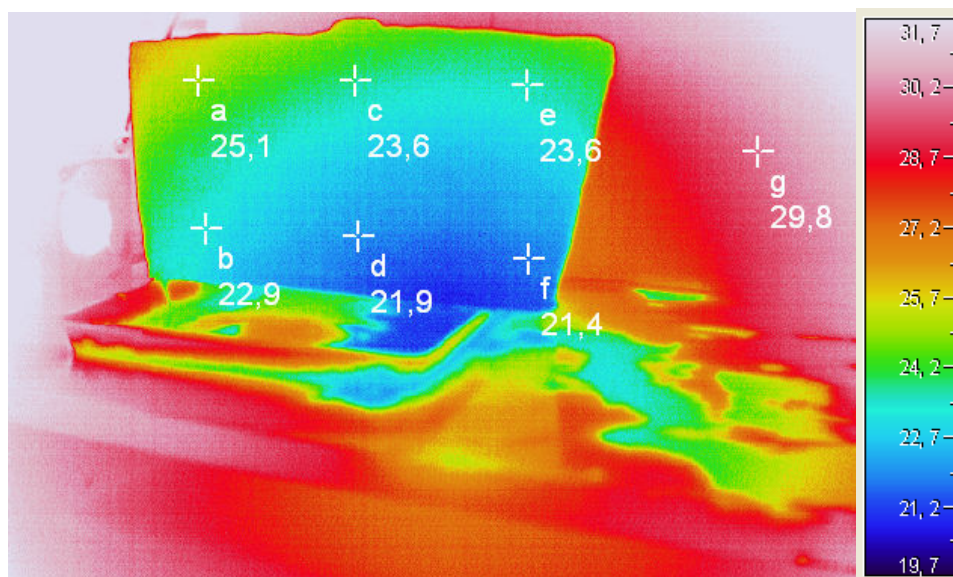


4.16. ábra Párolgás során létrejött hőmérséklet-változás az idő függvényében egyedi zárt agyagedényeknél

Az edényekben létrejött hőmérséklet-eloszlás változását a hőképek jól mutatják. A hőmérséklet-görbénél jól látszik, hogy először a vékonyabb falú edényben lévő víz hőmérséklete ért el alacsonyabb értéket, majd később a vastagabb falúé. A hőmérséklet-különbség a víz és a levegő között elérte 6,6 °C és 8,3 °C értéket, azaz átlagosan -7,45 °C-ot (4.17. ábra).



4.17. ábra A zárt egyedi agyagedények hőkamerás felvétele (hőmérsékleti értékek °C-ban) (SZIE)



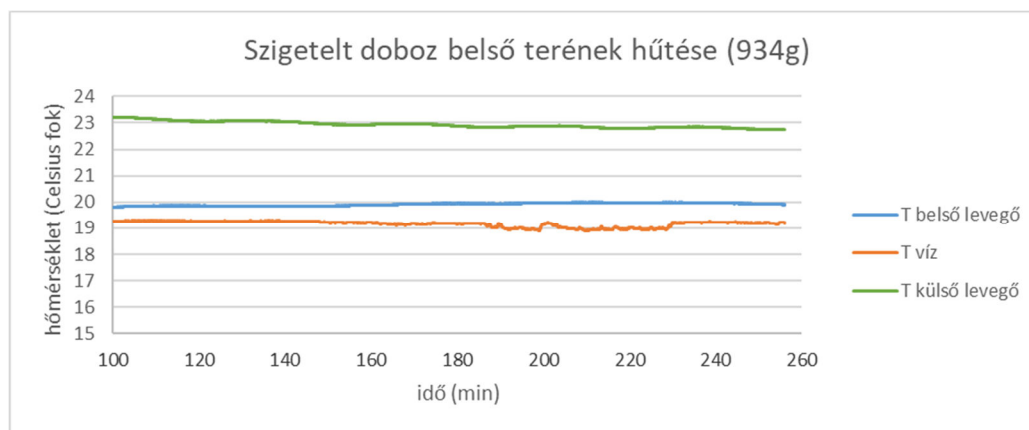
4.18. ábra Nyitott egyedi nagy felületű agyagedény hőkamerás felvétele (hőmérsékleti értékek °C-ban) (SZIE)

Az első mérés során egy 380 g száraz tömegű agyagtálat használtam fel nyitott rendszerű párolgásos hűtésre 0,5 liter víz felhasználásával (4.18. ábra). A külső hőmérséklet a mérés elején 23,2 °C volt, a szigetelt doboz belsejében a hőmérséklet 19,8 °C volt (3,4 °C-kal alacsonyabb érték). Az agyagtálatba töltött víz kezdeti hőmérséklete 19,2 °C volt. 2,5 óra eltelté

után a külső hőmérséklet 22,7 °C értékű, a doboz belsejében a hőmérséklet 19,9 °C értékű, az agyagtálban lévő víz 19,2 °C értékű lett.

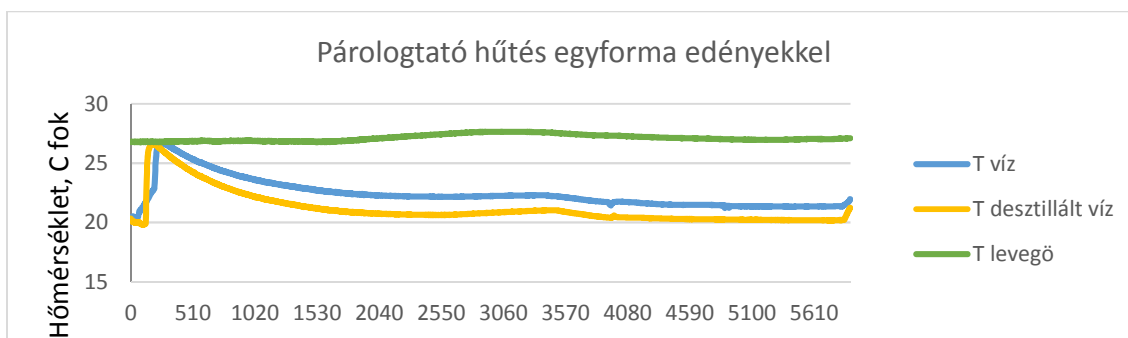
A mérések során az agyagedényekbe töltött víz hőmérséklete minden esetben csökkent, hőelvonás történt. A mérések alapján megállapítható, hogy a környezeti levegőtől melegebb víz is lehűlt agyagedényben, s ennek során kb. 9 °C-os hőmérséklet-különbség jött létre. Az elpárolgott víz mennyisége minimális volt (-4,8%). A környezeti levegőtől hidegebb víz edénybe töltve tovább hűlt az agyagedényben, s ennek során közel hasonló értékű hőmérséklet-különbség jött létre (átlagosan 8 °C -os). Egyedi és nagy sorozatban gyártott edényeket megvizsgálva az elpárolgott víz mennyisége minimális volt (-3,5 és -4,8% közötti). A nyitott és a zárt edények párologtatását összehasonlítva a nyitott edényekben nagyobb hőmérséklet-különbséget lehetett elérni. Az edényekbe töltött víz és a környezeti levegő hőmérséklet-különbsége állandó értékű lett átlagosan egy óra eltelte után.

A bemutatott rendszerek egyenlőre egy kisméretű légtér „klimatizálására” voltak alkalmasak (4.19. ábra). A bemutatott egyenletek alapján egy tényleges rendszer (pl. egy helyiség) hőmérsékletének kontrollálásához szükséges párolási tömegáram meghatározható, és hozzá a leírt geometriához hasonló, de nagyobb méretű kísérleti berendezés megépíthető.



4.19. ábra Szigetelt belső tér hűtése

Ugyanolyan méretű edényeknél megvizsgáltam különböző munkafolyadékok viselkedését, azaz víz és desztillált víz párolgási jellemzőit. A párolgás során mért hőmérséklet-értékek a 4.20. ábrán jól láthatóak. A mérés során a relatív páratartalom 45% volt. A desztillált vízzel alacsonyabb hőmérsékleti érték érhető el, azonban a hőmérsékleti görbékben jól látható, hogy a különbség minimális volt (átlagosan 1,2 °C). Tehát munkaközegként pl. csapvíz is egyszerűen megfelel.



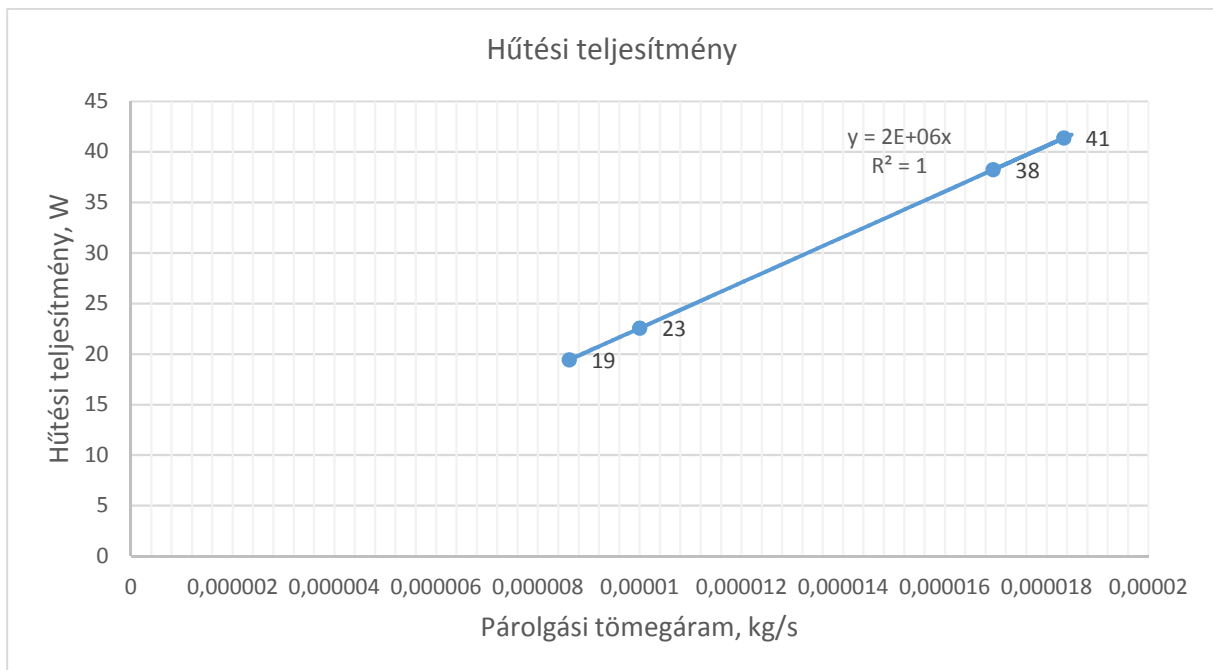
4.20. ábra Párologtató hűtés egyforma edényekkel

## 4. Eredmények

A kerámia edény anyagminősége meghatározza a hűtési teljesítményt, mely pl. a kerámia edény falán jól látható a 4.21. ábra képein. A hűtési teljesítmény értéke a párolgási tömegáramtól függ, melynek változását a 4.22. ábra szemlélteti.



4.21. ábra Kerámia edények vízzel töltve  
(bal oldali kép: átnedvesedett fal, jobb oldali kép: kerámiaedény oldalán vízcseppek)



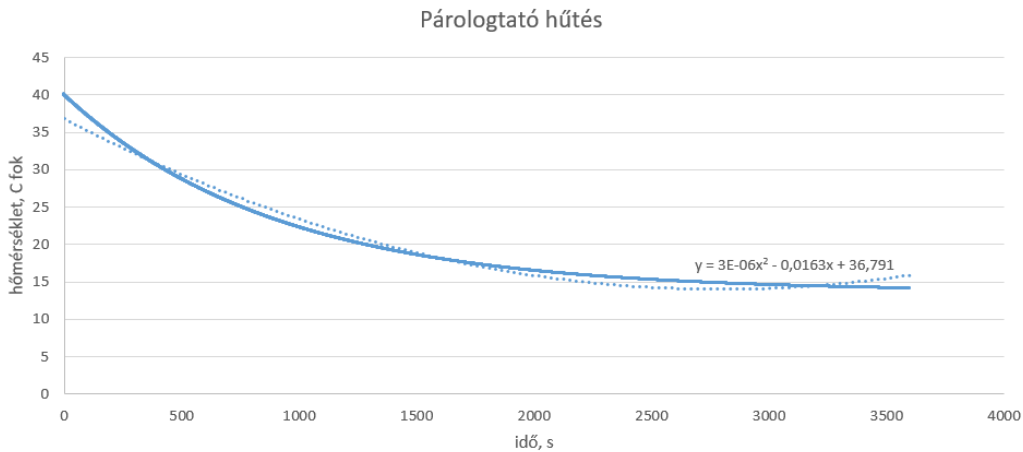
4.22. ábra Hűtési teljesítmény a párolgási tömegáram függvényében

A párolgató hűtés során elérhető hőmérsékleti érték az idő függvényében a következő egyenlettel írható le:

$$T(t) = 0,000003 t^2 + 0,0163 t + 36,791. \quad (4.10)$$

A függvény 1062-1234 g/h párolgási tömegáram tartományban érvényes.

A folyamat egy parabolikus függvénnyel jellemezhető a 4.23. ábra szerint.



4.23. ábra Hűtési hőmérséklet-görbe párolgatatás során

A számítások szerint 1000 W hűtési teljesítményhez 1,29 m<sup>2</sup> kerámiafelület szükséges. A számított érték párolgó víz esetén 1234 g/m<sup>2</sup> óra tömegáram mellett érvényes.

A hűtési teljesítmény meghatározható a következő egyenlet szerint:

$$P_h = L_p \cdot \dot{m}, \quad (4.11)$$

ahol  $L_p$  a párolgáshő [J/kg] és  $\dot{m}$  a párolgási tömegáram [kg/s].

A hűtési teljesítményt egy energetikai rendszerben meghatározza a porózus anyag felülete. Kiegészítve e szerint az előző egyenletet a párolgási felülettel, egy új formulát kapunk, ami a fajlagos hűtési teljesítményt fejezi ki W/m<sup>2</sup> dimenzióval:

$$P_{fh} = \frac{L_p \cdot \dot{m}}{A_p}. \quad (4.12)$$

Adott porózus anyagra vonatkozó párolgási tömegáramot mérésekkel meg tudjuk határozni, mely alapján kiszámítható a szükséges felület. Ez az érték a következő egyenlettel számítható a szükséges hűtési teljesítmény szerint:

$$A_p = \frac{L_p \cdot \dot{m}}{P_{fh}}. \quad (4.13)$$

A mérések során elért hőmérséklet-különbség ideális lehet légkondicionáló rendszerekhez, hiszen az emberi szervezet számára ez az érték még megfelelő lehet, szemben az ettől nagyobb hőmérséklet-különbséggel.

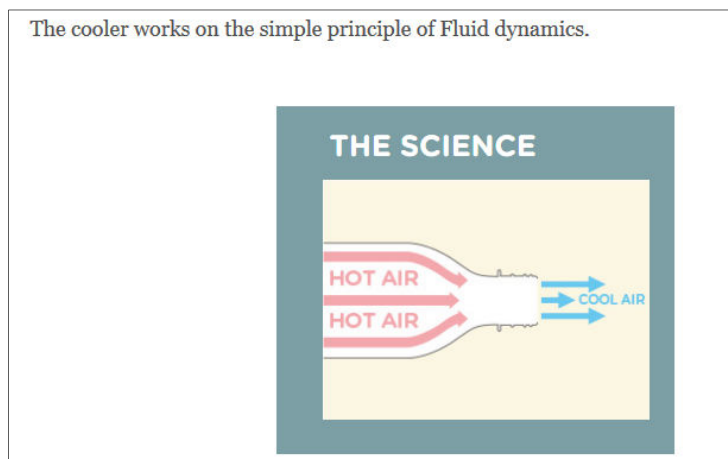
#### 4.4. Alternatív hűtés palackokkal

A kánikulában az emberi szervezet nehezen viseli a sajátjánál magasabb hőmérsékletet. A hosszabb időn át tartó hőterhelés enyhítésére megoldás lehet az előzőekben ismertetett bangladesi palackos hűtés. Ezzel a technikával a zárt térbe bejutó levegő hőmérsékletének csökkentését lehet elérni.

Nézzük meg, hogy a hűtőhatás milyen fizikai elveken alapul, és mekkora hűtőteljesítményre lehet képes. Ehhez az Irodalomfeldolgozásban bemutatott kétféle EcoCooler megoldás

mindegyikét megvizsgáltam, először a ventilátorral kiegészített módosított EcoCooler működési elvét vizsgáltam.

Az Interneten meglévő anyagok arra hivatkoznak, hogy a szűkületen áthaladó levegő sebessége felgyorsul, és emiatt a hőmérséklete lecsökken (4.24. ábra).



4.24. ábra Az átalakított EcoCooler működését magyarázó ábra

(<https://www.stumagz.com/eco-cooler-a-device-made-from-just-plastic-bottles-consumes-zero-electr/>)

Nézzük ezt az állítást a Fizika szemszögéből. A gyors termodinamikai folyamatok közelítőleg adiabatikusnak tekinthetők, mivel nagyon rövid idő alatt a rendszernek a környezettel való hőcseréje elhanyagolható, ami azt jelenti, hogy a hirtelen összenyomott levegő felmelegszik, míg a hirtelen kitáguló közeg lehül. Ez éppen ellentétes hatású, mint az ábrán jelölt eset, bár ha úgy fogjuk fel, hogy a szűkületen átáramló levegő a szűkület után ismét „kitágul”, akkor ez valóban hűléssel jár, de ez azt jelenti, hogy az összenyomódott, azaz a felmelegedett levegő fog visszahűlni, legfeljebb az összenyomódás előtti hőmérsékletre. A folyamathoz hőmérséklet-csökkenés nem társul.

A jelenséget komplikálja az az áramlási problémákból közismert tény, hogy ha a gázok legfeljebb a bennük mérhető hangsebesség legfeljebb 30%-ának megfelelő sebességgel mozognak, akkor nem „nyomódnak össze” a mozgás következtében, azaz állandó sűrűségű közegként áramlik. Mivel a hangsebesség 30%-a  $\sim 100$  m/s, azaz 360 km/h, elmondható, hogy az általam észlelt áramlási tartományban a gázokra is igaz a folytonossági és a Bernoulli törvény, azaz hogy a keresztmetszet és az áramlási sebesség fordítottan arányos:

$$A \cdot v = \text{állandó.} \quad (4.14)$$

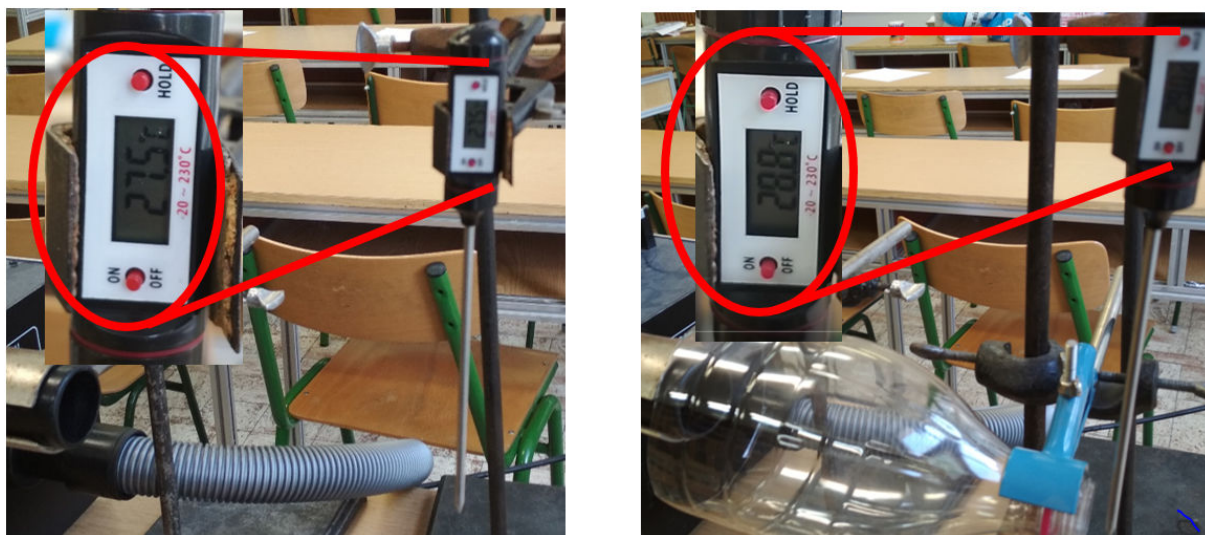
Ebben az esetben viszont a 4.24. ábrán bemutatott modell esetén a keresztmetszet csökkenéssel fordítottan arányos mértékben meg fog nőni az áramlás sebessége, azaz a bemutatott eszköz sebességnövelést okoz. A sebességnövekedés esetén viszont valóban érvényesül az a hatás, hogy ha meleg levegő levegő áramlik a kezünkre, akkor azt kis sebességek esetén melegnek, nagy sebességek esetén viszont hidegnek érezzük.

Ez a hatás nem a levő hőmérsékletének megváltozása miatt érezhető, hanem a kezünkön a párolgás sebességének növekedése, és emiatt a gyorsabb párolgás intenzívebb hűtő hatása miatt. Párolgásnál ugyanis az elpárolgó (a felületről kilépő, az átlagosnál nagyobb energiával rendelkező) vízmolekulák általában a felület közelében maradnak, így adott esetben vissza is „eshetnek” a felszínre, visszavive azt az energiát, amit a kilépéskor elvittek. Az inntenzív

légáram ezt a visszalépést akadályozza meg, lehetővé téve újabb molekulák kilépését, azaz a párolgás sebességének a növekedését, ez okozza a hideg érzetet.

Tehát ebben az esetben a helyiség hőmérséklete nem csökken, csak a benne levő emberek hőérzete lesz kicsit kellemesebb a légmozgás miatt (ami adott esetben persze szintén fontos).

Az hogy a jelenség nem okoz a levegő hőmérsékletében csökkenést, sőt a közegsúrlódás és a kompresszió miatt enyhe melegedést okoz, azt az alább bemutatott méréssel igazoltam. A mérés során egy légfúvóval levegő lett fújva egy digitális hőmérőre, amivel folyamatosan mértem a hőmérő által mért lég hőmérsékletet. A mérés során az eredeti EcoCooler módszerben használt elvágott PET palackkal le lett szűkítve az áramlási keresztmetszet, azaz meg lett növelve a légsebesség, és a palack nyakánál eközben mérve lett a levegő hőmérséklete. A mérés során a palack nélküli esetben a levegő hőmérséklete 27,5 °C értékű volt, míg a palack szűkítést a rendszerbe téve a hőmérséklet 28,8 - 29 °C értékre nőtt. A palackot elvéve a hőmérséklet ismét a 27,5 °C értékre ment vissza, a kísérlet nagyon jól reprodukálható volt (4.25. ábra).



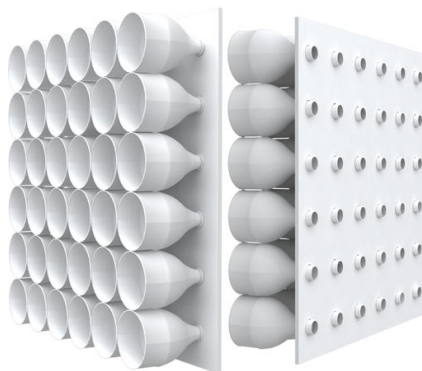
4.25. ábra EcoCooler kísérlet a hőmérséklet változásra (SZIE)

Vizsgáljuk meg most az eredeti elrendezésű bangladesi EcoCooler-t. Ennek lényege tehát, hogy a jellemzően fémből készült épület déli oldalára a fal egy része helyett (vagy az ablakba) a PET palackokból a 3.13 és 3.14 ábrán bemutatott geometriájú szerkezetet rakják (bár van már precízebben kivitelezett verziója is, ahogy az a 4.26. ábrán látható).

Bár a rendszer leírásában megadott ábrák azt sugallják, hogy itt is a kintről a lyukakon beáramló hűl le a beáramlás során, de az már igazolva lett, hogy ez nem igaz. A következő lépés volt annak kiderítése, hogy mi állhat a jelenség hátterében.

A megvalósított eseteknek utánanézőve kiderült, hogy a jelenséget általában nagyon meleg helyszíneken, jellemzően rosszul szigetelt építmények (fémbódék) esetén mutattak ki érzékelhető hatást. Az is fontos paraméter, hogy a szerkezetet az épület napos oldalán levő nyílászáróra kell felszerelni ahhoz, hogy működjön (ez azért fontos szempont, mert ha mondjuk az egyesek által a szél által okozott légmozgás következménye lenne a jelenség, akkor a felszerelés helye nem lenne a napsütés irányához kötve, hanem a jellemző szélirányhoz). Az előzőek alapján az EcoCooler működési elvét az alábbiakban azonosítottam.



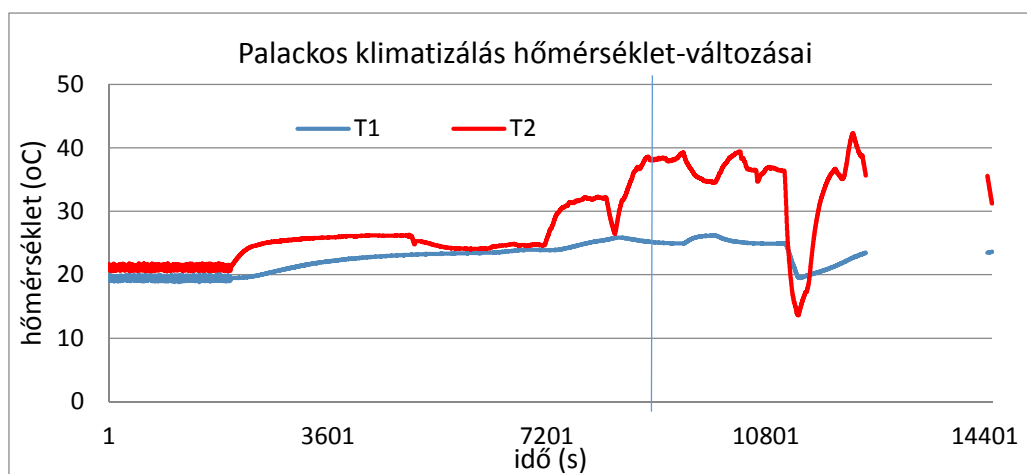


4.26. ábra: Az EcoCooler formatervezett változata

(<http://www.homecrux.com/eco-cooler-zero-electricity-cooler-uses-recycled-plastic-bottles-to-beat-the-summer-heat/47030/>)

Az erős napsütés az épület napsütéses oldalán, és az azt szegélyező légréteget jelentősen felmelegíti, ami a levegő hőtágulása miatt egy felfelé irányuló konvekciós légáramot hoz létre. A kitágulásból adódó sűrűségcsökkenés miatt és a felfelé áramló levegő mozgásából adódóan a Bernoulli törvény miatt a felfelé áramló levegőnek kisebb a nyomása, azaz az EcoCooler külső oldalán lecsökken a légnyomás. Ez a felmelegedett belső térben levő meleg levegő EcoCooler-en történő kiáramlásához vezet a kívül áramló levegő szívóhatása miatt. De hogy a belső nyomás kiegyenlítődjön, ezért az épület másik (északi) oldalán levő, nagyobb nyomású, és egyúttal hűvösebb levegő áramlik az épületbe, ezzel természetes konvekciót létrehozva.

Az elmélet ellenőrzésére megépítettem az EcoCooler kísérleti modelljét. A kísérleti berendezés részben zárt dobozának egyik oldalát egy 1000 W teljesítményű hőszugárzóval melegítettem ( $T_2$  hőmérséklet), a belépési pont után a dobozban mértem a belső levegő hőmérsékletét ( $T_1$  hőmérséklet). Az értékek időbeli változásai a 4.27. ábrán láthatóak. Kiemelendő a  $t_1$  és a  $t_2$  időszakasz, melyeknél jól látható a „hűtő hatás”, azaz amikor a külső levegő hőmérséklete növekszik, akkor a belső levegőé csökken. Ez utóbbi köszönhető a beáramló levegőmozgásnak, melynek hőelvivő szerepe van. A doboz külső felületénél lévő levegő hő hatására felmelegszik, ezáltal elkezd a levegő felfelé áramlani, mely hatás révén az alsó levegőrétegek felfelé áramlanak. Az így beáramló levegő egy szűkített keresztmetszeten keresztül áramlik a dobozba, mely révén a sebessége növekszik és hűtő azaz hőelvivő hatást fejt ki.



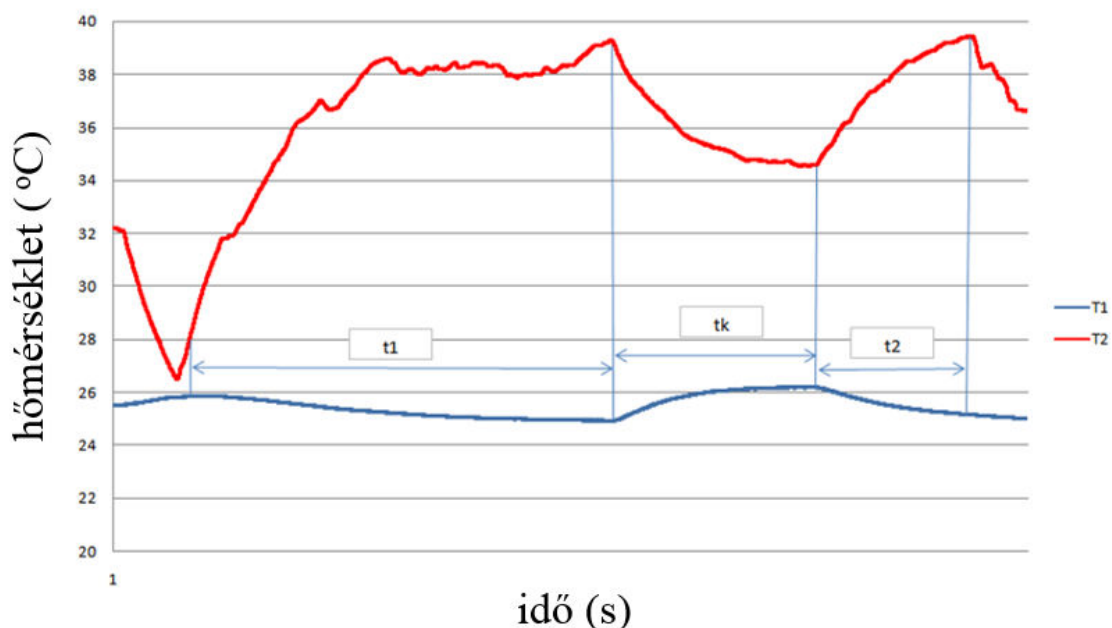
4.27. ábra Külső és belső hőmérséklet változása

A kísérleti berendezés részben zárt dobozának egyik oldalát egy 1000 W teljesítményű hőszugárzóval melegítettem ( $T_2$  hőmérséklet), a belépési pont után a dobozban mértem a belső levegő hőmérsékletét ( $T_1$  hőmérséklet). Az értékek időbeli változásai a 4.23. ábrán láthatóak. Kiemelendő a  $t_1$  és a  $t_2$  időszakasz, melyeknél jól látható a „hűtő hatás”, azaz amikor a külső levegő hőmérséklete növekszik, akkor a belső levegőé csökken. Ez utóbbi köszönhető a beáramló levegőmozgásnak, melynek hőelvivő szerepe van. A doboz külső felületénél lévő levegő hő hatására felmelegszik, ezáltal elkezd a levegő felfelé áramlani, mely hatás révén az alsó levegőrészek felfelé áramlanak. Az így beáramló levegő egy szűkített keresztmetszeten keresztül áramlik a dobozba, mely révén a sebessége növekszik és hűtő azaz hőelvivő hatást fejt ki.

Az elvégzett mérések során azt tapasztaltam, hogy a legkedvezőbb hűtő hatás a 16 mm átmérőjű furat alkalmazása esetén volt. 30 mm és a feletti furatok esetén pedig nem volt lényeges hűtő hatás.

A mérések alapján megállapítható, hogy ezzel a megoldással magas külső hőterhelés esetén is biztosítható 10-15 °C hőmérséklet-különbség, ami kedvező a belső mikroklíma szempontjából.

A 4.28. ábrán jól látható, hogy a külső hőmérséklet hatására csökken a belső hőmérséklet, ezáltal növekszik arányosan a  $\Delta T$  hőmérséklet-különbség ( $t_1$ ,  $t_2$  időszakasz). Amikor a külső hőmérséklet csökken, akkor a belső növekszik ( $t_k$  időszakasz), azaz a  $\Delta T$  értéke csökken.



4.28. ábra A hőmérséklet-változás alakulásai

A kontrolmérések tapasztalatai alapján azt tapasztaltam, hogy az eszköz alkalmas a leírt körülmények között légáram keltésére, de a folyamat nem a fellelhető szakirodalomban megadott elvek szerint működik, emiatt szükség volt a jelenség fizikai hátterének áttekintésére. Ennek alapján a következők állapíthatók meg.

A levegő az épület napos oldalán felmelegszik, emiatt kitágul és lecsökken a nyomása. A felmelegedés előtti (és egyúttal az árnyékban levő) levegő sűrűségét  $\rho_0$ -al jelölve, a felmelegedett levegő sűrűsége ( $\rho$ ) a térfogati hőtágulás törvénye miatt  $V=V_0 \cdot (1+\beta \cdot \Delta t)$ :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0 \cdot (1+\beta \cdot \Delta t)} = \frac{\rho_0}{(1+\beta \cdot \Delta t)}. \quad (4.15)$$

Gázok esetén kis hőmérséklet tartományban a gáztörvények is igazak, amiből a térfogatnövekedés, és egyúttal a sűrűségcsökkenés szintén meghatározható.

Tehát ha tudjuk, hogy mennyivel melegebb a levegő az épület napsütötte oldalán, meg tudjuk határozni az árnyékos és a napos oldal közötti sűrűségkülönbséget. Ez a sűrűségkülönbség azzal jár, hogy a kitágult, melegebb levegő feláramlik, egy kisebb nyomású zónát hagyva maga után. Ez a feláramlás addig történik, amíg a lecsökkent sűrűségű légréteg olyan magasra megy fel, ahol a sűrűsége már megegyezik az abban a magasságban mérhető levegő sűrűségével. A nyugvó levegőrétegek nyomásának függőleges eloszlása a barometrikus magasságformulával adható meg:

$$p(h) = p_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{P_0}}. \quad (4.16)$$

Itt  $p_0$  illetve  $\rho_0$  a kiindulási szint nyomás és sűrűség adatai. Ugyanakkor az ideális gázok állapotegyenlete alapján:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T. \quad (4.17)$$

Az egyenlet átrendezéséből:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \cdot M}{R \cdot T}. \quad (4.18)$$

Mivel a levegő moláris tömege ( $M$ ) és az egyetemes gázállandó ( $R$ ) ismert értékek, így a különböző magasságokban a sűrűség meghatározható. Az irodalomban általában a barometrikus magasságformulához hasonló formulával adják meg a sűrűség magasság függését is (Budó: Kísérleti Fizika I, 245. oldal):

$$\rho(h) = \rho = \rho_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{P_0}}. \quad (4.19)$$

Így az árnyékban  $\rho_0$  sűrűségű levegő ha felmelegszik, és a sűrűsége  $\rho$  értékre csökken addig fog felemelkedni, míg a környezeti sűrűség azonos nem lesz az ő sűrűségével. Ez az előző egyenletből a  $\rho_0$ -al való osztás miatt:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{P_0}}. \quad (4.20)$$

Az egyenlet természetes alapú logaritmusát véve és átrendezve:

$$\ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) = -\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{P_0}, \quad (4.21)$$

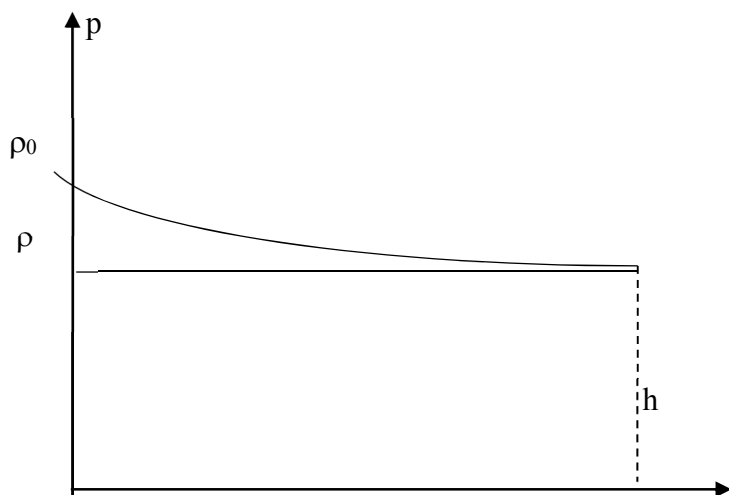
amiből a  $h$  magasság meghatározható:

$$h = -\frac{\rho_0 \cdot g}{P_0 \cdot \ln\left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)}. \quad (4.22)$$

A leírtak miatt azonban nyomáskülönbség alakul ki az épület napos és árnyékos oldala között, hiszen a napos oldalnál (a folytonos feláramlás miatt) a teljes  $h$  magasságig azonos ( $\rho$ ) a

levegősűrűség, ugyanakkor az árnyékos oldalon a barometrikus magasságformula szerint csökken.

Mivel a két érték  $h$  magasságban azonos, így a két oldal között a levegőnek a  $h$  magasságig meglévő sűrűségkülönbségből létrejövő „hidrosztatikai” nyomáskülönbsége mérhető, amit a 4.29. ábra is szemléltet.



4.29. ábra Sűrűségkülönbség miatt létrejött nyomásváltozás

A barometrikus magasságformula negatív exponenciálisan csökkenő függvénye és a konstans  $\rho$  sűrűségű felszálló levegő közötti nyomáskülönbség által egy rövid  $dy$  szakaszon létrehozott nyomáskülönbség:  $dp = (\rho(y) - \rho) \cdot g \cdot dy$ .

Így a teljes tartományra a nyomáskülönbség ennek integrálásával:

$$\Delta p = \int dp = \int_0^h (\rho(y) - \rho) \cdot g \cdot dy = \int_0^h (\rho_0 \cdot e^{-\frac{\rho_0 \cdot g \cdot h}{P_0}} - \rho) \cdot g \cdot dy \quad (4.23)$$

alakban írható fel.

Ez a nyomáskülönbség (ami a napsütötte oldalon a levegő kisebb, és az árnyékos oldal nagyobb légnyomása között mérhető) a meleg oldal felé elkezd „kiszívni” a levegőt a belső térből, aminek a helyére az árnyékos oldalról hűvösebb levegő kerül, ami a légmozgásnak az emberi test párolgásának gyorsításából származó hatásával együtt kellemesebb hőérzetet ad.

A két oldal közötti áramlási tér hidraulikus ellenállásának ( $R_h$ ) ismeretében a nyomáskülönbség által biztosított térfogatáram, és abból a hőtéljesítmény kiszámolható:

$$Q = \frac{\Delta p}{R_h}, \quad (4.24)$$

ahonnan a hűtőtéljesítmény:

$$P = c \cdot \rho \cdot Q \cdot \Delta T \quad (4.25)$$

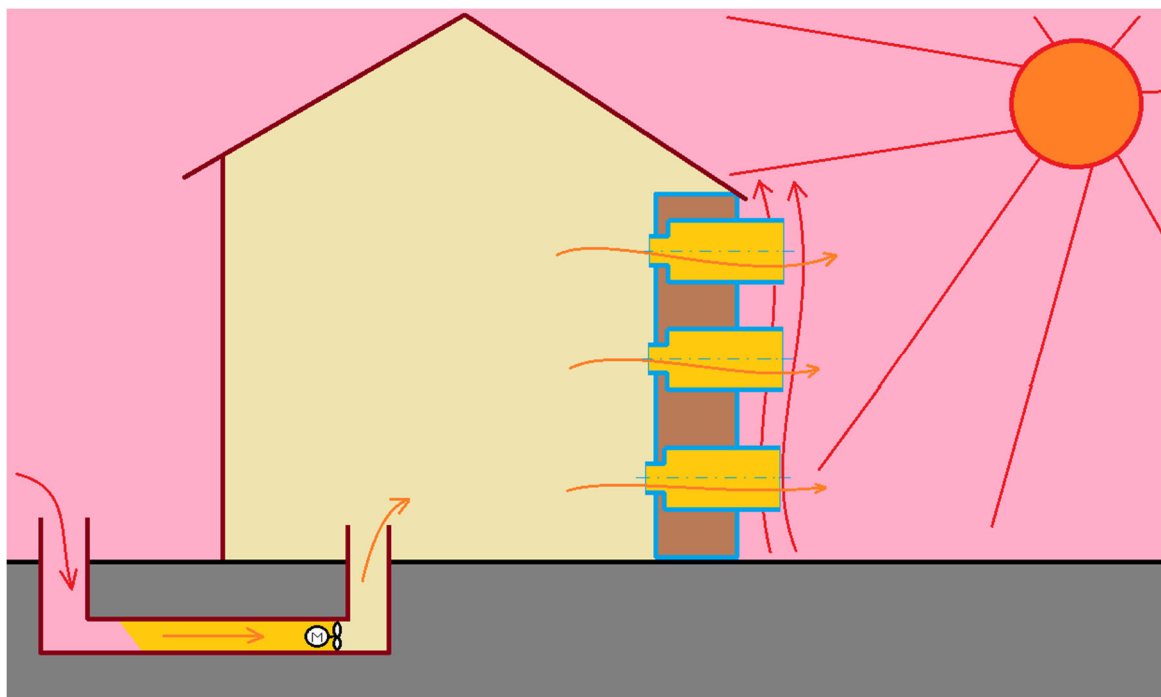
összefüggés segítségével meghatározható.

Az előzőekben leírt elméleti áttekintés alapján megállapítható, hogy az EcoCooler működési elve a napsütötte oldalon a hőközlés hatására bekövetkező hőtáguláson (sűrűségcsökkenésen) alapul, amely a napos és az árnyékos oldalak között nyomáskülönbséget, és ezáltal légáramot kelt.

Ugyanakkor a működés szempontjából fontos szerepe van a palackoknak, pontosabban azok alakjának is. Ugyanis, ha csak nyílást vágnánk a napos oldalon (vagy kinyitnánk ott egy ablakot), akkor ezen keresztül a napos oldalon feláramló forró levegő bejutna a helyiségbe is. A palackok alakja tehát megakadályozza azt, hogy a felfelé áramló meleg levegő bejusson az épületbe, és emiatt a palackok mellett fog a levegő felfelé áramlani. A palackok legszűkebb részének mérete az épületbe való beáramlást gátolja, a mérések szerint 30 mm átmérő fölött nyílás esetén már megtörténhet a meleg levegő épületbe való beáramlása; 16 mm alatt pedig nem számottevő a levegő kiáramlása. Tehát az optimális szűk keresztmetszet palackok esetén 16 és 30 mm közötti értékű.

Az elvégzett kísérletek és elméleti vizsgálatok alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a szakirodalmi áttekintésben bemutatott 2.21. ábra és a 4.20. ábra szerinti képi megjelenítés hibásnak tekinthető abban az értelemben, hogy nem jön létre hűtés a levegő átáramlása során és a valóságban (alapesetben) az áramlás ellenkező irányban történik (4.30. ábra). Különleges és egyszerű a bemutatott technika, mivel a palackok segítségével létrejött levegőáramlás a belső térben a párologtatás (hőelvonás) javítását tudja megoldani.

Összegezve megállapítható, hogy a napsugárzásnak kitett felület esetén működik a légáramlással létrejött hűtőhatás.



4.30. ábra Az EcoCooler valós működése hűtőcsővel kiegészítve

## 4.5. Új tudományos eredmények

Kutatómunkám során a napenergiával történő hűtés alkalmazásával foglalkoztam, kiemelt figyelemmel az optimális üzem kialakulásának eseteire. Az eredményeimet tézisek formájában az alábbiakban összegzem.

### 1. Vákuumcsöves napkollektorból hűtési célra kivehető maximális teljesítmény

Megalkottam klimatizálási célra használt vákuumcsöves napkollektorok hőhasznosítási matematikai modelljét. Megállapítottam, hogy a kollektorról üzemeltetett hőcserélő szekunder oldalából kivehető hőtéljesítmény:

$$P(\dot{V}) = A \cdot x \dot{V}^n \cdot e^{-c\dot{V}}$$

alakú függvény szerint függ a primer oldali térfogatáramtól ( $\dot{V}$ ), amit kísérleti eredményekkel is igazoltam. Mérések segítségével identifikáltam heat pipe rendszerű vákuumcsöves napkollektoros rendszerek együtthatóit ( $A= 60 \text{ Wm}^{-6}\text{s}^2$ ,  $n=2$ ,  $C= 9 \text{ sm}^{-3}$ ,  $R=0,7$  –es korrelációs együtthatóval). A kapott eredmények  $800\text{-}1000 \text{ W/m}^2$  sugárzási tartományban érvényesek.

### 2. A napenergiás hűtés működésének feltételei

A mérési adatok alapján meghatároztam a vizsgált napenergia-hasznosító berendezések és az abszorpciós hűtő munkapont létrejöttének feltételeit.

Bizonyítottam, hogy a napkollektor esetén a munkapont létrejöttének feltétele a minimális hőmérséklet biztosítása a hűtőegység felfűtő része számára, amelynek értékét a hűtőközeg párolgási hőmérséklete határozza meg. Ennek megfelelően, ha a napkollektorban lévő munkafolyadék hőmérséklete nem éri el a hűtőközeg párolgási hőmérsékletét, akkor a hűtőaggregát nem indul be, nem lesz hűtés.

Igazoltam továbbá, hogy a napelem által termelt egyenáram villamos fűtőpatronon keresztül biztosítani tudja a működéshez szükséges minimális hőmérsékletet. Így a napelemmel stabilan működtethető a hűtőaggregát.

### 3. Napenergiával létrehozott légáramlás hűtési célra

Kidolgoztam a villamos hálózattól távoli területeken használt klimatizálási eljárás működési elvét és azonosítottam a jelenség szempontjából meghatározó működési paramétereket. A módszer során a napsugárzásnak kitett felületek mentén a levegő felfelé fog áramlani, és így keltett nyomásváltozás felhasználható az épületben levő meleg levegő eltávolítására. A hatás fizikai magyarázatát kísérletekkel validáltam.

Mérések alapján megállapítottam, hogy a hűtés palackokkal történő megoldásánál a hűtő hatás (párolgás és hőelvonás megvalósulása a belső térben) csak egy bizonyos mérettartományban van. A palackok legkisebb átmérője 16 és 30 mm között kell, hogy legyen. Ha a külső hőmérséklet eléri a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  –ot a kialakuló nyomásváltozás hatására a kisebb sűrűségű légréteg áramlást indít el.

A kialakuló légáramlás  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  külső hőmérséklet felett már intenzív, mely során a levegő áramlási sebessége növekszik, ezáltal jelentősen növeli a belső felületek párolgását, hőelvonását.

### *4. Párolgató hűtés felhasználása klimatizálási célra*

Megvizsgáltam porózus edények hőelvonó képességét párolgó vízzel, mint munkaközeggel. Kismintákon kísérleteket végezve meghatároztam a hőelvonás – párolgási térfogatáram (tömegáram) közötti kapcsolatot. Identifikáltam a folyamat szempontjából fontos paramétereket és további jellemzőket. Ennek során – mérések alapján – a hőmérséklet idő függésére egy parabolikus modellt állítottam fel, amely felhasználható a hőelvonási igényhez tartozó párolgási tömegáram meghatározásához az 1062-1234 g/h tartományban:

$$T(t) = 0,000003 t^2 + 0,0163 t + 36,791.$$

Megállapítottam, hogy a párolgató hűtés porózus anyagokkal (kerámiákkal) alkalmas a klimatizálási célú felhasználásra 8-10 °C hőmérséklet-különbség létrehozásával, mely optimális hőlépcső az emberi szervezet számára.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutató munkám során a napenergiával történő hűtés vizsgálatával kapcsolatban olyan eredményekre jutottam, amelyek segítséget nyújtanak az energiat független, hagyományos energiahordozóktól mentes klimatizálás és hűtés megoldásainak alkalmazásaira.

Megalkottam egy klimatizálási célra használt vákuumcsöves napkollektor hőhasznosítási matematikai modelljét a napsugárzási adatok alapján. Megállapítottam, hogy a kollektorból kivehető hőtéljesítmény térfogatáramtól függő értékeit. Vákuumcsöves napkollektorra adott körülmények között meghatároztam a függvény együtthatóit. Bár a hűtőkör hőmérséklet igénye miatt a munkámhoz elsősorban a vákuumcsöves kollektorok vizsgálata volt fontos, a továbbiakban célszerű lenne ezen módszereket más kollektor típusokra (síkkollektor, koncentrátoros kollektor) is elvégezni.

Kísérleti rendszert állítottam össze napenergiával történő hűtés vizsgálatára. A rendszerben abszorpciós hűtőaggregátot használtam. A kísérleti mérések során vizsgáltam a hűtő működését napkollektorral és napelemmel. A hűtő és a napenergia-hasznosító berendezések munkapontjának jellemzőit vizsgáltam, a hasznosított energia mellett. A kísérleti rendszer egyedi hőcserélők alkalmazásával lett vizsgálva. A napkollektoros üzem létrejöttének feltétele a minimum hőmérséklet létrehozása a felfűtő-egység számára, míg napelemes működtetés esetén a minimális áramerősség biztosítása a fűtőpatron felé. A munkám kezdetekor az épülethűtés teljesítményszintjébe (pár kW nagyságrend) eső napelemes rendszerek beruházási költsége rendkívül magas volt. Mivel az utóbbi időben ezen rendszerek ára jelentősen csökkent, érdemes lenne egy gazdaságossági számítmást, és ez ezen alapuló trendet alkotni, hogy a napelemekkel működtetett kompresszoros hűtőkör milyen napelemes rendszerár mellett ad kedvezőbb beruházási költséget a napkollektor – abszorpciós hűtőkör áránál. Az elektromos rendszernél a napelemek, a kollektoros hűtésnél az abszorpciós egység ára adja a kritikus értéket.

Porózus kerámia edények hőelvonó képességét vizsgáltam homogén folyadékkal. A párolgó víz által létrehozott hűtőhatást mérésekkel vizsgáltam. Kismintákon kísérleteket végezve meghatároztam a hőelvonás – párolgási térfogatáram (tömegáram) közötti kapcsolatot a folyamat szempontjából fontos paraméterek meghatározásával. A mérések során tapasztalt hőmérséklet-különbség alapján megállapítottam, hogy a porózus anyagokkal létrehozott párolgató hűtés alkalmas klimatizálási célra. A továbbiakban érdemes lenne más porózus anyagokkal is vizsgálatokat végezni, mert a hűtőtéljesítmény elsősorban a párolgási sebességen alapszik. Felmerülhet a párolgási sebesség növelése víztől eltérő párolgó közeg alkalmazásával, de ez anyagi szempontból nem valós alternatíva.

Egy gyakorlatban alkalmazott technika alapján kidolgoztam a villamos hálózattól távoli területeken használt EcoCooler nevű hűtési eljárás valós működési elvét és meghatároztam a jelenség szempontjából fontos működési paramétereket. A módszer során a napsugárzásnak kitett felületek mentén a levegő felfelé fog áramlani (a palackok alakja miatt nem jut be meleg levegő a helyiségbe), és az így keltett nyomásváltozás felhasználható az épületben levő meleg levegő eltávolítására. A hatás fizikai magyarázatát kísérletekkel validáltam. Bár az általam elvégzett kísérletek a jelenség főbb jellemzőit (levegő áramlás iránya, hőmérséklet-változások előjele) megmutatták, további kísérletekkel a jelenség pontosabb analízise is elvégezhető, emiatt a paraméterek egy részének (pl, csőátmérő, palackhossz) optimalizálására további vizsgálatokat látok szükségesnek.



## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

### NAPENERGIA HASZNOSÍTÁS LÉGKONDITIONÁLÁSI RENDSZEREKBE

Az utóbbi években a légkondicionáló berendezések nyári energiaigénye megközelíti a téli energiafelhasználás mértékét. Ez a plusz villamos energiaigény a fosszilis tüzelőanyagot felhasználó hőerőművek és a villamos hálózat nagyobb leterheltségét jelenti. Ennek kiváltására egy lehetőség a napenergiával való hűtés, légkondicionálás alkalmazása. A napenergiával történő hűtés előnye, hogy a kereslet és a kínálat egy időbe esik, azaz a legintenzívebb napsugárzás esetén jelentkezik a legnagyobb energiaigény a légkondicionáló berendezések részéről, így nincs szükség energiátárolásra. Ebben az értekezésben bemutatásra került, hogy mekkora egy vákuumcsöves napkollektor által hazai klimatikus viszonyok között hasznosítható energia mennyisége, továbbá hogy ezt a hőenergiát illetve a napelemek által termelt villamos energiát mekkora határfokkal hasznosítja az abszorpciós hűtőkör, mekkora hűtőteljesítmény leadására képes. Továbbá vizsgálat tárgya lett a párologtató hűtés kerámia edények felhasználásával. Alternatív hűtésként a napsugárzás által felhasználható légmozgások hasznosítását vizsgáltam adott eszközön.

A kutatómunkám célja a napenergiával működtetett hűtők alkalmazási lehetőségeinek vizsgálata légkondicionáló rendszerekben. A kutatási célok megvalósítása érdekében áttekintettem a napenergia-hasznosítás, a hűtés és a légkondicionálás szakirodalmát, ahol arra a megállapításra jutottam, hogy az eddigi kísérletek nem tartalmaznak alkalmazási példát a háztartási célú szoláris hűtés megvalósítására. Továbbá a kerámiákkal történő párologtató hűtés témakörben sem állt rendelkezésre részletes irodalom. A médiában talált palackos hűtés felkeltette az érdeklődésemet, mely működésére szakirodalomban nem találtam leírást. Mérésekkel igazoltam a bemutatott technika valós fizikai jelenségét.

A mérések alapján meghatároztam egy vákuumcsöves napkollektor által leadott hőteljesítmény értékeit egy tipikus nyári napon, és egy napelem segítségével felfűtött abszorpciós hűtőkör hűtőteljesítményét. Minden esetben a hőcserélőknél alkalmazott munkaközeg víz volt. A leadott teljesítmények meghatározásánál (mindkét esetben) két paraméter befolyásolta a kimenő értékeket: a térfogatáram és a hőmérséklet-különbség. A mérések alapján megállapítható, hogy napkollektorral illetve napelemmel közvetlenül biztosítható a szükséges energia az abszorpciós hűtő számára, azonban a hűtőközeg elpárologtatásához szükséges minimális hőmérsékletet biztosítani kell.

Kisminták alapján mérésekkel vizsgáltam a párologtató hűtés lehetőségeit kerámia edényekkel. Hőkamerával vizsgáltam a kialakuló hőmérséklet-eloszlásokat. A víz párolgását felhasználva igazoltam, hogy kedvező hűtést lehet ezzel a megoldással létrehozni. A mérések alapján bizonyítottam, hogy a palackos hűtőhatás kedvezően alkalmazható kiegészítő elemként légkondicionáló rendszereknél.

A bemutatott új tudományos eredmények megkönnyíthetik a gyakorló mérnökök munkáját a napenergiás hűtés tervezésében.

## 7. SUMMARY

### SOLAR ENERGY UTILIZATION IN AIR-CONDITIONING SYSTEM

Nowadays in summer periods the air-conditioning systems' energy consumption is comparable to the energy consumption of the heating systems in winter. This energy demand means that the fossil fuel power plants are producing more power and the electric grid will be more load in Hungary.

For the problem there is an alternative solution as the solar cooling, solar energy utilization for air conditioning systems. The main advantage of the solar cooling is that the energy demand and the energy production are at the same time. So we do not need to store the energy. In this thesis a vacuum tube collector's energy utilization (operated during summer), and an absorption cooler working with solar energy are presented. By the way an evaporation cooling is measured with ceramics. Alternative solution is measured by solar energy via air moving's utilization at a bottle device.

My research work's aim was the measuring of solar cooling's applications in air-conditioning system. For aims of research work I studied the solar energy utilizations, the cooling technologies and the air-conditioning literatures. These papers do not give final solutions for solar cooling in domestic purposes. In theme of ceramic evaporation cooling there are not enough data. In media it is showed a simple cooling technology with bottles, which is not in the literature.

Based on measuring I have calculated a vacuum tube collector's heat performance on a typical sunny day and an absorption chiller's cooling performance heated by a solar cell according to my measuring data. By both measuring the transfer fluid was water. The heating and the cooling performances are depended on two parameters: the fluid flow rate and the difference of temperatures. The solar cells and collectors are able to ensure the energy needed directly in the necessary time for the absorption cooler, but it needs to ensure the minimal temperature for the boiler.

According to the little samples I analysed the evaporation cooling's possibilities with ceramics. I measured the temperatures' changings with infra camera. Based on water evaporation I showed that we can do a good cooling to solve it. According to measuring data I could show that the cooling with bottles is applicable by air-conditioning systems within a real temperature range.

The showed new scientific solutions could be easy the engineers' work by solar cooling and air-conditioning planning.

## 8. MELLÉKLETEK

### M1: Irodalomjegyzék

1. Alaksza Zs. (1981): Légkondicionálás az iparban, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
2. Al-Alili A., Hwang Y., Radermacher R., Kubo I. (2010): Optimization of a solar powered absorption cycle under Abu Dhabi's weather conditions, *Solar Energy* 84/12., pp. 2034–2040.
3. Bakos A. (1987): Épületgépészet a mezőgazdaságban, Mezőgazdasági Könyvkiadó és Műszaki Könyvkiadó, Budapest
4. Balázs Gy. (1984): Építőanyagok és kémia, Tankönyvkiadó, Budapest
5. Barótfi I. (szerk., 1993): Energiafelhasználói kézikönyv, Környezet-technika Szolgáltató Kft., Budapest
6. Beke J. (2000): Műszaki hőtan mérnököknek, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
7. Bergmann H., Trieglaff K., Bär J., Stange R. (1965): Fizikai-kémiai alapismeretek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
8. Budó Á. (1978): Kísérleti fizika I. kötet, Tankönyvkiadó, Budapest
9. Calise F., Dentice d'Accadia M., Palombo A. (2010): Transient analysis and energy optimization of solar heating and cooling systems in various configurations, *Solar Energy* 84., pp. 432-449.
10. De Angelis A., Saro O., Truant M. (2017): Evaporative cooling systems to improve internal comfort in industrial buildings, *Energy Procedia* 126 (201709), pp. 313–320.
11. Eicker U. (2003): *Solar Technologies for Buildings*, Wiley
12. Eicker U., Pietruschka D. (2009): Design and performance of solarpowered absorption cooling systems in office buildings. *Energy and Buildings* 4, pp. 81–91.
13. Farkas I. (szerk., 2003): Napenergia a mezőgazdaságban, Mezőgazda Kiadó, Budapest
14. Fong K.F., Chow T.T., Lee C.K., Lin Z., Chan L.S. (2010): Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city, *Solar Energy* 84., pp. 227-244.
15. Fonyó Zs., Fábry Gy. (2004): Vegyipari művelettani alapismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest
16. Foster R., Ghassemi M., Cota A. (2009): *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*, CRC Press
17. Gaál P., Gál P., Veres Cs. (2016): Szabadhűtés – energiatakarékos, környezetbarát megoldás, *Energiagazdálkodás*, 1-2.sz., 12-13.o.
18. Gist N. (2016): How to heat and cool your home without electricity, (Lekérdezés időpontja: 2017.02.20.) (<https://permaculturenews.org/2016/07/04/heat-cool-home-without-electricity/>)
19. Goswami D. Y., Kreider J. F. (2000): *Principles of solar engineering*, Taylor & Francis

20. Gyurcsovics L. (1982): A napenergia hasznosítása az épületgépészetben, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (hűtés napenergiával: 311-322. o.)
21. Gyurcsovics L. (1987): Hőtermelés napsugárból, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
22. Hackl M. (szerk., 2015): A magyar villamosenergia-rendszer adatai 2014., MAVIR Zrt., Budapest
23. Hall C., Hoff W. D., Nixon M. R. (1984): Water movement in porous building materials -VI. Evaporation and drying in brick and block materials, Building and Environment, Volume 19, Issue 1, pp. 13-20.
24. Henning H-M., Albers J. (2004): Decision Scheme for the Selection of The Appropriate Technology Using Solar Thermal Air-Conditioning, Guideline Document, IEA Solar Heating and Cooling
25. Henning H-M. (2007): Solar assisted air-conditioning of buildings – an overview, Applied Thermal Engineering, Volume 27, Issue 10, July, pp. 1734-1749.
26. Henning H-M., Motta M., Mugnier D. (edited, 2013): Solar Cooling Handbook, A guide to solar assisted cooling and dehumidification processes, Ambra, Vienna
27. Horváth P. (szerk., 2012): A magyar villamosenergia-rendszer (VER) 2011. évi statisztikai adatai, Magyar Energia Hivatal, Budapest
28. Izquierdo Millán M., Hernández F., Martín E. (1997): Solar cooling in Madrid: energetic efficiencies, Solar Energy 60, pp. 367–377.
29. Jordan R.C., Liu B.Y.H. (edited, 1977): Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers Inc., New York
30. Kacz K., Neményi M. (1998): Megújuló energiaforrások, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest
31. Kiss Gy., Sági Zs. (2016): Klímastratégia kidolgozásához kapcsolódó módszertan- és kapacitásfejlesztés, valamint szemléletformálás, KEHOP-1.2.0-15-2016-00001, tananyag
32. Kohlenbach P., Jakob U. (2014): Solar cooling, The Earthscan expert guide to solar cooling systems, Routledge, Abingdon
33. Komondy Z., Halász L. (1970): Hűtőgépek, Tankönyvkiadó, Budapest
34. Kostyák F. (2013): Evaporatív léghűtőkről, Magyar Installateur, 2013/1., 34-36.o.
35. Kószó J. (2003): A napos ház, Szukits Könyvkiadó, Szeged
36. Kovács Z. (szerk., 2018): Szabolcs-Szatmár-Bereg megye klímastratégiája, Nyíregyháza
37. Kreider J. F., Kreith F. (1982): Solar Heating and Cooling, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, D.C.
38. Kunz D., Müller H., Soltmann C.: Patent landscape report on solar cooling technologies, WIPO, 2012.

39. Lloyd A. (2008): Steinway installs solar-powered air conditioning, Renewable Energy December 29. (<http://www.treehugger.com/>) (Lekérdezés időpontja: 2013.04.21.)
40. Lyman A. H. (edited, 1982): Sunset Homeowner's Guide to Solar Heating and Cooling, Sunset Books, Lane Publishing, Menlo Park (California)
41. Mendes L.F., Collares-Pereira M., Ziegler F. (1998): Supply of cooling and heating with solar assisted heat pumps: an energetic approach, International Journal of Refrigeration 21 (2), pp. 116–125.
42. Meyer F. (2016): Kühlgeräte mit Zeolith und Wasser, BINE Informationsdienst, projectinfo 16/10, ([www.bine.info](http://www.bine.info)) (Lekérdezés időpontja: 2016.01.25.)
43. Ming Q., Hongxi Y., Archer D.H. (2010): A solar thermal cooling and heating system for buildings: Experimental and model based performance analysis and design, Solar Energy 84., pp. 166-182.
44. Moran M.J., Shapiro H.N. (2007): Fundamentals of Engineering Thermodynamics, Wiley
45. Porumb B., Ungureşan P., Tutunaru L. F., Şerban A., Balan M. (2016): A Review of Indirect Evaporative Cooling Technology, Energy Procedia, Volume 85, January, pp. 461-471.
46. Sabady P.R. (1980): A napenergia építészeti hasznosítása, Műszaki Könyvkiadó, Budapest
47. Szalay B. (1966): Fizika, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (430-433.o.)
48. Tóth L. (2011): Települési energetika, Szent István Egyetem ([www.tankonyvtar.hu](http://www.tankonyvtar.hu))
49. Várszegi T.: Frisbee – hűtéstechnika, (Lekérdezés időpontja: 2017.04.25.) ([www.frisbee.szie.hu](http://www.frisbee.szie.hu))
50. Víg P., Farkas I. (2013): Vákuumcsöves kollektor hatásfokának függése a térfogatáramtól, Magyar Energetika XX. (5), 10-12. o.
51. Watt J. R. (1986): Drip Cooler Progress In: Evaporative Air Conditioning Handbook, Springer, Boston, MA
52. Zsebik A., Csata Zs., Torma J., Váradi Sz., Moumoulidis I. (2010): Fűtés és hűtés napenergiával, Energiagazdálkodás, 2. szám, 3-8. o.

*Internetes források*

53. Altenergymag weboldal, [http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue\\_number=07.08.01&article=ponds](http://www.altenergymag.com/emagazine.php?issue_number=07.08.01&article=ponds) (Lekérdezés időpontja: 2011.08.30.)
54. AZEVAP History of evaporative cooling technology, <http://www.azevap.com/EvaporativeCooling/historytechnology.php> (Lekérdezés időpontja: 2018.05.10.)
55. Breezair, párologtató hűtés, <https://www.breezair.com.au/how-evaporative-works/> (Lekérdezés időpontja: 2018.09.16.)
56. Climatelab weboldal, [http://climatelab.org/Solar\\_Ponds/](http://climatelab.org/Solar_Ponds/) (Lekérdezés időpontja:

- 2011.06.10.)
57. Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék, A napsugárzás mérése,  
<http://meteor.geo.klte.hu/hu/doc/> (Lekérdezés időpontja: 2011.06.10.)
  58. Ecocooler, (átalakított) <https://www.clipzui.com/video/l3e4f4g3d4w5p3k375g513.html>  
(Lekérdezés időpontja: 2018.07.03.)
  59. Ecocooler, <http://www.homecru.com/eco-cooler-zero-electricity-cooler-uses-recycled-plastic-bottles-to-beat-the-summer-heat/47030/> (Lekérd. időp.: 2018.07.03)
  60. Ecocooler, <https://www.stumagz.com/eco-cooler-a-device-made-from-just-plastic-bottles-consumes-zero-electr/> (Lekérdezés időpontja: 2018.07.03.)
  61. Grameen Intel Social Business Ltd. video-ja az Ecocooler-ről,  
<https://www.youtube.com/watch?v=1Qyb2axBQzQ> (2016. június), (Lekérdezés időpontja: 2017.02.20.)
  62. Invensor hűtéstechnika, <http://www.invector.de> (Lekérdezés időpontja: 2016.02.09.)
  63. Naplopó Kft. Weboldala, <http://www.naplopo.hu/napsug.html/> (Lekérdezés időpontja: 2011.06.10.)
  64. NASA weboldala,  
[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RenewableEnergy/Images/solar\\_two.jpg](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/RenewableEnergy/Images/solar_two.jpg)  
(Lekérdezés időpontja: 2011.08.10.)
  65. Országos Meteorológiai Szolgálat, <http://www.met.hu/> (Lekérdezés időpontja: 2017.06.10.)
  66. SBP weboldala, <http://www.sbp.de/> (Lekérdezés időpontja: 2011.08.30.)
  67. Schottsolar technológiája, <http://www.schottsolar.com/> (Lekérdezés időpontja: 2011.08.30.)
  68. Simple Air cooler, <https://www.youtube.com/watch?v=hCJtjGxtrew> (Lekérdezés időpontja: 2018.07.03.)
  69. Solabcool hűtéstechnika, <http://www.solabcool.com> (Lekérdezés időpontja: 2017.11.28.)
  70. Solar map, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmapi/> (Lekérdezés időpontja: 2011.08.30.)
  71. SorTech hűtéstechnika <http://www.sortech.de> (Lekérdezés időpontja: 2016.02.09.)
  72. Stacy Liberatore, Dailymail, Ecocooler,  
<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3635710/How-cool-apartment-free-Electricity-free-DIY-aircon-uses-old-plastic-bottles-used-used-25-000-Indian-homes.html> (2016. június 10.) (Lekérdezés időpontja: 2017.02.20.)
  73. Stirlingengines weboldal, <http://www.stirlingengines.org.uk/sun/sola3.html>  
(Lekérdezés időpontja: 2011.08.30.)
  74. Tecnocooling Kft csarnokhűtés, <http://www.perfectcool.hu/> (Lekérd. időp.: 2018.06.10)
  75. Tecnocooling Kft., csarnokhűtés video-ja,  
[https://www.youtube.com/watch?v=S6HH\\_IeAHlY](https://www.youtube.com/watch?v=S6HH_IeAHlY), (Lekérd. időpontja: 2018.05.10.)
  76. Zeo-Tech hűtéstechnika, <http://www.zeo-tech.de> (Lekérdezés időpontja: 2016.01.25.)

## **M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk**

### *Lektorált cikk világnyelven*

1. **Szilágyi A.**, Seres I.: Solar energy utilization in solar air conditioning systems, Mechanical Engineering Letters, Szent István University, Gödöllő, 2012., Vol. 8., pp. 61-67.
2. **Szilágyi A.**, Farkas I., Seres I.: Development of a solar assisted absorption cooler, Mechanical Engineering Letters, Szent István University, Gödöllő, 2016., Vol. 14., pp. 26-32.
3. **Szilágyi A.**, Farkas I., Seres I.: Evaporation cooling with ceramics in air-conditioning system, Journal of Scientific and Engineering Research (*megjelenés alatt*)

### *Lektorált cikk magyar nyelven*

4. **Szilágyi A.**, Seres I., Farkas I.: Párolgató hűtés kerámiákkal, Energiagazdálkodás, 59. évf., 2018., 3-4. szám, 34-38.o.
5. **Szilágyi A.**, Farkas I., Seres I.: Napkollektorokkal elérhető hőteljesítmény nyári időszakban, Energiagazdálkodás, 59. évf., 2018., 6. sz., 2-5. o.
6. **Szilágyi A.**, Seres I., Farkas I.: Szoláris klimatizálás lehetőségei az állattartó telepeken, Mezőgazdasági Technika, 2018. (*megjelenés alatt*)

### *Nemzetközi konferencia kiadvány*

7. **Szilágyi A.**, Seres I.: Solar cooling with absorption chiller, 10th International Multidisciplinary Conference, College of Nyíregyháza, 2013. 05. 22-24., pp. 168-170.

### *Magyar nyelvű konferencia kiadvány*

8. **Szilágyi A.**, Seres I.: Hűtés napenergiával a hazai klimatikus viszonyokat figyelembe véve, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2013, Debreceni Egyetem, Debrecen, 2013.06.05., 198-205. o.
9. **Szilágyi A.**, Seres I.: Abszorpciós hűtővel működtetett légkondicionáló berendezés vizsgálata napenergia felhasználásával, Műszaki Tudomány az Észak-kelet Magyarországi Régióban 2016, Miskolci Egyetem, Miskolc-Egyetemváros, 2016.05.25., 622-630. o.

### *Nemzetközi konferencia abstract*

10. **Szilágyi A.**, Seres I.: Solar cooling with solar cells, 18th Workshop on Energy and Environment, Szent István University, Gödöllő, 2012.11.23., p.19.
11. **Szilágyi A.**, Seres I.: Solar cooling with absorption cooler in Hungary, BioPhys Spring 2014, Slovak University of Agriculture in Nitra, Nitra, 2014.06.17-19., pp. 118-120.
12. **Szilágyi A.**, Seres I.: Analysis the performance of absorption cooling system by solar energy, előadás, 20th Workshop on Energy and Environment, Szent István University, Gödöllő, 2014.12.05., p.11.
13. **Szilágyi A.**, Seres I.: Possibility of solar cooling, előadás, 22th Workshop on Energy and Environment, Szent István University, Gödöllő, 2016.12.02., p.7.

*Magyar nyelvű konferencia abstract:*

14. **Szilágyi A.:** Hűtési energiaszükséglet biztosítása napenergia felhasználásával,  
11. Nyíregyházi Doktorandusz Konferencia, Nyíregyházi Egyetem, Nyíregyháza,  
2017. 12. 01., 16.o.



## 9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek: Dr. Farkas István professzor úrnak és Dr. Seres István docens úrnak, hogy lehetőséget adtak disszertációm elkészítésére, valamint hasznos tanácsaikkal irányították kutatómunkámat.

Köszönettel tartozom Dr. Lengyel Antal, Dr. Kerekes Benedek tanár uraknak és Dr. Kovács Zoltán docensnek a doktori iskola elvégzése során nyújtott hasznos tanácsaikért és segítségükért.

Köszönöm a Környezetipari Rendszerek Intézet és azon belül a Fizika és Folyamatirányítási Tanszék munkatársainak a kísérleteim előkészítésében nyújtott segítségüket.

Végül, de nem utolsó sorban szeretnék köszönetet mondani feleségemnek, kisfiamnak, kislányomnak, szüleimnek, hogy támogattak a munkám során. Édesapámnak az egyedi készülékek elkészítéséért.