

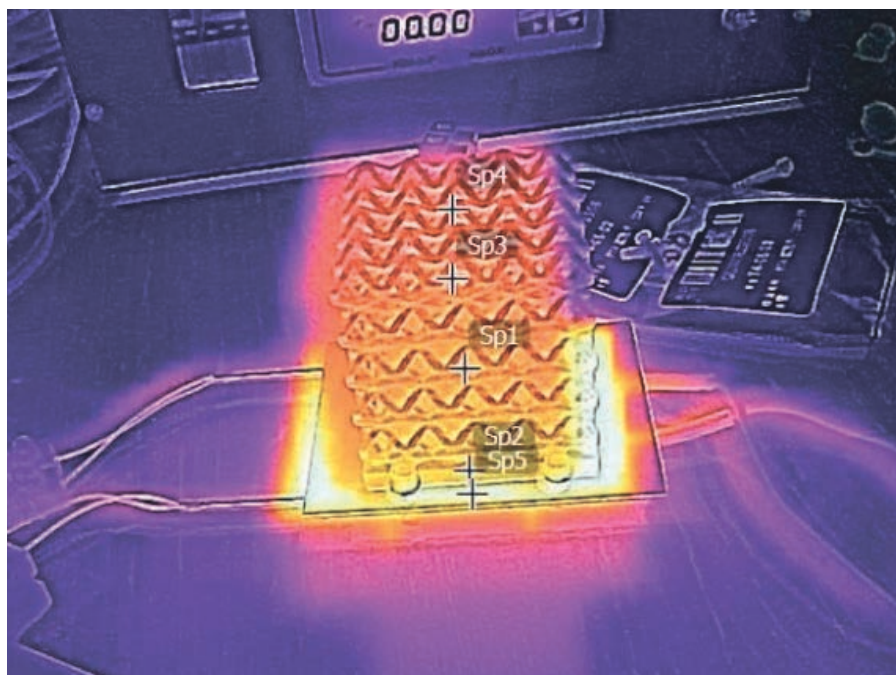
ENERGIAGAZDÁLKODÁS

Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

65. évfolyam 2024. különszám

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat

1. Magyar Mobil Hőtároló Workshop





Komplex környezetvédelmi szolgáltatásokkal az Ön eredményességéért!



KÖRNYEZETVÉDELEM



**ANALITIKAI
LABORATÓRIUM**



IPARBIZTONSÁG



KÁRMENTESÍTÉS



**ANYAGVIZSGÁLÓ
LABORATÓRIUM**



SZOFTVERFEJLESZTÉS

Környezetvédelmi feladatok? Kármentesítés, iparbiztonság, munkavédelem? Vagy munkáját segítő egyedi, szakmai szoftverek? Laborvizsgálatok? Gondosan felépített, egymást kiegészítő szolgáltatásainkkal segítjük munkáját, akár a jogszabályi megfelelésről, akár eredményei, gazdasági hatékonysága növeléséről legyen szó!

Szakértelem – Megbízhatóság – Komplex megoldások – Akkreditált tevékenységek

Keressen minket bizalommal!

IMSYS Mérnöki Szolgáltató Kft.



A részletekért keresse fel az IMSYS Kft. weboldalát!

+36 1 430 0014



imsys@imsys.hu



1033 Budapest, Mozaik utca 14/a



ENERGIAGAZDÁLKODÁS

Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

65. évfolyam 2024. különszám

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat

Főszerkesztő:

Dr. Gróf Gyula

Vendégszerkesztő:

Dr. Imre Attila

Olvasó szerkesztő:

Dr. Groniewsky Axel

Szerkesztőség vezető:

Kaposvári Regina

Szerkesztőbizottság:

Dr. Balikó Sándor, Dr. Bihari Péter,
Czinege Zoltán, Dr. Csűrök Tibor,
Dr. Farkas István, Juhász Sándor,
Korcsog György, Kövesdi Zsolt,
Dr. Laza Tamás, Mezei Károly,
Molnár Ferenc, PhD, Móczár Botond Máté,
Dr. Nagy Valéria, Németh Bálint,
Péter Szabó István, Romsics László,
Dr. Serédiné Dr. Wopera Ágnes,
Dr. Steier József, Dr. Stróbl Alajos,
Szabó Benjámín István, Dr. Szilágyi Zsombor,
Vancsó Tamás, Dr. Zsebik Albin

Honlap szerkesztő:

Kierblewski Marius

www.ete-net.hu

Kiadja:

Energiagazdálkodási
Tudományos Egyesület
1091 Budapest, Üllői út 25., IV. em. 420-421.
Tel.: +36 1 353 2751,
+36 1 353 2627,
E-mail: titkarsag@ete-net.hu

Felelős kiadó:

Dr. Kiss Csaba

A szerkesztőség címe:

BME Energetikai Gépek és
Rendszerek Tanszék
1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3.
D épület 208 sz.
Telefon: +36 1 463 2613.
Telefax: +36 1 353 3894.

E-mail: eng@ete-net.hu

Megjelenik kéthavonta.
Előfizetési díj egy évre: 7500 Ft
Egy szám ára: 1250 Ft

Előfizethető a díj átutalásával a
10200830-32310267-00000000
számlaszámra a postázási és számlázási cím
megadásával, valamint az
„Energiagazdálkodás” megjegyzéssel
ISSN 0021-0757

Tipográfia:

Büki András
bukiantdras@t-online.hu

Nyomdai munkák:

EFO Nyomda
www.efonyomda.hu

Lapunkat rendszeresen
szemléli a megújult

 OBSERVER

www.observer.hu

TARTALOM • CONTENTS • INHALT

| | |
|---|----|
| Tartalom | 1 |
| Content | |
| Inhalt | |
| Imre Attila | |
| Előszó | 3 |
| Foreword | |
| Vorwort | |
| Pirityi László, Németh Bence, Feczkó Tivadar | |
| A Thermofoam Kft. hullámkarton üzemének szolár meghajtású kísérleti abszorpciós hűtőrendszere | 5 |
| Solar powered experimental absorption cooling system of corrugated board plant of Thermofoam Ltd | |
| Das solarbetriebene experimentelle Absorptionskühlsystem des Wellpappenwerks der Thermofoam GmbH | |
| Balogh Péter, Pintér Gábor, Kovács András, Németh Kornél | |
| Ipari szimbiózis jellegű rendszerek megvalósításának lehetséges módjai | 8 |
| Possible ways to establish industrial symbiosis systems | |
| Optionale Aufbau von industriellen Symbiose-Systemen | |
| Kovács András | |
| Fázisváltó anyagok kémiai biztonsági értékelése | 13 |
| Chemical safety assessment of phase changing substances | |
| Stoffsicherheitsbeurteilung von Phasenverändernden Stoffen | |
| Gyenis János, Feczkó Tivadar | |
| Fázisváltó hőtároló makrokapszulák, tartályok és hőcserélők, mint a zöld és hulladék energiák hasznosításának eszközei | 16 |
| Macrocapsules, containers and heat exchangers with phase change materials for utilizing green and waste energy | |
| Macrokapsel, Container und Wärmetauscher von Phasenwechselmaterialien zur Verwendung der Öko- und Abfallenergien | |
| Németh Bence, Ferencz Mónika, Kovács Sándor, Trif László, Lendvai József, Kolay Kovács Ádám, Király Krisztina, Feczkó Tivadar | |
| Fázisváltó hőtároló anyagok előállításuk hulladék zsírból és használt növényi olajból | 26 |
| Preparation of phase change materials from waste fat and used vegetable oils | |
| Herstellung von Phasenwechselmaterialien aus Abfallfett und gebrauchtem Pflanzenöl | |
| Fehér Anna, Kovács Róbert, Kun Balog Attila, Maróti János Endre, Orbulov Imre Norbert, Sztankó Krisztián, Szűcs Mátyás, Balog Róbert, Takács Donát | |
| Szintaktikus fémhabok termikus és mechanikai tulajdonságai, valamint alkalmazhatóságuk fázisváltó hőtároló rendszerekben | 34 |
| Thermal and mechanical properties of metal syntactic foams, and their applicability in phase-change heat storage systems | |
| Thermische und mechanische Eigenschaften von syntaktischen Metallschäumen und ihre Anwendbarkeit in Phasenwechsel-Wärmespeichern | |

A beküldött kéziratokat nem őrizük meg, és nem küldjük vissza. A szerkesztőség fenntartja a jogot a beküldött cikkek rövidítésére és javítására. A szakfolyóiratban megjelent cikkek nem feltétlenül azonosak a szerkesztők vagy az ETE vezetőségének álláspontjával, azok tartalmáért az írójuk felelős.

2021-2.1.2-HŐ-2021-00004

"Hulladékhő tárolására és
szállítására alkalmas
hőtároló egység
kifejlesztése"

Andrássyné Farkas Rita, Andrásy Zoltán
Hőátadó- és fogadó állomások tervezése gépészeti, villamos és
szabályozástechnikai szempontok alapján 40
*Design of heat provider and receiving stations based on mechanical,
electrical and control engineering aspects*
*Die Planung von Wärmeübergabe und empfangsstationen in mechanischer,
elektrischer und und steuerungstechnischen Aspekten*

Pap Tímea, Erzsíák Bence, Vallus Gábor, Imre Attila
Hőhasznosítási esettanulmányok mobil hőkonténeres hulladékhő-szállításhoz
és felhasználáshoz 45
*Case studies for the transportation and utilization of waste heat
by mobile heat storage devices*
*Fallbeispiele für den Transport und die Nutzung von Abwärme
durch mobile Wärmespeicher*

Götz Sándor, Környey Balázs, Sztilkovics Szávó
Merre úszik a hőhajó Londonban? 55
Which way the heatbarge floats in London?
In welche Richtung schwimmt der Wärmekahn in London?

NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL
AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ PROGRAM

A folyóirat szerkesztésénél különös figyelmet fordítottunk
a környezetvédelmi szempontokra!

Konzorcium tagjai:

Kapcsolat:

Thermofoam
Csomagolástechnikai
Kft.



<https://www.thermofoam.hu/>

Pirityi László János
pirityi.laszlo@thermofoam.hu

BME GPK Energetikai
Gépek és Rendszerek
Tanszék



<https://www.energia.bme.hu/>

Dr. Imre Attila
imreattila@energia.bme.hu

Heatventors Kft.



<https://www.heatventors.com/>

Dr. Andrásy Zoltán
zoltan.andrassy@heatventors.com

IMSYS Kft.



<https://imsys.hu/>

Kovács András
kovacs.andras@imsys.hu

Pannon Egyetem,
Körforgásos Gazdaság
Egyetemi Központ



Pannon Egyetem
University of Pannonia

<https://uni-pannon.hu/>

Dr. Pintér Gábor
pinter.gabor@pen.uni-pannon.hu

HUN-REN
Természettudományi
Kutatóközpont,
Anyag- és
Környeztkémiai
Intézet



<https://www.ttk.hun-ren.hu/>

Dr. Feczkó Tivadar,
feczko.tivadar@ttk.hu

MAHART-
Szabadkikötő Zrt.



<https://www.mahartfreeport.hu/>

Környey Balázs
kornyei.balazs@mahart.hu

Előszó – 1. Magyar Mobil Hőtároló Workshop

Prof. Dr. Imre Attila^{1,2}, tanszékvezető egyetemi tanár

¹ BME GPK Energetikai Gépek és Rendszerek tanszék

² HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont

Különböző ipari, mezőgazdasági folyamatok magas hőmérsékleten játszódnak vagy hőkibocsátással járnak. Az itt keletkező vagy megmaradó, de helyben fel nem használt hőt maradványhőnek vagy hulladékhőnek nevezzük. A Heat Roadmap Europe (<https://heatroadmap.eu/>) szerint csak a villamosenergia előállításnál (európai szinten) annyi hulladékhő marad, amiből Európa teljes fűtési igénye megoldható lenne. A gond az, hogy bár hőre szükség van, de általában nem akkor és/vagy nem ott, ahol ez az ipari hulladékhő keletkezik. Ilyen hőkibocsátók – különböző hőmennyiséggel és kibocsátási hőmérséklettel – pl. vasöntödék, cementgyárak, kőolajfinomítók, polietilén-extrudáló üzemek, atomerőművek, desztillálók, stb. Ezek egy részénél (pl. pálinkafőzők-desztillálók) a kibocsátott hulladékhő kicsi, így nem éri meg elszállítani hagyományos módon (csővezetéken), míg más esetekben – pl. atomerőmű – bár a kibocsátott tercier víz nagy mennyiségű hőt hordoz, de alacsony hőmérséklete miatt nem használható fel. Mindemellett számtalan hulladékhő-kibocsátó létezik, ahol a hőmennyiség és a hőmérséklet is megfelelően nagy/magas ahhoz, hogy érdemes legyen vele foglalkozni.

A projekt célja egy könnyen szállítható hőtároló konténer elkészítése. A konténer a hőhasznosítás helyén a fűtőkörbe kapcsolva a kazánt helyettesítve biztosítaná a fűtést.

A projektben egy több egységes, összességében kb. 10 köbméteres tárolórendszer (hőkonténer) építettünk meg, ez valamivel kevesebb, mint 10 tonna hőtároló anyagot tartalmaz. A hő tárolása egy megfelelő hőmérsékleten olvadó/szilárduló fázisváltó anyagban (illetve a tesztek folyamán különböző anyagokban) történik. A hőtároló anyaga a fázisváltás hőmérsékletén – azaz hőmérséklet-változás nélkül – képes az anyag nagy mennyiségű hőt leadni vagy felvenni. A rendszer „feltöltése” egy maradványhő-kibocsátó telephelyen (ez esetben ez a Thermofoam Kft. felsőpakonyi üzemének egyik csarnokában), míg a „kisütése” a közeli óvodában történik; a választott anyag fázisátalakulási hőmérséklete kellően magas ahhoz, hogy az óvoda fűtési rendszere működtethető legyen a konténerrel. A fázisváltó anyagoknak széles köre áll rendelkezésünkre; ezek közt olyanok is vannak, amelyekből 1 kg a fázisváltáskor akár 200 kJ hő elnyelésére vagy kibocsátására is képes.

Egy közepesen szigetelt háznál a fűtésigény átlagosan 30-40 W/m³. Ez a teljes házra (120 m², 2,7 m belmagasság) 10-13 kW, ami óránként 10-13 kWh, azaz 36-47 MJ. A veszteségeket is figyelembe véve ezt 200-250 kg fázisváltó anyaggal lehetne biztosítani. Egy ilyen házat (ha a kazán helyére egy 10 tonna szilárd hőtároló konténer kerül), akár 40-50 óráig tudnánk fűteni. Napi két-három cserével (ami pl. egy üzletnél vagy közintézménynél megoldható) akár már kisebb intézmények is fűthetők lennének egy ilyen konténerrel.

Fontos, hogy a rendszer felskálázható legyen, ezen kívül az is fontos, hogy a feltöltésnél-kisütésnél ne (vagy csak minimális mértékben) legyen anyagmozgatás és rakodás. A fázisváltó anyag a

hőtárolóban marad, csak a hőt hozzuk ki belőle. A felskálázott hőtárolók (pl. 70 tonnás vasúti tartálykocsiból álló szerelvények, vagy 1000-10000 tonnás uszályok) közvetlenül a hőkibocsátó feltöltő-állomásáig, illetve a hőfelhasználó kazánházi bekötéséig jutnának el.

Példaként, egy közepes fázisváltó anyagnál a kisütési, feltöltési és szállítási veszteségek után 150 kJ/kg hőt lehetne kisütni. A 10 tonnás konténer esetén folyamatos fűtést véve kb. 18 kW-os hőteljesítményt tud biztosítani, egy napig. 30 W-os átlagos légköbméterenkénti fűtési igénnyel összesen kb. 218 m², 2,7 m magas lakrészt lehetne így fűteni, ami kb. 4 darab 50 m²-es lakás fűtésére elég. Ez elég kevés, de vessünk egy pillantást az 1. táblázatra, ami a nagyobb tárolókat mutatja.

1. táblázat. Különböző méretű hőtárolók jellemzői

| Tároló méret (tonna) | Típus | Fűthető négyzetméter | Fűthető „átlaglakás” (50 m ² alapterületű), egy nap |
|----------------------|-------------------------------|----------------------|--|
| 10 | Egy konténer | 210 | 4 |
| 70 | Egy vasúti tartálykocsi | 1500 | 30 |
| 700 | 10 tartályból álló szerelvény | 15000 | 300 |
| 1000 | Kis folyami uszály | 21400 | 428 |
| 10000 | Nagy folyami uszály | 214000 | 4287 |
| 100000 | Tengeri „tanker” | 2140000 | 42860 |

Így például egy vasúti tartálykocsiból kiépített mobil hőtárolóval új építésű, jól hőszigetelt lakás esetén 30 lakás napi, vagy kb. 4 lakás heti fűtése oldható meg (utóbbi esetben nagyobb lesz a hőveszteség a hosszabb távú tárolás miatt). Ez méretre egy kis vasútállomás, azaz egy olyan vonalon, ahol egy nagyobb hőkibocsátó található, a környék kisebb vasútállomásaihoz egy „hővonat” hordhatná a téli fűtéshez szükséges hőt; hetente fordulna, minden állomáson leakasztaná az új tartályt és felvenné a régijt. Három nagy folyami uszályal – megfelelő hőkibocsátó, pl. egy olajfinomító esetében – egy kisebb városrész fűtése is megoldható lenne (egy uszály feltöltődne, egy kisülne, egy pedig úton lenne a két hely között). Ilyen megoldás lehetne kibocsátóként a százhalombattai finomító, illetve felhasználóként a Kelenföldi Fűtőmű körzetének egy része, illetve a csepeli területen elhelyezkedő – vagy esetleg a későbbiekben épülő – épületek (mindkettő terület hozzáférhető a Dunáról).

Ahhoz, hogy egy sikeres pilotból ténylegesen felhasználható technológia legyen, több problémát is meg kell oldani. Emellett több „elméleti” kutatási projekt is folya:

- Össze kell gyűjteni a nagyobb hazai, illetve régiós hőkibocsátókat, amelyek megfelelő hőmérsékletű és mennyiségű hulladékhőt bocsátanak ki; megfelelő közút, vasút vagy hajózási út közvetlen közelében vannak és ezen az úton „nem túl távol” (ennek definiálása szintén a projekt feladata lesz) található egy megfelelő hőfelhasználó (pl. fűtendő ipartelep, vízparti raktár, stb.)
- Minden esethez találni kell olyan szállítási módszereket, ahol a szállítás energia-szükséglete és a járulékos energia-szükségletek kellően alacsonyak, így az energiamérleg nagy mértékben pozitív (ha éppen csak az, akkor valószínűleg nem érdemes vele foglalkozni).
- Világos, hogy egy 10 tonnás hőtárolóval a hőhasznosítás – a magas járulékos költségek miatt – még veszteséges lenne. Viszont nagyobb tárolóknál már a fajlagos költségek csökkennének. Olyan scenáriókat kell találni és elemezni, amelyekben az ilyen típusú hőhasznosítás nem, vagy csak kis mértékben veszteséges. Ehhez figyelembe kellene venni azt, hogy ez a fűtéstípus „karbonmentes”; amennyiben a szállítása az, így a széndioxid-kibocsátás akár jelentősen is csökkenthető.
- Bizonyos esetekben a szélsőséges mértékű (mennyiségű vagy hőmérsékletű) hulladékhő-kibocsátás környezetkárosító is lehet (pl. élővíz hőmérsékletének jelentős emelkedésével járhat); az ilyen esetekben a hő elszállítása még akkor is fontos lehet, ha ez gazdaságosan nem tehető meg.
- Bár első ránézésre a hő látszatra csak télen lenne eladható (fűtésre); a projekt részeként megmutatjuk, hogy kellően magas, de maradványhők esetében nem extrém magas értékek számított szinteken – pl. 60-80 fokon – a hőkonténer hője egy jó abszorpciós hűtőgéppel együtt remek „hidegforrás” is lehet, azaz klimatizáláshoz, élelmiszerek hűtéséhez nyáron is használható lenne a technológia.
- További potenciális hőtároló anyagokat kell találni. Több anyag is létezik, amelynek a látens hője az általunk használt anyagokénál magasabb, de ezeknek az ára is jelentősen magasabb. Amennyiben sikerülne olyan anyagot találni – akár azok közül is, amelyeket egyelőre nem használnak hőtárolásra – amelyenél a költségek kisebb mértékben emelkednének, mint az el-

tárolható hő mennyisége, akkor életképebb lehetne a technológia. Ebből a szempontból pedig fontos ennek a hőtároló anyagnak az előállítás is, hiszen a „karbonmentes” üzemnek az életciklus is a részét képezi (a szállítással együtt) a hőtároló anyag környezetkímélő forrása.

Röviden összefoglalva: a projektben egy olyan hőtároló egységet szeretnénk felépíteni, ami alkalmas arra, hogy egy adott ipari létesítmény hulladékhőjét eltárolja és kellőképpen kompakt ahhoz, hogy egy felhasználóhoz el lehessen szállítani, ahol télen fűtésre, nyáron (adszorpciós hűtő beiktatásával) hűtésre használható. A szállítás kis energiaigényű és lehetőleg karbonmentes legyen.

Reményeink szerint a sikeres pilot-projektre épülve a jövőben az alábbiakat lehetne biztosítani:

- a lakosságnak, valamint kis- és közepes intézményeknek, cégeknek fűtést/hűtést,
- a kibocsátóknak (ipari szereplők) energiahatékonyság növekedést és (energetikai cégeknél) fajlagos CO₂ kibocsátás csökkentést,
- a környezetre hőterhelés csökkenést és a megtakarított tüzelőanyag miatt CO₂ kibocsátás csökkentést,
- a nemzetgazdaságnak a fosszilis tüzelőanyagoktól való függés csökkenését.

A konzorcium résztvevői a Thermofoam Kft. (projektvezető; feladata a kivitelezés és a hőhasznosítási megoldások vizsgálata), a BME (szakmai vezető, feladata a tervezés, hőhasznosítás, fázisváltó anyagokkal és hőtárolókkal kapcsolatos alap kutatások, esettanulmányok, karbonmentes szállítás vizsgálata, életciklus analízis), a HeatVentors Kft. (feladata a tervezés, hőhasznosítási megoldások vizsgálata, kivitelezés), az IMSYS Kft. (feladata a környezetvédelmi és jogi problémák vizsgálata és a projektmenedzsment), a Pannon Egyetem (feladata hőkibocsátó-hőhasznosító párok keresése, hőhasznosítási megoldások vizsgálata, üzleti modellek vizsgálata), a HUN-REN TTK (feladata a hatásfok növelés vizsgálata, új hőtároló anyagok vizsgálata), valamint a MAHART-Szabadjkító Zrt. (feladata a szállítási módszerek vizsgálata)

A rendezvény és a jelen kiadvány a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 "Hulladékhő tárolására és szállítására alkalmas hőtároló egység kifejlesztése" című projekt disszeminációs programjának a részeként jött létre.



A Thermofoam Kft. hullámkarton üzemének szolár meghajtású kísérleti abszorpciós hűtőrendszere

Pirityi László¹, Németh Bence², Feczko Tivadar^{2,3}

¹ Thermofoam Kft., H-2363, Felsőpakony, Csarnok út 1.

² HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet, H-1117 Budapest, Magyar tudósok krt. 2.

³ Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, H-8200, Veszprém, Egyetem u. 10.

A Thermofoam Kft., innovatív csomagolástechnikai és funkcionális építőipari termékeket gyártó vállalkozás, a környezetvédelem érdekében törekszik az energiahatékony megoldásokra. Az abszorpciós hűtőberendezések klímaseleges hűtőközegekkel, az átlagosnál hosszabb élettartamukkal és kis karbantartási igényükkel az elterjedt hűtéstechnikai eszközök zöld alternatíváját jelenthetik. A projekt keretében üzembe helyezett abszorpciós hűtőrendszer hőigényét napkollektorokkal állítják elő, míg a felesleges hőenergia átmeneti tárolására látens hőtároló egység is rendelkezésre áll.

*

Thermofoam Ltd, a manufacturer of innovative packaging solutions and functional construction materials, is pursuing energy-efficient solutions to help climate protection. Absorption chillers are a potential green alternative of conventional refrigeration units, due to their climate-neutral refrigerants, long lifetime and low maintenance needs. A new chiller system was successfully installed and tested in one of the company's production halls. The necessary heat demand is supplied by solar thermal collectors, and the excess heat is stored in latent storage tanks filled with phase change materials.

Napjainkban az átlaghőmérséklet monoton növekedésének velejárójaként a légkondicionálás iránti kereslet jelentősen megnövekedett a hozzá tartozó primer energia igényrel együtt. Az elektromos hálózatban jelentkező csúcsterhelési periódusok száma a nyári időszakban egyre gyakrabban figyelhető meg, ami akár rendszerszintű hiányt okoz az elektromos ellátásban. Ez a tendencia jelentős többlet szén-dioxid kibocsátást okoz és terheli a környezetünket. A nyári időszakban a legnagyobb intenzitású hidegenergia kereslet egybeesik a napsugárzás energiájának maximumával, lehetővé téve ideális forrás-felhasználó párok létrejöttét [1]. A napsugárzásból hőenergiát előállító kollektorok általi termelést abszorpciós hűtőgépekben felhasználva a melegből hideg energiát nyerhetünk [2].

A harminc éves múltú visszatekintő Thermofoam Kft. 100%-ban magyar magánszemélyek tulajdonában lévő közép vállalkozás, ma Magyarország egyik legjelentősebb csomagolástechnikai és funkcionális építőipari termékeket gyártó vállalkozása. Legrégibbi termékcsoportja SOLFLEX márkanév alatt futó hővisszaverő fóliacsald, amit később különböző műanyag fóliák feldolgozása, társítása, konfekcionált termékek, tűzgátló szigetelőanyagok előállítása követett. 2000. óta foglalkozik műszaki haboknak a konvertálásával, ami lehetővé tette komplexebb, egyedi vevői igények kielégítését. Az egyre bővülő termékpaletta a tulajdonos-ügyvezető, Pirityi László saját szabadalmán alapuló műszaki fejlesztések eredménye, amivel a vállalat világszínvonalat képvisel. Jelentős pályázati

támogatással valósította meg eddigi termékfejlesztési projektjeit, és megújuló energiákat hasznosító, környezettudatos, modern gyártóüzemét Felsőpakonyon. Ennek a tudatos munkának a részeként a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással valósulhatott meg a napenergiával működtetett gyártócsarnok hűtés és a szállítható kivitelezésű látens hőtároló egységek.

A napkollektorokból nyert hőenergia a fázisváltást kihasználó tárolókapacitással összekapcsolva képes a hőforrás természetéből adódó ingadozásokat kiegyenlíteni, valamint a hűtőrendszer napi üzemidejét meghosszabbítani [3-5]. Az abszorpciós hűtőgépek érzékenyek az őket tápláló hőforrás hőmérsékletére, az optimálisnál alacsonyabb hőmérsékleten hatásfokuk meredeken csökken, illetve megáll a hűtési körfolyamat. Túl magas hőmérséklet esetén károsodhat a berendezés, ezt megelőzendő a védelme leválasztja a rendszerről. A hidegenergiát is lehet látens módon hőakkumulálni, ezzel az épület aktív hűtése hosszabb ideig biztosítható környezetbarát módon. Az év azon időszakában, amikor nincs szükség a hűtésre, a vákuumsöves napkollektorok esetében még a téli időszakban is képesek a hőenergiát a lehető legmagasabb hőmérsékleten begyűjteni, ami fűtés rásegítésre vagy melegvíz termelésre helyben felhasználható. Jelentős energiafelesleg esetén a közúti szállításhoz tervezett 250 kWh kapacitású hőakkumulátor feltöltésével és kiszállításával a helyi óvodának ajándékozunk a megtermelt hőt.

Az abszorpciós hűtőberendezések alkalmazásának reneszánszáról beszélhetünk azáltal, hogy klímaseleges hűtőközegekkel, az átlagosnál hosszabb élettartamukkal és kis karbantartási igényükkel vonzó befektetési lehetőséget nyújtanak a megbízható berendezések kedvelőinek. Hulladékhővel, geotermikus energiával, napenergiával fűtve kémiai sűrítőiket zöld alternatívának számítanak a hűtéstechnikai lehetőségek között.

Kísérleti összeállítás

Hidegenergiaforrásként egy Yazaki Aroace Water Fired Chiller WFC-SC5 típusú (Yazaki Corporation, Tokió, Japán) 17,6 kW maximális hűtőteljesítményű abszorpciós hűtőberendezést használtunk. Üzemi hőmérséklettartomány 70 – 90 °C, hűtőközegpárja víz – lítium-bromid. A hűtőgép segédhűtéséről egy MITA PMS 6/65 típusú (MITA Cooling Technologies, Sizzano, Olaszország) hűtőtorony gondoskodik.

Megújuló melegenergiaforrásként 7 db KS-1800/58-22 valamint 7 db SCM22-58/1800-01 hőcsővel ellátott vákuumsöves napkollektort alkalmaztunk soros elrendezésű hidraulikai kötésben, primer körű hőközvetítő folyadékként Innosolar HT20 (-28 - +256 °C) került felhasználásra 1,32 m³/h térfogatárammal keringtetve. A napból érkező energia optimális kiaknázása érdekében a kollektorok hátoldalára a SOLFLEX hővisszaverő fóliákat (Thermofoam Kft.,

Felsőpakony, Magyarország) szereltük fel. A napkollektorok és az abszorpciós hűtőgép között két hidraulikus kört építettünk ki, amiket Danfoss XB37H-1-20 (Danfoss, Nordborg, Dánia) lemezes hőcserélővel kötöttünk össze. A szekunder körben víz volt a hőközvetítő közeg átlagosan 1,34 m³/h térfogatárammal.

Az üzemcsarnokban a hidegenergia elosztását a mennyezeten felszerelt fan coil-ok (ventilátor hőcserélő) végzik. A levegő-folyadék (víz) hőcserélőkben az áramlás 2,34 m³/h térfogatárammal történik.

Műszerezés, mérésadatgyűjtés

Arduino MKR 1010 sorozatú mikrovezérlő felhasználásával, egyedileg tervezett nyomtatott áramkörön RS-485 illetve M-bus interface hozzáadásával, valamint 8 csatornás Pt 100-as 4 vezetékű elrendezésű ellenálláshőmérő rendszert telepítettünk. Az M-bus rendszerre két darab Axioma Qalco Sonic E4 típusú ultrahangos áramlás illetve hőmennyiségmérő műszert illesztettünk. Az eszközök WiFi hálózaton keresztül csatlakoznak a felhőszolgáltatásra, amely a távoli elérhetőséget, adattárolást biztosítja. Számítógép és mobil applikáció segítségével a rendszer valós időben távvezérelhető. A felsorolt képességek implementálása a Blynk IoT okostelefonra is telepíthető applikációban történt.

Eredmények

A Thermofoam Kft. szakemberei a HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont kutatóival együttműködve sikeresen beüzemelték a „Dobozüzem” napenergiával hűtött klímaberendezését és a hozzá kapcsolódó kísérleti gépészeti elemeket. Az üzemben dolgozó munkavállalók pozitív visszajelzései alapján is igazi, környezetkímélő sikertörténetnek lehetünk tanúi. Az épület belső hőmérsékletét az extrém forró 2024. évi nyáron átlagosan 5-7 °C-kal a külső

hőmérsékletnél alacsonyabban sikerült stabilizálni. Ez az érték az ajánlott komfortos tartományon belül található.

A kiépítésre került mérésadatgyűjtő és vezérlőrendszer korszerű okosüzemet teremtett. A karbantartók, döntéshozók, kutatók számára az adatok a világ bármely pontjáról online hozzáférhetőek és monitorozhatók. Az 1. ábrán látható diagramok mutatják a regisztrált mérési adatokat és az ezekből készült grafikonokat 3 napos bontásban 2024. szeptember 3. és 5. közötti időszakban. Az ábrák felső sorában található értékek a kép rögzítésének pillanatában aktuálisan mért értékeket jelölik. A Flowmeter Collector (áramlásmérő adatgyűjtő) megjelölésű grafikonon az abszorpciós hűtőgép előtt elhelyezett áramlásmérő mérésadatai kerültek illusztrálásra. A berendezés a meglévő elemekkel így maximálisan 80 °C-os fűtővíz elérésére volt képes. A Heatexchanger Temperature (hőcserélő hőmérséklet) elnevezésű grafikonon a primer és a szekunder kört összekötő hőcserélő csatlakozócsonkjain kialakuló hőmérsékleti értékek láthatóak. A Flowmeter Cool (áramlásmérő-hideg) megjelölésű grafikonon a csarnok levegő-folyadék hőcserélőjéhez tartozó áramlásmérő mérésadatai láthatóak grafikus megjelenítve. A Doboz 1st Floor Temperature (1. emeleti hőmérséklet) megjelölésű ábrán a gyártócsarnok első emeletén az üzem ember által látogatott legmelegebb pontján elhelyezett hőmérők által szolgáltatott értékekből készített hőmérsékletingadozás látható a megadott regisztrációs időszakban. A kiválasztott példa időintervallum (szeptember eleje) is mutatja, hogy egyre hosszabb azon időszakoknak a hossza, amikor az épületek hűtésére energiát kell fordítanunk.

Az 2.a ábrán látható a vákuumcsöves napkollektorsor ami a mérések alapján 16 kWh hőmennyiség szolgáltatását tette lehetővé csúcsidegben, 82 °C körüli hőmérséklet biztosításával. Az 2.b ábrán látható a SOLFLEX hőtükörfólia alkalmazása a teljesítmény további emelése érdekében, ezzel elhanyagolható költség-hányad mellett sikerült 19 kWh hőteljesítményt létrehozni 90 °C közeli hőmérséklet mellett a primer körben.

A 3.a ábrán látható a megépült szolár állomás biztonsági okokból túlméretezett táglási tartályokkal. Erre azért volt szükség, mert az abszorpciós hűtőgép bármilyen üzemzavar, például áramszünet esetén megszünteti a hőfelvételt, ezután a primer illetve szekunder hidraulikai kör rövid idő alatt túlmelegszik. A kollektorokban gőz képződik, és a növekvő nyomás a hőtároló folyadékot a táglási tartályokba visszanyomja, jelentősen lerontva ezzel a hőtárolást a hőcserélők és a szolár hőközlő folyadék gőze között.

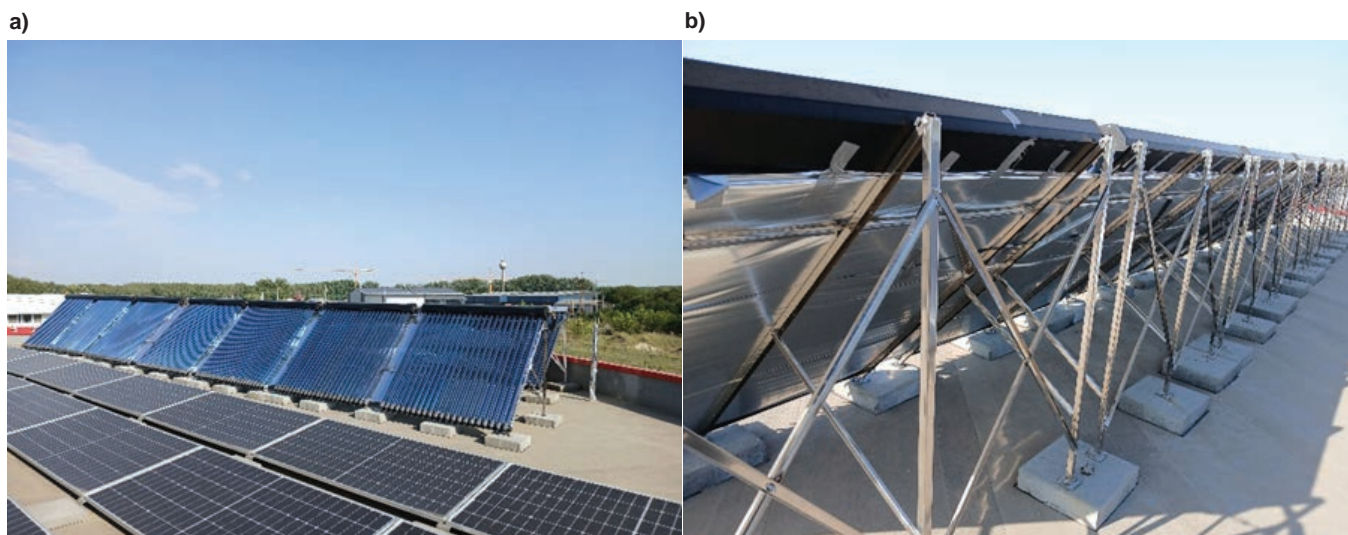
A 3. b ábrán figyelhetők meg a vezérlő és mérésadatgyűjtő villamosszekrénye, az in situ fel nem használt hidegenergia tárolására szolgáló fázisváltó hőakkumulátor (látens hőtároló egység), valamint az abszorpciós hűtőberendezés. A keringtetett hűtővíz hőmérsékletének limitálásával a nemkívánt kondenzációs folyamatok elkerülhetők a különböző gépészeti elemeken. Ezt az értéket tapasztalati úton hozzávetőleg 17 °C-ra állítottuk be.

Összefoglalás

A Thermofoam Kft. csapata a kezdetektől fogva keresi innovatív megoldások bevezetésével a fenntartható fejlődés útját. Azon kevés magyar közép vállalkozások egyike, amely a gazdasági nehézségek ellenére folyamatos fejlődést tudott produkálni, ami a valódi szakmai munkának köszönhető. A kísérletezésre is teret engedő abszorpciós hűtőtechnikai és hőtároló rendszer megépítésével fel tud-



1. ábra. A Blynk IoT mobil applikációjának képernyőfotója



2. ábra. A Thermofoam Kft. „Doboz” üzemsarnok tetején elhelyezett vákuumcsöves napkollektor sorának elülső (a) és hátsó nézete (b)



3. ábra. Az üzemsarnok első emeletén található gépészeti tér a szolár állomással, lemezes hőcserélővel (a); vezérlő és mérésadatgyűjtő villamos szekrény, hidegenergia akkumulátor, abszorpciós hűtőgép (b)

ja hívni a figyelmet a bemutatott technológiára, ezáltal a „Hőhajó” projekt megvalósíthatósági tanulmányának végeredményeként létrejövő tudásbázis szélesebb körben felhasználhatóvá válik.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HŐ pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

[1] Constantinos A. Balaras, Gershon Grossman, Hans- Martin Henning, Carlos A. Infante Ferreira, Erich Podesser, Lei Wang, Edo Wiemken. Solar air conditioning in Europe—an overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 299–314.

[2] Omar Ketfi, Mustapha Merzouk , Nachida Kasbadji Merzouk, Said El Metenan. Performance of a Single Effect Solar Absorption Cooling System (Libr-H₂O). *Energy Procedia* 74 (2015) 130 – 138.

[3] Christy Lahoud , Marwan El Brouche, Chawki Lahoud, Mohamed Hmadi. A Review of single-effect solar absorption chillers and its perspective. *Energy Reports* 7 (2021) 12–22.

[4] Soteris A. Kalogirou. Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science* 30 (2004) 231–295.

[5] Gang Pei , Guiqiang Li , Xi Zhou, Jie Ji , Yuehong Su. Comparative Experimental Analysis of the Thermal Performance of Evacuated Tube Solar Water Heater Systems With and Without a Mini-Compound Parabolic Concentrating (CPC) Reflector (C < 1) *Energies* 5 (2012) 911-924.

Ipari szimbiózis jellegű rendszerek megvalósításának lehetséges módjai

Balogh Péter¹, Dr. habil Pintér Gábor², Kovács András³, Dr. Németh Kornél⁴

¹ PhD hallgató, Pannon Egyetem, Gazdálkodás- és Szervezéstudományok Doktori Iskola

² Egyetemi docens, PE Nagykanizsa - Környezeti Gazdaság Egyetemi Központ, Soós Ernő KFK Megújuló Energiaforrások Kutatócsoport

³ IMSYS Mérnöki Szolgáltató Kft.

⁴ Egyetemi docens, Pannon Egyetem Nagykanizsa – Környezeti Gazdaság Egyetemi Központ, Alkalmazott Gazdálkodástani Intézet

e-mail: balogh.peter@pen.uni-pannon.hu; pinter.gabor@pen.uni-pannon.hu; kovacs.andras@imsys.hu nemeth.kornel@pen.uni-pannon.hu

Az ezredforduló második évtizede új kihívásokat hozott a mindennapokba. A Covid-19 pandémia okozta helyzet, valamint az egyre gyakrabban fellángoló fegyveres konfliktusok előtérbe hozták többek között a személyes biztonság, a globális értékláncok, valamint az energia- és ellátásbiztonság kérdését is. Cikkünkben az ipari szimbiózis jellegű együttműködések megvalósulásának lehetséges módjait foglaljuk össze. A tudatosan szervezett szimbiotikus kapcsolatok bizonyítottan segíthetnek csökkenteni az anyag- és energiafelhasználást, egyben csökkenthetik a környezetterhelést, miközben a résztvevő szereplők továbbra is profitábilisak lehetnek. Irodalmi összefoglalásunk betekintést nyújt az ipari szimbiózis jellemző eseteibe, valamint egy-egy megvalósult jó gyakorlaton, példán keresztül mutatja be a témakörben rejlő lehetőségeket. A kapcsolódó fogalomkörök áttekintéséből, a megvalósítás szintjeinek és irányainak értékelő elemzéséből egyértelműen kirajzolódik, hogy minden egyes együttműködés más karakterisztikával, jellemzőkkel bír. Nincs egy általános „recept” a sikeres együttműködésekre, de a beavatkozási irányok, jó gyakorlatok széleskörű ismerete a helyi adottságok jellemzőinek figyelembevételével, kellő motivációk mentén elvezethet a sikeres projektekhez.

*

The second decade of the millennium have brought new challenges to our everyday life. The Covid-19 pandemic situation and the increasing frequency of armed conflicts have drawn attention to issues such as personal security, global value chains, energy and supply security. In this article, we summarise possible ways of achieving industrial symbiosis cooperation. Consciously organised symbiotic relationships have been shown to help reduce material and energy use, while reducing environmental impacts and allowing the actors involved to remain profitable. Our systematic literature review provides insights into typical cases of industrial symbiosis and illustrates the potential of this topic through a case studies of good practices and examples. From a review of related concepts and an evaluative analysis of the levels and directions of implementation, it is clear that each cooperation has different characteristics and features. There is no general ‘recipe’ for success, but a broad knowledge of intervention directions and good practices, taking local characteristics and motivations into account, can lead to successful projects.

Természeti körforgáson alapuló rendszerek megjelenése

A nemzetközi tudományos társadalom több mint fél évszázada foglalkozik a biológiai körforgáson alapuló gazdasági modellek elméletével és gyakorlatával. Boulding már 1966-ban felhívta a figyelmet a téma fontosságára [1]. 1989-ben Frosch és Gallopoulos markáns véleményt fogalmaztak meg környezetünk védelme érdekében, továbbá felhívták a figyelmet arra, hogy a megoldás a természeti rendszerekből vett inspirációban lehet [2]. Az elméleti háttér az évek során tovább fejlődött, teret adva egyéb elméleti és gyakorlati megvalósítási lehetőségeknek, elképzeléseknek. Ilyen többek között a cradle to cradle [3], a biomimikri [4] és a kék gazdaság is [5]. A sokféle elmélet egy ernyőfogalom alá került, mely körforgásos gazdaság néven egyre inkább elterjed, főleg az Európai Unió erőfeszítéseinek, cselekvési tervének köszönhetően [6]. A Covid-19 pandémia, valamint az Orosz-ukrán háború drasztikus változásokat hozott az életünkbe, hiszen egyéni- és ellátás-, valamint energia-biztonságunk is kulcskérdéssé vált [7] [8]. Ez a vállalati szektorra is igaz, különösen az Európai Unió területén nagy számban létező kis- és középvállalkozásokra, akik komoly kihívásokkal néznek szembe, amikor a fenntarthatóságról, energiaellátásról és innovációs képességekről beszélünk [9]. Ebben a bizonytalansággal teli környezetben új erőre kaphatnak a körforgásos gazdaságot, azon belül is az ipari szimbiózist vizsgáló kutatások.

Magyarországon is növekszik a témát vizsgáló tudományos munkák száma. Jelen tanulmány ezt az utat szeretné követni, egy olyan átfogó szisztematikus irodalmi áttekintést kínálva, mely példákkal illusztrálva mutatja be az ipari szimbiózis megoldások lehetséges megvalósítási módjait és jellegzetességeit.

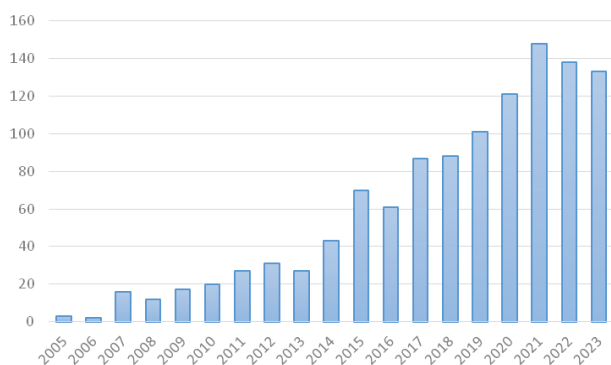
Anyag és módszer

Szisztematikus irodalomkutatásunkhoz a Web of Science keresőfelületét használtuk. Az „industrial symbiosis” AND („implementation” OR „establishment”) keresési feltételekkel a címben, absztraktban és szerzői kulcsszavakban végeztünk keresést, angol nyelvű tudományos munkákat keresve. Eredményként 248 tudományos cikket kaptunk. Ezeket PRISMA módszerrel szűkítettük tovább. A korrek-túraolvasás során további 52 tudományos munka került kizárára, mivel a szerzők megítélése szerint nem tartozott közvetlenül a vizsgált témához, többek között csak említés szintjén került elő az ipari szimbiózis, illetve a bemutatott példákra, folyamatokra nem volt igaz az ebben a tanulmányban is bemutatott definíció, miszerint ak-

kor beszélünk ipari szimbiózisról, ha legalább három cég legalább kétféle anyagot oszt meg egymás között. A végső halmazba így 194 tanulmány került, szisztematikus irodalmi áttekintésünk ezekből táplálkozik. Mindemellett a fogalmi lehatárolások mentén az egyes elméleti megközelítéseket (beavatkozások szintjei, irányultsága) szintén elemeztük és rendszereztük, valamint és egy-egy jó gyakorlatot rendeltünk az egyes megoldásokhoz.

Az ipari szimbiózis növekvő jelentősége

Az ipari szimbiózis a körforgásos gazdaság elmélete alá tartozva, az ipari ökológia alterületeként olyan folyamatok elnevezésére szolgál, amelyben a vállalkozások között megvalósuló kapcsolatok minél tudatosabb kiépítése történik [10]. Az ipari szimbiózis – definíciója szerint – akkor jön létre, ha legalább három vállalat legalább kétféle erőforrást oszt meg egymás között [11]. Ezt a definíciót a nemzetközi kutatói hálózat is széleskörben elfogadta és használja [12]. Chertow a definíció megalkotása után három kategóriába sorolta a lehetséges megvalósítási módokat. Az első esetben a cégekre és az iparágra jellemző melléktermékeket osztanak meg egymás között, a másodikban a rendelkezésre álló infrastruktúrán és eszközállományon osztoznak, mint például a víz és szennyvíz, vagy pedig harmadik lehetőségként ott van számukra a szolgáltatások megosztása, mint például a szállítás-szállítmányozás. Az elmélet feldolgozottsága az évek során jelentős növekedést mutat. A Web of Science adatbázisában, az "industrial symbiosis" kulcsszó használatával, angol nyelvű tudományos cikkeket keresve 1210 művet találhatunk. Az időbeli megoszlásuk az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az ipari szimbiózis témájú tudományos munkák megjelenési idő szerint

Forrás: Web of Science adatbázis kulcsszavas keresése alapján saját szerkesztés, 2024

Az ábrán foglaltak szerint a téma feldolgozottsága a 2010-es évek első felében ugrott meg jelentősen, főleg 2015 körül. Ezt az időszakot a 2008-as gazdasági válságból történő kilábalás határozta meg, valamint az Európai Unió témához köthető szakpolitikai lépései. Ez az Európai Unió körforgásos gazdaságra vonatkozó cselekvési tervében csúcspontot ért el [13]. Ebben a tervben az Európai Unió a klímaváltozás által okozott problémákat, a hulladékkezelés növekedéséből fakadó veszélyeket, az erőforrás-felhasználás kiszolgáltatottságát, fenntartható megoldások felé történő nyitás elkerülhetetlenségét egy egységes keretrendszerben, a körforgásos gazdaság égisze alatt tárgyalja. A második nagyobb ugrás 2020-tól látható, amikor a pandémia és az egyéni és gazdasági bezárkózás miatt nőtt a tanulmányok száma. Bár a szerzők által végzett Web of Science keresés során kiderült, hogy a tanulmányok legnagyobb része Kínából származik, az ország az ipari szimbiózis kutatásának talán

legfontosabb szereplője, azonban bolygónk minden lakott kontinensén található megvalósult példákat, jövőbeni terveket [14] [15] [16] [17]. A következő fejezetekben a megvalósult jó gyakorlatokat csoportosítjuk két nézőpont szerint. Először megvizsgáljuk, milyen szinteken, és milyen területeket érintve lehet szimbiotikus kapcsolatokat létrehozni, majd a megvalósítás iránya szerint kategorizálunk.

Ipari szimbiózis megoldások – megvalósítás szintje szerint

Ipari szimbiózis mikro szinten

Az ipari szimbiózis megoldások a legkisebb, mikroszinten kezdődnek. Ilyenkor bizonyos cégek kis területen, egymást segítve működnek együtt. Ennek tipikus helyszínei lehetnek az ipari parkok. Az együttműködés kiterjedhet akár a teljes ipari park területére, öko-ipari parkokat létrehozva (Eco-industrial parks, EIP) [18].

Az öko-ipari parkok vizsgálatával szintén már több évtizede foglalkoznak a kutatók. Ezek az együttműködések sikeresen csökkenthetik az ökoszisztémára nehezedő nyomást [19]. A leghíresebb ilyen park a dániai Kalundborg városában található. Az együttműködés kezdetben pár vállalat között indult, hogy vizet, hőt, gőzt és gázokat osszanak meg egymás között. Ehhez az együttműködéshez az elmúlt időszakban sorban csatlakoztak új tagok [20].

Ipari szimbiózis mezo szinten

Az ipari parkokban történő együttműködések tovább is fejlődhetnek, túlnyúlhatnak a területi kereteken. Ilyenkor az a település, ahol a park található, bekapcsolódhat az együttműködésbe. Ennek egyik jellegzetes példája a városi-ipari szimbiózis (Urban-industrial symbiosis, UIS). A modern városok nagymennyiségű hulladékot, üvegházhatású gázt termelnek, melyek bekapcsolódhatnak a korábban létrehozott körforgásba [21]. Itt nehézség a közös nézőpont kialakítása lehet. A résztvevő felek alapvetően ellenérdekeltek lehetnek, hiszen a lakosságnak érdeke a környezetvédelem, azonban a vállalkozások fő hajtóereje továbbra is a profit, a környezetvédelem gyakran másodlagos szempont csupán [22]. Azonban, ha létrejön a kompromisszum és megvalósul az együttműködés, úgy a város és a résztvevő vállalatok is profitálhatnak belőle. A város szállíthat hulladékot, szennyvizet, gyakorlatilag bármit, amit a helyi ipari parkokban feldolgozhatnak [23]. Ilyen együttműködés jött létre például Helsingborg városában, ahol a város mellett a helyi farmerek is bekapcsolódtak a szimbiotikus folyamatokba. Többek között szerves hulladék, városi háztartási hulladék és hő kerül megosztásra a szereplők között [24].

Ipari szimbiózis makro szinten

Az ipari szimbiózis kapcsolatok elmélyülésével és területbeli kiterjedésével még nagyobbra nőhet az együttműködés, városi tereken túlmutató regionális, térségi jelleget is ölthetnek. A szimbiotikus kapcsolatok létrejöttéhez ugyanis nem feltétlenül szükséges, hogy az együttműködésben résztvevők földrajzilag közel legyenek egymáshoz. Ha anyagilag megéri számukra, távolabb lévő vállalatokkal, egyéb szereplőkkel is együttműködhetnek [25]. Ennek eredményeképpen több település összefoghat, még több vállalati és magán-szereplő csatlakozhat be az együttműködésbe. Regionális, térségi, vagy akár még szélesebb körben elterjedő ipari szimbiózisra kiváló példa az Egyesült Királyságban megvalósult Nemzeti Ipari Szimbiózis Program (NISP) [26]. A program az Európai Bizottság véleménye szerint, az általuk vizsgált 120 példából a leghatékonyabb energiahatékonysági intézkedés volt [27].

Ipari szimbiózis megoldások – megvalósítás iránya szerint

Bottom-up megközelítés

A bottom-up, azaz alulról felfelé történő szerveződés az ipari szimbiózis kapcsolatok kialakításának egyik módja. Ebben az esetben a vállalkozások saját kezdeményezés és szervezés mentén kezdenek együttműködni, alakítanak ki szimbiotikus kapcsolatokat, és vannak be hasonló elveket valló szereplőket [28]. A szakirodalom áttekintése során több kutatás jutott olyan eredményre, hogy ez a fajta megközelítés sikeresebb és tartósabb módja lehet a jó gyakorlatok kialakulásának [9] [29] [30]. Ennek a kooperációra alapozó szemléletmódnak egyik kiváló példája a Chicago városában található 'The Plant' névre hallgató együttműködés és ipari komplexum. Az élelmiszeripari vállalkozások együttműködési közösségének kialakításakor, valamint a 12 ezer m² területű ipari létesítmény felújítása során kiemelt cél volt a zárt, körforgásos rendszerek kialakítása [31]. A 'The Plant' számára fontos a társadalmi felelősségvállalás, rendszeres tájékoztatókat, workshopokat, gyárlátogatásokat szervez az érdeklődők számára.

'Facilitált ipari szimbiózis' megközelítés

A koncepciót Paquin és Howard-Grenville dolgozta ki, és publikálta 2009-ben megjelent tanulmányában [32]. A már korábban említett Egyesült Királyságban elindított Nemzeti Ipari Szimbiózis Program (NISP) eredményeit vizsgálva jutottak a következtetésre, miszerint egyetlen közvetítő szervezet közreműködésével hatékonyan lehet létrehozni szimbiotikus együttműködések. Az NISP nagyon eredményes programnak bizonyult, 2007-re már 243 résztvevővel (cégekkel, non-profit szervezetekkel) működtek együtt több mint 300 különféle, az ipari szimbiózishoz kapcsolódó projektben. Hasonló NISP program Magyarországon is megvalósult 2010 és 2012 között [33] [34]. Eredményeképpen 1200 tonna ipari hulladékot sikerült eltéríteni, 1238 tonnával kevesebb elsődleges nyersanyagot, valamint 26.000 km³-rel kevesebb vizet használtak fel.

Top-down megközelítés

Az ipari szimbiózis megoldások létrehozásának harmadik módja a Top-down, azaz felülről lefelé történő kezdeményezés, szerveződés. Ilyen esetben az ország kormányzata, egyes minisztériumok vagy egyéb állami szereplők kezdeményeznek együttműködést, hoznak létre cselekvési terveket, adnak ki konkrét ajánlásokat, esetenként utasításokat. A nemzetközi szakirodalomban ennek a megközelítésnek a tipikus példáját Kína adja. Az ország 1997-től kezdett foglalkozni az öko-ipari parkok megvalósításának lehetőségeivel. Az első modell park, a Guanxi tartomány Guigang városában található park 2001-ben kezdte meg működését [35]. 2012-ben már 100 öko-ipari park létesítésére adott ki ajánlást a Nemzeti Fejlesztési és Reformbizottság és a Pénzügyminisztérium [15]. Ezek alapján nem meglepő, hogy az ország az ipari szimbiózis vizsgálatának egyik legfontosabb szereplője. Nagy kiterjedése, nagy lakosság száma, valamint iparának mérete predesztinálta erre. A Guitang Group [36] mellett még a nemzetközi szakirodalomban gyakran említett példa a Hai Hua Group [37], a Shandong Lubei ipari szimbiózis komplexum is [38].

Összefoglalás, következtetések

Az előző fejezetekben bemutatásra kerültek a szisztematikus irodalomkutatás eredményei, valamint a gyakorlati megvalósítások szintjeihez, irányaihoz rendelt jó gyakorlatok, megvalósítási módok. Az 1. táblázatban összefoglalásra kerültek a kutatás eredményei, a szisztematikus irodalomkutatás során megismert esettanulmányok csoportosítása a bemutatott összefüggésrendszer alapján. A táblázatos megjelenítésből kirajzolódik, hogy mely megvalósítási módra milyen szinten található a legtöbb nemzetközi példa. Fontos azonban azt is látni, hogy az elméleti megközelítések kategóriái közt a gyakorlatban nem minden esetben éles a határ (például mikro és mezo szint). A szakirodalmi áttekintés alapján összességében elmondható, a Bottom-up megközelítés, azaz a saját érdek mentén történő önszerveződés kezdetben kis számú vállalat között valósul meg, mely esetenként az idő múlásával bővíthet. A British Sugar

1. táblázat. A kutatási eredmények összefoglalása – beavatkozási szintek, irányok és egyes jó gyakorlatok kategorizálása.

Forrás: saját szerkesztés, 2024

| Ipari szimbiózis megoldások – megvalósítás iránya szerint | | | | |
|--|-------------|--|--|---|
| | | Bottom-up – önszerveződés | Facilitált – közvetítő szervezet által | Top-down – felülről tervezett |
| Ipari szimbiózis megoldások – megvalósítás szintje szerint | Mikro szint | Kalundborg (komplex együttműködések/Dánia) [20] The Plant (élelmiszeripar/USA) [31] | | Gujiao (bányászati tevékenység/Kína) [42] Hai Hua Group (vegyipar/Kína) [37] Guitang Group (cukoripar/Kína) [36] Kawasaki (cementgyártás/Japán) [43] |
| | Mezo szint | Kuusankoski (faipar/Finnország) [46] | Helsingborg (komplex együttműködések/Svédország) [24] Rotterdam (energia/Hollandia) [39] Härnösand (élelmiszeripar/Svédország) [45] | Ulsan (komplex együttműködések/Dél-Korea) [44] |
| | Makro szint | British Sugar (cukoripar/Nagy-Britannia) [40] | Sodankylä (komplex együttműködések/Finnország) [41] Nemzeti Ipari Szimbiózis Program (komplex együttműködések/Egyesült Királyság) (NISP) [26] | |

példája azért is példaértékű, mivel a vállalat magától ismerte fel az együttműködésben rejlő lehetőségeket, és céltudatosan építette ki a folyamatait.

A facilitált megvalósítás tágabb megközelítésben értelmezhető, hiszen általában egy nemzeti program keretében, vagy a helyi önkormányzat kezdeményezésére, támogatásával jönnek létre a szimbiotikus együttműködések. A Top-down, azaz a felülről, konkrétan tervezett, specifikus megvalósítás pedig szintén szűkebb kiterjedésű területeken, gyakran egy ipari parkon belül történik. A nemzetközi szakirodalom nagy számban vizsgálja az öko-ipari parkokat, különösen a Kínából származó eseteket, megvalósításokat.

Az elmúlt évtizedekben az ipari szimbiózis gondolata végig jelen volt a nemzetközi tudományos közbeszédben. Sikeres példák a világon szinte bárhol találhatóak, azonban minden jó gyakorlat más és más karakterisztikával rendelkezik. Az ipari szimbiózis megvalósításának számos módja, valamint az egyes helyszínek sajátos tulajdonságai döntően befolyásolják a végeredményt. Lehet, hogy az egyik országban sikeres módszer a másik országban kudarcba fullad. Ami közös, hogy a feleknek meg kell bízni egymásban, és tartósan együtt kell működni. Ezek nélkül bármely projekt kudarcra van ítélve. Whysall és munkatársai, valamint Katona és munkatársai szerint minden egyes ipari forradalom társadalmi és gazdasági szinten egyaránt hozott előnyöket és kihívásokat az ilyen átalakulásban részt vevő országok számára. Az ezeken az átalakulásokon való eligazodáshoz holisztikus megközelítésre van szükség, amely innovatív és fenntartható rendszerszintű megoldásokat foglal magába, nem pedig kizárólag a technológiai fejlesztésekre fókuszál [47] [48]. Kozma és munkatársai kutatásukban felhívják a figyelmet arra, hogy egy nagyon komplex, fejlődő, nem letisztult területről van szó: monitoringra, további kutatásokra van szükség annak érdekében, hogy az országokban és régiókban található sikertényezőket megfelelően be lehessen azonosítani [49]. Utóbbiak részletes elemzése túlmutat jelen tanulmányon és fontos jövőbeni kutatási irányként rajzolódik ki napjaink változó gazdasági környezetében.

Az előzőeket figyelembe véve tekintettük át a témakör tudományos megközelítésének alakulását, fejlődését. Ennek során kirajzolódott a 2010-es évek első felének, valamint a pandémiát követő sokk időszakának kiugró növekedése. Kutatásunkban értelemszerűen nem jelennek meg azon nagy számú, de nehezen összegyűjthető nem tudományos szakmai anyagok, elemzések, valamint előremutató projektek melyek a témakörrel foglalkoznak. Ezeket is figyelembe véve még inkább visszaigazolódna jelen megállapításunk, miszerint a témakör jelentősége minden túlzás nélkül napról-napra nő. Ahhoz, hogy napjaink témakört érintő fejlesztései, a jövőbeni tervezési folyamatok megfelelő keretek közt történjenek egyértelműen fontosnak tartjuk, az öko-innovációk mentén formálódó témakör keret- és feltételrendszerének minél alaposabb ismeretét. Ennek fontos lépése a megvalósítási szintek, irányok szerinti lehatárolása, amely jelen tanulmány másik fókuszát adta. A korábban említett sikertényező elemzésén túl további kutatási célként fogalmazható meg az elmúlt időszak és napjaink ipari szimbiózis jellegű együttműködéseinek tématerületenkénti (például energia, víz, másodnyersanyagok; infrastruktúrák; egyéb erőforrások) kategorizálása, értékelő elemzése, a hazai adaptálhatóság, sikertényező és kihívások vizsgálata.

Köszönetnyilvánítás

A munka részben a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból

biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HŐ pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

1. Boulding, K. H. The Economics of the Coming Spaceship Earth. In H. Jarrett (ed.) Environmental Quality in a Growing Economy, 1966. pp. 3-14. Baltimore, MD: Resources for the Future/Johns Hopkins University Press.
2. Frosch, R.A.; Gallopoulos N.E. Strategies for Manufacturing. Scientific American 189 (3) 1989 152.
3. McDonough, W. Braungart, M. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. North Point Press, 2002.
4. Benyus, J. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. Harpel Perennial, 2002
5. Pauli, G. The Blue Economy: 10 years – 100 innovations – 100 million jobs. Paradigm Publications, 2010
6. European Commission, A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. Brussels, 2020. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0098>. (accessed on April 22, 2024)
7. Allam, Z.; Bibri, S. E.; Sharpe, S. A. The Rising Impacts of the COVID-19 Pandemic and the Russia–UkraineWar: Energy Transition, Climate Justice, Global Inequality, and Supply Chain Disruption. Resources 2022, 11, 99.p
8. Katona, A.; Birkner, Z.; Péter, E.: Examining Digital Transformation Trends in Austrian and Hungarian Companies, SUSTAINABILITY 15 : 15 pp. 11891-1. Paper: 22 2023
9. Patricio, J.; Axelsson, L., Blomé, S.; Rosado, L.: Enabling industrial symbiosis collaborations between SMEs from a regional perspective. Journal of Cleaner Production 202 2018 1120-1130
10. Chertow, M.R. INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy. Annu. Rev. Energy Environ. 2000. 25:313–37
11. Chertow, M.R. "Uncovering" Industrial Symbiosis. Massachusetts Institute of Technology and Yale University Volume 11, Number 1 2007
12. Neves, A.; Godina, R.; Azevedo, S. G.; Matias, J. C.O.: A comprehensive review of industrial symbiosis Journal of Cleaner Production 247 2020 119113
13. European Commission. Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52015DC0614> (accessed on April 22, 2024)
14. Neves, A.; Godina, R.; Carvalho, H.; Azevedo, S.G.; Matias, João C.O. Industrial Symbiosis Initiatives in United States of America and Canada: Current Status and Challenges. 8th International Conference on Industrial Technology and Management 2019
15. Zhao, K.:Industrial symbiosis: practices in China's industrial parks. Industry and Waste: Toward The Circular Economy. Field Actions Science Reports. Special Issue 23 2021. Veolia Institute
16. Short, S.W.; Bocken, N.M.P.; Barlow, C.Y.; Chertow, M.R.: From Refining Sugar to Growing Tomatoes. Industrial Ecology and Business Model Evolution. Journal of Industrial Ecology 18(5) 2014
17. Oguntoye, O.; Geissdoerfer, M.; Nuwarinda, H.; Evans, S.: Facilitating industrial symbiosis programmes in developing countries: reflections from Gauteng, South Africa. Development in Practice. 2018
18. Lowe, E.A: Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. Journal of Cleaner Production Volume 5, Number 1-2 1997

19. Côte, R.P.; Cohen-Rosenthal, E.: Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences. *Journal of Cleaner Production* 6 1998 181–188
20. Valentine, S.V.: Kalundborg Symbiosis: fostering progressive innovation in environmental networks. *Journal of Cleaner Production* 118 2016 65-77
21. Butturi M. A.; Gamberini R.: Urban-Industrial Symbiosis to Support Sustainable Energy Transition. *International Journal of Energy Production & Management.*, Vol. 5, No. 4 2020 355-366
22. Feiferytė-Skirienė, A.; Stasiškienė, Ž.: Seeking Circularity: Circular Urban Metabolism in the Context of Industrial Symbiosis. *Sustainability* 2021, 13(16), 9094
23. Butturi, M.A.; Lolli, F.; Sellitto, M.A.; Balugani, E.; Gamberini, R.; Rimini, B.: Renewable energy in eco-industrial parks and urban-industrial symbiosis: A literature review and a conceptual synthesis. *Applied Energy* Volume 255 2019 113825
24. Industriell och urban symbios i Helsingborg. Available online at: <https://industrialsymbiosis.se/helsingborg-sv.html> (accessed on April 22, 2024)
25. Albino, V.; Fraccascia, L.; Giannoccaro, I.: Exploring the role of contracts to support the emergence of self-organized industrial symbiosis networks: an agent-based simulation study, *Journal of Cleaner Production*, 112 2016 4353–4366
26. European Commission: NISP_Factsheet Available online at: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/prevention/NISP_Factsheet.pdf (accessed on April 22, 2024)
27. Lombardi, D.R.; Laybourn, P.T.: NATIONAL INDUSTRIAL SYMBIOSIS PROGRAMME (NISP): CONNECTING INDUSTRY, CREATING OPPORTUNITY. In: Macuso, E.; Luciano, A.(szerk.): Experiences of Industrial Symbiosis in Italy. Proceedings of conferences promoted by ENEA at Eco-mondo in 2012, 2013 and 2014. 2015 Available online at: https://iris.uniroma1.it/retrieve/handle/11573/835626/166455/LaMarca_Treatment_2015.pdf#page=20 (accessed on April 22, 2024)
28. Fraccascia, L.; Giannoccaro, I.: What, where, and how measuring industrial symbiosis: A reasoned taxonomy of relevant indicators. *Resources, Conservation & Recycling* 157 2020 104799
29. Costa, I., Massard, G., Agarwal, A.: Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries. *J. Clean. Prod.* 18 (8) 2010 815e822.
30. Chertow, M., Ehrenfeld, J.: Organizing self-organizing systems. *Journal of Industrial Ecology*. 16, 13e27. 2012
31. Ashton, W.; Chance, E.; Pereira, J.; Mulrow, J.; Norberto, J.; Derrible, S.; Guilbert, S.: The Plant—An Experiment in Urban Food Sustainability. *Environmental Progress & Sustainable Energy* 37(1) 2017
32. Paquin, R. L., Howard Grenville, J. Facilitating regional industrial symbiosis: Network growth in the UK's National Industrial Symbiosis Programme. In F. A. Boons, & J. Howard Grenville (Eds.), *The Social Embeddedness of Industrial Ecology*. London, UK: Edward Elgar 2009
33. Domenech, T.; Bleischwitz, R.; Doranova, A.; Payanatopoulos, D.; Roman, L.: Mapping Industrial Symbiosis Development In Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy_ *Resources Conservation and Recycling* 141 2019 76-98
34. Magyar Gazdaságfejlesztési Ügynökség: NISP – NEMZETI IPARI SZIMBIÓZIS PROGRAM. Available online at: https://mgfu.hu/hu/article/green_economy/projects/432 (accessed on April 22, 2024)
35. Zhu, Q.; Yong, G.; Sarkis, J.; Lai, K-H.: Barriers to Promoting Eco-Industrial Parks Development in China. Perspectives from Senior Officials at National Industrial Parks. *Journal of Industrial Ecology*. Volume 19, Number 3. 2014 457-467 p.
36. Zhu, Q.; Lowe, E.: Industrial Symbiosis in China: A Case Study of the Guitang Group. *Journal of Industrial Ecology* Volume 11, Issue 1. 2007 31-42
37. Cui, H.; Liu, C.; Côté, R.; Liu, W.: Understanding the Evolution of Industrial Symbiosis with a System Dynamics Model: A Case Study of Hai Hua Industrial Symbiosis, China. *Sustainability* 2018, 10, 3873.
38. Zheng, H.; Zhang, Y.; Yang, Z.; Liu, G.; Su, M.; Chen, B.; Meng, X.; Li, Y.: Exploring Improvement Paths for Eight Industrial Symbiosis Complexes throughout the World. *Journal of Environmental Accounting and Management* 1(3) 2013 295-306
39. Baas, L.; Boons, F.: The introduction and dissemination of the industrial symbiosis projects in the Rotterdam Harbour and Industry Complex. *International Journal of Environmental Technology and Management*, 7(5-6), 2007 551-577.
40. Short, S.W.; Bocken, N.M.P.; Barlow, C.Y.; Chertow, M.R.: From Refining Sugar to Growing Tomatoes. *Industrial Ecology and Business Model Evolution*. *Journal of Industrial Ecology* 18(5) 2014
41. Haq, H.; Välisuo, P.; Kumpulainen, L.; Tuomi, V.; Niemi, S.: A preliminary assessment of industrial symbiosis in Sodankylä. *Current Research in Environmental Sustainability* Volume 2, 100018 2020
42. Song, X.; Geng, Y.; Dong, H.; Chen, W.: Social network analysis on industrial symbiosis: A case of Gujiao eco-industrial park. *Journal of Cleaner Production*. Volume 193, 2018 Pages 414-423
43. Hashimoto, S.; Fujita, T.; Geng, Y.; Nagasawa, E.: Realizing CO2 emission reduction through industrial symbiosis: A cement production case study for Kawasaki. *Resources, Conservation and Recycling* 54 2010 704–710
44. Behera, S.; – Kim, J-H.; Lee, S-Y.; Suh, S.; Park, H-S.: Evolution of 'designed' industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrial Park: 'research and development into business' as the enabling framework. *Journal of Cleaner Production*. Volumes 29-30, 2012 103-112
45. Haller, H.; Fagerholm, A-S.; Carlsson, P.; Skoglund, W.; Brink, Paul v.d.; Danielski, I.; Brink, K.; Mirata, M.; Englund, O.: Towards a Resilient and Resource-Efficient Local Food System Based on Industrial Symbiosis in Härnösand: A Swedish Case Study. *Sustainability* 14, 2197 2022
46. Pakarinen, S.; Mattila, T.; Melanen, M.; Nissinen, A.; Sokka, L.: Sustainability and industrial symbiosis—The evolution of a Finnish forest industry complex. *Resources, Conservation and Recycling* Volume 54, Issue 12, 2010 Pages 1393-1404
47. Whysall, Z.; Owtram, M.; Brittain, S. The New Talent Management Challenges of Industry 4.0. *J. Manag. Dev.* 2019, 38, 118–129.
48. Katona, A.; Birkner, Z; Péter, E.: Examining Digital Transformation Trends in Austrian and Hungarian Companies *Sustainability* 15 2023 11891.
49. Kozma, D. E.; Molnárné Barna, K.; Molnár, T.: Rangsoroljunk vagy nem? A körforgásos gazdaság mérési lehetőségei és azok összehasonlítása az EU tagországokban. *Vezetéstudomány*. 52 (8-9). 2021 77. p.

Fázisváltó anyagok kémiai biztonsági értékelése

Kovács András³

ügyvezető igazgató, IMSYS Kft.

A veszélyes vegyi anyagoknak való kitettség jelentős aggodalomra ad okot. Az embereket mindennapi életükben a vegyi anyagok széles körének expozíciója éri. Munkájából adódóan még több ember találkozik veszélyes vegyi anyaggal, keverékkel, ezek egészségre gyakorolt hatásai nem elhanyagolhatóak. Az anyagok, keverékek felhasználása során kulcsfontosságú tényező az anyagra, illetve keverékekre vonatkozó megfelelő információk ismerete, a veszélyek felismerése, ennek megfelelően az óvintézkedések betartása. Ebben nyújt elsődleges segítséget a veszélyes anyagokra, keverékekre vonatkozó biztonsági adatlap.

*

Exposure to hazardous chemicals is a major concern. People are exposed to a wide range of chemicals in their daily lives. As a result of his work, even more people come across dangerous chemicals and mixtures, their effects on health are not negligible. A key factor in the use of substances and mixtures is the knowledge of adequate information about the substance or mixtures, the recognition of hazards and, accordingly, the observance of precautionary measures. The safety data sheet for hazardous substances and mixtures provides primary help in this.

Biztonsági adatlap fogalma

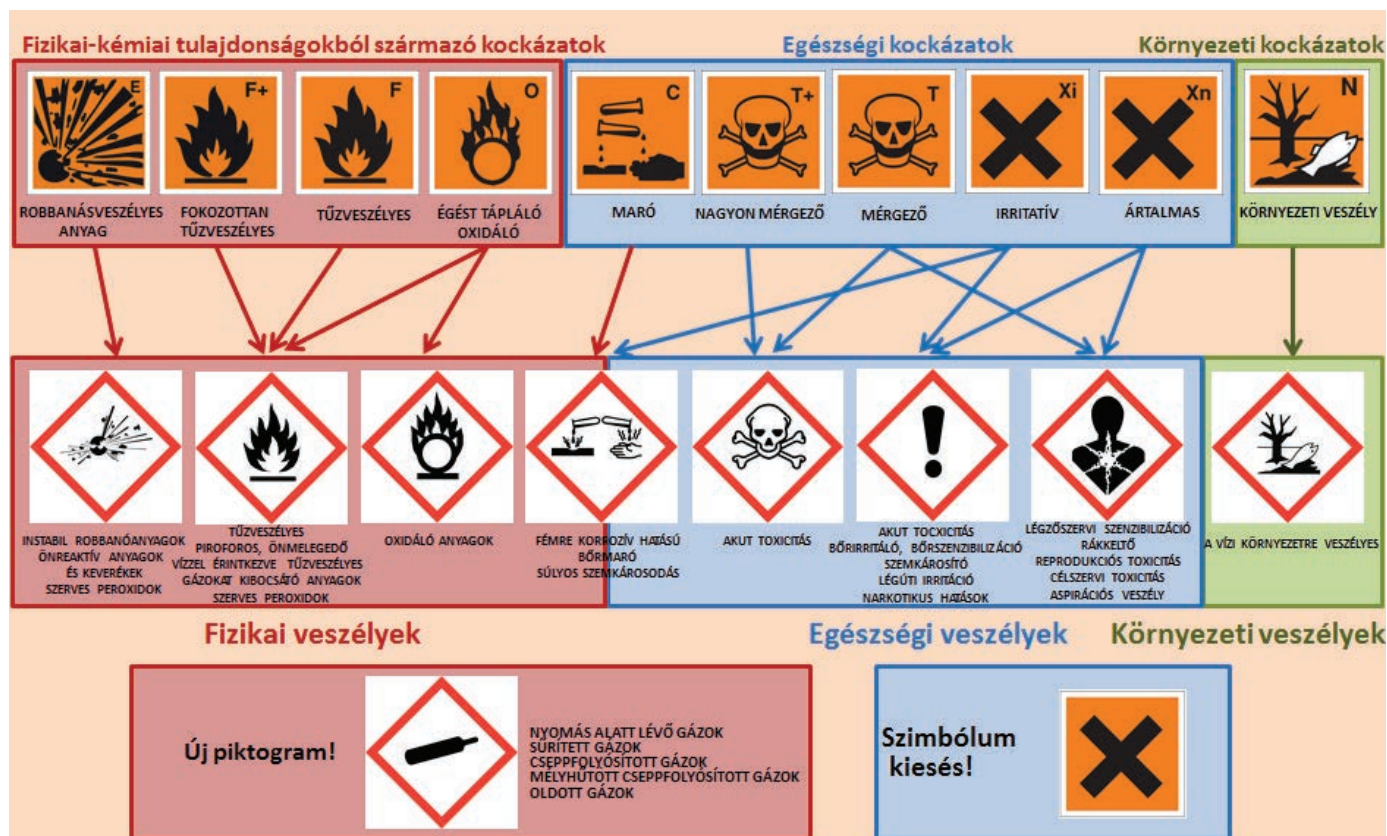
A biztonsági adatlap vegyi anyagokra vagy keverékekre összeállított dokumentum, amely széleskörű információt tartalmaz az anyag, vagy keverék összetételéről, fizikai, kémiai, egészségügyi és környezeti hatásairól, a termékek biztonságos felhasználásáról, tárolásáról, ártalmatlanításáról.

Ezen információk ismerete lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy meghozhassák az emberi egészség és a munkahelyi biztonság védelméhez, valamint a környezet védelméhez szükséges intézkedéseket.

Kémiai biztonság alapfogalmai

„2000. évi XXV. törvény a kémiai biztonságról”c. törvény szerinti fogalom meghatározások:

- **„kémiai biztonság:** a kemizációból, a vegyi anyagok életciklusából származó, a környezetet és az ember egészségét károsító kockázatok csökkentését, elkerülését célul kitűző, illetőleg megvalósító intézmények, tevékenységek olyan összessége, amely egyidejűleg tekintetbe veszi a fejlődés fenntarthatóságának szükségességét”
- **„veszélyes anyag:** valamennyi, a 3. § alapján veszélyesként osztályozott anyag”



1. ábra. Régi (DSD/DPD) és új (GHS/CLP) veszélyszimbólumok (Forrás: Saját szerkesztés)

- „veszélyes keverék: egy vagy több veszélyes anyagot tartalmazó keverék vagy oldat, amely az osztályozás során veszélyes besorolást kap”

A kémiai biztonsághoz, valamint az általános munkavédelemhez kapcsolódó legfontosabb jogszabályok ismertetése

A műszaki és a munkavédelmi szakemberek részére igen fontos a jogszabályismeret. Az alkalmazott vegyi anyagok biztonságos felhasználása érdekében számos kémiai biztonságot érintő jogszabályt kell betartaniuk a vegyi anyagot gyártóknak, forgalmazóknak, felhasználóknak.

Európai Uniók rendeletek

A biztonsági adatlap fordítása és szakmai adaptálása során az 1907/2006/EK (REACH) 31. cikkében foglaltakat, valamint a (EU) 215/830 és a (EU) 2020/878 rendeletének, illetve a releváns magyar jogszabályoknak az előírásait alkalmazzuk.

Magyarország kémiai biztonságának jelenlegi helyzete

Magyarországon alapvetően a kémiai biztonságról szóló 2000. évi XX. törvény rendelkezései, valamint a REACH és CLP Közösségi rendeletek biztosítják együttesen hazánkban a kémiai biztonság szabályozás vázát.

REACH rendelet

„A BIZOTTSÁG (EU) 2020/878 RENDELETE (2020. június 18.) a vegyi anyagok regisztrálásáról, értékeléséről, engedélyezéséről és korlátozásáról (REACH) szóló 1907/2006/EK európai parlamenti és tanácsi rendelet II. mellékletének módosításáról”

A REACH rendelet egy európai uniós rendelet. A rendelet célja az ember egészségének és környezetének védelme, az EU vegyiparának versenyképességének javítása a fenntartható fejlődése eszmeiségének figyelembevételével. A REACH rendelet alapvetően általános kémiai biztonsági szabályozást fogalmaz meg.

A rendelet az egyes anyagok tulajdonságaira és veszélyeire vonatkozó információk összegyűjtését és minősítésének eljárását határozza meg.

1. táblázat. Fázisváltó anyagok és veszélyességi besorolásuk (Forrás: Saját szerkesztés)

| PCM | Veszélyességi besorolás (CLP szabályai szerint) | Figyelmeztető mondatok |
|-------------------------------|---|--|
| Glicerín | Nem veszélyes | |
| Glicerín monosztearát 1 | Nem veszélyes | |
| 1-dodekanol (lauryl alcohol) | Eye Irrit. 2 Aquatic Acute 1 Aquatic Chronic 2 | Bőrirritáló hatású Súlyos szemirritációt okoz Mérgező a vízi élővilágra, hosszan tartó károsodást okoz |
| 1-hexadekanol (cetyl alcohol) | Nem veszélyes | |
| Kókuszszír 1 | Nem veszélyes | |
| Kókuszszír 2 | Nem veszélyes | |
| Kókuszszír 3 | Nem veszélyes | |
| Kókuszszír 4 | Nem veszélyes | |
| CrodaTherm 9,5 | Skin Sensitisation 1 | Allergiás bőrreakciót válthat ki |
| Kókuszszír 5 | Nem veszélyes | |
| Pentadekán | Asp. Tox. 1 | Lenyelve és a légutakba kerülve halálos lehet Ismétlődő expozíció a bőr kiszáradását vagy megrepedezését okozhatja |
| RT 35 HC | Aspiration hazard, category 1 | Lenyelve és a légutakba kerülve halálos lehet |
| CrodaTherm 53 | Nem veszélyes | |
| Sztearinsav | Nem veszélyes | |
| Palmitinsav | Nem veszélyes | |
| PLUSS HS36 | Oxidizing Solids 2 Acute Toxicity-Oral 4 Skin Irritation 2 Eye Irritation 2A | Fokozhatja a tűz intenzitását; oxidáló hatású. Lenyelve ártalmatlan. Súlyos szemirritációt okoz. Bőrirritáló hatású |
| PLUSS HS48 | Oxidizing Solids 2 Specific target organ toxicity - single exposure 3, Skin Irritation 2, Eye Irritation 2A. | Fokozhatja a tűz intenzitását; oxidáló hatású. Légúti irritációt okozhat Súlyos szemirritációt okoz. Bőrirritáló hatású |
| PLUSS OM03 | Aquatic acute 1 Aquatic chronic 2 | Nagyon mérgező a vízi élővilágra Mérgező a vízi élővilágra, hosszan tartó károsodást okoz |
| PLUSS OM50 | Acute Toxicity-Oral 5 Eye Irritation 2B | Lenyelve ártalmatlan lehet. Szemirritációt okoz. |
| PLUSS OM55 | Acute Toxicity-Oral 5 Eye Irritation 2B | Lenyelve ártalmatlan lehet. Szemirritációt okoz. |

A cégeknek regisztrálniuk kell anyagaikat. A vállalatoknak meg kell állapítani az általuk gyártott és az Európai Unióban forgalmazott anyagokhoz tartozó veszélyeket, kockázatokat, és kezelniük kell azokat. Ismertetniük kell az ECHA (Európai Vegyianyag Ügynökség) felé az anyag biztonságos felhasználásának módját, és megfelelő információt kell szolgáltatni a kockázatkezelési intézkedésekről a felhasználó felé is.

A hatóságoknak lehetőségük van az adott vegyi anyag korlátozására, betiltására, amennyiben a hozzá kapcsolódó kockázatok nem kezelhetők. A veszélyes anyagokat hosszú távon kevésbé veszélyesekkel kell helyettesíteni.

CLP rendelet

A CLP rövidítés a „Classification”, „Labelling” és „Packaging” (osztályozás, címkézés és csomagolás) szavakból áll össze. Ez a rendelet két már meglévő irányelvet vált fel, a veszélyes anyagokról (Dangerous Substances Directive: DSD) szóló és a veszélyes készítményekről (Dangerous Preparations Directive: DPD) szóló irányelveket. A rendelet célja az Európai Unióban lévő vegyi anyagok osztályozásának és címkézésének egységesítése, annak érdekében, hogy a vegyi anyagokkal expozícióba kerülő munkavállalók, felhasználók egyértelmű tájékoztatást kapjanak a vegyi anyagokkal kapcsolatos veszélyekről, biztonságos felhasználás feltételeiről. E rendelet által bevezetett, a vegyi anyagok osztályozására és címkézésére szolgáló eljárás az ENSZ globálisan harmonizált rendszerén (GHS) alapul.

A régi (DSD/DPD) szerinti veszélyszimbólumokat a CLP szerinti veszély piktogramok váltották fel. A változást az 1. ábra szemlélteti.

A korábbi „R” kockázatokra utaló mondatok helyett „H” figyelmeztető mondatok, valamint „EUH” EU specifikus figyelmeztető mondatok kerültek bevezetésre, míg az „S” biztonságos használatra utaló mondatok helyét a „P” óvintézkedésekre utaló mondatok vették át a CLP szerinti osztályozás, címkézés esetében.

A projekt kapcsán potenciális fázisváltó anyagok, illetve keverékek veszélyeinek meghatározása biztonsági adatlapjuk alapján

A 2021-2.1.2-HŐ pályázati program keretében belül a HeatVentors munkatársai összeállítottak egy PCM anyag listát, melyek potenciális fázisváltóanyag szerepet tölthetnek be a tanulmányban.

Ahhoz, hogy tisztában legyünk az alkalmazott anyag, keverék veszélyeivel, humán egészségügyi és környezeti kockázataival, birtokolnunk szükséges az anyag, keverék biztonságtechnikai adatlapját, illetve technikai adatlapját.

Ezekre az adatlapokra meghatározott tartalmi és formai követelmények vonatkoznak, így a megfelelő szakaszokból – optimális esetben - hiteles információt kaphatunk a kémiai biztonságra vonatkozó kérdésekben. A kiválasztott fázisváltóanyagok kémiai biztonsági értékelése szempontjából kardinális tényező, hogy hozzáférhető e számunkra az anyag, illetve keverék biztonságtechnikai adatlapja.

A listát áttekintve megállapítottuk, hogy számos esetben nem áll rendelkezésünkre konkrét biztonságtechnikai adatlap. Emiatt kiragadtunk a rendelkezésünkre bocsátott PCM listából néhány anyagot, melyre szemléltetésképpen elkészítettük az anyaghoz tartozó biztonságtechnikai adatlapot. Az adatlapok

elkészítésénél több gyártó által közölt adatokat, információkat, a CLP besorolás szerinti szabályokat, valamint vegyianyag (ECHA) és toxikológiai információs oldalakat vettük alapul (IRIS, PubChem – HSDB, TOXBASE).

Ahogy azt láthatjuk az 1. táblázat alapján a vizsgált fázisváltóanyagok rendelkezhetnek fizikai-, egészségügyi- és környezeti veszéllyel egyaránt. A sokféle veszély számos kockázattal bír. Ezen információk feltárása és megismerése lehetővé teszi az előállítási, felhasználási, szállítási és hulladékkezelési feltételek beazonosítását és leírását, melyek mellett a kockázatok, az anyag teljes életciklusa alatt kézben tarthatóak lehetnek.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HŐ pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Andrassy Zoltán: Doktori disszertáció fázisváltóanyaggal töltött hőtároló modellezése, optimalizálása és épületgépészeti rendszerekbe illesztése
- [2] A Nemzetgazdasági Minisztérium Munkafelügyeleti Főosztályának tájékoztatása a REACH rendelet (1907/2006/EK rendelet), a CLP rendelet (1272/2008/EK rendelet), valamint az egyes munkavédelmi irányelvek kapcsolatával összefüggésben, Budapest, 2016. április 19.
- [3] Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat hivatalos honlapja, Tájékoztató az OKBI tevékenységéről, https://www.antsz.hu/data/cms35963/II_2_tevekenyseg_magyar.pdf,
- [4] TOXINFO, a kémiai biztonság szakértője, <https://www.biztonsagiadatlap.hu/>
- [5] Európai vegyianyag Ügynökség honlapja, <https://echa.europa.eu/hu/home>
- [6] IRIS, (Integrated Risk Information System) - Integrált Kockázati Információs Rendszer. https://iris.epa.gov/AtoZ/?list_type=alpha
- [7] PubChem: HSDB (Hazardous Substances Data Bank) – Veszélyes Anyagok Adatbankja, <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>
- [8] TOXBASE, A Nemzeti Mérgezési Információs Szolgálat elsődleges klinikai toxikológiai adatbázisa



+36 1 430 0014



imsys@imsys.hu



www.imsys.hu

Az **IMSYS Kft.** 1996 óta nyújt magas színvonalú mérnöki tanácsadást hazai és külföldi vállalkozások számára.

Szolgáltatásaik közé tartozik:

- Akkreditált analitikai és anyagvizsgáló laboratórium
- Környezetvédelmi engedélyeztetés és mérések (zaj, rezgés, levegőminőség)
- Kármentesítés, vízjogi engedélyeztetés
- Hulladékvizsgálatok
- Iparbiztonsági szolgáltatások (SEVESO, REACH, BIR)
- Környezetvédelmi és iparbiztonsági szoftverfejlesztés
- Üvegházhatású gázok kibocsátásának hitelesítése
- Munka- és tűzvédelmi szolgáltatások (MEBIR, kockázatbecslés)

Fázisváltó hőtároló makrokapszulák, tartályok és hőcserélők, mint a zöld és hulladék energiák hasznosításának eszközei

Gyenis János¹ professzor emeritusz

Feczkó Tivadar^{1,2} tudományos főmunkatárs, csoportvezető

¹ HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet, H-1117 Budapest, Magyar tudósok krt. 2.

² Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, H-8200, Veszprém, Egyetem u. 10.

A nagy látens hőkapacitású fázisváltó anyagok hőtárolási alkalmazásokhoz a hőátadás fokozása érdekében megnövelt felületű tárolókban helyezhetők el. Szerves és szervetlen fázisváltó hőtároló anyagok makrokapszulázása polimer vagy fém gömbökbe, csövekbe, tasakokba, illetve egyéb üreges alakzatokba, az egyik leggazdaságosabb módja a hőátadó felület megnövelésének. Jelen összefoglaló mű a makrokapszulákkal töltött tartályok mellett egyéb felületnövelt tartályos megoldásokat is bemutat. Kiemelt figyelmet szentelünk a hőcserélőkben elhelyezett látens hőtároló módszereknek.

*

The phase change materials with high latent heat capacity can be integrated into containers of high surface in order to increase the heat transfer. Macroencapsulation of organic and inorganic phase change materials into polymer or metal spheres, tubes, bags or other formations having cavities is one of the most economic methods to enhance the heat transfer area. The present review introduces other containers with increased surface beside holders loaded with macrocapsules. Latent heat storing methods of heat exchangers are highly emphasized.

A fázisváltózással megvalósított látens hőtárolás céljairól, fontosságáról, előnyeiről, lehetséges módszereiről a jelen kiadványban közölt „Fázisváltó hőtároló anyagok előállításra hulladék zsírból és használt növényi olajból” című cikkünkben írtunk, ezért ezeket itt nem ismertetjük.

Ebben az áttekintő cikkben a látens hőtároláshoz alkalmazható eszközöket (makrokapszulák, panelek, tartályok) és a gyakorlatban alkalmazható műszaki megoldásait ismertetjük. Ezek lényege, hogy időben változó, pl. napkollektorból, egyéb természetes hőforrásból, vagy hulladékhő forrásból nyert energiát egy zárt térben, például kapszulákban, tartályokban elhelyezett fázisváltó anyag (angolul phase change material, PCM) megolvasztása révén tároljuk, és azt a szükségeknek megfelelően szabadítjuk, használjuk fel a PCM megdermedésekor felszabaduló hő formájában. A hőtároló egység általában egy összetettebb, több komponensből álló rendszer részeként működik.

A hőakkumulátorként működő tároló egységben biztosítani kell a hőenergia bevitelét (az akkumulátor töltését), valamint kinyerését (ürítést). Ehhez hőközlő közegre, többnyire csőrendszerben vagy egy tartály elkülönített terében áramló folyadékra vagy gázra van szükség, és mindkét részfolyamatban biztosítani kell az energiaátvitelhez szükséges hőmérsékletkülönbséget és megfelelő nagyságú hőátadási felületet. Előnyös, ha a hőbevitelhez és hőkinyeréshez

ugyanazt a felületet és hőközlő közeget használhatjuk, mivel így a teljes hőátadó felület mindkét részfolyamatban kihasználható.

A hőtároló tartályok két nagy csoportba sorolhatók: egyik esetben a fázisváltó anyag folytonos, vagyis egybefüggő módon tölti ki a tartály belső terét, a hőközlő közeg pedig azon belül csövekben vagy az erre a célra kialakított tereken belül áramlik át a berendezésen. A másik esetben a fázisváltó hőtároló anyag elkülönült tételekben, például zárt gömbökben, táskákban - gyűjtő néven makrokapszulákban - helyezkedik el, melyek között áramlik a hőközlő folyadék vagy gáz.

A makrokapszulák esetében fontos jellemző a méret, mivel ettől függ a térkitöltés, vagyis az egységnyi térfogatban elhelyezhető PCM mennyiség, vagyis hőtároló kapacitás, valamint a hőátadó felület nagysága. Kisebb kapszulaméret nagyobb fajlagos hőátadási felületet biztosít, és emellett előnyösebb a fázisváltó anyag esetleges szételegyedésének akadályozásában is, ami különösen a szervetlen sóhidrát PCM-ek esetében fontos. Ugyanakkor ez a hőközlő folyadék áramlásával szembeni ellenállást növelheti. A kialakuló áramlási viszonyok, a hőközlő folyadék sebessége, turbulenciája, valamint a PCM fázisállapota, keveredése befolyásolja a hőátadás intenzitását, vagyis a hő bevitel és hőkinyerés dinamikáját. A fázisváltó anyagok önmagukban általában rossz hővezetők, ezért a makrokapszulák mérete, vagy a tartályokban elhelyezett hőtároló anyag kiterjedése ebből a szempontból is fontos, bár azt más eszközökkel, például bordázattal javítani lehet.

A két fázis elrendezési megoldás között közbenső helyet foglalnak el azok a berendezések, ahol a lamellás hőcserélőhöz hasonlóan a nem áramló fázisváltó anyagot tartalmazó térrészek és az áramló hőközlő közeg csatornái váltakozva helyezkednek el, hőátadó felületekkel elválasztva.

A fázisváltó anyagokat tartalmazó hőtárolókat egyaránt használják fűtési, illetve hűtési célok megvalósítására. Fűtési vagy például használati melegvíz előállítására szolgáló rendszerekben a hőtároló feltöltése külső, időszakosan rendelkezésre álló energiaforrásból történik, ürítését pedig a szükségleteknek megfelelő ütemben, a hőenergiát fogyasztó berendezések felé irányuló hőelvezetéssel végezzük. Hűtési, pl. nyári légkondicionálási feladat esetén a tároló feltöltése a ház belső terében jelentkező hőforrás vagy a hőszigetelésen át bejutó hő, vagyis a hőnyereség elvonása révén történik, ami a hőtároló PCM tartalmát részben vagy egészben megolvasztja. Ürítése pedig a PCM-ben tárolt hőnek a külső környezet felé történő átadásával, természetes konvekció, kisugárzás, vagy pl. hőszivattyú vagy hőcső segítségével megy végbe, ami a fázisváltó anyag megdermedésével jár. Az irodalomban jócskán találni olyan cikkeket is, ahol ezt a folyamatot fordítva értelmezik: a PCM hőtar-

talmának csökkentését, azaz hűtését, megdermesztését a hőtároló „hideg energiával” történő feltöltéseként fogalmazzák meg, az épület belső terének a PCM megolvadása révén történő hűtését pedig a tárolóból a „hideg energia” kiürítéseként jelölik meg. Bár ez a szóhasználat elvileg nem helyes, abból a szempontból érthető, hogy a hasznosság szempontjából így is felfogható a hőtároló működése.

A továbbiakban a jelenleg fellelhető szakirodalomból szemezgetve elsőként a hőtárolás szempontjából egyre inkább a figyelem középpontjába kerülő makrokapszulákkal foglalkozunk, majd a fázisváltó anyagokat tartalmazó a tartályos hőtároló berendezésekkel, végül pedig a hőtároló hőcserélőkkel kapcsolatos ismereteket tekintjük át. Mindegyik területen meghatározó az, hogy a hőtároló kapszulákban vagy berendezésekben milyen fázisváltó anyagot használnak. Itt a felhasználható anyagok sokfélesége két nagy csoportba sorolható: szerves és szervesetlen fázisváltó anyagok csoportjába. A hőtároló makrokapszulák esetében érdekes információk találhatóak azok előállítási módszereivel foglalkozó munkákban, és azok mérete, felépítése, belső szerkezete, valamint működési hőmérséklet tartományai és alkalmazási lehetőségei tekintetében. A működési hőmérsékleteket gyakorlatilag meghatározza a kapszulákba töltött fázisváltó anyagok fizikai, kémiai minősége, de külön figyelmet kell fordítanunk a kapszulák burkolatához felhasználható anyagokra is.

Hőtároló makrokapszulák

Előállítási technikák

Szerves és szervesetlen fázisváltó hőtároló anyagok kapszulázásának legegyszerűbb módja, ha azokat előre elkészített üres polimer vagy fém gömbökbe, csövekbe, tasakokba, táskákba vagy hasonló üreges alakzatokba, egyszerűen kész kapszulákba töltjük be. Betöltés után a kapszulákat légtömören le kell zárni, de gondoskodni kell arról, hogy a hőmérséklet- vagy fázisváltozás közben fellépő térfogat növekedés ne károsítsa a kapszulákat. Ehhez általában kellő nagyságú üres teret kell hagyni a kapszulákon belül.

A kapszulafal anyagának kompatibilisnek kell lennie a bezárt fázisváltó anyaggal, vagyis hosszú használat során sem károsíthatják egymást. Szerves fázisváltó hőtároló anyagokhoz általában könnyű megfelelő kapszulafal anyagot találni, legtöbbször közönséges polimerek vagy fémek használhatók azok bezárására.

Szervesetlen sók, sóhidrátok, vagy ezek keveréke sok szempontból előnyös lenne a megújuló energiaforrások vagy hulladékhő hasznosításához, mivel a szerves eredetű fázisváltó anyagokhoz képest többnyire olcsóbb, biztonságosabb, és könnyebben beszerezhető anyagok. Sajnos azonban hátrányaik is vannak: általában korrozívak, nem eléggé időt állók, a sóhidrátok könnyen bomlanak, a keverékek szételegyedhetnek, és hővezetőképességük sem elég jó. Nagyobb térfogatban történő alkalmazásukat elsősorban a stabilitás hiánya, a szételegyedés, rétegződés nehezíti meg, amire válasz lehet a kisebb térfogatba való bezárásuk. Milliméternél kisebb méretű kapszulákba történő bezárásukra (mikrokapszulázásukra) sok próbálkozás történt, de igazán jó megoldást eddig nem sikerült kidolgozni. Makrokapszulázásuk, vagyis több milliméter vagy centiméter kiterjedésű kapszulákba zárásuk sem egyszerű feladat, de sokkal könnyebb. Utóbbi területen már születtek alkalmazható megoldások, például karbonát sók keverékének milliméter vagy centiméter méretű szemcséit kétrétegű stabil bevonattal látták el [1]. A vizsgált megoldásban expandált grafitot használtak, szerves kötőanyag alkalmazásával és préseléssel, majd az így kapott szem-

cséket külső kaolin réteggel borították, amit nagy hőmérsékletű szinterezéssel stabilizáltak, így kifolyásmentes összefüggő kerámia bevonatot kaptak. Az expandált grafit arra volt jó, hogy szinterezéskor a sóolvadék ne folyjék ki a félig kész kapszulákból. A módszerrel $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{-Li}_2\text{CO}_3$ eutektikus keverékből 5-10 mm magméretű, 0,5-3 mm vastag bevonatú, nagyon stabil kapszulákat állítottak elő, 498 °C olvadási hőmérséklettel és 313 kJ/kg látens hővel. A kapszulák 400-600 °C közötti hőmérséklet tartományban elsősorban napenergiát hasznosító technológiai rendszerekben alkalmazhatók.

Viszonylag magas hőmérsékleten (120-350 °C) olvadó szervesetlen sókat, mint fázisváltó anyagokat tartalmazó fémbevonatú makrokapszulák előállítási módszerét dolgozták ki a Tampai Egyetemen (Florida, USA) [2,3]. Ehhez préseléssel előállított gömbalakú só pelletek felületén PTFE (teflon) bevonatot hoztak létre, majd újabb bevonatként – ipari léptékben is alkalmazható saját módszerrel – fémréteget alakítottak ki. Az előállított kapszulák kitűnő kémiai és mechanikai ellenállóképességgel bírtak, amit 2200 felfűtési-lehűtési ciklussal bizonyítottak.

Goswami és munkatársai kerámiafalú kapszulákat fejlesztenek már több mint egy évtizede [4]. Optikailag aktív, vagyis infravörös hőhullámokat kibocsájtó fázisváltó anyagot tartalmazó, külső fémréteggel borított kerámia makrokapszulák előállításáról számoltak be. Elsőként megfelelő radiációs tulajdonságú szervesetlen sókból (K-, Na-, Mg- kloridok, fluoridok, karbonátok) 306-308 °C-on olvadó pelletet készítettek, amit előre elkészített gömbalakú kerámia kapszulában helyeztek el. Ennek falát belülről jó emissziós tulajdonságú vékony réteggel borították, kívülről pedig fémréteggel vonták be. A kapszulák termikus jellemzőit, hőtároló kapacitását, a felmelegítési-visszahűtési ciklusok során várható tartósságát laborméretű töltött oszlopban vizsgálták. Hasonló, de töltőnyílással ellátott kerámia kapszulák előállítási módszerét szabadalmaztatták [5].

A makrokapszulázott látens hőtároló anyagok különleges osztályát képezik a könnyen olvadó fémet tartalmazó kapszulák, melyek nagy hőmérsékletű energiatároló rendszerekben használhatók. Bár ezek előállítása számos nehézségbe ütközik, különleges módszerrel vas-oxid köpenyű, réz magot tartalmazó kapszulákat hoztak létre az úgynevezett aerodinamikai lebegtetés módszerével, olvadákcseppekben lejátszódó fázisszevárációval [6]. A fémkeverékből préselt kockákat argon gázárammal tartották lebegésben, amit lézersugárral olvasztottak meg. Az olvadákcseppekben lehűlés közben fázisszeváráció játszódott le, melynek során a cseppek közepén réz különült el, amit fém vas vett körül. A felületen vas-oxid réteg is képződött. A hőtárolásra a réz mag fázisváltozási hője használható. A szerzők a kifejlesztett módszerrel kb. 2 mm átmérőjű kapszulákat állítottak elő, jó hővezető képességű fázisváltó réz maggal, amit magas hőmérsékletű energiatároló rendszerekhez javasoltak. Kérdéses, hogy nagyipari léptékben előállíthatók-e gazdaságosan ezek a kapszulák.

Makrokapszulák alakja, felépítése, mérettartománya

A különböző geometriájú kapszulák energetikai és exergetikai hatásfokainak összehasonlítása céljából végzett szimulációs vizsgálatok azt mutatták, hogy hőtároló fázisváltó anyaggal töltött azonos térfogatok (14,8 cm³) esetében a hengeralakú kapszula működött a legjobb energetikai hatásfokkal, ezt követte a gömbalakú, majd a kocka alakú kapszula [7]. Ez arra enged következtetni, hogy olyan hőtároló tartályokban, ahol áramló hőközlő folyadék a folytonos közeg, a csőalakú mikrokapszulák, vagy csövekbe töltött fázisváltó anyagok alkalmazása látszik legelőnyösebbnek. Mivel azonban

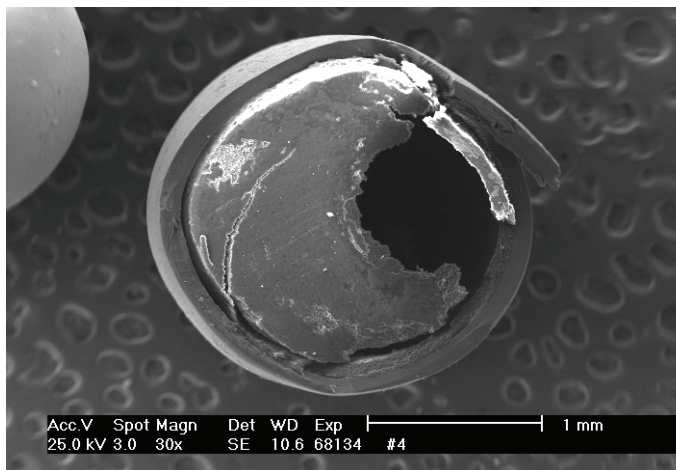
a szerzők által ismertetett kísérletekben csak egyedi kapszulákat vizsgáltak, nem lehet messzemenő következtetést levonni kapszula sokaságát tartalmazó komplex hőtároló rendszerekre.

Gömbszerű makrokapszulák

Dhau és munkatársai (2014) olyan, szervesetlen sókat (lítium-, kálium-, nátrium-nitrátok, -kloridok, -hidroxidok), vagy ezek két- vagy három komponensű elegyeit tartalmazó makrokapszulákat szabadalmaztattak 120 és 383 °C közötti olvadási hőmérsékletekkel, melyeket a következő lépésekben állítanak elő: 1. a szilárd állapotú fázisváltó anyag pelletálása, 2. a pelletek bevonása rugalmas anyaggal, 3. az így nyert szemcsék felmelegítése a bezárt anyag megolvadásáig, ami a burkolaton belüli levegő távozásával jár, majd 4. a kapszulák lehűtése a bezárt anyag megszilárdulásáig [8]. Ezek a kapszulák üreget is tartalmaznak, ami működés közben lehetővé teszi a fázisváltó anyag tágulását. A szabadalom magában foglalja többrétegű bevonatok kialakítását is, valamint a külső polimer héj fémes réteggel történő bevonását is, ami a rugalmas kapszulából merev falú kapszulákat állít elő.

Az ismert fázisváltó anyagok általában rossz hővezetőképességgel bírnak, ezért különböző megoldásokkal sokan törekednek ennek javítására. Kumaresan és munkatársai gömbalakú kapszulákba töltött fázisváltó anyag tömegében belső bordázattal kívánták javítani a hőátadást [9]. Ehhez kétféle kialakítást próbáltak ki, a gömb héjazata menti, illetve ortogonális (teljes keresztmetszetben kialakított) bordázatot, és vizsgálták ezek hatását áramlási modellezéssel és kísérletileg. A fázisváltó anyag teljes megolvadási ideje az ortogonális kialakítás esetében 37%-kal kisebb volt a gömb héjazata mentén kialakított bordázathoz képest, és 57,8%-kal kisebb a bordázat nélküli kapszulához képest. Számszerűen eltérő, de hasonló tendenciát kaptak a megdermedéshez szükséges idők összehasonlításakor is.

A kutatócsoportunk korábban minden összetevőjében biológiai eredetű, néhány milliméter átmérőjű kalcium-alginát héjba zárt kókuszolaj fázisváltó hőtároló anyag makrokapszulák (1. ábra) előállítását szabadalmaztatta magas, akár 80% PCM tartalommal és ennek megfelelő látens hőtároló képességgel [10]. Ezek a kapszulák üreget is tartalmaztak (1. ábra), ami működés közben lehetővé teszi a fázisváltó anyag tágulását. Igazoltuk, hogy az eljárás a zsírsavak mellett paraffinok és más megújuló forrásból előállítható szerves fázisváltó anyagok, mint a zsírsav-észterek makrokapszulázására is kiválóan alkalmas [11,12].



1. ábra. Kettévágott kalcium-alginát-kókuszolaj makrokapszula pásztázó elektronmikroszkópos felvétele

Henger- vagy cső alakú makrokapszulák

Egyszerű elkészíthetőségük miatt gyakran használnak hengeres vagy cső alakú kapszulákat hőtároló tartályokban vagy hőcserélőkben. Ezek akár polimerből vagy saválló acél fallal is készülhetnek [13]. Hosszabb csövekben elhelyezett fázisváltó anyagokat csöktetes hőcserélőkben is előnyös használni a nagy hőátadó felület miatt. Ilyen esetben a csöveken belül elhelyezett PCM, például sóhidrát nem áramlik, hanem helyben maradva olvad, illetve dermed meg, és a hőközlő folyadék a köpenytéren halad át [14].

Komplex stratégiát dolgoztak ki korrozív fázisváltó hőtároló anyagok betöltésére, lezárására, és a korrózió elleni védekezésre henger alakú fém kapszulákban [15]. A módszert 115,1 °C fázisváltási hőmérsékletű, 166,9 J/g olvadáshőjű kristályvizes magnézium-klorid ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) kapszulázására alkalmazták. Erre 40 mm külső átmérőjű, 250 mm hosszúságú eloxált alumínium csöveket használtak 3 mm falvastagsággal, melyeket szabályos háromszög osztásban helyeztek el a hőtároló tartályban, 90% térkitöltéssel. A csövek lezárásához becsavarozható zárófedeleket használtak tömítőgyűrűvel. Költségelemzést is végeztek, és megállapították, hogy ez a módszer költséghatékony megoldás lehet sóhidrátok kapszulázására hőtároló tartályokhoz.

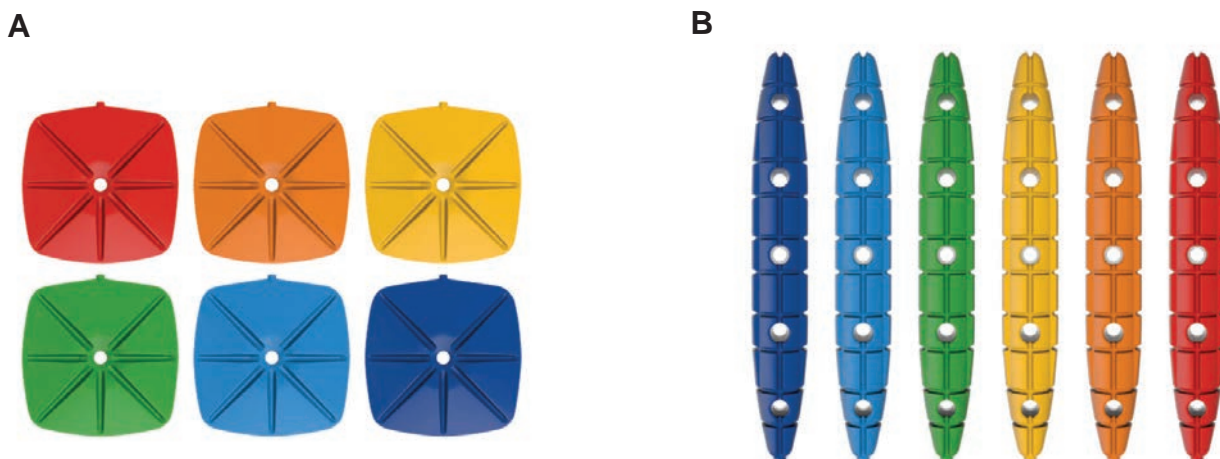
Hasáb alakú makrokapszulák

Hasáb alakú kapszulákat általában akkor részesítik előnyben, ha hőtároló tartályokban szabályos elrendezésben kívánják azokat használni. Jó példa erre az a megoldás, ahol a lapos táskák alakú polimer kapszulákat szabályos sorokban és oszlopokban helyezték el a hőtároló tartályban [16]. A fázisstabilizált PCM panelek is többnyire hasábok, lapok formájában készülnek, melyeket leginkább szabályos elrendezésben használnak tartályokban, falazatokban, vagy lemezes (táskás) hőcserélőkben [17].

Egyéb alakzatok

Sultan és munkatársai ellipszoid alakú kapszulákba (2,6×6,2 cm kis- és nagytengely méretek) töltött paraffin olvadási folyamatát vizsgálták kísérletileg és áramlási szimulációval [18]. Egy 30 cm átmérőjű, 30 cm magas tartályban felfelé áramló melegvíz hatására a kapszulában lévő paraffin megolvadása fokozatosan következett be. Eközben az átlátszó kapszulákban vizsgálták az olvadárány időbeli változását a belépő hőközlő folyadék hőmérséklete és áramlási sebessége függvényében, de szimulációval a kapszula geometria változtatásának hatását is tanulmányozták. Számításokkal azt találták, hogy minél inkább megnyúlt a kapszula az áramlás irányára merőlegesen, annál gyorsabb volt a PCM megolvadása, és annál rövidebb volt a teljes megolvadáshoz szükséges idő. A vizsgált tartományban a hőközlő folyadék áramlási sebessége csak kis mértékben befolyásolta az olvadás dinamikáját, de annak hőmérsékletét növelve az olvadás sebessége nőtt, jelentősen csökkentve a teljes megolvadáshoz szükséges időt.

Az Axiotherm GmbH (Eisenberg, Németország) cég különleges, lekerekített négyzet alapú, szélei felé elvékonyodó lapos (HeatSels® márkanéven, 2.A ábra), illetve ellipszoid alakú (HeatStixx® márkanéven, 2.B ábra) műanyag kapszulákat forgalmaz, melyeknek legnagyobb mérete 20-40 cm. Ezeket legalább 6 féle hőmérséklettartományban fázist váltó szerves és szervesetlen anyagokkal töltik meg; és a következő területeken ajánlják alkalmazni: meleg energia tárolás, hideg energia tárolás, hőszivattyús rendszerek, villamos energia – hőenergia átalakító és egyéb energiátároló rendszerek [19].



2. ábra. Az Axiotherm GmbH HeatSels® (A) és HeatStixx® (B) márkanévű fázisváltó hőtároló anyagokat tartalmazó makrokapszulái

Bionikus vagy pollen alakú kapszulákat a természetben előforduló albizia (selyemakác) pollen felépítését utánozva állítottak elő hőtároló tartályokban történő felhasználásra [20], ami azzal az előnyös tulajdonsággal rendelkezik, hogy a hővezetéshez rendelkezésre álló fajlagos felülete jóval nagyobb a belső bordázat nélküli kapszulák felületénél. A szerzők numerikus és kísérleti módszerekkel vizsgálták ennek a kapszula típusnak a hőtárolási teljesítményét és gazdaságosságát. Kísérleteik során a pollen alakú kapszulák üregeit a Rubitherm Technologies GmbH (Berlin, Németország) RT28 jelű paraffinjával töltötték fel és vizsgálták a termikus viselkedésüket. Méréseik szerint hővel történő feltöltésük sokkal gyorsabban megy végbe, nevezetesen rendre 19, 24, 41 és 61% csökkenést tapasztaltak a teljes feltöltéshez szükséges időben a hagyományos lapos, gyűrű alakú, hengeres töltetekhez tapadó fázisváltó anyaghoz képest. Alkalmazásuk gazdaságosságát jelzi, hogy exercia hatásfokuk 15%-kal jobb a puszta PCM-hez képest. Alakjuk optimalásával a megolvadási idő további 62%-kal csökkenthető, és exercia hatásfokuk még 16%-kal javítható. Jobban megmondolva, valójában ezek nem makrokapszulák, hanem tartályokban, oszlopokban alkalmazható töltetek. Teljesen megolvadó hőtároló anyagok esetében ugyanis nem biztosítható, hogy megolvadáskor az ne folyjék ki ezekből az üregekből. Hőtároló anyaggal feltöltött tartály esetében ez azonban nem okoz nehézséget, mivel jó hővezető anyagból készült és a nagy felületű töltet jelentősen segíti a fázisváltozást a tartály teljes térfogatában. Vagyis ez a töltet hasonlóan működik, mint a később tárgyalt, tartályba helyezett fémháb vagy fémháló.

Makrokapszulák működési hőmérséklettartománya

Mindig a felhasználási terület és cél határozza meg, hogy milyen hőmérsékleten vagy hőmérséklet tartományban olvadó-dermedő fázisváltó anyag használható a kapszulákban. Előnyös, ha a betöltött anyag olvadási és dermedési hőmérséklete közel áll egymáshoz, vagyis dermedéskor nem lép fel nagy fagyáspont csökkenés (túlhűlés). A gyakorlatban általában nem követelmény, hogy a kapszulák anyagának fázisátalakulása pontosan egy meghatározott hőmérsékleten következzen be, hanem elegendő, ha bizonyos hőmérséklettartományon belül megy végbe ez a folyamat. Bizonyos nem teljesen tiszta anyagoknál vagy keverékeknél (paraffinok, zsírsavak, zsíralkoholok) ez természetes is, és a fázisváltás hőmérséklettartománya akár 5-10 °C is lehet, és az olvadási és dermedési hőmérséklet középtételei is nagyjából ennyiben eltérhetnek

egymástól. Szeretlennel sók, sóhidrátok, eutektikumok esetében a fázisváltozási tartomány sokkal kisebb, de a túlhűlés ezeket az anyagokat fokozottan jellemzi. Bizonyos alkalmazásoknál ki lehet használni, hogy egy kb. 60 °C-on olvadó anyag (Na-acetát-trihidrát) akár 20 °C fokra is visszahűthető anélkül, hogy megfagyjon. Közismert alkalmazás a gyermekek körében kedvelt zselés kézmelegítő, amelyben a kristályosodást mechanikai hatással váltják ki. A dermedéspont eltolódás csökkentésére különböző göcképző adalékok (például magasabb dermedéspontú vegyületek adalékolása, szilárd részecskék) is használhatók.

Leginkább négy jellemző hőmérséklettartományban alkalmaznak hőtároló fázisváltó anyagokat. Alacsony működési hőmérsékletű PCM-ek (kb. -5 ±10 °C között) szükségesek hűtött terek, csomagok, áruk minőségének megőrzéséhez (általában sóhidrátok, víz, kis szénatomszámú szénhidrogének). Kis és közepes hőmérsékleten olvadó-dermedő (+15-30 °C) hőtároló kapszulák alkalmasak épületek légkondicionálásához és fűtéséhez (paraffinok, zsírsavak, zsíralkoholok). Magas hőmérsékleten fázist váltó (50-70 °C) kapszulák használati melegvíz előállítás, napkollektorok (paraffinok, zsírsavak, zsíralkoholok, szerves eutektikumok), távfűtés, hulladékhő hasznosítás céljaira, és a nagyon magas hőmérsékletű (300-600 °C) kapszulák naperőművek hőtárolási céljaira (sókeverékek, könnyen olvadó fémek).

Makrokapszulák anyaga

A hőtároló makrokapszulák töltetének anyagát a felhasználási követelmények, elsősorban hőtárolás szükséges hőmérsékleti szintje és a gazdaságossági szempontok határozzák meg. Két nagy csoportba sorolhatók: szerves és szervesen fázisváltó anyagok. A szerves anyagok között leggyakrabban alkalmazzák a különböző lánchoszúságú szénhidrogéneket, paraffinokat, de sok szempontból előnyösen használhatók erre a célra a zsírsavak, zsíralkoholok és bizonyos polimerek (pl. PVA helyett polietilén-glikol). Ezek többnyire a kis- és közepes hőmérsékletű alkalmazásoknál jöhetnek szóba. A szervesen sók, sóhidrátok, vagy ezek keveréke általában nagyobb hőmérsékletű hőtárolási célokra használatosak, például napenergia felhasználását célzó rendszerekben, de kis hőmérsékletű tárolókban is hasznosak lehetnek. A nagy hőmérsékletű rendszerekben, például naperőművek esetében fémek-fémolvadékok is számításba jöhetnek.

A kapszulák falának anyaga is sokféle lehet, itt is elsősorban az alkalmazási hőmérséklet, a kapszulákat körülvevő közeg és a kap-

szulamag anyagával való kompatibilitás az elsődleges szempont. Különböző polimerek, például polietilén, polipropilén elsősorban alacsony hőmérsékletű alkalmazásoknál célszerű. Nagy hőmérsékletű rendszerekben kerámia vagy fém kapszulafalak alkalmazása jöhet szóba.

Hőtároló tartályok

Makrokapszulákat tartalmazó hőtároló tartályok

A 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretében a Thermofoam Kft.-vel együttműködésben az egyik megoldásban HeatStixx® (2.B ábra) makrokapszulákat tartalmazó, szállítható 250 kWh hőenergiát tárolni és felszabadítani képes 6 m³ térfogatú tartályt fejlesztünk. A projekt tapasztalatai alapján a Thermofoam Kft. saját makrokapszulákat gyártását tervezi a HUN-REN Természettudományi Kutatóközpontban fejlesztett összetételű gazdaságosan előállítható fázisváltó hőtároló anyagok alkalmazásával.

Gömbyszerű makrokapszulákkal töltött tartályok

Használati melegvíz előállítás során általában követelmény, hogy a felhasználási pontokon állandó hőmérsékletet tartsunk. Fluktuáló energiaforrások – például napkollektorok - esetén ez nehezen biztosítható. Megoldás lehet a melegvíz tároló tartályokba töltött fázisváltó hőtároló anyag, előnyösen makrokapszulák formájában, melyek csökkentik a hőmérsékletingadozást. PCM kapszulákkal töltött hőtároló tartályokat legtöbbször komplex energetikai rendszerekben alkalmaznak. Erre példa lehet épületek belső tereinek fűtésére szolgáló napkollektoros rendszer, ahol a kollektor által nappal begyűjtött hőt a hőközlő folyadék cirkulációs köréhez tartozó tartályba töltött PCM kapszulákban tudják eltárolni a napfényhiányos időszakokra. 61 °C olvadáspontú paraffinnal töltött, 68 mm átmérőjű, gömb alakú nagy sűrűségű polietilén (HDPE), alumínium vagy lágyacél kapszulákat a tároló tartályba helyezték, és víz hőközlő folyadékot áramoltattak azok körül [21]. Azt tapasztalták, hogy a kapszulafal anyaga nem befolyásolta lényegesen a töltés és ürítés időtartamát. Peng és munkatársai annak lehetőségét vizsgálták, hogy sűrített levegős energiatároló rendszerek hatékonyságát miként lehet javítani PCM kapszulákat tartalmazó tartályban lejátszódó hőcserével [22]. A javasolt megoldás lényege az, hogy szélturbinákkal vagy napelemekkel előállított villamos energiával kompresszort hajtanak meg, és sűrített levegőt állítanak elő. A kompresszió során felhevült levegőt a kapszulákat tartalmazó tartályban lehűtik és a sűrített levegő tartályba vezetik. A levegőből elvont hőt a megolvadt fázisváltó anyagban tárolják. Energia visszanyeréskor a sűrített levegő tartályból a turbina felé áramló levegőt átvezetik a PCM kapszulákkal töltött tartályon, ahol az felmelegszik és a térfogata nő. A levegő tehát megnövelt energiatartalommal kerül a turbinákhoz, javítva a teljes rendszer határfokát. A szimulációs vizsgálatokat 2 m magas, 1 m átmérőjű tartály feltételezésével végezték el, amibe 20 mm átmérőjű, három különböző olvadáspontú hőtároló anyag kapszuláit töltötték be kaszkád elrendezésben (a nagyobb olvadáspontú PCM a forró levegő belépési helyéhez esett közelebb). Az olvadási hőmérsékletek változása a tartály magassága mentén jobban megfelel az átáramló víz hőmérsékletprofiljának, ezáltal az áramlás mentén jobban fenntartható a hőátadáshoz szükséges hőmérsékletkülönbség. Wu és munkatársai ipari méretű nagy hőmérsékletű hőtároló tartályok termikus viselkedését vizsgálták numerikus szimulációval [23]. Az álló hengeres tartályok feltételezett magassága 14,0 m, átmérője 2,45 m volt, melyeket 4 cm átmérőjű, szervesen

só/sókeverék fázisváltó anyagokat tartalmazó kapszulákkal töltöttek fel. Háromféle konfigurációt tételtek fel: az első tartályban azonos (375 °C) olvadási hőmérsékletű fázisváltó anyagot használtak, a második tartályban háromféle, különböző olvadáspontú (375 °C, 340 °C és 305 °C) anyaggal töltött kapszulákat helyeztek el kaszkád rendszerben, felülről lefelé csökkenő olvadásponttal. A harmadik tartályban ötféle kapszulát vettek figyelembe, rendre 375 °C, 360 °C, 340 °C, 320 °C és 305 °C olvadáspontokkal. A kapszulák közötti térben sóolvadék hőközlő folyadék áramlott fentről lefelé. A szimulációs eredmények alapján megállapították, hogy kaszkád kialakítás esetén az átáramló sóolvadék hőmérséklete az oszlop magassága mentén egyenletesebben változott az azonos olvadáspontú kapszulák alkalmazásához viszonyítva. A nem kaszkád rendszerben hosszabb feltöltési idő alatt is csak kisebb feltöltési fokot lehet elérni a kaszkád rendszerekhez viszonyítva. Utóbbiak között az 5 fokozatú kaszkád rendszer volt a legjobb, a legrövidebb feltöltési és leürítési időt eredményezve.

Henger vagy cső alakú makrokapszulákkal töltött tartályok

Ezek a hőtároló tartályok azzal jellemezhetők, hogy bennük olyan csőszakaszok, csövek vagy csőkötegek vannak, melyekbe fázisváltó anyagot zárnak be, vagyis az nem áramlik. A csövekben elhelyezett fázisváltó anyag hőenergiával való feltöltése és ürítése a tartály köpenyterében áramló közeg révén történik, ami feltöltéskor lehül, ürítéskor pedig felmelegszik. A tartályban elhelyezett csövek egyfajta makrokapszuláknak foghatók fel, ezért az ilyen típusú készülékeket ebben a fejezetben tárgyaljuk, bár működésük eredményét tekintve ezeket a később tárgyalt hőtároló hőcserélőkhöz is sorolhatnánk. A különbség csak annyi, hogy utóbbiak esetében a fázisváltó anyag a köpenyterében van elhelyezve, ami semmiképp nem fogható fel kapszulának, a hőközlő közeg pedig a csöveken belül áramlik át a készüléken.

Zárt saválló hengeres acél csövekbe töltött fázisváltó anyagot elektromos fűtéssel adott hőmérsékletre melegítettek, majd behelyezték egy nagyobb nyitott hengerbe, melyen át hűtőközegként levegőt, vizet, vagy hőközlő olajat áramoltattak, és mérték a PCM hőmérsékletét az idő függvényében [24]. Fázisváltó anyagként először 60% NaNO₃ és 40% KNO₃ összetételű eutektikumot használtak 230 °C olvadásponttal, majd a következő kísérletekben a sókeverékbe fémhabot, illetve fém szivacsot helyeztek el a hővezetőképesség növelésére. Méréseik szerint mind a fémhab mind a fémszivacs jelentősen javította a fázisváltó anyag megdermedésének sebességét a kapszulán belül.

Hasáb alakú kapszulákkal töltött tartályok

Hasáb alakú kapszulákkal töltött fekvő elrendezésű hőtároló tartály működését vizsgálták, amibe szabályos oszlopokban és sorokban 32 darab kereskedelembe kapható, egyenként 0,5 m hosszú, 0,25 m széles és 0,032 m magas polimer falú kapszulákat helyeztek el [16]. A kapszulák, 45,9/46,1 °C dermedési/olvadási hőmérsékletű sóhidrát keveréket tartalmaztak. A különböző üzemelési körülmények során mért és számított eredményeket ipari méretű rendszerek tervezéséhez javasolták a működtetési körülmények javítására.

Különleges alakú makrokapszulák

Egy tanulmányban hőtárolási rendszert modelleztek és hasonlítottak össze azok teljesítménye és költségei alapján [25]. Először egy 3 m átmérőjű és 5 m magasságú hengeres tartályban PCM tartalmú spirális csőköteget helyeztek el, és a tartály köpenyterében hőközlő

folyadékot áramoltatva vizsgálták a hőtárolás jellemzőit. Ezt használták referenciaként. Ezután ugyanebbe a tartályba töltve kétféle, polimer falú kapszula kialakítást próbáltak ki hőtárolás céljából: a korábban bemutatott ellipszoidhoz hasonló hosszúkás HeatStixx® (2.B ábra) kapszulákat, illetve a lekerekített négyzet alapú, lapos HeatSels® (2.A ábra) hőtároló kapszulákat. A rendszer működési hőmérséklet tartománya mindegyik esetben 46-72 °C volt, a hőközlő folyadék 4,2-8,4 m³/h között változó áramlási sebessége mellett. Méréseik szerint 3 órás töltési idő után a lapos kapszulákkal lehetett elérni a legnagyobb energiatároló kapacitást (40%-os töltöttség, 710 kWh), bár ezeknek a kapszuláknak a teljes tárolókapacitása valamivel kisebb volt (1760 kWh), mint a spirál csőigényes rendszeré (1830 kWh). A hosszúkás ellipszoidhoz hasonló kapszulák által tárolt hőmennyiség 3 óra töltési idő után valamivel kisebb volt (700 kWh), mint a lapos kapszuláké. Az utóbbi kapszulákban történő tárolás költsége volt a legkisebb: 6-12%-kal kisebb a spirál csőigényes tároláshoz viszonyítva, de csak 2-3%-kal kisebb, mint a hosszúkás kapszuláké.

Fázisstabilizált hőtároló testekkel töltött tartályok

Az ezen a területen alkalmazott fázisstabilizált hőtároló alakzatok hasonló módon működnek, mint a PCM makrokapszulák, ezért ezeket is bevontuk a témakör tárgyalásába. Ezek olyan szilárd halmazállapotú testek, melyek zárványok formájában tartalmazzák a fázisváltó hőtároló anyagokat. Előállításuk ez utóbbiak és valamilyen mátrixanyag keverékéből öntéssel és a mátrixanyag megszilárdításával, préseléssel, képlékeny formázással, vagy fázisváltó anyagok porózus testekben történő felitásával történhet. Épületek szellőző rendszereiben történő használatra készítettek ilyen kompozit testeket, korongok, illetve gömbök formájában, és vizsgálták azokat hőtechnikai szempontokból [26]. Háromféle mátrixanyagot használtak: néhány mikronos fém alumínium port és kétféle alumínium-oxid port. Ezeket sztearinsav fázisváltó anyaggal keverték és hőkezeléssel formálták 2,4 cm átmérőjű korongokká, kb. 15-25% sztearinsav tartalommal, és 28-47 kJ/kg látens hőkapacitással. Másik módszerük szerint a sztearinsav – mátrixanyag – epoxigyanta keverékéből 5,5 cm átmérőjű gömbalakú kapszulákat formáztak, 50-65% sztearinsav tartalommal, 90-116 kJ/kg látens hőkapacitással. A fázisstabilizált kapszulákat a szellőzőrendszer részét képező, 0,4 m átmérőjű és 1,0 m magas tartályban helyezték el. A hőtároló töltését napkollektorban 70 °C maximális hőmérsékletig felmelegített levegő átáramoltatásával végezték. A hőtároló ürtése szintén levegőárammal történt, az épület belső hőmérsékletének 20 °C -on tartása érdekében. Az alumínium és alumínium-oxid részecskék jelenléte a kapszulákban jelentősen javította az azokon belüli hővezetést. Ezek az eredmények arra is rámutatnak, hogy hőtároló tartályokban használható kapszulák akár külső bevonat vagy kapszulahéj nélkül is működőképeseek lehetnek.

PCM tartályok hőközlő folyadék átfolyással

Az ilyen megoldások esetében a PCM tölti ki az egész tartályt, és a hőközlő folyadék a tartályon keresztül átvezető csövekben, lamellákban, üregekben áramlik, vagyis fordítottja az előzőekben tárgyalt elrendezésnek. Működőképés kialakításukhoz figyelembe kell venni, hogy összefüggő, nagyobb kiterjedésű terekben elhelyezett fázisváltó anyagok esetében az egyik legnagyobb nehézséget jelent azok nem elég jó hővezetőképessége. Utóbbi gátolja a betárolandó vagy kinyerendő hő terjedését, és ezáltal lassítja a szilárd fázis - olvadék front mozgását, vagy a teljes térfogat menti egyen-

letes olvadást-dermedést. Ezt a nehézséget hővezetést javító bordázattal, nagy fajlagos felületű fémhabok, fémszivacsok, fémhálók behelyezésével, vagy jó hővezető részecskék (például fémporok, grafit) jelenléte révén célszerű megoldani.

Fémháló betétek

A hővezetés javítására fémhálók alkalmazásával is történtek ígéretes vizsgálatok egy 75×75 mm keresztmetszetű szögletes tartályban, amibe fázisváltó hőtároló anyagként 23 °C olvadási hőmérsékletű kókuszolajat töltöttek [27]. A tartály egyik oldalán melegvízzel fűtött lapos hőcserélőt helyeztek el, a kókuszolajba pedig fémhálót merítettek. A háló nyílásmérete 2 mm, a fémszálak vastagsága 0,35 mm volt. A hőcserélő fűtését 45 °C-os cirkuláló vízzel végezték, miközben mérték, és kamerával is megfigyelték az előzetesen 15 °C-ra lehűtött kókuszolaj olvadását, az olvadékhányad időbeli változását, és a hőmérséklet hely szerinti eloszlását, majd ezeket összehasonlították a fémháló nélkül végzett kísérletek eredményeivel. Megállapították, hogy a háló használata sokkal egyenletesebbé tette a hőmérséklet térbeli eloszlását, és akár 52%-kal is lerövidítette a teljes megolvadáshoz szükséges időt.

Bordázott csövek, csőigények

Összetett hőenergia tároló rendszerben vizsgálták a fázisváltó anyag alkalmazásának előnyeit, amelyben a hőközlő olaj tárcsaszzerű bordákkal ellátott, 3 darab vízszintes csőben párhuzamosan áramlott [28]. A rendszer 2 db hőtároló tartályt, a hő betáplálásához és visszanyeréséhez szükséges hőcserélőt, hőközlőolaj tartályt, elektromos olajmelegítőt, hűtővíz ellátást, cirkulációs szivattyúkat, tágulási tartályt és mérőműszereket tartalmazott. A tartályokba 60 °C olvadáspontú paraffint töltöttek. A kísérleteket később 220 °C olvadáspontú, kétkomponensű szolár só (40% KNO₃ és 60% NaNO₃ keveréke), illetve 142 °C olvadáspontú, háromkomponensű HITEC só (53% KNO₃, 40% NaNO₂ és 7% NaNO₃) használatával is elvégezték. Yang és munkatársai napkollektorral fűtött hőtároló tartályban a hőközlő folyadékot vízszintes bordázattal ellátott, változtatható sebességgel forgatható csövön vezették át [29]. A bordázat és a folyamatos mozgatás révén jelentősen tudták javítani a konvektív hőátadást a cső és az olvadó hőtároló anyag között.

Fémhabokkal töltött tartályok

Cui és munkatársai szakirodalmi feldolgozásban tekintették át a különböző hővezetést javító betétekkel ellátott hőtároló tartályokat [30]. A 2000 év óta megjelent közel 500 forrásmunkában a hővezetőképességet javító eszközök, mint például a hőtároló fázisban elhelyezett részecskék, bordázatok, hőcsövek, porózus anyagok között a PCM/fémhab kompozitok kitétetett szerepet kaptak. A teljesítményt befolyásoló tényezők között legfontosabbak voltak a fémhabok strukturális jellemzői, a porozitás, a pórusűrűség, a kompozit betét geometriai arányai, a tartályban elfoglalt térfogata és PCM/fémhab fázisarány. Felhívták a figyelmet arra, hogy az üzemeltetés során fontos tényező a fázisváltozás során bekövetkező térfogatváltozás, ami a fémhabon belül üres terek kialakulásához vezet és hőszigeteléseként jelentkeznek a fém és a PCM között. Az impregnálás szempontjából szükséges tulajdonság a nedvesíthetőség és a fémhab átjárhatósága. Nedvesíthetőség szempontjából előnyös a nikkal és réz habok használata. Vákuum segítségével a pórusok telítési foka elérheti a 95-100%-ot is. A fémhabokon belül alkalmazott nano- és mikrorészecskék, bordák, vagy nano- és mikrokapszulázott PCM használata javíthatják a hőátadást. Ki-

emelték, hogy a PCM/fémhab kompozitok fontos szerepet kapnak a megújuló energiaforrások hasznosításában, az ipari hulladék hő tárolásában, épületek energiagazdálkodásában. A hőtárolás dinamikáját a fémhabokkal történő rendszerekben a természetes konvekció és a hővezetés befolyásolja. A konvekciós áramlást befolyásolja a pórusszerkezet és annak térbeli változása, a fázisátalakulás folyamata viszont függ a természetes konvekciótól. A fázisváltó anyag teljes megolvadásához szükséges idő a pórusszerkezetben lejátszódó természetes konvekció következtében 85,2-88,3%-kal csökkent ahhoz képest, mintha csak a hővezetést vették volna figyelembe [31]. Az átlagos hőmérsékletváltozás sebessége pedig pórusszerkezettől függően 301,9-378,4%-kal nőtt a természetes konvekció következtében.

Fémhabok hőtároló tartályokban történő alkalmazása során többen is arra a következtetésre jutottak, hogy a pórusszerkezet térbeli változtatása (porozitás-gradiens) előnyösen befolyásolja a fázisváltozás dinamikáját. Függőleges hengeres tartályokban, vagy csövekben elhelyezett fémhab porozitásának radiális irányú változásának hatását vizsgálták kísérletekkel igazolt matematikai modellezéssel [32]. A hőközlő folyadék a tartály középvonalában elhelyezett függőleges csőben áramlott. Az adaptív hab elrendezésnek nevezett módszer során radiális irányban három eltérő pórusszerkezetű zónát alakítottak ki. A referenciatartályban a három zóna porozitása megegyezett egymással, értéke egyenként 0,94-0,94-0,94 volt. Ehhez hasonlították 27 különböző porozitás gradiens esetén kapott áramlási és fázisváltozási jellemzőket. A legjobb eredményt akkor kapták, amikor a középső zónában viszonylag nagy porozitást alkalmaztak, és a belső zóna kisebb, a külső zóna pedig még nagyobb porozitású volt. Ebben az esetben a belső, középső és külső porozitás rendre 0,87, 0,94, és 0,97 volt, ami a teljes megolvadás időtartamát 17,15%-kal rövidítette a referenciához képest, de nem csökkentette a tartály hőtároló kapacitását. A magyarázatot a jobb természetes áramlásban látták.

Hőtároló hőcserélők

Léteznek olyan megoldások is, ahol a látens hőtároló anyagot nem kapszulákban, hanem hőcserélőben, annak egyik terében helyezik el. A hőcserélő másik terében hőközlő fluidum áramlik, és a hőtároló fázisváltó anyag hővel való feltöltése és ürítése a hőcserélő hőátadó felületén keresztül történik. Működésüket tekintve közel állnak az előzőekben bemutatott hőtároló tartályok működéséhez, külön tárgyalásuk bizonyos mértékben szubjektív döntésünkön múlott. Az ide sorolt megoldások specifikuma abban a különbségben áll, hogy a hőtároló hőcserélők kialakítása hasonló a szokásos hőcserélőkhöz, vagyis nem tartályszerű berendezések, és a bennük kialakított terek térfogata viszonylag nem nagy mértékben tér el egymástól. A másik specifikum pedig abban áll, hogy – legalábbis sok esetben – a hővel való feltöltésük és a hő visszanyerése adott időszakokban szimultán módon történhet. Ebben az esetben a feltöltést és ürítést szolgáló hőközlő fluidumok más-más csőrendszeren keresztül áramlanak át a berendezésen, vagyis a hőtároló hőcserélőben három elkülönült teret alakítanak ki: külön a fázisváltó anyag elhelyezésére, és külön-külön a hideg és a meleg hőközlő cirkulációs kör számára. Ez utóbbi kialakítás speciális esete, amikor egy napkollektor három koncentrikusan elhelyezett csöveinek egyikében (a középsőben) található a fázisváltó hőtároló anyag.

Magyarországon a HeatVentors Kft. innovatív kisvállalkozás tervez és forgalmaz hőtároló tartályokat fűtési és hűtési rendsze-

rekhez, 0,9-1,9 m³ külső térfogattal és 20-65 kWh hőtárolási kapacitásokkal, 100-200 kW elérhető teljesítmény mellett. Megoldásaikkal 20-50% nagyságrendű energiamegtakarítás elérését célozzák meg [33]. Igény esetén vállalják 1100-1300 kWh kapacitású szezonális hőtároló létesítését is.

Cső a csőben típusú PCM hőcserélők

A napkollektorok csöveiben áramló hőközlő folyadék hőmérsékletét nagymértékben befolyásolja a napsugárzás időben változó intenzitása, ami meghatározza a napkollektor pillanatnyi termikus hatásfokát is. Az ebből adódó veszteség csökkentése céljából olyan napkollektor csöveket alakítottak ki, melyek integrálva tartalmazzák a hőmérsékletingadozás csökkentésére és egyben hőtárolásra is szolgáló fázisváltó hőtároló anyagot is [34]. Ehhez három, koncentrikus csőből álló szerkezetet alakítottak ki, ahol a belső, legkisebb átmérőjű csőben áramoltatták a hőközlő fluidumot (itt levegőt), a középső, hengergyűrű alakú térben helyezték el a fázisváltó hőtároló anyagot (szolár sónak nevezett 60:40 tömegarányú NaNO₃ - KNO₃ elegy). A külső hengergyűrűben a hőveszteség csökkentésére vákuumot hoztak létre. A vizsgált kollektorcső 630 mm hosszú volt, 20/70 mm belső és külső átmérővel. Mérések és numerikus szimuláció alapján a hasonló méretű hagyományos napkollektor csővel összehasonlítva az új konstrukció előnyösebbnek bizonyult, mivel az új típusú kollektor cső hőmérséklete a különböző intenzitású napsugárzással történt feltöltés, majd áramló levegővel történő 4 órás hűtés után kb. 65-129 °C-kal volt magasabb, vagyis hőkinyerés közben tartósan magas hőmérsékleten maradt. Cső a csőben hőcserélőkben alkalmazható fémhabok és különböző kialakítású cső bordázatok összehasonlítását végezték matematikai módszerekkel abból a szempontból, hogy az egyes módszerekkel milyen mértékű hővezetés javulás érhető el [35]. Ezek az eszközök a PCM számára rendelkezésre álló hasznos térfogatnak csak igen kis hányadát, 1,5-3%-át foglalták el, nem csökkentették számottevően a tároló hőkapacitását, de jelentősen rövidítették a fázisváltó anyag teljes megolvadásához szükséges időtartamot. Az összehasonlításból a fémhab került ki győztesen, a szerzők szerint akár 10-szer gyorsabb megolvadás érhető el használatával.

Koncentrikus csövekből felépített, hőtárolást is megvalósító kaszkád hőcserélő beiktatható a napkollektor és a háztartási melegvíz tartály közé [36]. A hőtároló hőcserélő csövei három koncentrikus hengerből álltak, ahol a napkollektorból jövő forró hőközlő folyadékot külső körgyűrű keresztmetszetű térben áramoltatják és vezetik vissza a napkollektorba, míg a hálózati hidegvíz a legbelső csővön keresztül ellenáramban halad át hőcserélőn a melegvíz tartály felé. A külső és belső csövek közötti hengergyűrűben három, különböző olvadási hőmérsékletű fázisváltó hőtároló anyagot (Rubitherm cég által forgalmazott RT62HC, RT54HC and RT44HC paraffinok rendre 62 °C, 54 °C és 44 °C névleges olvadásponttal) helyezték el, olyan sorrendben, hogy a napkollektorból érkező forró víz először a legmagasabb, majd a közepes és legkisebb olvadáspontú paraffinnal érintkezzen a falon keresztül. A bejövő hidegvíz esetében ez fordított sorrendben történik. A háromfokozatú kaszkád hőcserélő előnye az egyetlen, adott olvadási hőmérsékletű fázisváltó anyag alkalmazásával szemben, hogy töltéskor itt lejátszódott mindhárom PCM teljes megolvadása, ami nagyobb hőtárolási kapacitást eredményezett. Másrészt a napkollektorba visszatérő alacsonyabb hőmérsékletű hőközlő folyadék a napkollektor hatásfokát is javította.

Csőköteges PCM hőcserélők

Csőköteges hőcserélőkben is előnyösnek bizonyultak a többféle olvadáspontú hőtároló anyagot tartalmazó kaszkád hőcserélők [37]. Pilot léptékű kísérleti berendezésben kétféle, nagy látens hőjű PCM-mel háromféle hőcserélő konfigurációban keresték az optimális konfigurációt. A pilot berendezés egy 0,527 m széles, 0,273 m magas és 1,273 m hosszú, fekvő hasáb alakú köpenytérből, és az abban elhelyezett 49 db csőből állt, 6,55 m² hőtároló felülettel. A hőtároló töltését 24 kW teljesítménnyel végezték, a hő felhasználása pedig légmelegítő kaloriferrel történt, mindkét esetben hőközlő olaj áramlatással a csövekben. Az eredmények szerint a kaszkád hőcserélő tárolási hatásfoka 19,36%-kal bizonyult jobbnak az egyetlen PCM-et alkalmazó berendezéseknél. Előbbi esetben a hőközlő folyadék is egyenletesebb hőmérsékletváltozást mutatott a ki- és belépési pontok között. A többfokozatú kaszkád hőtároló hőcserélő az egyfokozatú hőcserélőkhöz képest nemcsak azzal az előnnyel jár, hogy növeli a termikus hatásfokot és hőteljesítményt, de kiterjeszti az alkalmazási lehetőségeket is.

Vikas és munkatársai numerikus vizsgálatokat végeztek annak megállapítására, hogy dinamikus körülmények között a fekvő hengeres csőköteges hőcserélőkben a csövek elrendezése hogyan befolyásolja a PCM megolvadási időtartamát és a hőtároló teljesítményét [38]. Kétféle keresztmetszeti elrendezést tételtek fel: vízszintesen sorakozó, illetve átlós elrendezésű csövekkel, és azt is vizsgálták, hogy a csőosztás/csőátmérő arány (PR) milyen hatással van a fázisváltó anyag olvadási-dermedési folyamatára. Az átlós elrendezés nagy PR aránnyal (PR=3,5) bizonyult a legjobb választásnak, ahol a megolvadás ideje 74,2%-kal csökkent a vízszintes sorokban való elrendezéshez képest. A megszilárdulás ideje is 56% csökkenést mutatott.

Egy másik tanulmányban egy feltételezett napkollektoros háztartási melegvíz előállító rendszer részét képező vízszintes hőtároló tartály teljesítményét vizsgálták a tartályon áthaladó primer és szekunder vízköri csövek pozícióinak függvényében numerikus szimulációval, melyet irodalmi forrásokból gyűjtött kísérleti adatokkal validáltak [39]. Azt az esetet vizsgálták, amikor a tartály hővel történő feltöltése és ürítése szimultán történik, a következő módon: a feltöltés napközben a napkollektor melegével folyamatosan történik, a fogyasztás pedig rövid, 10-30 perces intervallumokban, az otthoni melegvíz fogyasztás szokott módja szerint, különböző kilépő melegvíz térfogatáramokkal. Kétféle kiindulási helyzetet is feltételeztek: a hőtároló teljesen feltöltött, illetve teljesen leürített állapotát. A szimuláció során a hőtárolóban változtatták a primer és szekunder körű csövek egymáshoz és a tartályhoz viszonyított helyzetét. A szekunder körű cső minden esetben a tartály felső részében, a primer körű pedig alul helyezkedett el. Hőtároló fázisváltó anyagként 41,9-43,9 °C tartományban dermedő-olvadó, 184 kJ/kg látens hőjű dodekanolsav adatait vették figyelembe. A csövek helyzetének változtatásával különböző mértékű javulást értek el a felhasználható, illetve a napkollektorból nyert energia nagyságában.

Csőkígyós hőcserélők

Hideg energia tárolására szolgáló szögletes (195×210×5 mm élhosszúságú) hőcserélő működését kísérletekkel és numerikus szimulációval vizsgálták [40]. Hőtároló fázisváltó anyagként a köpenyoldalon vezet, illetve jeget használtak, melyet a jobb hővezetés érdekében expandált grafittal kevertek. A köpenyen belül függőleges síkban csőkígyót építettek be, ami a hőcserélő teljes keresztmetszetére kiterjedő bordákkal láttak el. Hőközlő folyadékként fagy-

álló keveréket használtak, amivel a hőtárolót -10 °C-ig hűtötték le, amivel megfagyasztották a betöltött víz-grafit keveréket. Vizsgálataik szerint a hőtárolóba töltött keverék teljes fázisátalakulási ideje 69,7%-a volt a tiszta víz megfagyasztásához szükséges időnek, miközben a tároló hőkapacitása alig csökkent. A megdermedéshez szükséges idő a hőközlő folyadék térfogatsebessége növelésével és hőmérsékletének csökkentésével is rövidült.

Fázisstabilizált hőtároló panelek hőcserélőkben

Tipikus fázisstabilizált PCM elemek alkalmazhatóságát háztartási melegvíz előállító rendszerekben vizsgálták [41]. Lemezes hőcserélőhöz hasonló, hasáb alakú hőtároló rendszert alakítottak ki 260 mm×500 mm×400 mm fő méretekkel. Ebben nátrium-acetátri-hidráttól és expandált grafitból készült hőtároló paneleket helyeztek el 260 mm×500 mm×20 mm méretű táblák formájában. A panelek és belső csatornákkal ellátott alumínium hőcserélő lemezek váltakozó elrendezésével szendvics szerkezetet hoztak létre. Ez a szerkezet egyszerre hőtárolást és hőcserét is képes volt megvalósítani. A legjobb eredményt akkor érték el, amikor a fázisváltó anyag aránya a panelekben 80% volt. Az így kialakított hőcserélő közel 200 kg melegvizet adott kb. 23 perc alatt, 300 liter/óra belépő vízáram esetén, ami közel 83%-os hővisszanyerési hatásfoknak felelt meg.

Összefoglalás, következtetések

A terület legújabb szakirodalmának áttekintése alapján megállapítható, hogy a hőtárolás az energetikai rendszerek igen nagy részében kiemelkedő jelentőségű, és ezen belül a PCM makrokapszulák fontos eszközt képezik a célok elérésének. Ebben az összefoglaló cikkben áttekintettük a PCM makrokapszulák fontosabb előállítási módjait, főbb jellemzőit, formáit, a felhasználható anyagokat, működési hőmérséklet tartományait, különös tekintettel a legújabb fejlesztésekre.

Szakirodalmi eredmények és példák alapján bemutattuk a felhasználási területeket, így a különböző kialakítású makrokapszulák hőtároló tartályokban történő alkalmazási módjait, formáit. E célból leggyakrabban a tartályokba berétegzett gömbalakú, hengeres vagy csőszerű, hasábszerű és újabban néhány különleges alakú PCM makrokapszula formát alkalmaznak a forrásmunkák. A hazai Thermofoam Kft. a HUN-REN Természettudományi Kutatóközponttal együttműködésben innovatív formájú makrokapszulázott PCM gyártását tervezi a vállalkozás csomagolástechnikai tapasztalatát és az Anyag- és Környezetkémiai Intézet Funkcionális Nanorészecskék Kutatócsoport fázisváltó anyagok terén felhalmozott tudását ötvözve.

Egyre inkább terjedőben vannak az olyan hőtároló tartályok, ahol a fázisváltó anyag a tartály fő tömegében, annak köpenyterében van jelen, és a hőközlő anyag csövekben áramlik át a tartályon. A fázisváltó anyagot tartalmazó anyag kiterjedése és gyenge hővezetőképessége miatt a hőátvitel dinamikájának gyorsítása érdekében alkalmazott fémháló betétek, bordák, fémhabok jelentősen csökkentik a tároló hőenergiával való feltöltésének és ürítésének időtartamát, ami az ilyen energetikai rendszerek egyik kritikus pontja. A magyar HeatVentors Kft. nagyméretű hőcserélő tartályt forgalmaz, melyben a PCM folytonos fázisban van jelen lamellákba töltve és a víz hőközvetítő közeg csövekben szállítja és adja át a hőt a nagy felületű lamellákon keresztül a PCM-nek.

A hőtárolási feladatok nagyon hatékony és gyors működésű teljesítésére alkalmasak a hőtároló hőcserélők, melyek kisebb helyet foglalnak el a hőtároló tartályokhoz képest, alkalmazásuk azonban egy adott feladatra mérlegelés kérdése, mivel a kisebb

PCM térfogat miatt hőtárolási kapacitásuk is kisebb a tartályos megoldásoknál, adott esetekben azonban mégis előnyösebb lehet. Számottevő hatékonyságnövelést értek el egynél több, különböző olvadáspontú PCM alkalmazásával, amelyekkel a vizsgálati tartályban kihasználták a különböző hőmérsékletű rétegződés kialakulását. Néhány munkában talákoztunk olyan megoldásokkal is, ahol a PCM kapszulákhoz hasonló hatású, fázisstabilizált PCM testeket alkalmaztak.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HŐ pályázati program finanszírozásában valósult meg. Köszönetünket fejezzük ki a HUN-REN Központ innováció fókuszú Proof of Concept Programjának a „Nagy hőkapacitású fázisváltó hőtároló puffertartály fejlesztése” című ELKH-PoC-2023-012 számú pályázatra nyújtott támogatásáért.

Irodalomjegyzék

- [1] L. Zeng et al: Macroencapsulated carbonate eutectic salt phase change material with high durability for high temperature heat storage, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 256 (2023) 112338, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112338>
- [2] T.A. Alam et al: Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems, *Applied Energy* 154 (2015) 92–101, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.086>
- [3] T. A. Alam: Experimental Investigation of Encapsulated Phase Change Experimental Investigation of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage Materials for Thermal Energy Storage, USF Tampa Graduate Theses and Dissertations, 2015. pp. 1-128. <https://digitalcommons.usf.edu/etd/5632>
- [4] D. Y. Goswami: Development of Low Cost Industrially Scalable PCM Capsules for Thermal Energy Storage in CSP Plants, 2011. Prezentáció: Clean Energy Research Center, University of South Florida, Tampa, FL 33620
- [5] D. Y. Goswami et al: Encapsulation of thermal energy storage media. US Patent 9,879,166 B1, 2018.
- [6] B. Ma et al: Fe-shell/Cu-core encapsulated metallic phase change materials prepared by aerodynamic levitation method, *Applied Energy* 132 (2014) 568–574, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.054>.
- [7] I. Dincer és M.A. Rosen: Thermal Energy Storage. System and applications. Ch.7.7.2. Case study 2: Melting and solidification of paraffin in a spherical shell from forced external convection. Wiley 2011. pp. 376-390. ISBN: 978-0-470-74706-3.
- [8] Dhau et al: Encapsulation of thermal energy storage media, 2017, University of South Florida, Tampa, US Patent 9,765,251B2.
- [9] G. Kumaresan et al: CFD and experimental analysis of phase change material behaviour encapsulated in Internally finned spherical capsule, E3S Web of Conferences 128, 01002 (2019) ICCHMT 2019, <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/201912801002>.
- [10] Feczko T., Fodorné Kardos A., Gyenis J., Németh B.L., Szemesné Németh Á., Tóth J.: Kongruens fázisváltást biztosító hőtároló mikrokapszulák, eljárás előállításukra és alkalmazásuk.. P1400593, 2018.
- [11] Hajba-Horvath, E; Nemeth, B; Trif, L; May, Z; Jakab, M; Fodor-Kardos, A; Feczko, T. Low temperature energy storage by bio-originated calcium alginate-octyl laurate microcapsules. *J. Therm. Anal. Calorim.* 147 (2022) 13151–13160.
- [12] Németh, B., Németh, Á.S., Tóth, J., Fodor-Kardos, A., Gyenis, J., Feczko, T. Consolidated microcapsules with double alginate shell containing paraffin for latent heat storage. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 143 (2015) 397–405.
- [13] C. Chen et al: Melting performance of a cold energy storage device filled with metal foam–composite phase-change materials, *Journal of Energy Storage* 60 (2023) 106567, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.106567>.
- [14] G. Wang et al: Experimental and numerical study of a latent heat storage using sodium acetate trihydrate for short and long term applications, *Journal of Energy Storage* 47 (2022) 103588, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103588>.
- [15] Höhle, Stephan, Andreas König-Haagen, and Dieter Brüggemann. 2018. “Macro-Encapsulation of Inorganic Phase-Change Materials (PCM) in Metal Capsules” *Materials* 11, no. 9: 1752. <https://doi.org/10.3390/ma11091752>.
- [16] K. D’Avignon, M. Kummert: (2018) Modeling horizontal storage tanks with encapsulated phase change materials for building performance simulation, *Science and Technology for the Built Environment*, 24 (4) (2018) 327-342, DOI: 10.1080/23744731.2018.1438012.
- [17] W. Zhou et al: Numerical simulation and optimization of compact latent heat exchanger with micro-channel plate in shape-stabilized composite phase change material, *Applied Thermal Engineering* 245 (2024) 122740, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122740>.
- [18] M. A. Sultan et al: Effect of Inlet and Geometrical Parameters on the Melting of PCM Capsules of Elliptical Cross Section, *ERJ Engineering Research Journal, Faculty of Engineering, Menoufia University*, Vol. 44, No. 1, January 2021, pp. 11-20 ISSN: 1110-1180, DOI: 10.21608/erjm.2021.42713.1041
- [19] <https://heatstixx.de/en/>, <https://heatstixx.de/en/products-heatstixx/> Utolsó belépés: 2024.04.26.
- [20] H. Yao et al: Albizzia pollen-inspired phase change capsules accelerate energy storage of packed-bed thermal energy storage system, *Applied Thermal Engineering* 230 (2023) 12077, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120777>.
- [21] R. M. Reddy et al: The Effect of PCM Capsule Material on the Thermal Energy Storage System Performance, *ISRN Renewable Energy*, Volume 2014, Article ID 529280, 1-6, Hindui Publishing Corporation, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/529280>
- [22] H. Peng et al: Modeling on heat storage performance of compressed air in a packed bed system, *Applied Energy* 160 (2015) 1–9, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.09.029>.
- [23] M. Wu et al: Cyclic behaviors of the molten-salt packed-bed thermal storage system filled with cascaded phase change material capsules, *Applied Thermal Engineering* 93 (2016) 1061–1073, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.014>.
- [24] H.L. Zhang et al: Latent heat storage with tubular-encapsulated phase change materials (PCMs), *Energy* 76 (2014) 66-72, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.03.067>.
- [25] T. Xu et al: Performance evaluation of three latent heat storage designs for cogeneration applications, *Solar Energy* 225 (2021) 444-462, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.07.043>

- [26] B. Xie et al: Experimental and numerical study of epoxy resin-based composite phase change material in packed-bed thermal energy storage system for ventilation, *Energy & Buildings* 291 (2023) 113145 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113145>.
- [27] H. Nabilou et al: Application of partial wire mesh and particle image velocimetry for rectangular phase change material containers as efficient thermal energy storage systems, *Energy Sci Eng.* 2022;00:1–20. DOI: 10.1002/ese3.1079.
- [28] M. Huang et al: Phase change material heat storage performance in the solar thermal storage structure employing experimental evaluation, *Journal of Energy Storage*, 46 (2022) 103638, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103638>.
- [29] B. Yang et al: Evaluation of variable rotation on enhancing thermal performance of phase change heat storage tank, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 106 (2024) 109328, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109328>.
- [30] W. Cui et al: Heat transfer enhancement of phase change materials embedded with metal foam for thermal energy storage: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 169 (2022) 112912, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112912>.
- [31] T. Xiao et al: Effect of natural convection on charging of phase change materials in graded metal foam: Pore-scale simulation, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 149 (2023) 107080, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2023.107080>.
- [32] J. Guo et al: Optimization of adaptive metal foam arrangement in a heat storage tank, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 213 (2023) 124278, <https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2023.124278>.
- [33] <https://www.heatventors.com/> Utolsó belépés: 2024.04.26.
- [34] H. Wang, S. Xie: The effect of annular phase-change material layer on the thermal behavior of solar collector tube, *Journal of Energy Storage* 52 (2022) 104948, <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104948>.
- [35] S. Zhang et al: Comparative study on heat transfer enhancement of metal foam and fins in a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit, *Energy Storage and Saving*, 2 (3) (2023) 487-494, <https://doi.org/10.1016/j.enss.2023.03.004>.
- [36] R. Elbahjaoui: Improvement of the thermal performance of a solar triple concentric-tube thermal energy storage unit using cascaded phase change materials, *Journal of Energy Storage* 42 (2021) 103047, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103047>.
- [37] Peiró et al: Experimental evaluation at pilot plant scale of multiple PCMs (cascaded) vs. single PCM configuration for thermal energy storage, *Renewable Energy* 83 (2015) 729e736, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.029>.
- [38] Ch. Vikas et al: Performance assessment of multi-tube inline and staggered array based latent heat storage system, *Journal of Energy Storage* 68 (2023) 10777, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107770>.
- [39] M. Yang et al: Design of a latent heat thermal energy storage system under simultaneous charging and discharging for solar domestic hot water applications, *Applied Energy* 336 (2023) 120848, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120848>.
- [40] J. Feng et al: Experimental research and numerical simulation of the thermal performance of a tube-fin cold energy storage unit using water/modified expanded graphite as the phase change material, *Energy Storage and Saving* 1 (2022) 71–79, <https://doi.org/10.1016/j.enss.2022.02.001>.
- [41] W. Zhou et al: Numerical simulation and optimization of compact latent heat exchanger with micro-channel plate in shape-stabilized composite phase change material, *Applied Thermal Engineering* 245 (2024) 122740, <https://doi.org/10.1016/j.apthermaleng.2024.122740>.



Kínai hőkonténer-szállító járművek, 3,76 GJ (balra), illetve 5 GJ hőtároló-kapacitással. Az utóbbi kb. 1400 kWh, ami egy 100-150 m²-es, eredetileg 14 kW-os gázkazánnal fűtött ház esetén legalább 10 órára képes kielégíteni a fűtési igényeket. Forrás: <http://www.zhongyineng.com/product/125.html>, illetve Shaopeng Guo, Jun Zhao, Alexandre Bertrand, Jinyue Yan: Mobilized thermal energy storage for clean heating in carbon neutrality era: A perspective on policies in China, *Energy & Buildings* 277 (2022) 112537.

Fázisváltó hőtároló anyagok előállítása hulladék zsírból és használt növényi olajból

Németh Bence¹ tudományos munkatárs

Ferencz Mónika² PhD hallgató

Kovács Sándor¹ kutató

Trif László¹ tudományos segédmunkatárs

Lendvai József³ vizsgálómérnök

Kolay Kovács Ádám³ mérőcsoport vezető

Király Krisztina³ vizsgálómérnök

Feczkó Tivadar^{1,2} tudományos főmunkatárs, csoportvezető

¹ HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet, H-1117 Budapest, Magyar tudósok krt. 2.

² Pannon Egyetem, Mérnöki Kar, H-8200, Veszprém, Egyetem u. 10.

³ IMSYS Kft., H-1033 Budapest, Mozaik utca 14/a.

Az energia jelentős része hőenergia formájában kerül felhasználásra, ezért gazdaságilag ésszerű a hőenergia tárolásának megoldása. A fázisváltó anyagok (PCM) közel állandó hőmérsékleten nagy hőkapacitással képesek hőenergiát tárolni. A PCM-ek gazdaságos alkalmazásához kis költséggel előállítható anyagok szükségesek. A szerves PCM-ek számos előnyös tulajdonsága mellett az egyik legnagyobb hátrányuk a magas előállítási költség a szerves anyagokhoz képest. Ebben a munkában megújuló forrásból, hulladék növényi és állati eredetű trigliceridekből enyhe reakciókörülmények között állítottunk elő telített triglicerid és zsírsav PCM-eket, melyek a paraffinokkal szemben tulajdonságaikban és költségükben is versenyképes alternatívát jelenthetnek.

*

The substantial part of energy is used as heat energy, hence its storage would be economically reasonable. The phase change materials (PCMs) are capable of storing heat energy with high heat capacity at almost constant temperature. In order to utilize PCMs economically, materials of low cost are necessary. Beside the numerous beneficial properties of organic PCMs, one of their greatest disadvantage is their high cost compared to inorganic PCMs. In this study, saturated triglyceride and fatty acid PCMs were prepared under mild conditions from vegetable and animal waste triglycerides derived from renewable source, which can be competitive with paraffin economically and due to their properties.

Látens hőtárolás

A fosszilis energiahordozók mennyiségének csökkenése és a hagyományos módon előállított hőenergia árának folyamatos növekedése és a klímacélok miatt az alternatív energiaforrások egyre inkább előtérbe kerülnek hőenergia kinyerésére és tárolására. A szél, a víz, a nap energiája és a geotermikus hőenergia mellett az ipari tevékenységekből származó hulladékhő is számottevő mennyiségben keletkezik, amelyeknek a túlnyomó része hasznosítás nélkül távozik a környezetbe.

A kontinentális éghajlaton a háztartások energiájának hozzávetőleg 50%-a hőenergia formájában hasznosul [1], így ésszerű lenne az elektromos energia tárolása mellett a hőenergia hatékonyabb tárolási módjainak alkalmazása. A hőenergia tárolása egy fontos tudományos kihívás, ami által a kereslet és a kínálat összhangba hozható, nem utolsósorban az energiarendszerek teljesítményét és kiegyensúlyozott működését támogathatja, az energiaveszteség csökkentésével jelentős megtakarítást generálva.

Az energiatárolás megvalósítható mechanikai, elektromos vagy hőenergia formájában. A hőenergia tárolása történhet érzékelhető, látens vagy termokémiai formában, illetve ezek kombinációjában. Az érzékelhető hőtárolás során nagymértékű hőmérsékletváltozás kíséretében érhető el jelentős hőtárolási kapacitás. Ez esetben az eltárolt hőenergia a tároló közeg fajhőjétől, tömegétől és a hőmérsékletváltozástól függ. A termokémiai energiatárolás molekuláris kötések létrejötte és felhasadása során következik be, melyet reverzibilis kémiai reakciók során lehet gazdaságosan hasznosítani. Az eltárolható energia függ a tároló anyag mennyiségétől, a reakció hőjétől és a konverzió fokától.

Látens hő elnyelése és kibocsátása szilárd-szilárd, szilárd-folyadék, szilárd-gáz, folyadék-gáz, illetve vice versa fázisváltozás során következik be. A látens hő nagy energiatárolási sűrűséggel jellemezhető közel állandó hőmérsékleten. A szilárd-szilárd átmenet esetén az egyik kristályos módosulat alakul egy másikká, jellemzően jóval kisebb látens hő és térfogatváltozással, mint szilárd-folyadék átmenet esetében. A szilárd-gáz és folyadék-gáz átmenetekkel nagyobb látens hőkapacitás érhető el, azonban a fázisátmenet során fellépő nagy térfogatváltozás jelentősen korlátozza a gyakorlati alkalmazhatóságukat. Gyakorlati és gazdasági szempontból a leginkább megfelelő látens hőtárolási forma a szilárd-folyadék átmenet.

Fázisváltó hőtároló anyagok

Látens hőtárolásra a fázisváltó hőtároló anyagokat használják. A paraffin PCM-ek látens hő formájában közel két nagyságrenddel nagyobb hőenergia tárolására képesek (150-255 J/g) [2,3], mint amennyi érzékelhető hő eltárolható általuk 1 K hőmérsékletválto-

zás mellett, hiszen a fajhőjük 2,9 kJ/kgK [4], míg az építőanyagok fajhője ennél is lényegesen alacsonyabb (0,84-1,60 kJ/kgK), bár a nagyobb sűrűség miatt a szerkezeti anyagok térfogategységre jutó érzékelhető hőtároló képessége a paraffinéhoz hasonló nagyságú.

A PCM-ek gyakorlati kiválasztásánál számos elvárást fogalmazhatunk meg: hosszútávú kémiai stabilitás; kompatibilis legyen az együtt alkalmazott anyagokkal; ne legyen toxikus, gyúlékony vagy robbanékony; megfelelő hőmérsékleten, kis gőznyomással és kis térfogatváltozással menjen végbe a fázisátalakulás; nagy látens hőkapacitással és megfelelő hőátadással bírjon [5]. A kinetikai paraméterek között a legfontosabb a túlhűlés elkerülése és a megfelelő kristályosodási sebesség. Gazdasági megfontolások, hogy rendelkezésre álljon megfelelő mennyiségben és alacsony költségű legyen. Olyan ideális anyag nem létezik, ami mindegyik szempontnak megfelel, azonban léteznek technológiai megoldások a meglévő hátrányok kiküszöbölésére. Például a gyakran fellépő túlhűlés elkerülésére nukleációs ágenszt adagolnak a PCM-hez, a hővezetés javítására fémeket alkalmaznak különböző formákban (pl. fémhab vagy diszpergált részecske).

A szerves PCM-eket sóhidrátok, eutektikumok és fémek jelentik [6]. A szerves vagy szerves eutektikumok két vagy több komponensből épülnek fel, melyek mindegyike kongruensen olvad és fagy, és alkotja a komponenskristályok keverékét a kristályosodás során. A sóhidrátok az olvadás során vizet veszítenek és inkongruens olvadás léphet fel azáltal, hogy a kibocsátott kristályvíz nem elegendő, hogy feloldja a szilárd fázist. Kongruens az olvadás, ha az olvadás során vizet veszített só teljesen oldódik a kristályvízből felszabaduló vízben; nem kongruens, ha nem teljesen oldódik, és részben kongruens, ha a fázisátalakulás során az egyensúlyi folyadék és szilárd fázis különböző oladási összetételű, mivel a hidrát kevésbé hidratált anyaggá alakul. A sűrűségkülönbség miatt a kevesebb kristályvizet tartalmazó hidrát kiülepszik a tartó aljára. A nem kongruens olvadás kiküszöbölésére alkalmaznak még mechanikai keverést, PCM mikrokapszulázást a szeparáció csökkentésére, sűrűsítőanyagot, ami gátolja a szilárd só ülepedését, vízfelesleg alkalmazását, hogy az olvadt kristályok ne telítsék túl az oldatot. A legtöbb sóhidrát gyenge nukleációs tulajdonságokkal bír, ami jelentős túlhűlést okozhat a kristályosodás előtt [7]. A kristályképződés elősegítésére nukleációs ágenseket használnak. A sóhidrátok legnagyobb előnyei a térfogategységre vonatkoztatott magas látens hőkapacitás, a fázisváltás során fellépő kis térfogatváltozás és az, hogy jellemzően olcsó anyagok.

Szerves PCM-ek

A szerves PCM-ek általában kongruensen olvadnak és dermednek, ismételt fázisszeparáció nélkül, a látens hőkapacitásuk számos ciklus után is megmarad, nem korrozívak és a túlhűlés kevésbé jellemzi azokat, mint a szerves PCM-eket. A szerves PCM-ek között a legelterjedtebben a paraffinokat alkalmazzák, melyek általában egyenes szénláncú alkánokat tartalmaznak, és a kristályosodásuk nagy mennyiségű (jellemzően 150-210 J/g) látens hő felszabadulásával jár. Az olvadáspontjuk a C-atomszám növekedésével növekszik. Magas látens hőkapacitással jellemezhetők, fázisszeparáció nélkül számos hűtési-fűtési ciklus után; inert, nem korrozív, nem toxikus, ökológiailag veszélytelen, tartós, alacsony költségű anyagok, bár ez utóbbi kitétel a technikai minőségekre igaz [2].

A nem-paraffin típusú szerves PCM-ek további előnye a paraffinokhoz képest a kevésbé gyúlékony karakter. A zsírsavak a pa-

raffinokhoz hasonlóan magas látens hővel bírnak. A zsírsavak is reprodukálható oladási-fagyási tulajdonságokat mutatnak jelentős túlhűlés nélkül. Hátrányuk a magasabb költség és a fémekkel szembeni korrozivitás.

A zsírsavak megújuló forrásból, növényi vagy állati eredetű anyagokból kinyerhető PCM-ek. A leginkább használatos telített zsírsavak PCM-ként: kaprilsav (oktánsav), kaprinsav (dekánsav), laurinsav (dodekánsav), mirisztinsav (tetradekánsav), palmitinsav (hexadekánsav), sztearinsav (oktadekánsav), illetve ezek eutektikumai. Az olvadáspontjuk 30 °C és 65 °C között változik, és a paraffinokhoz hasonló magas 153-203 kJ/kg látens hő tárolható el és szabadítható fel általuk [8,9]. Eutektikumokkal a kívánt működési olvadáspont jól szabályozható [10].

Ritkábban alkalmazott szerves PCM-ek a cukoralkoholok, melyek jellemzően magasabb hőmérséklettartományban (90-200 °C) használhatók, magas látens entalpiaváltozással (190-350 kJ/kg) [11]. A xilit, eritrit és mannit a leggyakrabban alkalmazott cukoralkohol PCM-ek, melyeknek a fő hátránya a túlhűlésre való hajlamuk [12].

A zsírsav észterek szintén kereskedelmi forgalomban nagy tömegben kapható anyagok, melyek eutektikumokat képezhetnek elhanyagolható túlhűléssel [13]. Számos metil-észtert és eutektikumokat vizsgáltak 18 hónapon át, és nem tapasztaltak változást a termofizikai tulajdonságaikban [14].

A trigliceridek olyan zsírsav észterek, amelyek az állati és növényi zsírok fő alkotóiként természetes energiatároló alkotókként szerepelnek az állati és emberi szervezetben [15]. Jelenleg a triglicerideket széles körben alkalmazzák az élelmiszeriparban és a biodízelgyártásban, valamint glicerint prekursor anyagként. A PCM-ként történő felhasználásuk szempontjából a legnagyobb hátrányuk a polimorfizmus, ami által különböző szilárd halmazállapotú szerkezetekben kristályosodnak más-más fázisátmenettel és látens entalpiaváltozással.

A PCM-ek egyes hátrányos tulajdonságainak kiküszöbölésére kiváló lehetőség azok kapszulázása [16], mellyel egyfelől a környezetüktől elkülönítjük azokat, hogy elkerüljük a PCM szivárgását folyadék állapotban, továbbá az esetleges káros hatásokat a PCM vagy a környezet irányába, illetve a PCM összetétel megváltozását. Kiemelt szerepe a kapszulázásnak a PCM-ek rossz hővezetőképessége miatt a hőtároló felület megnövelése. A kapszulázás történhet mikro- vagy makrokapszulázás formájában. Mikrokapszulázás során a létrehozott PCM hordozó részecskék mérete a nanométeres tartományoktól a néhány milliméterig terjedhet. A hordozó szemcse lehet mag-héj (kapszula) vagy ún. alakstabilizált mátrix szerkezetű. A mikrokapszulázással meghatározott morfológia, méret, termikus stabilitás, a héj mechanikai szilárdsága és áteresztőképesség biztosítható [17]. A mikrokapszulák használhatók hőcserélőkben PCM szuszpenzióként vagy beépíthetők építő-, szigetelő- ill. csomagolóanyagokba. A mikrokapszulázás azonban relatíve drága eljárás. A makrokapszulázással jellemzően a milliméteres mérettől a néhány tíz centiméteres méretű kapszulákat hoznak létre a PCM-ek bezárására. A makrokapszulázás költség-hatékonyabb eljárás, és könnyebben újrahasznosítható terméket eredményez.

Növényi trigliceridek elterjedt hasznosítása

A trigliceridek hidrogénezésével az azokban található telítetlen zsírsavakat (palmitolajsav, olajsav, linolsav, linolénsav, eikozénsav, erukasav) a megfelelő szénatomszámú telített zsírsavakká (palmi-

tinsav, sztearinsav, arachinsav, dokoziánsav) lehet alakítani, ezáltal a trigliceridek olvadáspontja megnövelhető, és a telítetlen zsírsavak miatti széles olvadáspont tartomány lényegesen összeszűkül. Ezáltal az anyagok sokkal alkalmasabbá válnak arra, hogy PCM-ként alkalmazzuk azokat hulladékhő és/vagy megújuló energia (pl. geotermikus energia, napenergia) tárolására.

Trigliceridek hidrogénezését jellemzően nem PCM termék előállítása érdekében végzik. A legfontosabb felhasználás a trigliceridek nagy nyomáson (20-200 bar) és magas hőmérsékleten (150-280 °C) végzett, katalitikus hidrogénezése, melynek során a telítetlen kötésekkel telítik, az oxigénatomokat eltávolítják, és végső soron paraffinokat, biodízelt vagy dízelolaj keverő komponenseket állítanak elő [18,19].

PCM előállítása érdekében többnyire kétféle megközelítést alkalmaznak. Az egyik megoldásban először alkoholok jelenlétében átészterezik a triglicerideket azok metil-, etil-, propil- vagy butil-észterévé Na-metilát/hidroxid katalizátor vagy enzim jelenlétében [20,21], és ezáltal szobahőmérséklet körüli olvadásponttal rendelkező zsírsav észtereket kapnak. Az idézett szabadalomban [21], az alkoholt 6:1 alkohol:zsír vagy olaj arányban adagolták. A víztartalmát 100 °C-on 30 percig melegítéssel távolították el, az átészterezés 65 °C-on 45 percig zajlott metil-észter előállítás esetén (butil-észter 115 °C-on történt). 10 perc elteltével két fázis keletkezett, a felső fázisban az alkil-észter, az alsó pedig a glicerin. Az alkil-észtert sósavval semlegesítették és 3-szor mosták desztillált vízzel. Ezt követően hidrogénezési eljárásban a képződött telítetlen észtereket telítették. Aktív szén por hordozón 5% palládiumot tartalmazó katalizátort alkalmaztak a hidrogénezési reakcióhoz. A katalizátort tartalmazó aktív szén 2% koncentrációban volt jelen a zsírokhoz/olajokhoz képest. 40 psig (2,75 bar) nyomáson 60 °C-on. Ezáltal jellemzően 120-140 J/g látens entalpiaváltozással bíró, 40 °C alatti olvadáspontú telített metil-, etil-, propil- vagy butil-észtereket hoznak létre, melyeket illetve elegyeiket szobahőmérsékleten fázist váltó látens hőtárolásra javasolnak épületekben történő alkalmazásra.

Az előzőeknél egyszerűbb, de magasabb hőmérsékleten alkalmazott eljárás szerint állati és növényi zsíradékok elegyét (pl. 60-90% szarvasmarhafaggyút és 10-40% szójaolajat tartalmazó elegyet) 10-20 mesh (2-0,84 mm) kalcium-karbonát katalizátorral töltött ágyas reaktorban magas hőmérsékleten (200-280 °C-on) átészterezték, majd lehűtés után szilárd-folyadék szeparációval választották le a kívánt frakciót, végül a szeparáció megkönnyítésére alkalmazott oldószert eltávolították [22].

Másik út a telített trigliceridek előállítására a zsírsavakból és glicerinből kiinduló Fischer észterezés, amely során a termék megfelelő reakciókörülmények között szintén telített zsírsavak triglicerid észtere [23].

Az említett első megoldás hátránya, hogy az alacsonyabb 40 °C alatti olvadáspontú fázisváltó anyagok előállítása érdekében több olyan eljárási lépést alkalmaz, amelynek jelentős energia és/vagy segédanyag igénye van. További hátránya, hogy a magasabb, 50-60 °C fölötti hőmérsékleteket elérő geotermikus hőenergia és hulladékhő hasznosítása szempontjából ezen anyagok nem is iga-

zán megfelelőek, mert ehhez a célhoz a 40 °C alatti olvadáspontú fázisváltó anyagok nem alkalmazhatók kedvező határfokkal.

A két reakcióval (átészterezés és hidrogénezés) és további tisztítási/szeparálási procedúrával szemben a célunk az volt, hogy egy lépésben, oldószert alkalmazása nélkül katalitikus hidrogénezéssel hozzunk létre magasabb olvadáspont tartományban (jellemzően 40-65 °C) és magasabb entalpiával (140-165 J/g) fázist váltó telített triglicerideket. A terméknel további elválasztási eljárásra nincs szükség, ugyanis a reakciótermék tisztítás vagy szeparálás nélkül alkalmazható, míg a hordozón rögzített katalizátort a reaktortartályból szűréssel távolítjuk el.

Jelen fejlesztéssel a célunk olyan eljárás kidolgozása volt, amellyel egyszerűen, kisebb energia-befektetéssel és kevesebb lépésben lehet a magasabb hőmérsékleti tartományba eső alternatív és megújuló hőenergia gazdaságos és jó hatékonyságú hasznosítására szolgáló fázisváltó anyagot előállítani. Célunk volt még, hogy a fázisváltó anyag kiinduló anyaga más ipari-, kereskedelmi- vagy üzemeltetési eljárásból származó „melléktermék” legyen, amelynek újrahasznosítása, vagy tovább hasznosítása csökkenti a környezetterhelést.

Kísérleti rész

Telítetlen trigliceridek hidrogénezése

A hidrogénezéshez alkalmazható alapanyagok zsírsav trigliceridek, melyek származhatnak hulladék állati zsírokból (zsír, hár, faggyú) vagy használt növényi olajokból, mint szója-, pálma-, napraforgó-, és repceolaj. A kiindulási anyag befolyásolja a termék tulajdonságait, hiszen a különböző eredetű zsírsav észterek különböző arányban tartalmazzák az eltérő szénatomszámú zsírsavakat (1. táblázat) [24]. Az 1. táblázatból látszik, hogy még ugyanabból a fajtából kinyert trigliceridek is lényeges összetételbeli különbséget mutathatnak.

Vizsgálataink során a hidrogénezést ciklohexán oldószert jelenlétében és anélkül is megvizsgáltuk. Katalizátorként aktív szénen rögzített platinát vagy palládiumot alkalmaztunk. Egy állati és egy növényi triglicerid példáján mutatjuk be az általunk alkalmazott jellemző előállítási körülményeket:

- 400 g szarvasmarhafaggyúhoz 200 cm³ metil-ciklohexánt, 4 g sztearinsavat és 5 g aktív szénre felvitt platina katalizátort (5% platinát tartalmazó) Anker keverővel ellátott duplafalú nyomásálló, 80 °C-ra termosztált 2 liter térfogatú boroszilikát reaktorba mértünk be. Reakció előtt a reaktort 10 l N₂ majd 15 l H₂ gázzal öblítettük át. A hidrogént 4,0 bar nyomáson a reaktor alján vezettük be és buborékoltattuk át. A reakció során propelleres keverővel 800 rpm fordulatszámra kevertettük a trigliceridet 4 órán át. A reakció végén a katalizátort üvegfritten G3 szűrővel szűrtük.
- 400 g használt napraforgóolajat 80 °C-ra melegítettünk és 4,0 g aktív szénre felvitt Pd katalizátort (10% Pdt-t tartalmazó) 2 l térfogatú Anker keverővel ellátott duplafalú nyomásálló, 80 °C-ra termosztált boroszilikát reaktorba mértünk be. Reakció előtt a reaktort 10 l N₂ majd 15 l H₂ gázzal öblít-

1. táblázat. Növényi olajok és állati zsíradékok jellemző zsírsav összetétele [24].

| Zsíradék | C14:0 | C16:0 | C18:0 | C18:1 | C18:2 | C18:3 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sertészsír | 0,8-2 | 22-32 | 8-18 | 41-60 | 4-10 | 0,5-2 |
| Szarvasmarhafaggyú | 2-6 | 24-37 | 15-30 | 28-45 | 2-6 | 0 |
| Pálmaolaj | 0,5-3 | 30-50 | 3-10 | 34-55 | 5-13 | 0 |
| Napraforgóolaj | 0 | 3-7 | 1-4 | 14-50 | 42-70 | 0 |

teztük át. A hidrogént 4,2 bar nyomáson a reaktor alján vezettük be és buborékolattuk át. A reakció során propelleres keverővel 800 rpm fordulatszámon kevertettük a trigliceridet 4 órán át. A reakció végén a katalizátort üvegfitren G3 szűrővel szűrtük.

Telített zsírsavelegy előállítása hidrogénezett trigliceridből elszappanosítással és savazással

Szappanosító lúg: 1,8 kg víz + 200 g KOH

A KOH oldatot 90 °C-ra melegítettük és 2 óra alatt hozzáadtuk a napraforgóolajból a 2. pontban keletkezett telített zsírsav észtert, majd további 8 órán át kevertettük 90 °C-on.

Savazáshoz 360 g cc. HCl oldatot 400 g vízzel hígítottunk és a sósavoldatot 85 °C-ra melegítettük, majd azt az elszappanosított sűrű masszához adagoltuk kevertetés során, végül 2 órán át állni hagytuk 85 °C-on. Az alsó vizes fázist (4% glicerint és 10% KCl-ot tartalmaz) leeresztettük, majd a zsírsavelegyhez 400 g 80 °C-os mósóvizet adtunk, intenzív kevertetés után üleptettük és eltávolítottuk a vizes fázist.

Termék: 900 g zsírsav elegy

A kiindulási anyag és a termék telítetlen zsírsavainak meghatározását jódszám mérésrel [25] végeztük.

A PCM-ek látens entalpiaváltozásának és olvadás/dermedéspontjának elterjedten alkalmazott módszere a differenciális pásztázó kalorimetria (DSC). Ennél a módszernél a mintát és a referenciaanyagot állandó sebességgel fűtik és hűtik. A köztük lévő hőmérséklet különbség arányos a két anyag közötti hőáram különbségével, amit ábrázolva a hőmérséklet függvényében kapjuk a DSC termogrammot. A látens hőmennyiség a csúcs alatti terület integrálásával kapható.

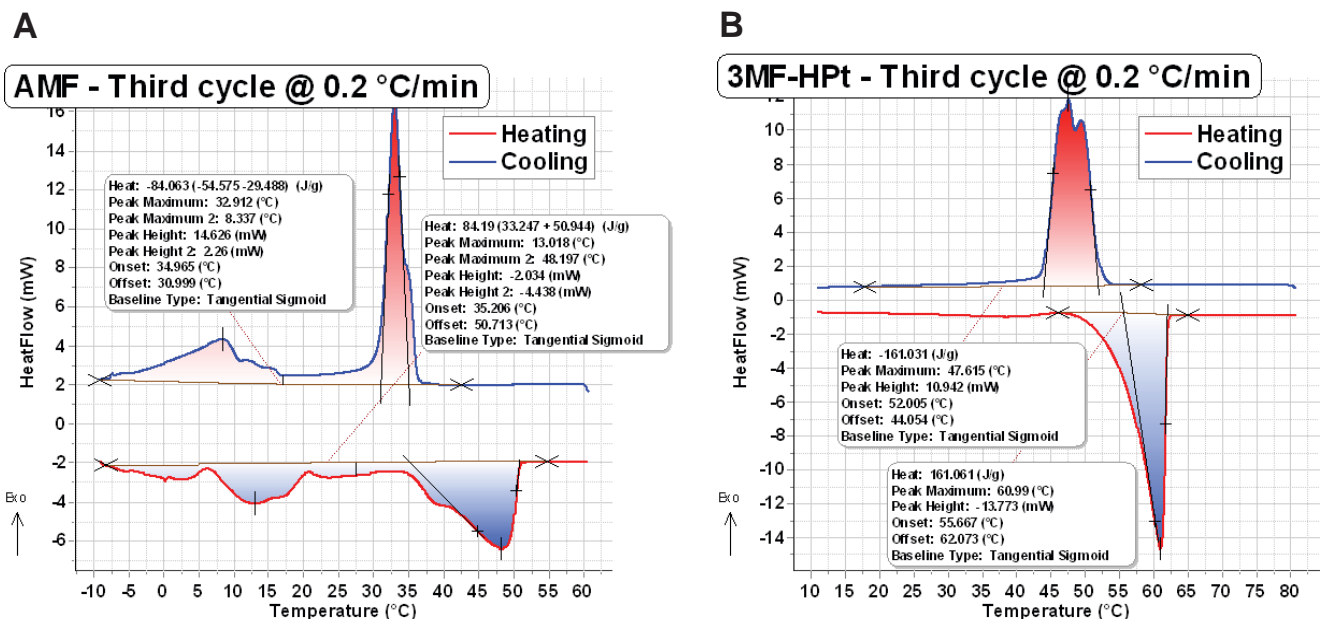
A hidrogénezett trigliceridek és a hidrolízissel előállított zsírsavak termikus tulajdonságait Setaram µDSC3evo differenciál pásztázó mikrokaloriméterrel (Setaram, Franciaország) határoztuk meg. A mintákat háromszor ciklikusan -10 °C és 80 °C között, 0,2 °C/perc pásztázási sebességgel vizsgáltuk. Az eredményeket a termoanalizátor Calisto Processing (v1.12) szoftverével dolgoztuk fel. Termogravimetriás elemzést Setaram LabsysEvo TG-DSC

rendszerrel 99.999% tisztaságú szintetikus levegő atmoszférában végeztünk 25–800 °C tartományban, 20 °C/perc felfűtési sebességgel.

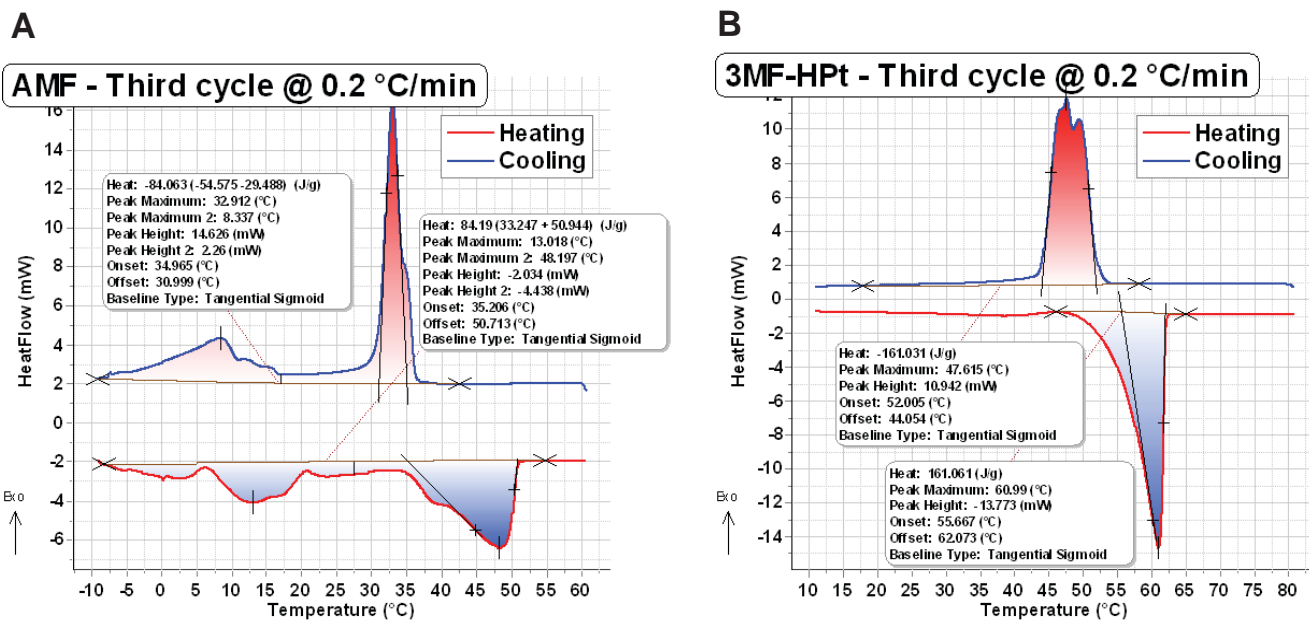
Kísérleti eredmények

Fabiani és mtsai (2019) bemutatták, hogy állati hulladékból (disznó és csirke nem fogyasztható zsíradékaiból) kinyert zsírok kémiai kezelés nélkül kb 28,9 J/g látens hő tárolására alkalmasak [26]. Az állati zsíradékok valóban feldolgozás nélkül is alkalmasak lehetnek PCM-ként, azonban több hátrányos tulajdonságukat szükséges kiküszöbölni. Az állati zsíradékok esetén egy megfelelő hőkezeléssel egyrészt a víztartalmuk és fehérjetartalmuk túlnyomó részét is el lehet távolítani, továbbá az azokban előforduló patogén kórokozók is kiküszöbölhetők. A szarvasmarhafaggyúval folytatott kísérleteink során az említett célokból a nyers zsíradékot kockázás után 140 °C-on kisütöttük, és a visszamaradó szilárd maradék anyagot szűrővel távolítottuk el. Az így keletkező zsíradék meglepően magas fázisváltási entalpiával (olvadási: 84,2 J/g, fagyási: 84,1 J/g) rendelkezett, azonban ez a többféle és nagymennyiségű telítetlen komponens (lásd 1. táblázat) miatt nagyon széles olvadás- (-10-+50 °C) és dermedéspont (-10-+35 °C) tartományt eredményezett (1.A ábra). A kísérleti részben leírt enyhe körülmények között folytatott hidrogénezés hatására a telítetlen kötéseket gyakorlatilag teljes mértékben telítettük; a kiindulási anyag 39,8 értékű jódszáma 0,5-re csökkent. A DSC vizsgálat megmutatta, hogy azáltal, hogy telítettük a telítetlen kötéseket, és ennek eredményeképpen a nagyrészt sztearinsavat és még jelentős részben palmitinsavat tartalmazó trigliceridek keletkeztek (lásd 1. táblázat), melyek egyfelől lényegesen nagyobb látens hőkapacitással (161,0 J/g olvadási és fagyási) rendelkeznek, mint a kiindulási zsíradék, másrészt az olvadás és fagyás hőmérséklettartománya nagymértékben leszűkült, ami által a gyakorlatban sokkal inkább felhasználható PCM jött létre (1.B ábra).

Használt növényi olajok közül a Magyarországon legnagyobb tömegben gyártott napraforgóolaj hidrogénezésével végeztük a kísérleteink nagy részét. A napraforgóolaj szobahőmérsékleten nem dermed meg, mivel túlnyomórészt telítetlen zsírsavakat tartalmaz, azaz itt látens hőkapacitása sincs. Hidrogénezés után hasonló



1. ábra. Hőkezelt szarvasmarhafaggyú DSC-je hidrogénezés előtt (A) és után (B)



2. ábra. Hidrogénezett használt napraforgóolaj (A) és DMW6266 MOL paraffin (B) DSC-je

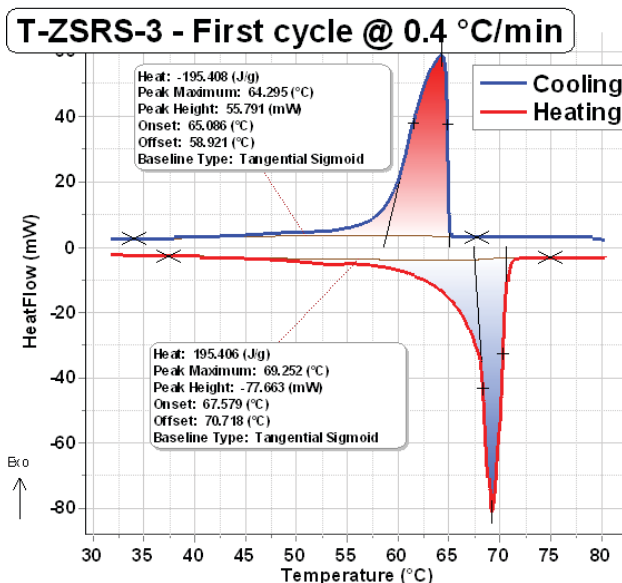
eredményre jutottunk, mint a szarvasmarhafaggyúnál, azaz szűk olvadás és dermedés tartományú anyagot kaptunk (2. A ábra) magas látens hőkapacitással (151,5 J/g olvadási, 150,8 J/g fagyási entalpiaváltozás). Az eredeti napraforgóolaj nagy telítetlen zsírsav aránya (jódszám: 124,2, lásd még 1. táblázat) elenyészőre (jódszám: 3,4) csökkent a hidrogénezéssel. Mivel a hidrogénezés után a napraforgóolajban szinte csak sztearinsav marad vissza, a keletkező triglicerid mért olvadáspontja lényegesen magasabb (69,5 °C), mint a hidrogénezett szarvasmarhafaggyúé (61,0 °C), ami jelentős mennyiségű palmitinsavat is tartalmaz.

Az általunk hulladék zsírból és használt olajból előállított PCM-eket összehasonlítottuk a kereskedelmi forgalomban kapható hasonló olvadáspontú paraffinnal. A MOL csoporttól kapott DMW6266 jelű paraffin DSC-jét a 2.B ábra mutatja. A paraffin olvadáspontja 65,3 °C, és az olvadási és fagyási entalpiaváltozások (162,7 J/g) hasonló nagyságúak voltak a hidrogénezett trigliceridekhez. A vizsgált paraffinhoz képest szűkebb olvadás és dermedés tartományú anyagot állítottunk elő, bár nem elhanyagolható mértékű túlhűlést tapasztaltunk a triglicerideknél, ami a paraffinnál nem jelentkezett. A kiindulási és a termékek zsírsav analízisét az Imsys Kft. végezte. A bemutatott triglicerid minták legfontosabb zsírsav összetevőit a 2. táblázat tartalmazza, ami kiváló összefüggésben van az irodalomban található 1. táblázatban bemutatott eredményekkel.

Az is látható a 2. táblázatból, amire a jódszám méréséből is következtetni lehetett, hogy a telítetlen zsírsavakat gyakorlatilag teljes mértékben telítettük a hidrogénezési eljárás során.

A hidrogénezett napraforgóolajat a kísérleti részben leírtak szerint elszappanosítottuk és visszavasavazással telített zsírsavakat áll-

tottunk elő (3. ábra), melyeknek olvadás- (68,2 °C) és fagyáspontja (64,8 °C) illetve a fázisváltási entalpiája (194,6 J/g) gyakorlatilag megfelel az irodalomban a sztearinsavra fellelhető értékeknek [27]. Ezzel a megoldással a PCM túlhűlése minimálisra csökkenthető, bár további technológiai lépések beiktatásával és szennyvíz keletkezésével kell számolni.

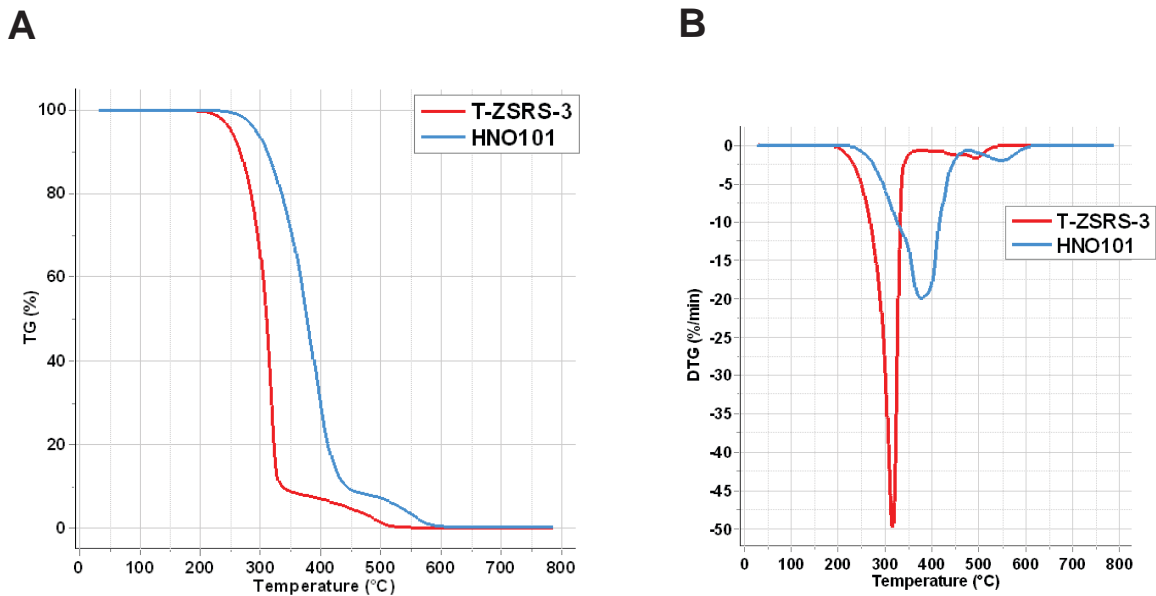


3. ábra. Hidrogénezett használt napraforgóolaj hidrolízisével és savasavazással nyert zsírsavak DSC-je

2. táblázat. Kiindulási és termék trigliceridek zsírsav összetétele

| Minta neve | AMF (kiindulási szarvasmarhafaggyú), % | 3MF-HPt (termék), % | HNO (kiindulási napraforgóolaj), % | HNO-Pd (termék), % |
|------------|--|---------------------|------------------------------------|--------------------|
| C16:0 | 24,99 | 24,50 | 6,89 | 6,40 |
| C18:0 | 27,90 | 67,43 | 4,08 | 86,66 |
| C:18:1 | 34,85 | 0,00 | 32,71 | 0,25 |
| C18:2 | 4,75 | 0,13 | 52,57 | 0,00 |

A hidrogénezett használt napraforgóolaj és a hidrolízisével és savasavazással nyert zsírsavak oxidatív atmoszférában végzett TG analízisének eredményeit a 4. ábra mutatja be. Mindkét TG görbén két tömegcsökkenési lépcső látható, egy nagyobb, majd egy kisebb. A nagyobb tömegcsökkenési lépcső alatt az alacsonyabb forráspontú, s így nagyobb mennyiségben jelen lévő komponensek párolognak és égnek el, míg a kisebb lépcsőben a magasabb forráspontú frakciók oxidálódnak. A hidrolizálással és visszavasavazással kapott



4. ábra. Hidrogénezett használt napraforgóolaj (HNO101) és a hidrolízisével és savazásával nyert zsírsavak (T-ZSRS-3) tömegváltozásának (TG, A) illetve tömegváltozás sebességének görbéi (DTG, B)

3. táblázat. Növényi olajok és állati zsiradékok jellemző zsírsav összetétele [24].

| Minta neve | 1. tömegcsökkenési lépcső | | | 2. tömegcsökkenési lépcső | | |
|------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------|
| | Hőmérsékleti intervallum (°C) | Tömeg-csökkenés (%) | DTG csúcsmaximum (°C) | Hőmérsékleti intervallum (°C) | Tömeg-csökkenés (%) | DTG csúcsmaximum (°C) |
| HNO101 | 223,7-476,1 | 91,98 | 377,6 | 476,1-618 | 7,72 | 547,9 |
| T-ZSRS-3 | 192,5-374,4 | 92,24 | 316,9 | 374,4-549,6 | 7,76 | 493,4 |

zsírsavak oxidatív degradációja (égése) alacsonyabb hőmérsékleten indul, gyorsabban és szűkebb hőmérsékleti tartományban ér véget (4.B ábra), a hidrogénezett növényi olaj minta (HNO101) komplexebb összetétele miatt (triglicerid) magasabb hőmérsékleti tartományok fele tolódva, lassabban és szélesebb hőmérsékleti tartományban ég el.

Az 4. ábrán látható termikus események adatait a 3. táblázatban foglaltuk össze.

Következtetések, környezetvédelmi megfontolások

A hidrogénezés mellett, hogy szűk olvadási- és fagyáspont tartományú triglicerideket eredményezett, a telítetlen kötések eltávolítása révén kémiaiilag sokkal stabilabb, az oxidációra (avasodásra) nem hajlamos PCM terméket eredményez. A hidrogénezett trigliceridek látens hőkapacitása jelentősen (kb. 20%-kal) növelhető és a túlűlése számottevően csökkenthető, amennyiben zsírsavvá alakítjuk azokat, ez azonban további vegyszerek alkalmazását és szennyvíz keletkezését vonja maga után, ezért további kutatási feladatunk a túlűlés mértékének a csökkentése szennyvíz keletkezés nélküli technológiával, melyre jelenleg ígéretes kísérleteket folytatunk.

Azzal, hogy a fázisváltó anyagok csökkentik a fűtésre és a hűtésre szánt primer energia (elektromos áram, földgáz, fa, stb) költségét, hozzájárulnak az üvegházhatású gázok kibocsátás csökkentéséhez. Fontos előny még a Magyarországon jelenleg még nem, de egyes nyugat-európai országokban már szankcionált hulladékhőnek a hasznosítása. Az így csökkentett karbonlábnyom elsődleges környezetvédelmi eredmény. Nemcsak a közvetlen égéstermékek (a szén-dioxid mellett pl. korom, poliaromás any-

gok) mennyisége, de a szennyezéssel járó egyéb hatások is kisebbek (szagok, por stb.). A megújuló energiaforrások esetében is az energiahatékonyságnak kiemelt szerepe van: a PCM-ek alkalmazása hozzájárul ahhoz, hogy a megújuló rendszerek akkor is kellő hatékonysággal üzemelhessenek, amikor az elsődleges energiaforrások (pl. nap vagy szél) nem áll rendelkezésre.

Fontos vizsgálni a fázisváltó anyagok teljes életciklusának környezeti hatását. R. Aridi és A. Yehya többféle PCM elemzése során megállapította, hogy a legnagyobb környezeti költsége a szénhidrogén (pl. paraffin) PCM-eknek van, ugyanakkor a növényi bázisúaknak szignifikánsan alacsonyabb [28]. Az épületenergetikai felhasználás során az alkalmazott PCM-ek ideális fázisváltási tartománya miatt előtérbe kerülnek a paraffin keverékek helyettesítésére alkalmas anyagok. Elsődlegesen felmerülnek a növényi olajok, amelyek felhasználása eleve kisebb karbonlábnyomot eredményez. A világ növényi olaj igénye egyre nő, egyes források jelenleg évente 175 millió tonna növényi olajjal számolnak, és az előrejelzések szerint a termelés több mint 75 százalékkal, 307 millió tonnára nő 2050-re, hogy kielégítsék a keresletet [29]. Különösen nagy ára van a pálmaolaj elterjedésének, amit az élelmiszeriparon túl a kozmetikai ipar is nagy mennyiségben használ fel. A pálmaolaj felhasználás egy része nem visszanyerhető, mert pl. készítményekbe kerül, de annak ellenére jelentős a sütőolaj felhasználás, hogy a világgpiaci ára egyre csökken, és megközelíti a korábban drágábbnak tartott repce és szója árakat.

A Magyarországon elterjedten termelt napraforgó és repceolaj környezeti lábnyoma jelentősen kisebb, mint pl. a pálma- vagy a kókuszolajé. A növényi olajok környezetvédelmi hatása jórészt az olajnövény fajtájától és a szükséges logisztikai költségektől függ

[30,31]. Az olajnövényekből jellemzően intenzív eljárások eredményeként lesz olaj, tehát érdemes megvizsgálni, hogy a termék életciklusát meg tudja-e hosszabbítani a PCM-ben való felhasználása. Alapvetően valamennyi növényi termék friss olajként alkalmazva is alkalmas PCM előállításra, ugyanakkor felvetődik, hogy érdemes lehet felhasználni azokat az olajokat és zsírokat, amelyek viszonylag tisztán, vagy fizikai módszerekkel egyszerűen regenerálhatóan állnak rendelkezésre a különféle növényi olaj-hulladékokban. A növényi olajok újrahasonosítása azért is fontos, mert hulladékként kárt okoz, ha a nem megfelelő ártalmatlanítás eredményeként az élővízbe, a talajra vagy akár a közcatornába - és a kapcsolódó szennyvízkezelő műre jut. Az európai -és így a magyar jogszabályok- a használt sűtőolajat a körforgásos gazdálkodás részeként szigorúan visszagyűjtendőnek tekintik, azonban a kommunális szennyvíztelepek gyakran számolnak be arról, hogy a csatornába került olajok károkat okoznak a hálózati műtárgyakban (átemelőkhben, aknáknban, szivattyúkban stb.), más anyagokkal összeragadva tömedékelik a csatornát, stb. Ezek növelik a hálózat mosatásához felhasznált vizet, és végeredményben a szennyvíztelep hatásfokát is csökkentik. Részben a jogszabályi környezet, részben pedig a felhasználók egyre nagyobb környezettudatossága miatt a használt növényi olajok visszagyűjtésének több, mint 10 éve kialakult, jól működő rendszere van Magyarországon.

A visszagyűjtött sűtőolajokból jelentős részben bioüzemanyag készül, ami így első körben anyagában történő hasznosításnak számít, azonban az elkészült termék tüzelőanyag, vagyis nagyon rövid időn belül energetikailag hasznosul, hiszen üzemanyagként elége-tik. Emellé technológiai és környezetgazdasági megfontolások mellett is jó alkalmazási terület lehetne a PCM-ként való újrahasonosítás, ami jelentős mértékben növeli az életciklust, ezáltal egyszerre mérsékli az olaj(hulladék) és a PCM káros környezeti hatásait.

A növényi olajhulladékok mellett felmerült az állati zsír hulladékok felhasználásának lehetősége is. Ennek a jelentősége azért volna kiemelkedő, mert az állati zsír hulladék szintén nagy mennyiségben, olcsón és relatíve egyszerű és biztonságos technológiák mentén lenne alkalmazható PCM-ekben. Állati zsírok alapvetően könnyen kinyerhetőek vágóhídi hulladékokból, így az két környezetvédelmi problémára is megoldást kínál.

Az állati hulladék feldolgozását Magyarországon az ATEV Zrt. végzi, amely a zsiradékot egy kereskedelmi terméként viszi a piacra. Ez a feldolgozott zsiradék alapvetően állati takarmányokhoz előkészített anyag, ami a PCM előállításához alkalmazott technológiában nem alkalmazható hatékonyan, mivel nagy mennyiségben tartalmaz egyéb összetevőket, mint pl. fehérjéket. Az állati zsírok hidrogénezése katalizátor alkalmazása mellett történik, így fontos, hogy a faggyú illetve az állati zsiradék-termék ne tartalmazzon semmi olyan anyagot, ami katalizátor inhibitor (pl. fehérjék).

Jelenleg az állati zsírokat keverik, és mivel Magyarországon ehhez a feldolgozáshoz képest kevés szarvasmarhát vágnak, az elérhető állati zsírtermékek sem tiszta faggyút jelentenek, hanem különféle minőségű keverékeket. Az előállítás során a zsír előállításához 1., 2. és 3. kategóriába sorolt állati eredetű melléktermékeket az EU Bizottság 142/2011/EU rendelete által előírt 1. feldolgozási módszer szerint max. 50 mm méretre történő aprítást követően min. 133 °C hőmérsékleten, min. 3 bar nyomáson, min. 20 percen át hőkezelik, majd a centrifugával történő zsírkinyerést és tisztítást követően az értékesítésig szigetelt, fűthető tartályban tárolják. Ez a termék valószínűleg a kiindulási alapanyag komplexitása miatt nem alkalmazható elég jó hatásokkal.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2021-2.1.2-HÓ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HÓ pályázati program finanszírozásában valósult meg. Köszönetünket fejezzük ki a HUN-REN Központ innováció fókuszú Proof of Concept Programjának a „Nagy hőkapacitású fázisváltó hőtároló puffertartály fejlesztése” című ELKH-PoC-2023-012 számú pályázatra nyújtott támogatásáért.

Irodalomjegyzék

- [1] Ürge-Vorsatz, D; Cabeza, LF; Serrano, S; Barreneche, C; Petrichenko, K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 2015, 85-98.
- [2] Peng H, Zhang D, Ling X, Li Y, Wang Y, Yu QH, She XH, Li YL, Ding YL. n-Alkanes Phase Change Materials and Their Microencapsulation for Thermal Energy Storage: A Critical Review. *Energy Fuel* 2018;32:7262-7293.)
- [3] Soibam, Jerol. (2018). Numerical Investigation of a heat exchanger using Phase Change Materials (PCMs) For small-scale combustion appliances. 10.13140/RG.2.2.30871.06560.
- [4] (Kandasamy, R., et al., Transient Cooling of Electronics Using Phase Change Material (PCM)-Based Heat Sinks, *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008), 8-9, pp. 1047-1057)
- [5] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy*, 92, 2012, 593-605, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.025>
- [6] Kalidasan B., A.K. Pandey, R. Saidur, S.K. Tyagi, Yogendra Kumar Mishra, Experimental evaluation of binary and ternary eutectic phase change material for sustainable thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*, 68, 2023, 107707, <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107707>.
- [7] Gang Wang, Chao Xu, Weiqiang Kong, Gerald Englmaier, Jinhua Fan, Gaosheng Wei, Simon Furbo, Review on sodium acetate trihydrate in flexible thermal energy storages: Properties, challenges and applications, *Journal of Energy Storage*, 40, 2021, 102780, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102780>.
- [8] D. Feldman, M.M. Shapiro, D. Banu, C.J. Fuks. Fatty acids and their mixtures as phase-change materials for thermal energy storage. *Sol Energy Mater*, 18 (1989), pp. 201-216.
- [9] A. Sari and K. Kaygusuz, Thermal performance of palmitic acid as a phase change energy storage material, *Energy Conversion and Management*, 43 (2002) 863-876.
- [10] G. Baran, A. Sari, Phase change and heat transfer characteristics of a eutectic mixture of palmitic and stearic acids as PCM in a latent heat storage system, *Energy Conversion and Management*, 44 (2003) 3227-3246.
- [11] Solé A, Neumann H, Niedermaier S, Martorell I, Schossig P, Cabeza LF. Stability of sugaralcohols as PCM for thermal energy storage. *Sol Energy Mater Sol Cells* 2014; 126:125-34.
- [12] Shukla A, Buddhi D, Sharma S, Sagara K. Accelerated thermal cycle test of erythritol for the latent heat storage application. In: *Proceedings of the EM4 Indore workshop IEA ECES IA annex*; 2003. p. 21-4.
- [13] K. Pielichowska, K. Pielichowski. Phase change materials for thermal energy storage *Prog Mater Sci*, 65 (2014), pp. 67-123.
- [14] R. Nikolić, M. Marinović-Cincović, S. Gadžurić, I.J. Zsigrai. New materials for solar thermal storage—solid/liquid transitions in

- fatty acid esters. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 79 (2003), pp. 285-292.
- [15] Kenar, J.A. The use of lipids as phase change materials for thermal energy storage. *Lip. Technol.* 2014, 26, 154–156.
- [16] Sari A, Alkan C, Doguscu, DK, Kizil C. Micro/nano encapsulated n-tetracosane and n-octadecane eutectic mixture with polystyrene shell for low-temperature latent heat thermal energy storage applications. *Sol Energy* 2015;115:195-203.
- [17] R.K. Sharma, P. Ganesan, V.V. Tyagi, H.S.C. Metselaar, S.C. Sandaran, Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage, *Energy Conversion and Management*, 95, 2015, 193-228.
- [18] Papadogianakis, G., Bouriazos, A., Tschla, A., Vasiliou, C. Process for the manufacture of saturated fatty acid esters. 2012. US 8,334,396 B2.
- [19] Solymosi Péter, 2021. Dízelgázolaj keverőkomponensek előállítása nem hagyományos triglicerid forrásokból. PhD dolgozat, Pannon Egyetem
- [20] Okogeri, O., Stathopoulos, V.N. What about greener phase change materials? A review on biobased phase change materials for thermal energy storage applications, *International Journal of Thermofluids*, 10, 2021, 100081,
- [21] Hiromori, K., Kitakawa, N., Shigehara, T. Latent heat storage material composition, and method for controlling latent heat storage characteristics. 2021. WO/2021/025134.
- [22] Suppes, G.J. Fatty-acid thermal storage devices, cycle, and chemicals. 2003. US 6,574,971 B2.
- [23] Ahmet Sari, Alper Biçer, Ali Karaipekli, Synthesis, characterization, thermal properties of a series of stearic acid esters as novel solid–liquid phase change materials, *Materials Letters*, 63, 2009, 1213-1216.
- [24] Rudakov, O.B., Polyanskii, K.K. & Alekseyuk, M.P. Qualitative Identification of Milk Fat from Chromatographic Data. *Journal of Analytical Chemistry* 57, 1081–1088 (2002). <https://doi.org/10.1023/A:1021476332260>
- [25] Csapó, J., Albert, C., Kiss, D. Analitikai kémia élelmiszer-mérnököknek. 2020, Scientia Kiadó, Kolozsvár, Románia.
- [26] Fabiani C, Pisello AL, Barbanera M, Cabeza LF, Cotana F. Assessing the Potentiality of Animal Fat Based-Bio Phase Change Materials (PCM) for Building Applications: An Innovative Multipurpose Thermal Investigation. *Energies*. 2019; 12(6):1111. <https://doi.org/10.3390/en12061111>.
- [27] G. Baran, A. Sari, Phase change and heat transfer characteristics of a eutectic mixture of palmitic and stearic acids as PCM in a latent heat storage system, *Energy Conversion and Management*, 44 (2003) 3227-3246.
- [28] R. Aridi, A. Yehya: Review on the sustainability of phase-change materials used in buildings, *Energy Conversion and Management*: X, 15, 2022, 100237, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100237>.
- [29] <https://forestsnews.cifor.org/71585/wanted-a-balanced-assessment-of-the-ecological-impact-of-all-vegetable-oils?fnl=en> (utolsó belépés: 2024.04.16.)
- [30] FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 2021 <https://www.fao.org/3/cb4476en/cb4476en.pdf> (utolsó belépés: 2024.03.24.)
- [31] The Environmental Impact of Vegetable Oils JEFF NOBBS, 2021 onl: <https://www.jeffnobbs.com/posts/the-environmental-impact-of-vegetable-oils> (utolsó belépés: 2024.03.24.)

A THERMOFOAM Csomagolástechnikai Kft., a HUN-REN Természettudományi Kutatóközpont, Anyag- és Környezetkémiai Intézet Funkcionális Nanorészecskék Kutatócsoportja és a NEBRASKA-HÁZ Építési Kft. a 2021.09.01-2025.08.31. időszakban a 2020-1.1.2-PIACI KFI pályázati program keretében a „Komplex műszaki rendszer kifejlesztése könnyűszerkezetes házak hőgazdálkodására (THERMOKOMP)” című (2020-1.1.2-PIACI-KFI-2021-00287 azonosító számú) projekt megvalósítását végzi. A projektet az egyre növekvő piaci igény a közel nulla energiaigényű épületek kifejlesztésére hívta életre, melyek használati értéküket és piaci versenyképességüket tekintve nagy előrelépést jelentenek a már hagyományosnak tekinthető szerelt-, vagy szárazépítési technológiával készült épületekhez képest. A belső terekben alapvető követelmény a külső időjárási körülményektől független, komfortos élet- és munkakörülmények biztosítása. A projekt a megújuló természeti erőforrások évszakoktól és napszakoktól, az átmeneti időjárási körülményektől jórészt független hasznosítását tűzi ki célul. Bármilyen jó a hőszigetelésük, a könnyűszerkezetes épületek ismert gyengesége a viszonylag kis termikus tehetetlenség (energiabefektetés nélkül télen hamar kihűl, nyáron gyorsan felmelegszik). Ezért további cél a belső terek hőmérsékletingadozásának csillapítása könnyűszerkezetes épületek termikus tömegének növelése révén, anélkül, hogy a beépített építőanyagok tömegét jelentősen megnövelnénk. Ezeknek a követelményeknek a megoldására alkalmasak az úgynevezett látens hőtároló anyagok, melyek a fázisváltó entalpiának megfelelő hőtartalom változást használják fel a hő átmeneti tárolására, ami fűtésre, hűtésre és temperálásra hasznosítható.

A tervezett projekt révén olyan, a könnyűszerkezetes épületek piacra vitelét elősegítő komplex műszaki rendszer kifejlesztését céloztuk meg, amely gyakorlatilag elhanyagolható mértékű fosszilis vagy elektromos energiafelhasználás mellett alkalmas ezen építmények belső terének temperálására (hűtésére vagy fűtésére), a naptári év teljes tartama alatt, csupán a napenergia, mint megújuló energiaforrás felhasználásával és a külső környezet éjszakai természetes lehűlése révén. A nem mindig a legalkalmasabb napszakban rendelkezésre álló energiaforrásokat terveink szerint a kifejlesztett magas színvonalú épületgépészeti rendszer részét képező fázisváltó hőtároló anyagok tárolják. A szárazépítési technológiával készült épületek fűtésére vagy klimatizálására kifejlesztendő komplex innovatív épületgépészeti rendszer révén jelentős megtakarítás érhető el mind a felhasznált építőanyagok és hőszigetelő rendszerek beruházási költségeit, mind pedig az épületek energiafelhasználási költségeit tekintve. A rendszer legfontosabb elemei: az épület belső terében elhelyezett passzív látens hőtároló panelekből és aktív fázisváltó hőtároló puffertartály, az épület hőszigetelő burkolatán kívül elhelyezett radiációs hűtőpanelek, és a napsugárzás hőjét begyűjtő napkollektorok, valamint ezek közötti termikus csatolást biztosító, intelligens módon vezérelt, egyszerű gépészeti rendszer. A három ipari konzorciumi tag fejlett technológiáik, magas szakértelmük révén és eredményeik alapján megfelelő piaci tapasztalattal és innovációs potenciállal rendelkeznek a tervezett projekt megvalósítására és az annak révén kifejlesztett technológia gyakorlati alkalmazására ezzel kiemelkedően magas műszaki tartalom és minőség elérésére az építőiparban.

Szintaktikus fémhabok termikus és mechanikai tulajdonságai, valamint alkalmazhatóságuk fázisváltó hőtároló rendszerekben

Fehér Anna^{a,e} PhD hallgató

Kovács Róbert^{a,d,e} egyetemi docens

Kun Balog Attila^a, tudományos segédmunkatárs

Maróti János Endre^{b,c} PhD hallgató

Orbulov Imre Norbert^{b,c} egyetemi tanár

Sztankó Krisztián^a egyetemi docens

Szűcs Mátyás^{a,d,e} egyetemi adjunktus

Balog Róbert^f biztonságtechnikai mérnök, Iparbiztonsági üzletágvezető

Takács Donát M.^{a,e} PhD hallgató

- a) *Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem; 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
- b) *Anyagtudomány és Technológia Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem; 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
- c) *MTA-BME Lendület Nagyteljesítményű Kompozit Fémhabok Kutatócsoport; 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.*
- d) *Elméleti Fizika Osztály, HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet; 1525 Budapest, Konkoly-Thege Miklós u. 29-33*
- e) *Montavid Termodinamikai Kutatócsoport; c/o ETTE, 1012 Budapest, Lovas út 18.*
- f) *IMSYS Mérnöki Szolgáltató Kft; 1033 Budapest, Mozaik utca 14/a.*

A nagy látens hőjű fázisváltó anyaggal megtöltött, jó hővezető képességű mátrixszal rendelkező fémhabok porózus belső szerkezetüknél fogva alkalmasak arra, hogy egy hőtároló be- rendezés részét képezzék. Ezt a koncepciót vizsgálándó, termikus és mechanikai méréseken keresztül bemutatjuk különféle, AISi7Mg mátrixú és Al₂O₃ ill. SiC erősítésű szintaktikus fémhabok anyagi tulajdonságait, sajátos jellemzőit. Ismertetjük a hőtárolásban felhasználható fémhabok termikus modellezésének lehetőségeit és kísérleti vizsgálataink friss eredményeit is.

*

Metal foams of high matrix thermal conductivity, filled with phase-change materials of high latent heat, can be a suitable choice in heat storage systems due to their porous inner structure. To investigate this concept, we present material properties and notable characterizing features of AISi7Mg matrix metal syntactic foams with Al₂O₃ or SiC reinforcing particles through thermal and mechanical measurements. We also present the possibilities in the thermal modelling and our first results from experimental investigations of metal foams for heat storage systems.

A fémhabok lehetséges műszaki célú felhasználása igen széleskörű. Előnyös mechanikai tulajdonságaik miatt (pl. nagy fajlagos szilárdság és energiaelnyelő-képesség) alkalmazásuk egyre elterjedtebb gépjárművekben, repülőgépekben és egyéb járművekben [1-4], üreszközökben [5-6], továbbá zajcsökkentés céljára is alkalmasak [4,7]. Mechanikai viselkedésük mellett termikus tulajdonságaik is jól hasznosíthatóak különböző műszaki problémák megol-

dására, pl. hőcserélők, hűtőrendszerek és hőtárolási rendszerek tervezésénél [8-10]. Ezen alkalmazások során elsősorban a fémhabok mátrixanyagának (pl. Al, Cu ötvözetek) jó hővezető képességét, valamint a porózus szerkezet által lehetővé tett gáz- illetve folyadékáteresztő-képességét használják ki.

Hőtároló rendszerek tervezésénél a fázisváltó anyaggal töltött fémhabok tulajdonságai különösen előnyösnek bizonyulnak: a fázisváltó anyagok nagy fajlagos hőtárolási képességéhez társuló, általában kis hővezetési tényezőt jól ellensúlyozza a fémhabok mátrixának nagy hővezetési tényezője, mely ezáltal biztosítja a gyorsabb hőterjedést.

Kutatásunkban elsősorban a fémhabok egy specifikus típusát, az ún. szintaktikus fémhabokat vizsgáltuk, különféle töltőanyagok mellett. Kísérleti eredményeken keresztül jellemezzük mechanikai és termikus tulajdonságaikat, utóbbi esetben különös tekintettel a porózus anyagokban gyakran megfigyelhető, a hagyományostól eltérő (nem-Fourier típusú) hővezetés [11] jelenségére. Az anyag-tulajdonságok jellemzése után bemutatjuk a hőtárolás céljára alkalmazott, fázisváltó anyaggal töltött fémhabok termikus elméleti modellezésének lehetőségeit, valamint a modellek validációja céljából létrehozott kísérleti elrendezést és az abban alkalmazott, additív gyártástechnológiával készített hőtároló-modell.

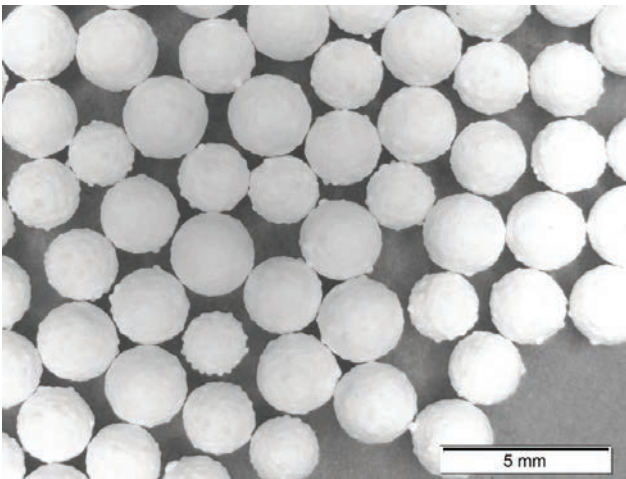
Fémhabok szerkezeti és mechanikai tulajdonságai

A fémhabok a celluláris anyagok csoportjába tartoznak. A fémhabok között megkülönböztethetünk nyílt és zárt cellás fémhabokat. Jelen kutatásunk témája a mátrixanyagában erősített szintaktikus fémhabok és tulajdonságaik. Ezek az anyagok a zárt cellás, porózus

szerkezeti anyagok csoportjába tartoznak. A szintaktikus fémhabok porozitását a fémmátrixba juttatott gömbhéjak, vagy zárt felületű porózus részecskék biztosítják, míg a kompozit jellegét pedig a gömbhéjak és a fémmátrixba, erősítés céljából elhelyezett erősítő-részecskék adják.

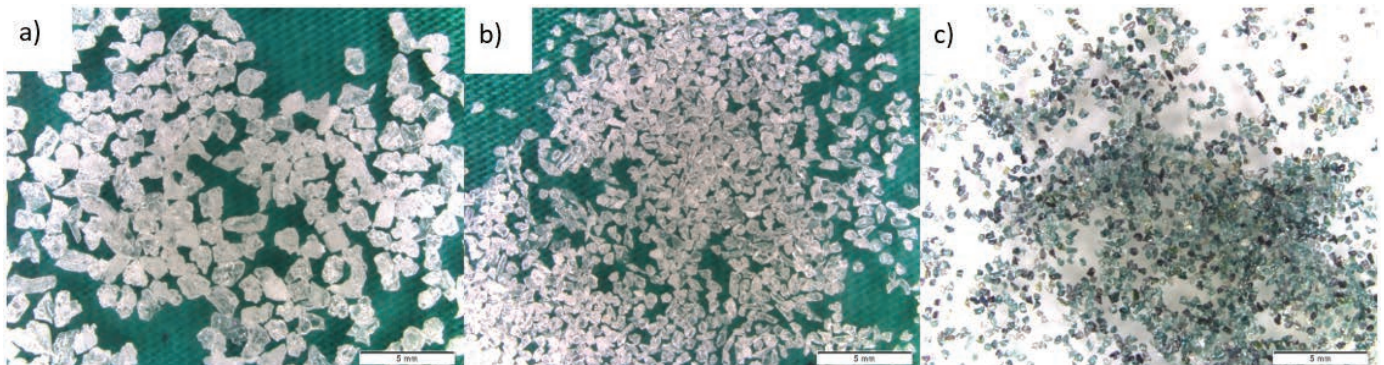
Fémhabok mátrixanyagaként általában kis sűrűségű, jó mechanikai és korróziós tulajdonságú, valamint a gyártásnál könnyen kezelhető fémeket használnak. Ezen kritériumoknak legjobban a különböző alumíniumötvözetek felelnek meg. Ezek miatt mi AlSi7Mg (A356) ötvözetű alumíniumot alkalmaztunk, a Si jelenléte csökkenti az olvadási hőmérsékletet és javítja az önthetőséget.

A szintaktikus fémhabok porozitását adó gömbhéjak (töltőanyagok) változatos anyagúak lehetnek, de fontos szempont, hogy a gyártás során olvadék állapotban lévő mátrixanyaggal ne lépjen kémiai reakcióba és kedvező mechanikai tulajdonságokkal rendelkezzenek. Ezért leggyakrabban Al_2O_3 vagy fém alapanyagú gömbhéjakat használnak. Esetünkben tiszta Al_2O_3 kerámia gömbhéjakat (CHS – „ceramic hollow spheres”) alkalmaztunk. A gömbhéjak átmérője $\varnothing 2,27 \pm 0,13$ mm, míg sűrűsége $0,94 \pm 0,05$ gcm⁻³ volt. A töltőanyagról készült sztereomikroszkópos képet mutatja az 1. ábra.



1. ábra. Kerámia gömbhéjakról készült sztereomikroszkópos kép

A tényleges kompozit jellegét a mátrixanyagba juttatott erősítőanyag adja. Kutatásunkban három különböző erősítést használtunk, két különböző méretű (1,2 mm és 0,6 mm névleges befoglaló méretű) Al_2O_3 szemcséket és egy 0,4 mm névleges méretű SiC szemcséket. Minden típusú erősítőanyagot 20 tf%-ban (a mátrixanyag térfogatához képest) alkalmaztuk. Az erősítőanyagokról készült mikroszkópi képet mutatja a 2. ábra.



2. ábra. Erősítőanyagokról készült mikroszkópi képek: a) 1,2 mm névleges méretű Al_2O_3 szemcsék, b) 0,6 mm névleges méretű Al_2O_3 szemcsék és c) 0,4 mm névleges méretű SiC szemcsék

A próbatesteket kisnyomású infiltrálással gyártottuk. A gyártás első lépéseként a töltő- és erősítőanyag homogén keverékét egy öntőformába töltöttük, majd a keverék tetejére egy S325JR 1 mm-es osztású acélhálót helyeztünk, hogy megakadályozzuk a gömbhéjak olvadékba történő felúszását. Ez után az öntőforma 30 perces, 600 °C-on történő előmelegítését követően, 840 °C-os olvadék állapotában lévő alumínium ötvözetet öntöttünk a keverék tetejére, majd 5 másodpercig 500 kPa nyomású argon gázzal az erősítő- és töltőanyag közé kényszerítettük az olvadékot.

A 30 mm átmérőjű, valamint 40 mm hosszúságú próbatesteken az ISO13314:2011 szabványnak megfelelő nyomóvizsgálatot végeztünk egy MTS810-es univerzális anyagvizsgáló gépen 4 mm/perc keresztfej sebességgel legalább 50%-os alakváltozásig. A szerszámok és a próbatestek közé 0,3 mm vastagságú Kolofol teflon fóliát helyeztünk, a súrlódás csökkentése érdekében. A nyomóvizsgálat eredményeiből a következő szabványos mérőszámokat tudjuk számolni:

- (i) *nyomószilárdság* (σ_c (MPa): a rugalmas szakaszt követő első csúcspont feszültségi értéke),
- (ii) *platófeszültség* (σ_p (MPa): a 10%-40%-os alakváltozás közötti átlagos feszültség),
- (iii) *mechanikai energiaelnyelés* ($W_{50\%}$ (J/cm³): a feszültség - alakváltozás görbe integrálja 50%-os alakváltozásig)
- (iv) *szerkezeti merevség* (k (MPa): a rugalmas alakváltozási szakaszra illesztett egyenes meredeksége)
- (v) *az energiaelnyelés hatásfoka* (W_η (-): a valós és az ideális fémhab energiaelnyelésének hányadosa).

A kapott mechanikai eredményeket megvizsgálva azt állapíthatjuk meg, hogy a feszültség-alakváltozás görbék alakját a szintaktikus fémhabok töltőanyaga határozza meg. Az erősítőanyag jelenléte minden esetben csökkentette a platófeszültséget és egyes esetekben az elnyelt energiát is, csak a SiC erősítés tudta tartani az erősítetlen referencia minták energiaelnyelését. A nyomószilárdság és a szerkezeti merevség növekedett az erősítőanyag jelenléte miatt, valamint ezen tulajdonságok és az erősítőanyag mérete között lineáris kapcsolatot fedeztünk fel:

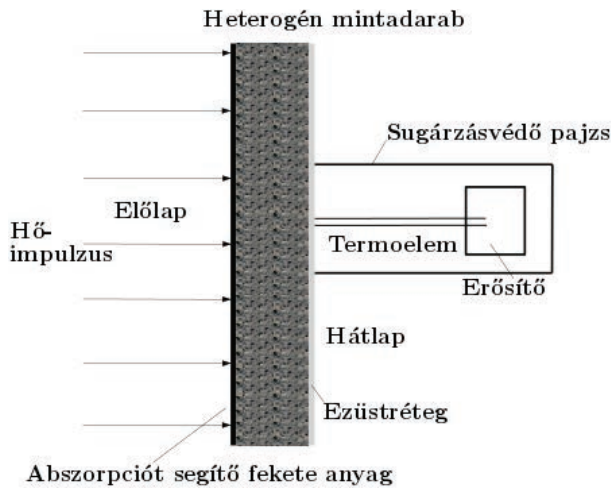
$$\sigma_c = 102,6 + 23,7d; R^2 = 0,981,$$

$$k = 51,6 - 8,2d; R^2 = 0,907,$$

ahol d az erősítőanyag névleges mérete mm-ben [12].

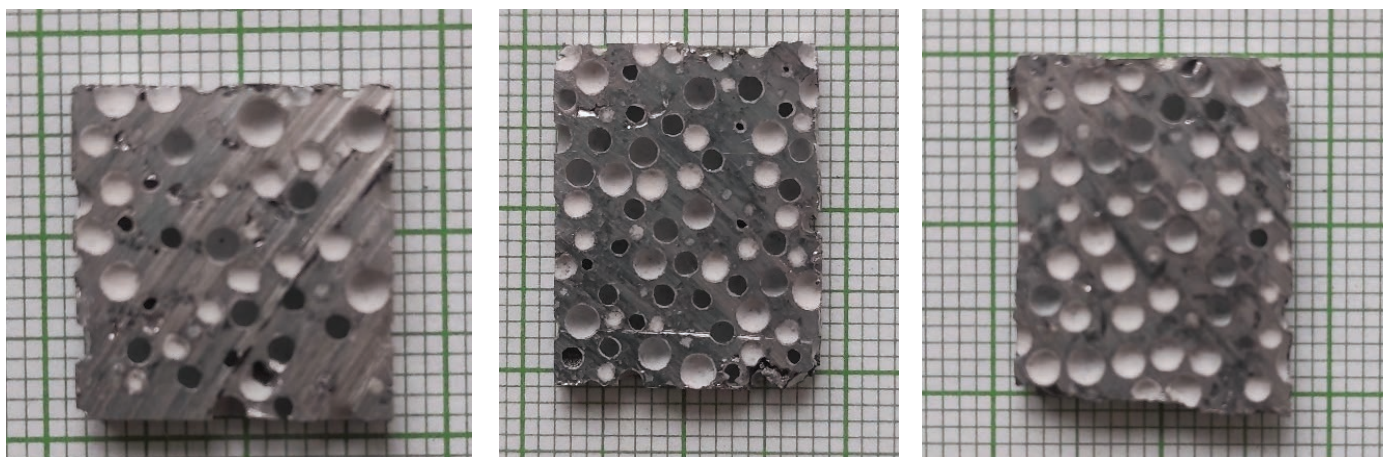
Termikus jellemzők meghatározása

Az anyag termikus jellemzőinek meghatározásához hőimpulzus-kísérleteket alkalmazunk, így a kísérleti minták hőfokvezetési tényezői meghatározhatók már szobahőmérsékleten is. A kísérletek során egy villanólámpa rövid ideig (0,01 s) gerjeszt hőimpulzust a minta előlő felületén, míg a minta hőmérsékletét a hátsó oldalon egy K-típusú termoelem segítségével mérjük, hasonlóan a 3. ábrán látható elrendezéshez.



3. ábra. A hőimpulzus-kísérlet sematikus ábrája

A pontos mérésekhez alapos mintaelőkészítés szükséges. Ez bonyolult, mivel a mérni kívánt mintáknak vékonyknak kell lenniük, max. 5 mm nagyságrendben, ami a mérőeszköz korlátozott képessége miatt szükséges. Ez általános minden szabványosított berendezésnél, így ez korlátozza a minták kísérleti vizsgálatának lehetőségét is. Az ilyen méretben azonos vastagságok előállítását, különösen fémhabok esetén, kihívást jelent. Ideális esetben egy adott mintához reprezentatívabb hőtani jellemzőket szeretnénk kapni, ehhez sokkal nagyobb mintát kellene tesztelni, ahol a párhuzamos hőátadási csatornák kölcsönhatása kevésbé jelentős, és nem befolyásolja az átmeneti viselkedést. Azonban a 2 és 3 mm közötti vastagságú ilyen kis minták használata részletesebb viselkedést mutathat be a szerkezetben, és ezáltal elősegítheti a komplex szerkezetek hatékony jellemzését. A minták előkészítése során az előlapot grafitfestékkel vonjuk be a legjobb abszorpció elérése miatt. A vizsgált minták a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra. A vizsgált fémhabminták képei

Termikus mérések kiértékelése

A mérések kiértékeléséhez szükség van a kísérleti elrendezés termikus modelljére. A kísérlethez egydimenziós modell használható, amelynek egyik végén időfüggő hőáram-peremfeltétel, a másik végén pedig hőátadási peremfeltétel van, mivel a próbatestek vastagsága jóval kisebb, mint a felületük, és a hőimpulzus homogén módon gerjeszti a teljes felületet. Továbbá az anyagtulajdonságok hőmérsékletfüggését nem vesszük figyelembe, mivel a kísérletek során a hőmérsékletváltozások minimálisak (3-5 K).

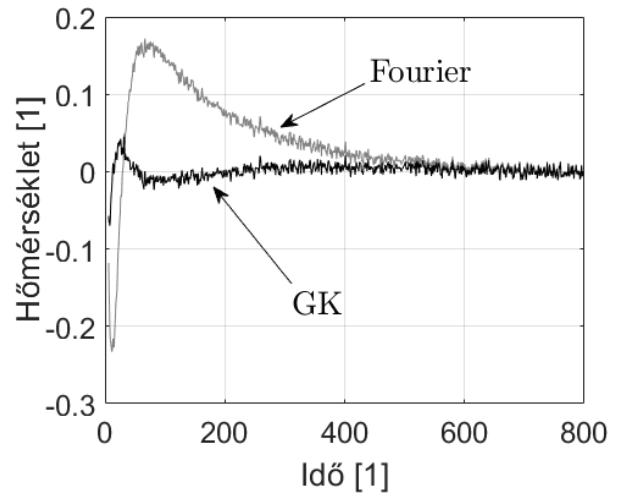
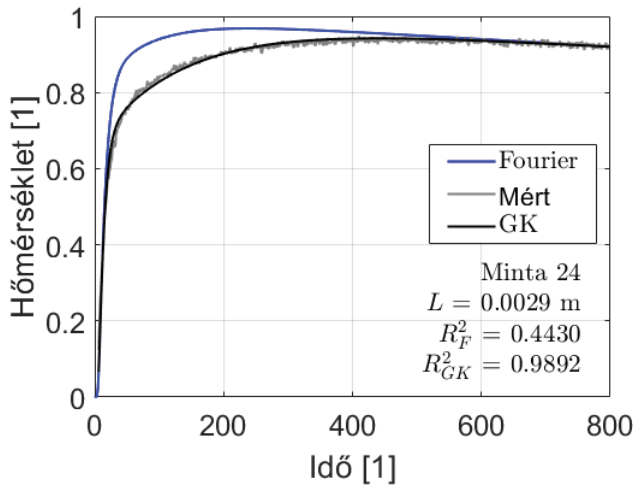
A rendszerben több időskála van jelen, ugyanis röviddel azután, hogy a hőimpulzus elnyelődik a próbatestben, majd eltűnik, és fokozatos természetes lehűlési szakasz következik. A Fourier-egyenlet használata nem feltétlenül illeszkedik megfelelően a hátoldal hőmérséklet-lefutásához, és az eltérés megakadályozza egy megbízható átlagos hővezetési tényező meghatározását is. Ezzel szemben a Guyer-Krumhansl-egyenlet (GK) számos mérés és kiértékelés során megfelelő modell ennek pontosabb meghatározására. A kísérletekből származó kiértékeléseket – érzékenységvizsgálatot követően [13] – iteratív úton készítjük el, melyekből a GK-egyenlet kiegészítő paramétereit kapjuk meg, úgy, mint a τ_q relaxációs idő, és a κ jellemző hosszúság-lépték. A kapott paraméterekből egy átlagos időskála becsülhető,

$$\alpha_{Fc} = \frac{1}{2} \left(\alpha_{GK} + \frac{\kappa^2}{\tau_q} \right),$$

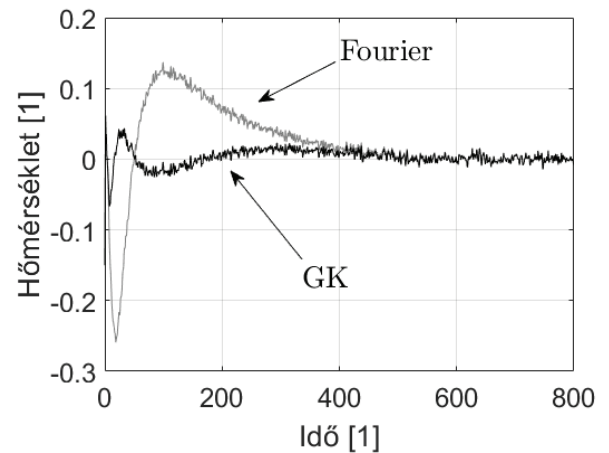
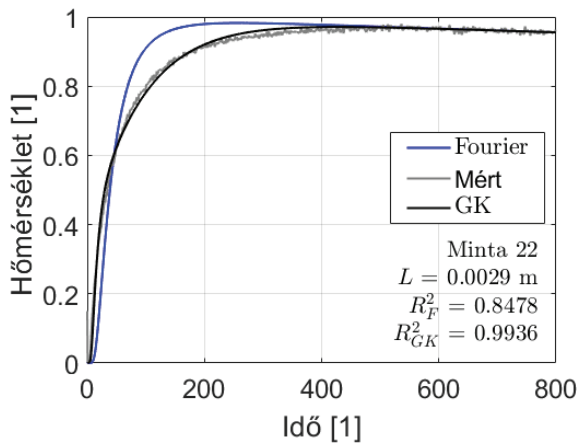
ami a Fourier-egyenletben használható effektív hőfokvezetési tényezőnek feleltethető meg. Itt α_{GK} a GK-egyenletben megjelenő hőfokvezetési tényező, ami definíciójában egyezik a klasszikus értelmezéssel, azaz a hővezetési tényező és a fajlagos hőkapacitás hányadosa. Az eltérés a Fourier és a GK modellek között abban rejlik, hogy az eltérő paraméterhalmaz miatt eltérő hővezetési, vagy hőfokvezetési tényezőt lehet kimérni ugyanarra a próbatestre. Az előbbieken definiált α_{Fc} felhasználható az összetett

1. táblázat. Néhány fémhabminta termikus paramétere

| Minta ID | L | Fourier | GK | | | Számított Fourier |
|----------|--------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | | α_F | α_{GK} | τ_q | |
| | [m] | 10^{-6} [m ² /s] | 10^{-6} [m ² /s] | | 10^{-6} [m ²] | 10^{-6} [m ²] |
| 22 | 0,0029 | 2,59 | 1,92 | 0,21 | 1,28 | 3,92 |
| 32 | 0,0021 | 2,85 | 1,56 | 0,28 | 1,31 | 3,15 |
| 42 | 0,0028 | 5,41 | 4,25 | 0,22 | 1,62 | 6,08 |



5. ábra. Fémhab minta (24) kiértékelése és különbség a kiértékelések és a mért hőmérséklet között



6. ábra. Fémhab minta (22) kiértékelése és különbség a kiértékelések és a mért hőmérséklet között

fémhabszerkezetek hosszú távú (vagy kellően lassú) transziens viselkedésének előrejelzésére. Emiatt a két modell által adott lehülési szakaszok együttfutása egy megkövetésként fogható fel, mivel a mérések szerint is akkorra kellően kiátlagolódnak a Fourier-tól eltérő hatások is.

Az 5. és 6. ábrákon jól látható, hogy a különböző kiértékelések használata mennyiben illeszkedik a mért hőmérsékleti görbékre. A Fourier-illesztés esetében megfigyelhető, hogy a minták kezdetén van, hogy lassabb felmelegedést, majd egy ponton túl gyorsabb felmelegedést jelez, mint ami a valóságban történik, ez a két elkülönülő időskála kísérleti megjelenését mutatja, és egyben hangsúlyozza a két hővezetési időskálát tartalmazó modellek használatát, mint például a GK-egyenletét. A 7. ábrán látható, hogy egyes minták kiértékelt termikus jellemzője milyen mértékben tér el a Fourier-álta adott értékektől, ahol a vízszintes tengelyen az egyes próbatetek azonosítói láthatóak.

Hőtárolás fázisváltó anyaggal töltött fémhabokkal

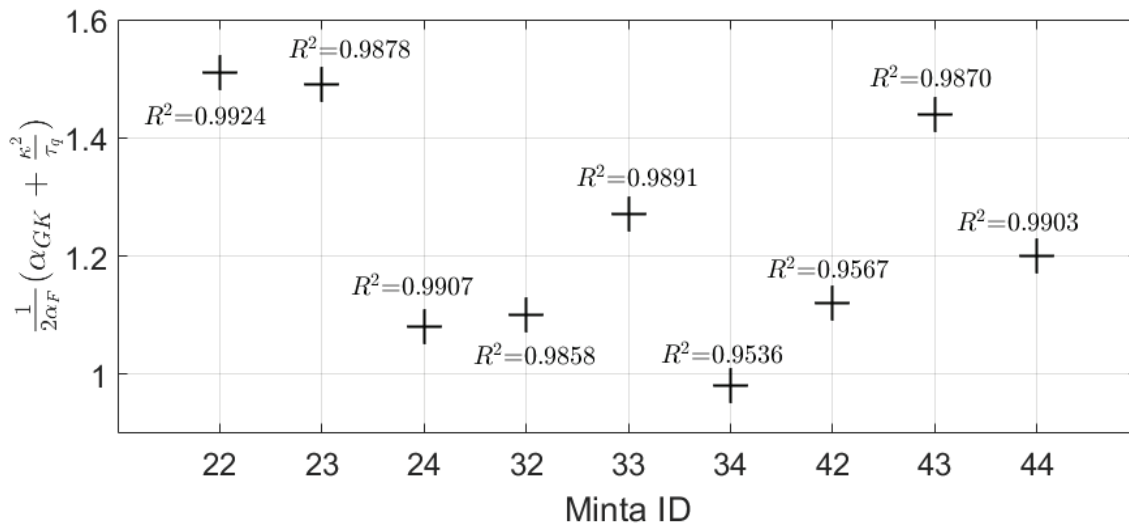
A fémhabbal és fázisváltó anyaggal töltött hőtároló koncepció hatékonyságának és előnyeinek meghatározásának, valamint a tervezést segítő szimulációk validálásának érdekében a berendezés, illetve a berendezésben lejátszódó folyamatok számszerűsítése szükséges. Az ipari körülmények között gyártott fémhabok szerke-

zete csak statisztikusan jellemezhető, például porozitásukon és a fémátlagban lévő üregek átlagos egyenértékű átmérőin keresztül. Ezek meghatározása optikai mérésekkel esetleg CT alkalmazásával történhet, ugyanakkor ezen paraméterek számértéke erősen függ az alkalmazott mérési módszer térbeli felbontásától (pl. optikai mérések esetén a pixelméret egy természetes korlátot szab).

A hőtároló teljes térfogatában tárolt termikus energiát (mely egyben a belső energia is, ugyanis a hőtágulástól eltekintünk) a fázisváltó anyag (jelölésben PCM – „phase changing material”) és a fémátlag (jelölésben MF – „metal foam”) ρ sűrűségeinek és u fajlagos belső energiáinak, illetve a fémhab ε porozitásának ismeretében az

$$U = \int_{V_{\text{hőtároló}}} [\varepsilon \rho_{\text{PCM}} u_{\text{PCM}} + (1 - \varepsilon) \rho_{\text{MF}} u_{\text{MF}}] dV$$

összefüggéssel számíthatjuk. A fajlagos belső energia és a hőmérséklet között a c fajlagos hőkapacitás teremt kapcsolatot, azaz $u_{\text{PCM}} = c_{\text{PCM}} T_{\text{PCM}}$ és $u_{\text{MF}} = c_{\text{MF}} T_{\text{MF}}$. Kontinuum szemlélettel élve, azaz feltételezve, hogy a fémhab és a fázisváltó anyag homogéneken tölti ki a teljes térfogatot (ezáltal figyelmen kívül hagyva a fémátlagban lévő fázisváltó anyaggal kitöltött üregek tényleges, lényegében nem meghatározható térbeli eloszlását) és a két közeg alkotta kompozitot egyetlen tér- és időfüggő \bar{T} átlaghőmérséklettel jellemezve, a hőtárolóban lejátszódó termikus folyamatokat a



7. ábra. A minták eltérése a Fourier-rezonanciától. A vízszintes tengelyen az egyes próbatestek azonosítói láthatóak. Az R2 értékek a GK-egyenletre értendőek.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T$$

hővezetési egyenlettel modellezhetjük, ahol

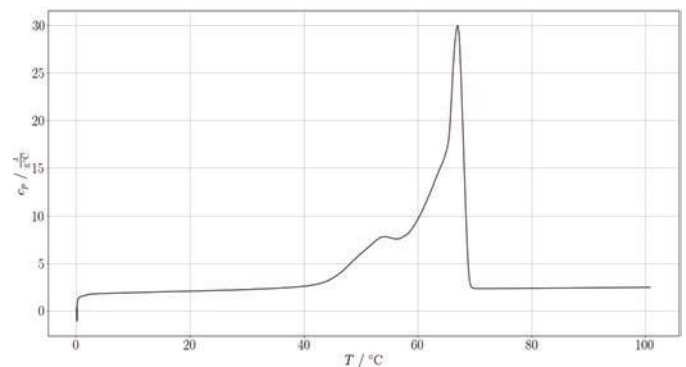
$$\rho c = \varepsilon \rho_{PCM} c_{PCM} + (1-\varepsilon) \rho_{MF} c_{MF},$$

a hőtároló kompozit átlagos hőkapacitás-sűrűsége, λ pedig átlagos hővezetési tényezője, melynek becslését a porozitás ismeretében számos tapasztalati úton felállított formula alapján elvégezhetjük (néhányat ezek közül [14] 41. oldalának 2.2 táblázata foglal össze), továbbá $\partial/\partial t$ a parciális időderiváltat, Δ pedig a Laplace-operátort jelöli. Ehelyett az effektív megközelítés helyett alkalmazhatjuk az ún. két-hőmérsékletű modellt is, mely továbbra is egy kontinuummodell, viszont a két közeg hőmérsékletét különbözőnek tételezi fel. A közegek közti hőmérsékletkülönbség hatására a hőtároló térfogatában egy hőátadással analóg hőtranszport is megjelenik, így a fázisváltó anyagban és a fémmátrixban történő hővezetést az

$$\varepsilon \rho_{PCM} c_{PCM} \frac{\partial T_{PCM}}{\partial t} = \lambda_{PCM} \Delta T_{PCM} - ha(T_{PCM} - T_{MF}),$$

$$(1-\varepsilon) \rho_{MF} c_{MF} \frac{\partial T_{MF}}{\partial t} = \lambda_{MF} \Delta T_{MF} + ha(T_{PCM} - T_{MF})$$

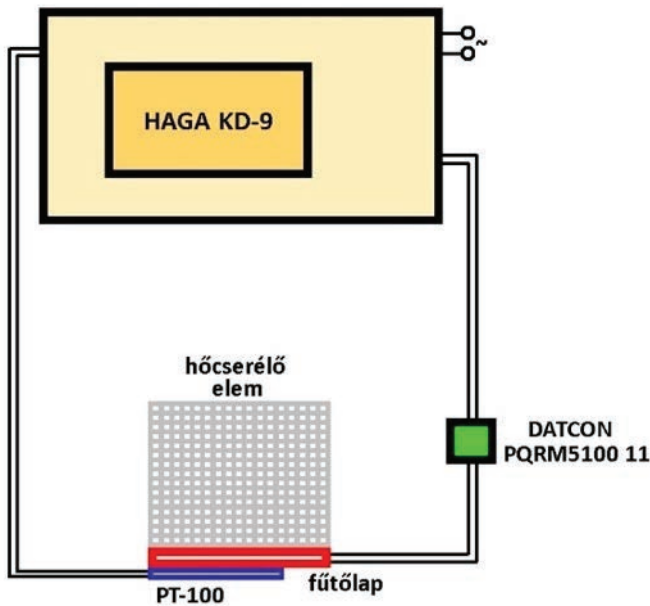
egyenletekkel írhatjuk le, ahol h egy hőátadási tényezőnek megfelelő jellemző, a pedig egy fajlagos hőátadó felület, ami az egységnyi térfogatban jelenlévő pórusok felülete, amit m^2/m^3 -ben mérünk. A két-hőmérsékletű modell előnye, hogy nincs szükség átlagos anyagjellemzők definiálására, a két közeg saját anyagjellemzőinek ismerete elegendő. Ugyanakkor a két közeg közti hőátadást jellemző ha szorzat meghatározása bonyodalmas, amint már utaltunk rá, a porózus közeg belső geometriáját jellemző paraméterek becslése statisztikus és erősen hibákkal terhelt, a porózus közegbeli hőátadási tényező becslése pedig túlzottan egyszerűsített geometriák numerikus szimulációira, illetve kísérleti eredményekre támaszkodik, mely vizsgált problémák nem feltétlenül vannak összhangban az általunk vizsgált esettel. Ezek fényében a ha szorzat esetleges becslését követően mindig szükséges annak kísérleti adatokra történő illesztése is. Mindezekon túl, a fázisváltó közegben a „nagy” hőmérsékletkülönbség és fázisváltás okozta anyagi nemlinearitásokra, az anyag szennyezettségétől függően a fázisváltási hőmérséklet el-



8. ábra. MOL DMW 6266 paraffin DSC („differential scanning calorimetry”) módszerrel meghatározott izobár fajhője a hőmérséklet függvényében

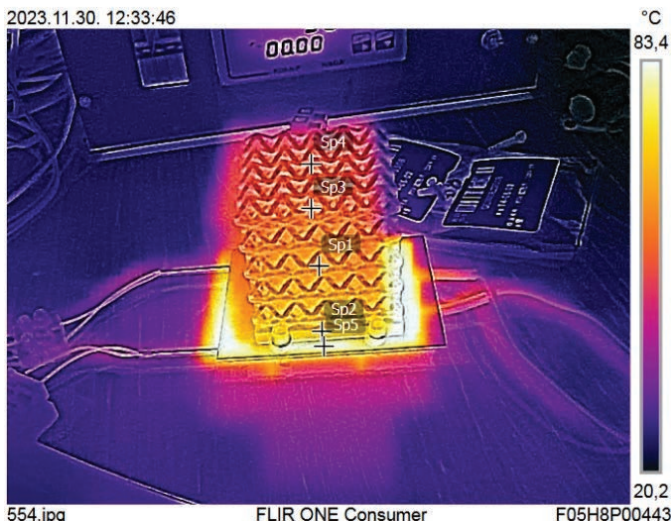
kenődésére, illetve termikus hiszterézisre (azaz, amikor az olvadási és fagyási hőmérséklet eltér) is számítanunk kell, ezeket szemlélteti a 8. ábra.

A fémhabbal és fázisváltó anyaggal töltött hőtároló termikus folyamatainak vizsgálatához és megértéséhez így egy geometriailag sokkal egyszerűbben és megbízhatóbban jellemezhető „porózus” közegre lenne szükségünk. A modern additív gyártástechnológiának köszönhetően egy szabályos, 3D nyomtatással, alumíniumból készült, $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ befoglaló méretű térrács alkalmazásával modellezzük kísérletileg a porózus anyagot. Ezen alumínium hőcserélő elem hőtechnikai vizsgálatához kialakításra került egy megfelelő mérőrendszer. A tervezett hőcserélő síkfelületéhez meghatározott hőmérséklettel érkező közvetítő közeg helyettesítésére az állandó hőmérsékletre szabályozott kontakt fűtés látszott észszerűnek, amit egy 110 W teljesítményű elektromos fűtőlappal biztosítunk. A fűtőlappot a hőcserélő elem síklapjához szorítjuk, az alkatrészek közé hővezetőpaszta kerül. A fűtőelemmel bevitt hőteljesítmény szabályozását egy HAGA KD9 programozható szabályozó végzi el, aminek a bemeneti szabályozott jelét a fűtőlappra szerelt Pt-100 ellenálláshőmérők adják. A PID szabályozó egy relé segítségével, megfelelően kapcsolgatva a fűtőelem tápellátását, tartja a beállított hőmérsékletet. A fűtőelem villamos teljesítményét egy DATCON PQRM5100 11 típusú egyfázisú teljesítménymérővel méri. A mérőrendszer sematikus összeállítását a 9. ábra mutatja.



9. ábra. A fémhabbal és fázisváltó anyaggal töltött hőtároló modellező kísérleti mérőrendszer sematikus összeállítása

Az első tesztek paraffin nélkül, üres állapotban kívántuk elvégezni. Az összeállított rendszerrel végzett tesztüzem hőkamerás vizsgálatának eredménye a 10. ábrán látható. A fűtőlaptól távolodva a fémrácsban 20 °C maximális hőmérséklet különbség volt tapasztalható. A hőmérsékleti értékek a jobb oldali hőképen jelölt pontokban a következők: Sp1: 51,8 °C, Sp2: 63,2 °C, Sp3: 45,4 °C, Sp4: 43,3 °C, Sp5: 83,1 °C.



10. ábra. A fűtött alumínium fémrács hőkamerás felvétele

A későbbiekben tervezett tesztek szerint az alumínium fémrácsot a rászertelt fűtőlappal együtt egy felülről nyitott, felolvasztott paraffinnal töltött plexiüveg kockában helyezük majd el, melyben a megfelelő pontokban hőmérők lesznek elhelyezve. A plexiüveg kocka előnye, hogy optikai hozzáférést is biztosít a kísérleti hőcserélő belsejéhez. A valóságoshoz közeli termikus állapotot a megfelelő peremhőmérsékletek beállításával érhetjük el, amit a fűtőlapp szabályozása biztosít. A fázisváltó közegben különböző pontokon mérhető hő-

mérsékletértékek változása szolgáltathat információt a hővezetési folyamatokról.

Köszönetnyilvánítás

A DSC méréseket köszönjük Kállay-Menyhárd Alfrédnek (BME VBK). A munka a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HŐ pályázati program finanszírozásában valósult meg. A kutatásokat továbbá az NKFIH K 138505 és FK 134277 támogatta. A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta.

Hivatkozásjegyzék

- [1] Banhart, J.: Aluminium foams for lighter vehicles. *International Journal of vehicle design*, 37(2-3), p. 114-125, 2005.
- [2] Srinath, G., Vadiraj, A., Balachandran, G., Sahu, S. N., & Gokhale, A. A.: Characteristics of aluminium metal foam for automotive applications. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 63, p. 765-772, 2010.
- [3] Claar, T. D., Yu, C. J., Hall, I., Banhart, J., Baumeister, J., & Seeliger, W.: Ultra-lightweight aluminum foam materials for automotive applications. *SAE transactions*, p. 98-106, 2000.
- [4] Lefebvre, L. P., Banhart, J., & Dunand, D. C.: Porous metals and metallic foams: current status and recent developments. *Advanced engineering materials*, 10(9), p. 775-787, 2008.
- [5] Klavzar, A., Chiroli, M., Jung, A., & Reck, B.: Protective performance of hybrid metal foams as MMOD shields. *Procedia Engineering*, 103, p. 294-301, 2015.
- [6] Ryan, S., Ordonez, E., Christiansen, E. L., & Lear, D. M.: Hypervelocity impact performance of open cell foam core sandwich panel structures. *Hypervelocity Impact Symposium (No. JSC-CN-19432)*, 2010. jan.
- [7] Liu, H., Wei, J., & Qu, Z. (2012). Prediction of aerodynamic noise reduction by using open-cell metal foam. *Journal of Sound and Vibration*, 331(7), 1483-1497.
- [8] Boomsma, K., Poulikakos, D., & Zwick, F.: Metal foams as compact high performance heat exchangers. *Mechanics of materials*, 35(12), p. 1161-1176, 2003.
- [9] Chen, X., Li, X., Xia, X., Sun, C., & Liu, R.: Thermal storage analysis of a foam-filled PCM heat exchanger subjected to fluctuating flow conditions. *Energy*, 216, 119259, 2021.
- [10] Ejlali, A., Ejlali, A., Hooman, K., & Gurgenci, H.: Application of high porosity metal foams as air-cooled heat exchangers to high heat load removal systems. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 36(7), p. 674-679, 2009.
- [11] Kovács R.: Heat equations beyond Fourier: From heat waves to thermal metamaterials. *Physics Reports*, 1048, p. 1-75, 2024.
- [12] Maróti J. E., & Orbulov I. N.: Characteristic compressive properties of AlSi7Mg matrix syntactic foams reinforced by Al₂O₃ or SiC particles in the matrix. *Materials Science and Engineering: A*, 869, 144817, 2023.
- [13] Fehér A., Maróti J.E., Takács D.M., Orbulov I.N., Kovács I.N.: Thermal and mechanical properties of AlSi7Mg matrix syntactic foams reinforced by Al₂O₃ or SiC particles in matrix. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Volume 226, 25446, ISSN 0017-9310, 2024.
- [14] X. Lu: Fluid flow and heat transfer in porous media manufactured by a space holder method. PhD disszertáció, University of Liverpool, 2020.

Hőátadó- és fogadó állomások tervezése gépészeti, villamos és szabályozástechnikai szempontok alapján

Andrássyné Farkas Rita, operatív igazgató, HeatVentors Kft.

Dr. Andrásy Zoltán, HeatVentors Kft. ügyvezető, zoltan.andrassy@heatventors.com

A villamos akkumulátorokhoz hasonlóan a hő tárolása is egyre fontosabb szerepet tölt be az energiamegtakarítási lehetőségek között, hiszen gyakori probléma, hogy nem akkor áll rendelkezésre a hőenergia, legyen az hűtési vagy fűtési energia, amikor arra szükség van, illetve nem akkor van szükség a hőenergiára, amikor annak előállításra optimális gazdasági vagy műszaki szempontból. Ezen kívül tárolók segítségével a hőenergiát nem csak időben lehet átcsoportosítani, hanem térben is. Ehhez a hőenergia, illetve a hőenergia tárolók szállítására van szükség, valamint az ehhez szükséges hőátadó- és fogadó állomások kiépítésére.

*

Similar as electric batteries, thermal energy storage (Thermal Battery) is an increasingly important energy-saving option, as it is a common problem that thermal energy, whether it is heating or cooling energy, is not available when it is needed, or when its production is optimal from economical or technical aspects. In addition, storages can be used to redistribute thermal energy not only in time but also in space. This requires the transport of thermal energy and thermal energy storage, as well as the construction of the necessary heat provider and receiving stations.

A hőakkumulátorok, vagy ha nagyobb mennyiségekről beszélünk hőtároló konténerek hatékonysága ugyan sokkal nagyobb, mint a villamos akkumulátoroké, azaz megfelelően kialakított és szigetelt tárolókkal hosszabb ideig meg lehet őrizni a hőenergiát azonos hőmérsékleten, gazdasági szempontból mégis szükséges, hogy minél gyorsabb és egyszerűbb legyen a ki- és betárolás. A hőátadó- és fogadó állomások tervezése során ezért az alábbi szempontokat kell figyelembe venni:

- Gyors hidraulikai csatlakoztathatóság: fontos, hogy minél egyszerűbben és gyorsabban lehessen használni a rendszert, minden legyen plug&play.
- Gyors elektronikai csatlakoztathatóság: fontos, hogy minél egyszerűbben és gyorsabban lehessen használni a rendszert, minden legyen plug&play.
- Mérhetőség: az elszámolhatóság kapcsán kiemelten fontos a be- és kitarolt hőmennyiség mérése, illetve, hogy biztosítva legyen a kívánt hőmérséklet.
- Eltérő hidraulika és vízminőség: előfordulhat, hogy a szállító egység és a hőátadó- vagy fogadó állomások hidraulikája vagy vízminősége eltér. Ekkor nem lehet közvetlenül egymáshoz csatlakoztatni a rendszereket, hanem hőcserélőn keresztül kell a hőakkumulátort és az állomást összekapcsolni.
- Fagyvédelem: mind a szállítható hőakkumulátor, mind a hőátadó- vagy fogadó állomások tervezésénél figyelembe kell venni a környezeti hatásokat, hogy minél kevesebb

meghibásodás fordulhasson elő és minél kevesebb legyen a szükséges karbantartás.

- Vízpótlás: a rendszerek összekapcsolásánál előfordulhat vízvesztés, a kiömlött vizet pótolni szükséges. A rendszerben áramló víz lehet fagyállós víz vagy kezelt víz, amely megfagyhat. Kezelt víz esetén az épületen kívüli részből a vizet a tömlőkből, vagy csövekből ki kell engedni.
- Gyors kiépítés: gazdasági szempontból fontos, hogy minél kevesebb rendszerelemmel, minél gyorsabban ki lehessen építeni a hőátadó- vagy fogadó állomásokat.
- Szükség esetén áttelepíthetőség: amennyiben változik a hőforrás vagy a hőfelhasználás helye, úgy a hőátadó- vagy fogadó állomásokat át lehessen telepíteni.

Kialakítás szempontjából kétféle megoldás létezik. A hő fogadásához és átadásához szükséges berendezések kiépítésre kerülhetnek a hőforrás, illetve a hőfogyasztó egység telephelyén, illetve kialakításra kerülhetnek a szállítható hőakkumulátorral egy egységet képezve is.

Hőfogadó állomás a hőforrásra csatlakoztatva

A gépészeti kapcsolás a hőt fogadó állomásra kerül bemutatásra. A hőátadó állomás is hasonló elven épül fel. A hőforrásnál hasonlóan épül fel a rendszer, azzal a kivétellel, hogy a hőtároló konténerrel az áramlási irány megfordul, nem az osztóra táplál rá a tároló, hanem arról történik a tároló feltöltése.

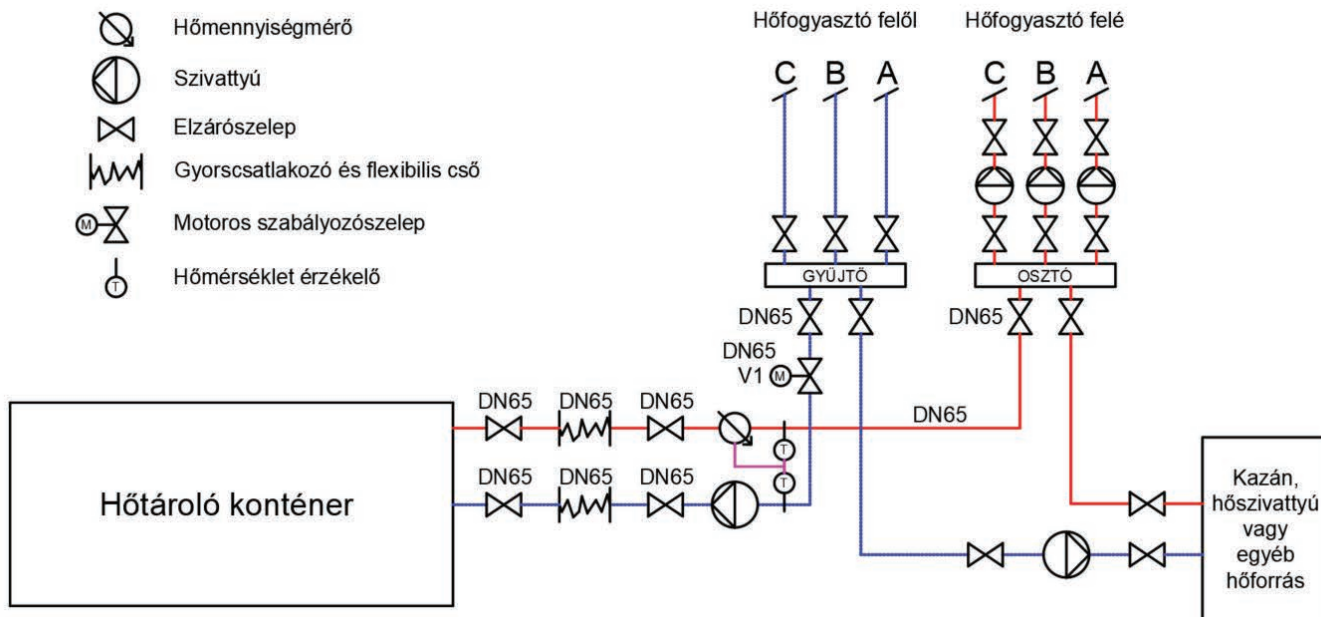
Az 1. ábra a hőfogadó állomás koncepciótervét mutatja be, a prototípus tárolóhoz szükséges cső- és szerelvény méretekkel (áramlástechnikai számítások alapján lett elkészítve, úgy, hogy a hőtároló konténer töltése és kisütése maximális hőteljesítménnyel történhessen). Az alap rendszerben található egy hőtermelő berendezés (kazán, hőszivattyú vagy egyéb hőforrás). Ez ellát egy osztó szerelvényt hőenergiával, ami szétosztja a hőt a hőfogyasztók külön körei között. A körökről visszatérő hőkövetítő közeget a gyűjtő összegyűjti és visszakérül a hőtermelőhöz.

Ebbe a rendszerbe kell beintegrálni a feltöltött hőtároló konténeret. Ezt két flexibilis csőre szerelt gyorscsatlakozóval, lehet a leg egyszerűbben megoldani.

A 2. ábra 2 anya-apa gyorscsatlakozó párosítást mutat be, melyek segítségével a csatlakozás gyors és egyszerű.

A tároló kisütése és a fogyasztók ellátása a szivattyú indításával és a V1 szelep nyitásával történik. Az igények kiszolgálása hasonló módon történik, mint az eredeti hőtermelő esetén, annak a szabályozási körébe kell bevonni a tárolót is és prioritálni kell annak üzemét, hogy minél hamarabb megtörténjen a kisütés és újratölthető legyen a tároló a hulladékhő kibocsátónál.

Fontos az elszámolás, azaz a hő értékesítése a fogyasztó számára. Ehhez egy hőmennyiségmérőt kell beépíteni, ami méri az átáramlott víz mennyiségét, az előremenő- és a visszatérő víz hő-



1. ábra. Hőfogadó állomás koncepcióterve



2. ábra. Gyorscsatlakozók

mérsékletét. Ezen paraméterek segítségével számítja a kiadott hő mennyiségét, ami az elszámolás alapja. A hőmérsékletérzékelő pár a hőmennyiség meghatározásán túl a megfelelő hőmérséklet ellenőrzését is ellátja. Ezenkívül elzárószelepeket tartalmaz a rendszer, melyek a fel és lecsatlakozást, illetve a szerelhetőséget biztosítják. Amennyiben a tároló és a fogyasztó hidraulikai körét külön kell választani, egy hőcserélő beépítése szükséges, melyet a 3. ábra mutat be. Ez a kapcsolat olyankor jelent megoldást, amikor a szállító egység és a hőátadó- vagy fogadó állomások hidraulikája vagy vízminősége eltér. Ekkor nem lehet közvetlenül egymáshoz csatlakoztatni a rendszereket, hanem hőcserélőn keresztül kell a hőakkumulátort és az állomást összekapcsolni.

A 2021-2.1.2.-HŐ-2021-0004 azonosító számú „Hulladékhő tárolására és szállítására alkalmas hőtároló egység kifejlesztése” című pályázat keretében egy hőtároló konténer, illetve hőátadó- és fogadó állomás prototípusa kerül megépítésre a Thermofoam Kft. telephelyén. A főbb szerelvényeket az 1. táblázat tartalmazza.

A tervezett rendszer cső anyaga acél. Lágyított víz fog keringeni a rendszerben. Minimum és maximum közeghőmérséklet: 10÷90 °C.

A 4. ábra szemlélteti a tervezett rendszert. A tesztek során cél több hőforrással történő töltés illetve több fogyasztóval történő kisütés vizsgálata. A hőtároló konténerben elhelyezett fázisváltó

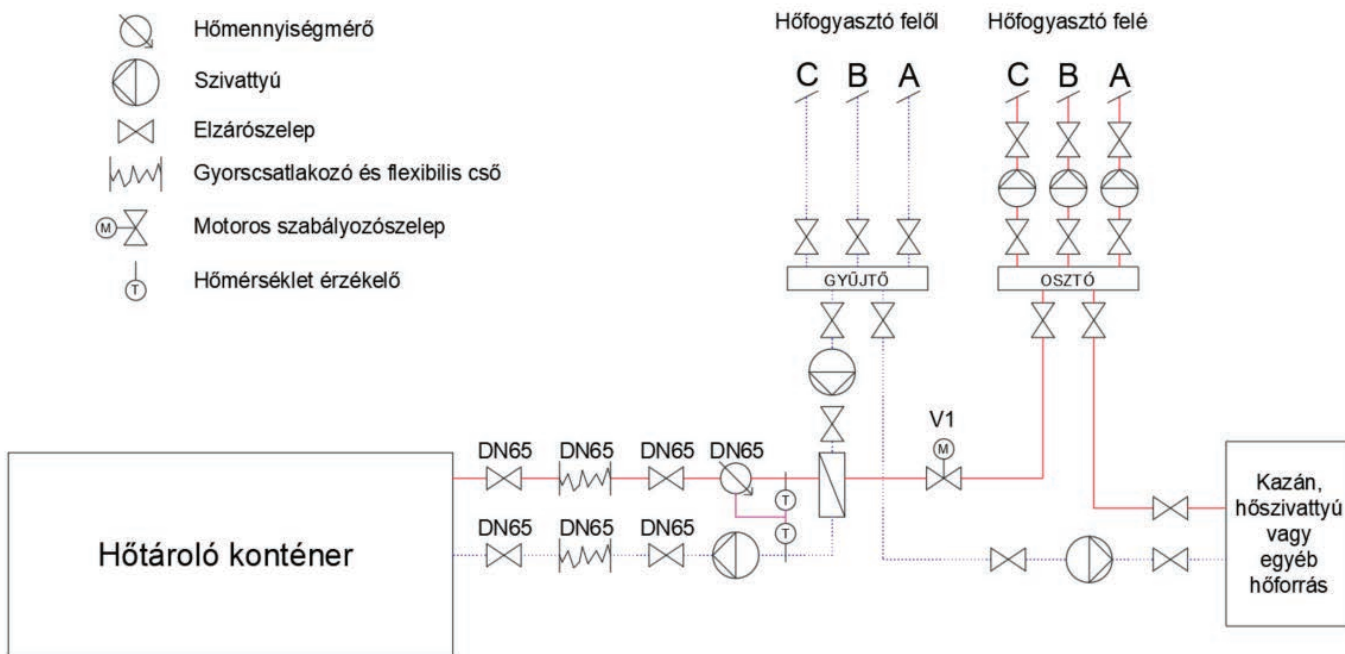
1. táblázat. Csatlakozáshoz szükséges főbb szerelvények listája

| Tétel | Darab |
|---|-------|
| Motoros szabályozó szelep (vagy hasonló): Siemens VVF22.65-63 Együtű karimás szabályozószelep. PN6. Szelepszár elmozdulás:20mm, DN65, kvs:63m ³ /h | 1 |
| Szelepmozgató motor (vagy hasonló): Siemens SAX61.03 Elektromotoros szelepmozgató AC/ DC 24 V, 0...10 V, 30 s | 1 |
| Szivattyú (vagy hasonló): Grundfos CM 10-1 A-R-A-E-AQQE F-A-A-N | 1 |
| elzáró szelep (szivattyú 2 oldalára) | 2 |
| 6/4" elzáró szelep (tárolók minden csonkjához) | 4 |
| csövek, könyökök, T-idomok, szűkítők, bővítők, egyéb | |

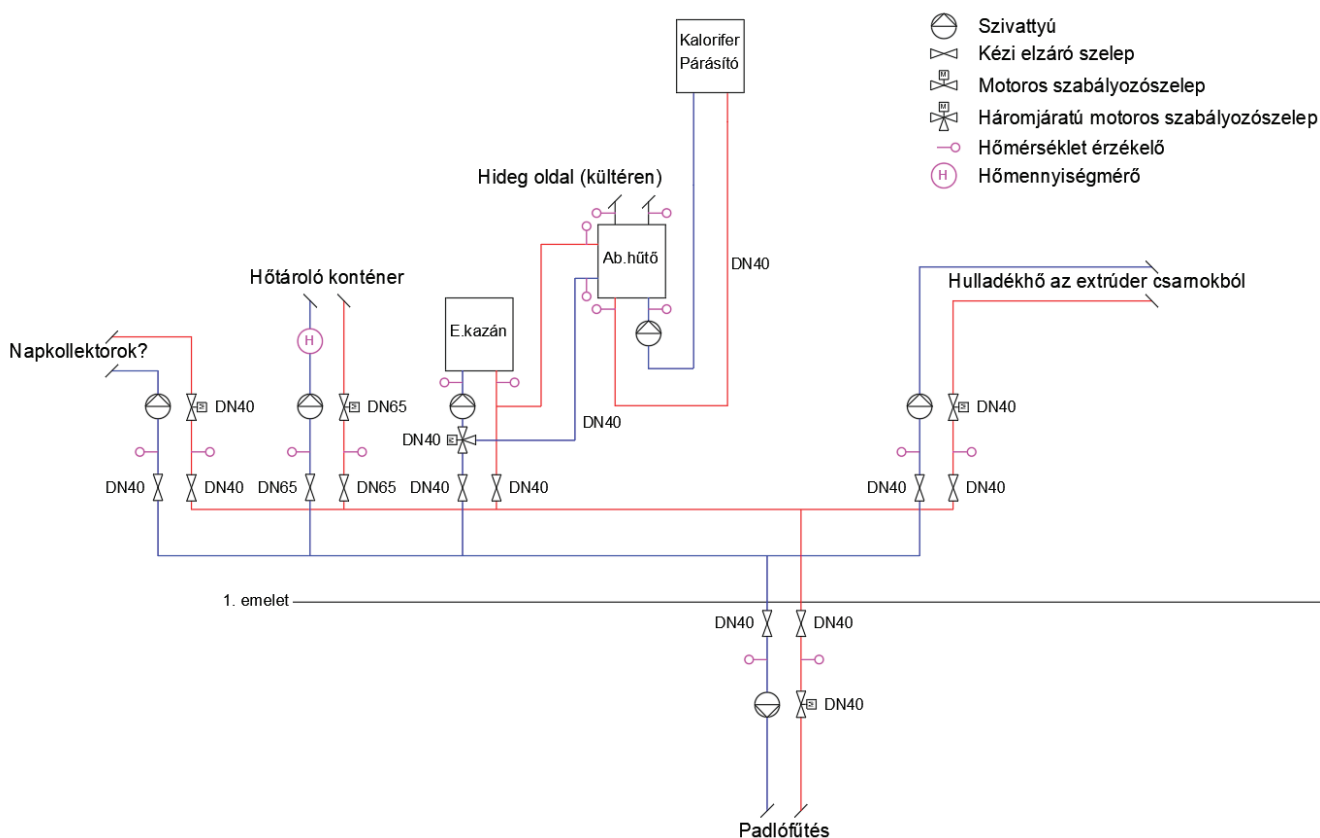
anyag olvadáspontja a hőforrásoktól, illetve az igényoldali hőmérséklettől függ.

Hőtermelők, melyek segítségével a hőtároló konténer feltölthető:

- Hőszivattyú, fűtési üzemben kb 40/30 °C
- Hulladékhő az extruder csarnokból
- Elektromos kazán
- Napkollektor



3. ábra. Hidraulikai körök leválasztása



4. ábra. Thermofoam Kft. telephelyén megvalósítani tervezett rendszer

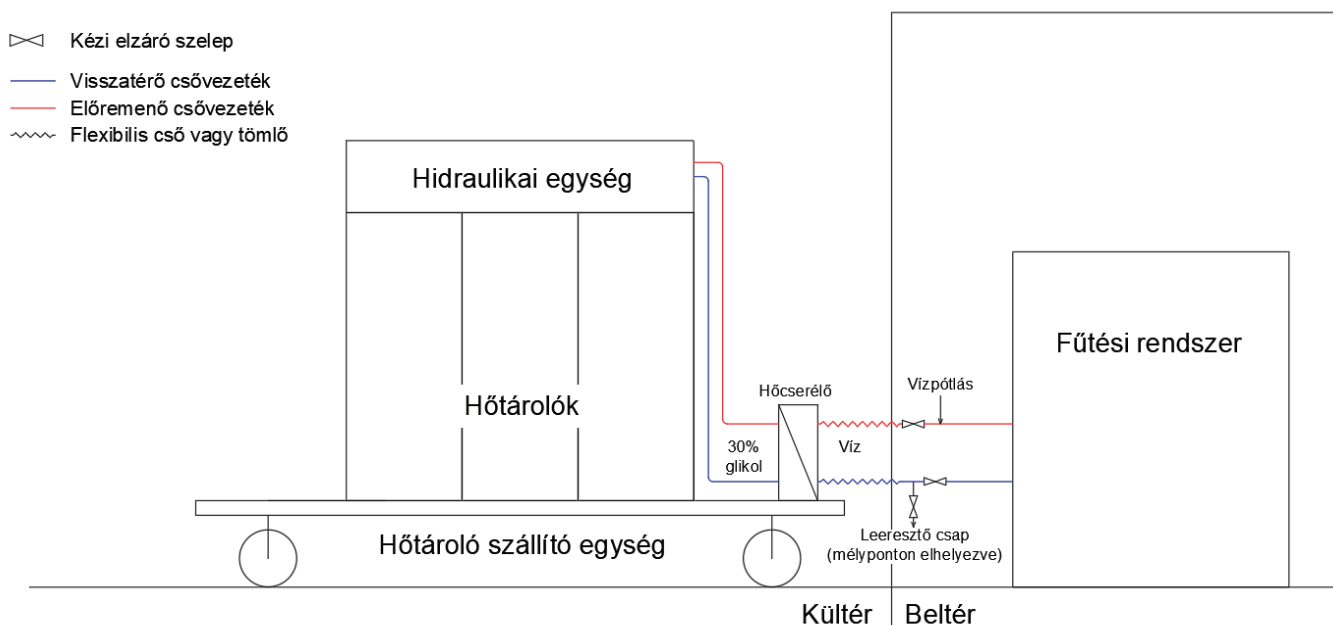
Fogyasztó, ami kisüti a konténeret:

- Felületfűtés
- Abszorpciós hűtő megoldása

Minden hőtermelő és fogyasztó után található egy szivattyú, amely az áramlást biztosítja, hőmérsékletérzékelők, melyek a szabályozásban játszanak szerepet, motoros szabályozószelepek, szintén a szabályozhatósághoz, illetve elzáró szerelvények minden előre-

menő és visszatérő ágon. Hőmennyiségmérő a hőtároló konténer csatlakozásánál kerül beépítésre.

A szabályozás során az egyes hőtermelők hálózatba kapcsolását egy relé segítségével az adott szivattyú indításával és a motoros szabályozószelep nyitásával lehet megoldani. Az eredmények kiértékelése hőmérséklet- és hőmennyiség mérés alapján fog történni.



5. ábra. Hidraulikai egység a hőtároló egységgel együtt kialakítva

Hidraulikai egység a szállítható egységen elhelyezve

Lehetőség van arra is, hogy a csatlakozáshoz (a hő fogadásához és leadásához) szükséges hidraulikai egység a hőtárolókkal együtt, egy komplett hőtároló szállító egységben legyen elhelyezve. A kialakítás előnye, hogy könnyen lehet változtatni a feltöltési vagy a kisütési rendszert.

Az 5. ábra szemlélteti azt az esetet, amikor a feltöltéshez és a kisütéshez szükséges hidraulikai egység a hőakkumulátoron van elhelyezve és vele együtt a szállítható egység részét képezi. Az ábrán a hőakkumulátor kisütése valósul meg, a hőszállító egység feltöltése hasonlóan valósul meg.

A fűtési rendszerből kilépő előremenő és visszatérő ágán egy-egy kézi elzárószerelvény kerül elhelyezésre még az épületen belül, kültéren csak a flexibilis cső vagy tömlő található. Az előremenő ágon a fűtési rendszer és az elzárószerelvény között található egy csonk, ahol a flexibilis csövet és a hőcserélőt fel lehet tölteni vízzel. A visszatérő ágon a flexibilis cső és az elzárószerelvény között (a rendszer legmélyebb pontján) található egy leeresztő csap, a hőtároló lecsatlakoztatása után ennek a segítségével lehet leeresztetni a vizet a flexibilis csövekből és a hőcserélőből. A szállítható hidraulikai egység egy hőcserélőben végződik, amely összekapcsolja a hőtárolót és a fűtési rendszert, így a helyszínen nem kell feltölteni a szállítható rendszert folyadékkal, illetve nem jelenhet problémát az esetlegesen eltérő összetételű vagy minőségű hőközvetítő közeg a fűtési rendszer oldalán. Az ábrán látható esetben a hőcserélő tiszta víz, illetve 30% glikolos vízzel töltött rendszereket köti össze hőtechnikailag.

Csatlakozás lépései:

- Villamos csatlakozás: a hidraulikai egység csatlakoztatása a fűtési rendszer hőmérsékletérzékelőjéhez,
- Flexibilis cső csatlakoztatása és feltöltése vízzel az előremenő vezetéken keresztül,
- Elzáró szerelvények megnyitása a fűtési rendszer felé,
- Hőtároló kisütésének indítása a szabályozórendszer segítségével.

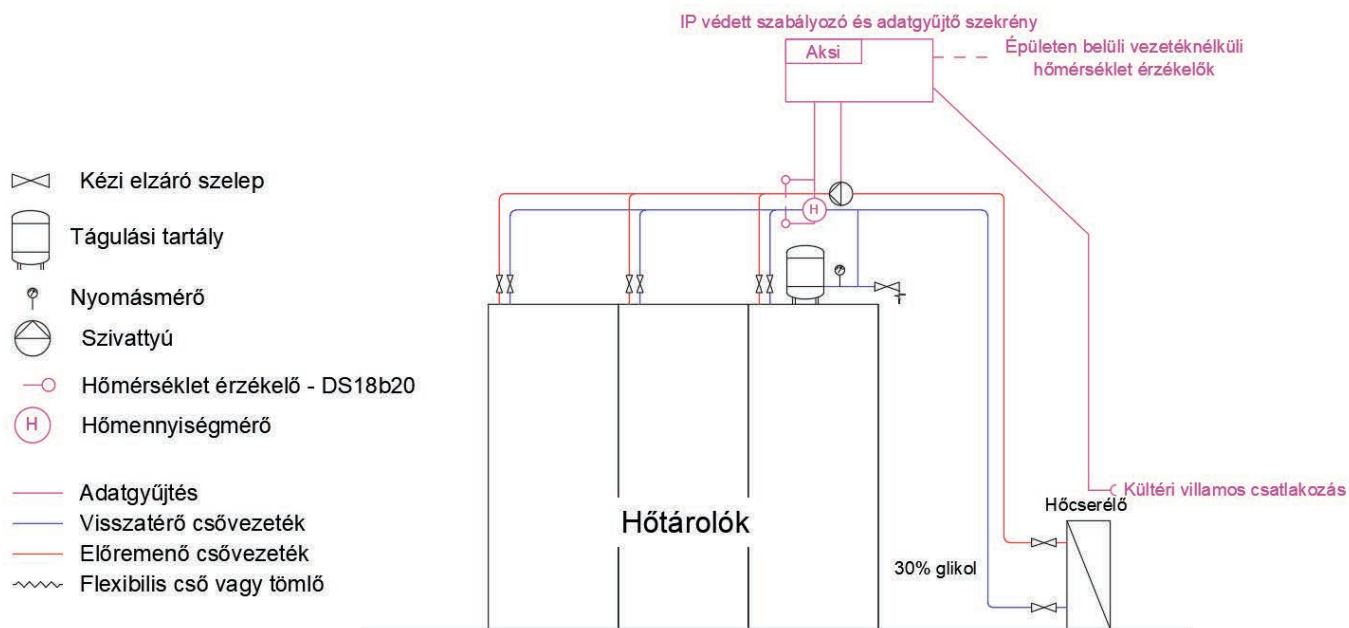
Lecsatlakozás lépései:

- Hőtároló kisütésének leállítása a szabályozórendszer segítségével,
- Elzáró szerelvények zárása a fűtési rendszer felé,
- Víz leeresztése a flexibilis csövekből és hőcserélőből a visszatérő csővezetéken elhelyezett leeresztő csapon keresztül,
- Flexibilis csövek és villamos kapcsolat lecsatlakoztatása.

A 6. ábra mutatja magát a hidraulikai egységet. A hőtároló egység több hőtárolóból álló moduláris rendszer, melyek csővezetéken keresztül párhuzamosan vannak összekapcsolva. Mindegyik modul előtt található egy-egy elzáró szerelvény, így a modulok száma könnyen változtatható. Az előremenő csővezetéken található egy szivattyú, amely a glikolos vizet keringeti. A fagyálló víz indokolt, mivel a hőakkumulátor kültéren van elhelyezve, illetve kültéren valósul meg a szállítás. A visszatérő csővezetéken a hőtároló modulok és az elzáró szelep között helyezkedik el egy nyomásmérő egy táglas tartály. A hőtároló modulok után az előremenő és visszatérő ágon is található egy-egy hőmérsékletérzékelő, melyek a hőmennyiségmérővel vannak összekötve. A szabályozórendszer részét képezi egy villamos akkumulátor, melynek két szerepe van. Egyrészt szállítás közben is gyűjt adatokat a szabályozórendszer, másrészt gyorsítja az elektronikai csatlakozást, nem kell megvárni csatlakoztatás után az adatgyűjtő elindulását, így azt az időt meg lehet spórolni.

A kisütés és feltöltés szabályozása

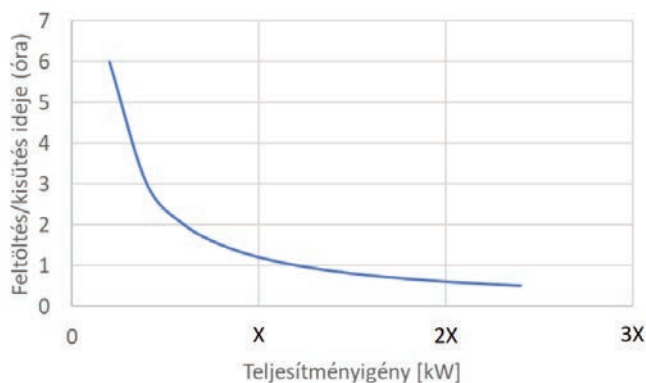
A szabályozáshoz a rendszer a HeatVentors Kft. PLC szabályozórendszerét használja. Egy szabályozórendszer tartozik az összes hőtároló modulhoz. A szabályozás alapja a hőmérsékletmérés, a gazdasági elszámolás alapja pedig a hőmennyiségmérés. Figyelembe kell venni a fogyasztó, illetve a hőforrás hőmérsékleteit, erre legjobb lehetőség a térfogatáram szabályozás hőtároló oldalon, a szivattyú és a szelepek szabályozásával. A szabályozórendszer információt kap a helyi hőmérsékletérzékelőktől is, melyekhez vezeték nélkül tud csatlakozni. A rendszer rendelkezik belső memóriával



6. ábra. Hidraulikai egység kirészletezve

is, mely minden adatot automatikus elemet, illetve a mért adatokat a felhőbe is továbbítja.

A kisütés és a feltöltés ideje a hőforrás, illetve a fogyasztó teljesítményétől függ, melyet szintén térfogatáram szabályozással lehet állítani a szivattyú és a szelepek segítségével.



7. ábra. Feltöltés illetve kisütés ideje

A 7. ábra szemlélteti a feltöltés, illetve a kisütés idejét. Minél nagyobb a teljesítmény, annál rövidebb a feltöltéshez illetve a kisütéshez szükséges idő.

Összefoglalás

A hőenergia szállítása során a szállított egység megtervezésén kívül fontos a hőátadó- és fogadó állomások tervezése is, hogy minél gyorsabban és egyszerűbben lehessen megvalósítani a hőtároló feltöltését és kisütését. Megvizsgálásra kerültek a tervezés során legfontosabb szempontok, illetve bemutatásra került az állomások gépészeti és villamos oldali felépítése. Két kivitelben is meg lehet valósítani a feltöltést és a kisütést: az ehhez szükséges hidraulikai blokk elhelyezésre kerülhet a hőforrás, illetve a fogyasztó oldalán, illetve magán a szállítható egységen is elhelyezhető. A szabályozás

legfontosabb eleme a hőmennyiségmérő, hogy a betöltött és kisütött hőmennyiségekkel el lehessen számolni.

Köszönetnyilvánítás

A munka az Innovációs és Technológiai Minisztérium 2021-2.1.2.-HŐ-2021-0004 azonosító számú „Hulladék hő tárolására és szállítására alkalmas hőtároló egység kifejlesztése” című pályázat keretében elnyert finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

1. Árokszálási Kálmán. Hőtárolás a jövő technológiája. Roxa Kft. Érd. 2001.
2. Dr. Andrassy Zoltán: PhD disszertáció: Fázisváltó anyaggal töltött hőtároló modellezése, optimalizálása és épületgépészeti rendszerekbe illesztése. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar. 2021.
3. Szánthó Zoltán, Andrassy Zoltán: Fázisváltó anyagok épületgépészeti alkalmazásának szempontjai. Magyar Épületgépészet. 2021;70, 2021/4:3-7.
4. Andrassy Zoltán, Szánthó Zoltán. Thermal behaviour of materials in interrupted phase change. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2019;138:3915-3924. DOI: 10.1007/s10973-019-08541-w
5. Andrassy Zoltán, Szánthó Zoltán. Hőtárolók alkalmazása hűtési rendszerekben. Magyar Épületgépészet. 2020;69, 2020/10:3-7.
6. Andrassy Zoltán, Szánthó Zoltán. Energy storage potential of phase change materials. International Review of Applied Sciences and Engineering. 2020;11:24-28.
7. Andrassy Zoltán, Szánthó Zoltán. Use cases of phase change material-based thermal energy storages. International Review of Applied Sciences and Engineering. 2019;10:67-71.
8. Andrassy Zoltán. Táv hőrendszerek hatékonyságnövelése fázisváltó anyagokkal. Matászsz hírlevél: Fókuszban a távhő. 2018;2018/02:20-21.

Hőhasznosítási esettanulmányok mobil hőkonténeres hulladékhő-szállításhoz és felhasználáshoz

Pap Tímea¹, energetikai mérnök, MSc

Erzsiák Bence^{1,3}, energetikai mérnök, MSc

Vallus Gábor², okleveles környezetmérnök, IMSYS Kft., Környezetvédelmi Üzletágvezető

Prof. Dr. Imre Attila^{1,4}, tanszékvezető egyetemi tanár, BME GPK Energetikai Gépek és Rendszerek tanszék

¹ BME GPK Energetikai Gépek és Rendszerek tanszék

² IMSYS Kft.

³ EnergyHub Energetikai Tanácsadó Kft, Senior energetikai szakértő

⁴ HUN-REN Energetikai Kutatóközpont

A mobil hőtárolás koncepciója a hő előállítás helytől különböző helyű felhasználására épül. Mobil hőtárolók használata egy eddig ritkán használt, de perspektivikus út lehet – a helyben megtermelt, illetve a központilag előállított és csővezetéken a felhasználóhoz juttatott módszerek mellett – egy vagy több felhasználó hőigényeinek kielégítésére. Emellett ezeknek a berendezéseknek az alkalmazása megengedi diverz, korábban nem felhasznált hőforrások bevonását is a hőellátásba; például lehetőség lenne egyes ipari folyamatok maradványhőjét vagy hulladékhőjét összegyűjteni és ezzel kielégíteni a lakossági hőigények egy részét. A cikkben a mobil hőtárolás alapjai mellett bemutatunk három hazai esettanulmányt, amelyekben a mobil hőtárolók használata megfontolandó lehet.

*

The concept of mobile heat storage is based on the use of heat in different locations than where it is generated. The use of mobile heat storage can be a novel but prospective way to satisfy the heat demand of one or more users, in addition to locally generated heat or centralized heating networks. In addition, the use of such equipment could allow the integration of diverse heat sources not previously used, such as the possibility of collecting residual heat or waste heat from certain industrial processes to meet part of the heat demand of the population. In addition to the basics of mobile heat storage, this article presents three domestic case studies where the use of mobile heat storage is the most appropriate option to consider.

Világszerte rengeteg olyan, már létező hőforrással találkozunk, amit bizonyos okok miatt nem hasznosítanak. Ennek több oka is lehet, de a legtöbb esetben ez a hőforrás hőmérsékletével, hozamával vagy állandóságával kapcsolatos, illetve gyakran előfordul, hogy bár lenne igény a hő hasznosítására, de a hasznosítás és a hőkibocsátás helye közt nehezen lenne megteremthető az összeköttetés (pl. távolság, geopolitikai okok).

A hőforrások egy része természetes (pl. geotermikus hő, naphő), más részük pedig úgynevezett maradványhő. Az utóbbi legismertebb formája az ipari hulladékhő, amikor egy ipari folyamat végére „melléktermékként” megmarad valamikor, még kellően magas hőmérsékletű hőmennyiség, amit akár hasznosítani is lehetne, de gyakran az adott ipartelepen nem lépnek fel ilyen igények. Fontos, hogy akár természetes, akár mesterséges eredetű a hő, gyakorlati-

lag karbonmentesnek lenne tekinthető, hisz még az ipari hulladékhő esetében is a karbonlábnyom a folyamatban előállított termékhez kötődik. Így az ilyen jellegű hőforrások hasznosításának fokozása segítené a fenntarthatósági célok elérését, nemcsak a CO₂ kibocsátás csökkentésével, hanem a környezet lokális hőterhelésének a csökkentésével, illetve ipari maradványhő esetén az energiahatékonyság növelésével is.

A kutatás célja olyan hőellátó rendszer sémák felderítése volt, amelyek Magyarországon képesek a fűtési célú földgáz felhasználás kiváltására, ezen keresztül pedig mind a tüzelőanyag függőség, mind a károsanyag kibocsátás csökkentésére. A vizsgált rendszer az ipari hulladékhő kibocsátást kapcsolja össze a lakossági hőigényekkel. Hiszen azzal párhuzamosan, hogy a lakossági jelentős földgáz felhasználó – ami elsősorban a fűtési és háztartási melegvíz (HMV) igényekben mutatkozik meg –, az ipar nagymértékű hulladékhőt enged ki a természetbe. Tehát, miközben a lakossági hőigények nagy része földgázból van fedezve, ami környezeti szempontból káros és kínálati oldala bizonytalanságokat rejt, a hazai ipari szereplők jelentős mennyiségű hulladékhőt bocsátanak ki a környezetbe, ami környezeti szempontból szintén negatív hatású és energiahatékonysági szempontból is előnytelen. A lakossági hőigények és az iparban keletkező hulladékhő összekapcsolása így több szempontból is optimális megoldás lehet.

A lakossági hőigények és az iparban keletkező hulladékhő közti kapcsolat megteremtése azonban problémát okozhat, a hőforrásokat és a hőigényeket időben és térben kellene egyeztetni, ám az erre szolgáló hőtárolás és szállítás számos kihívást rejt. A mobil hőtárolók alkalmazása egy jó alternatívája lehet a hő csővezetékben való szállításának [1]. A tárolhatóság és szállíthatóság egyes problémáira jelenthet megoldást az ún. fázisváltó anyagok (Phase Changing Materials, PCM) használata, amelyek a vizes tárolóknál jóval nagyobb energiasűrűségen tudnak hőt tárolni a számunkra releváns hőmérséklet-tartományokban.

Mindezek ismeretében, a cél annak a vizsgálatának volt, hogy a hazai lakosság hőigénye milyen módon szolgálható ki az ipari szereplőknél keletkező hulladékhő hasznosításával, mégpedig fázisváltó anyaggal megvalósított hőtárolás segítségével. A bemutatott megoldásokban akár kisebb kapacitású, nem állandó hőkibocsátású hőforrásokat is be lehet vonni a lokális, de akár kellően szétszórt hőigények ellátásába. Ehhez röviden bemutatunk három egyszerűsített esettanulmányt is.

A hőforrások jellemzése és hasznosítási lehetőségei

Hőigényeink egy része kielégíthető lenne már eleve létező hőforrások hasznosításával. Ilyen hőforrások lehetnek a naphő, a földhő különböző változatai (sekély, mély, geotermális, petrotermális, szárazkutas), vagy a különböző folyamatok végén megmaradó maradványhő, pl. az ipari hulladékhő. Míg a naphő vagy földhő csak akkor áll rendelkezésünkre, ha valamit teszünk is ezért, a maradványhő akkor is ott van, ha nem akarjuk, így kellene vele valamit kezdeni. Ha nem kezdünk vele semmit, akkor elvesz, ami manapság, amikor a fenntartható energetika egyre fontosabb, nehezen indokolható. Emellett bizonyos esetekben – pl. vízűtésű erőművek esetén – akár környezeti ártalmak is lehetnek.

A rendelkezésünkre álló hőnek többféle jellemzője van, ezek közül – a rendelkezésre állási idő mellett – talán a legfontosabbak a hőforrásban levő hő mennyisége (energia jellegű, pl. MWh), a kinyerhető vagy önmagától kilépő hőáram (teljesítmény jellegű, kW vagy MW), illetve a hő „minősége”, azaz hőmérséklete (Celsius vagy Kelvin). Míg a hőáram és a hőmérséklet minden esetben fontos, egyes esetekben a rendelkezésre álló össz-hőmennyiség nehezen értelmezhető (pl. egy folyamatosan termelő ipari létesítménynél), más esetekben (pl. egy véges termálvíz-készlettel rendelkező geotermális mezőnél) azonban fontos.

A hőforrásból kivehető hőátadó közeg hőmérséklete megszabja, hogy az adott hőforrást mire alkalmazhatjuk. A minket érdeklő hőmérséklet-tartományban az ún. Lindal-diagram [2,3,4] mutatja be, milyen hőmérsékletű hőforrás hőjét milyen célra érdemes használni. Egy egyszerűsített Lindal diagram az 1. táblázatban látható.

A hőáram hasonlóképp fontos a felhasználhatóságnál. Hiába van egy 200 °C-os hőforrásom, ha kicsi a hőáram és csak pár kW a kinyerhető hőteljesítmény, így nem érdemes papírgyártást építeni mellé, bár a hőmérséklet ezt lehetővé tenné.

Amennyiben egy hőforrás hőjét fel akarjuk használni, a leghatékonyabb, ha ezt hő formájában tesszük; a hő hővé való „konverziójának” nincs vesztesége. A fenti ábrán/táblázatban ez a „Közvetlen fűtési célú hőhasznosítás”, „Hőszivattyús fűtés” és „Egyéb felhasználás” oszlopokban/sorokban látható. Viszont a hőigények gyakran nem a források közelében jelentkeznek és a hő a villamos energiánál nehezebben, drágábban és nagyobb veszteséggel szállítható, így amennyiben van rá lehetőség, megfontolandó a rendelkezésreálló hő villamos energiává alakítása is; ezt jelzi az első két oszlopban a gőz alapú, illetve a bináris rendszerű villamosenergia-termelés. Az előzőnél magas hőmérsékletű, nagy nyomású vízgőz segítségével termelik az áramot (geotermális kutaknál ez a gőz már rendelkezésre állhat, sok más esetben a hőforrás segítségével kell előállítani), míg az utóbbinál a hőforrás segítségével egy nagy nyomású szerves gőzt (ORC) vagy ammónia-vízgőz keveréket (Kalina) állítanak elő, aminek nyomása már jóval 100 °C alatt is megfelelő lehet egy expanziós berendezésen keresztül egy generátor meghajtásához. Mindkét (gőzös és bináris) módszernél a hőnek csak egy töredékét tudják villamos energiává alakítani, így továbbra is igaz, hogy a hőt leginkább fűtési célokra jó alkalmazni – amennyiben erre van igény [5,6].

A jelen tanulmány az ipari folyamatokban megmaradt hulladék- vagy maradványhőre fókuszál. Sajnos csak szórványos adatok léteznek a hazai potenciális lehetőségekről (ld. például az csak maroknyi hazai cég adatát tartalmazó sEEnergies Open Data adatbázist [7]) és néha ezek is ellentmondásosak. A környékbeli országok közül Lengyelországban 2021-ben a hulladékhő (azaz az a hő, amit

1. táblázat. Egyszerűsített Lindal diagram táblázatos változata, a különböző hőmérsékletű hőforrások felhasználhatóságáról ([2,3,4] alapján)

| Energetikai felhasználás | | Hőmérséklet (°C) | Egyéb felhasználás |
|-------------------------------------|--|------------------|--|
| Gőz alapú villamosenergia-termelés | Bináris rendszerű (ORC, Kalina) villamosenergia-termelés | 200 | |
| | | 190 | Papírgyártás |
| | | 180 | Tömény oldatok bepárlása |
| | | 170 | Nehézzvíz előállítása |
| | | 160 | Fa szárítás |
| | | 150 | Bayer eljárás (alumínium-gyártás) |
| | | 140 | Mezőgazdasági termékek szárítása |
| | | 130 | Cukorfinomítás, sókinyerés bepárlással |
| | | 120 | Ivóvíz előállítás desztillációval |
| | | 110 | Könnyűszerkezetű betonelemek szárítása |
| | | 100 | Zöldszárazítás, gyapjúmosás és szárítás |
| | | 90 | Intenzív fagymentesítés, épületek fűtése |
| | | 80 | Üvegházak fűtése |
| | | 70 | Háztartási melegvíz előállítása, élelmiszer-ipari felhasználások |
| | | 60 | Állattenyésztés |
| Közvetlen fűtési célú hőhasznosítás | Hőszivattyús fűtés | 50 | Gombatermesztés, biomassza kezelés |
| | | 40 | Padlófűtés, medencefűtés |
| | | 30 | Balneológia, jégmentesítés |
| | | 20 | haltenyésztés |
| | | 10 | |
| 0 | | | |

már biztos nem használnak fel) mennyisége 60 TWh körüli volt; összehasonlításként egy évvel korábban a lengyelországi, távfűtéssel foglalkozó cégek hőkibocsátása a fogyasztók felé 110 TWh volt [1]. Ezen adatok szerint a távfűtés több, mint fele fedezhető lett volna a hulladékhő-felhasználásból, ezzel jelentősen csökkentve a fűtési célú primerenergia-felhasználást és a hozzá kapcsolódó esetleges környezeti hatásokat (pl. CO₂-kibocsátás).

Egy másik felmérés szerint az USA-ban felhasznált energiamennyiség harmadát az ipar használja fel [8] és ennek a harmadnak a harmada (azaz a teljes belföldi energiafogyasztás tizede) veszteségként távozik, általában a környező levegőbe [9]. Természetesen ennek a hőnek egy része túl alacsony hőmérsékletű a további hasznosításhoz, de a villamosenergia-termeléshez egyszerűen (akár hagyományos gőz-ciklussal) felhasználható 230 Celsius-fok feletti hőmérsékletű részből akár 7,6 GW (!) villamos energia is előállítható lenne [10]; természetesen csak ha megfelelően be lehetne gyűjteni ezt a hőt.

Léteznek becslések a világszintű hulladékhő-potenciálra is, viszont az ezekben szereplő számokat – a sok közelítés miatt – fenntartással kell kezelni. Forman és társai 2016-ban [11] 246 EJ –ra (68 PWh) becsülték a 2012-es hulladékhő-mennyiséget (E mint exa, 10¹⁸, míg P mint peta, 10¹⁵). Még a fenntartások mellett is vi-

lágosan kell látnunk, hogy ezek a számok szinte elképzelhetetlenül nagyok lehetnek, így már egy kis mértékű hasznosítással is sokat lehetne nyerni.

Ezekből az adatokból jól látszik, hogy már a hulladékhő egy részének felhasználása – ami tárolással, főképp mobil tárolással időben és térben is jobban felhasználható lenne – több szempontból is hasznos a társadalomnak és a gazdaságnak.

Hőtárolás

A hőtárolás története több ezer évre nyúlik vissza. A tábortűz köré rakott kövek a tűz kialvása után is melegnek langyosak maradtak és amíg ki nem hűltek, melegedni lehetett mellettük; a hőtárolásnak ez a fajtája az ún. szenzibilis (érzékelhető) hőtárolás. Ilyenkor a hő felvétele és leadása hőmérséklet-változással jár; a tárolt hő mennyisége a tárolóanyag mennyiségétől, fajhőjétől és hőmérsékletétől függ. Jellemzően nagy sűrűségű és tömegű (pl. kő, homok) vagy nagy fajhőjű (pl. víz) anyag a tárolóközeg. A módszer egyik hátránya a „kisütés” közbeni folyamatos hőmérséklet-csökkenés, ami megnehezíti az alkalmazást (ld. a Lindal-diagrammot); a másik gond az elérhető hőmérséklet-tartományban viszonylag alacsony (tömegegységre vagy térfogategységre arányosított) eltárolható hőmennyiség; előnye az egyszerűség.

Mindkét hátrány esetében megoldás lehet a másik két módszer, a fázisváltásos és a kémiai tárolás. Ezekben reverzibilis, nagy mennyiségű hő elnyelésére, illetve kibocsátására képes folyamatokat (fázisváltás, mint pl. olvadás, megszilárdulás, illetve kémiai folyamatok) hasznosítunk. Az ilyenkor elnyelt/kibocsátott hőmennyiség nagyon magas lehet (ld. pl. a fázisváltások látens hőjét), viszont a módszer hátránya, hogy csak bizonyos, az alkalmazott anyagokra jellemző hőmérsékleten lehet őket használni. Gyakori fázisváltásos hőtároló megoldás (ebben az esetben hidegtárolásról beszélünk, mert a környezetet hűteni akarjuk) a víz-jég rendszer. A fagyás/olvadás látens hője 334 kJ/kg; összehasonlításképpen ennyi hővel 1 kg 0 °C vizet majdnem 80 °C hőmérsékletűre lehetne felmelegíteni [12].

A fagyás/olvadási hőmérséklete (nulla fok) miatt a víz/jég rendszer nem alkalmas fűtési célú felhasználásra (bár hűtésre gyakran használták-használják, pl. sokáig a Parlament épületének a hűtése is jég alapú volt). Szerencsére számtalan olyan anyag található, amelynek a fázisváltási hőmérséklete a hagyományos fűtési rendszerek előremenő hőmérsékletéhez (60-70 °C) vagy a kontakt, illetve légfűtési rendszerek hőmérsékletéhez (30-50 °C) közel helyezkedik el, talán a legismertebbek a paraffinok. A hőtároló anyagok kiválasztásánál a szükséges hőmérséklet mellett más szempontok is figyelembe veendőek, mint pl. az ár, a tűz- és robbanásveszélyesség, az esetleges egészség- vagy környezetkárosító hatás, a kémiai stabilitás, stb.

Amennyiben telepített hőtárolóra van szükség, akkor jellemzően a rendelkezésre álló hely határozza meg, hogy mekkora lehet a hőtároló maximális mérete; amennyiben pedig mobil hőtárolót alkalmazunk, akkor a térfogat mellett a tömeg is fontos, azaz lehetőleg nagy sűrűségű (kis helyigényű), nagy hőkapacitású (sok hő tárolására képes) anyagokat válasszunk. A helyigény miatt nem jöhet szóba a folyadék/gőz fázisátalakulás ilyen célú hasznosítása (a gőz térfogatigénye nagy), míg a viszonylag kis látens hő miatt nem nagyon lehet szilárd-szilárd fázisátalakulás (átkristályosodó) rendszereket használni, így a hőtároló rendszerek a szilárd-folyadék (feltöltés) és folyadék-szilárd (kisütés) fázisátmeneteket hasznosítják.

Mobil hőtároló megoldások

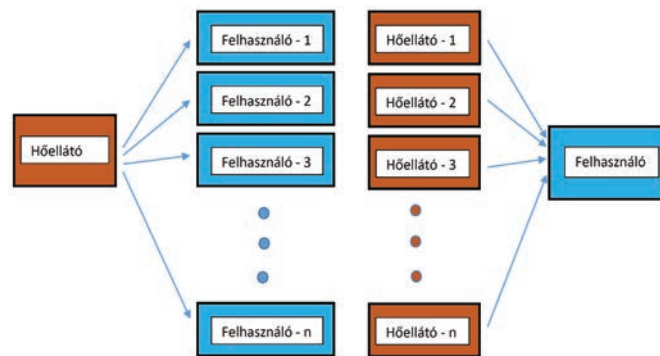
A mobil hőtárolás nem új ötlet; már generációkkal ezelőtt használtak például melegvizet palackot, amivel az ágyat fel lehetett melegíteni, de mobil hőtárolókról beszélhetünk a tárolt hővel működő járműveknél is, mint például az időnként még ma is használt tűzmentes mozdonyok [13]. Ilyeneket hazánkban is használtak [14], ilyen volt a Chinoin „Ödönke” névre hallgató, máig jó állapotban kiállított mozdonya.

Jelenleg a hőigényeket vagy helyben megtermelt hővel, vagy egy központi ellátóból, csővezetékén keresztül (általában víz hordozóközeget használva) biztosítják. A mobil hőtároló megoldást ez utóbbival érdemes összehasonlítani. Olyan esetekben lehet előnyös, ahol nem éri meg csővezetékét építeni, mert kicsi a hő/anyagáram (mivel kicsi a hőigény vagy a rendelkezésre álló hő) vagy nem állandó az igény, illetve olyan esetekben is, ahol csővezeték lefektetésére nincs lehetőség, vagy technológiailag nehezen/drágán lenne csak kivitelezhető.

A mobil tárolók előnyei a csővezetékes megoldáshoz képest a következők:

- Felhasználóként/termelőként rugalmasság, azaz nem vagyok kötve egy vevőhöz/eladóhoz, ha megszűnik az igény/kínálat, hiszen vehetek máshonnan, adhatok el máshova, nem leszek a csővezeték nyomvonalához kötve vagy nem kell új csővezeték lefektetnem.
- Felhasználóként, ha túl nagy az igényem és azt egy szolgáltató nem tudja ellátni, vehetek több helyről is.
- Termelőként, ha túl sok a hőm és egy fogyasztó nem tudja azt hasznosítani, eladhatom akár több helyre is.

A következő ábrán (1. ábra) az egy nagykapacitású termelő – több kis igényű felhasználó, illetve a több kiskapacitású termelő, egy nagy igényű felhasználó esetek láthatók.



1. ábra. Az egy ellátó – több felhasználó és több ellátó – egy felhasználó esetek sematikus blokkdiagramja

Egy vagy több lakóépület hőellátásának sematikus diagramja látható az 2. ábrán. Első lépésben az iparban keletkező hulladékhő (vagy más, rendelkezésre álló hő, pl. geotermális vagy petrotermális hő) át kell vezetni egy hőcserélőn, melyen keresztül a fázisváltó munkaközeg felveszi annak hőmennyiségét. Ezt követően a fázisváltó anyagot betároló teherszállítók elszállítják azt a fogyasztói hőközpontokhoz. Itt újabb hőcserélőn keresztül a PCM átadja a tárolt hőmennyiségét a lakossági fűtést ellátó körnek.

Hőforrások esetében ipari szereplők, elsősorban gyárak és az általuk kibocsátott hulladékhő jöhet szóba, ilyenek lehetnek például a világszerte fellelhető, energia-intenzív acél- és a cementgyárak. Hőigények tekintetében kiemelt szerepet kaphatnak a



2. ábra. A mobil tárolós hőellátás felépítése

jelenleg távhővel ellátott épületek, tömbházak, panel épületek. A távhő ellátás ugyanis egy centralizált fogyasztói oldalt jelent, ami előnyös, mivel a fogyasztói távhőközpontok átalakíthatóak a mobil hőtárolók fogadására és kitérítésére, valamint az egyes fogyasztói hőközpontokon keresztül egyszerre jelentős mennyiségű hőigény elégíthető ki.

A hőforrás és a hőigények közt a hőtárolás és szállítás teremti meg a kapcsolatot. Mivel lakossági hőellátásról van szó, mindenképpen egy kiegyenlített hőleadás megvalósítása a cél. Emellett a hő szállítása során jelentős hőveszteségek léphetnek fel, így ennek minimalizálása sem elhanyagolható. Tehát, minimális hőveszteséggel szállítható és hőcsere szempontjából jól tervezhető anyagot érdemes használnunk. E szempontoknak megfelelnek a fázisváltó anyagok, különösképp a paraffinok, melyek számos előnnyel rendelkeznek: tervezhetőek, biztonságos a használatuk, nem-korozív anyagok, valamint elérhetőek a piacon is [15]. Folyékony állapotban való közúti vagy vasúti szállításuk – a kémiai hasonlóság miatt – a folyékony üzemanyagokhoz, olajokhoz hasonló műszaki megoldásokkal valósítható meg és ezekhez hasonló lehet a szállítással kapcsolatos jogi-engedélyezési háttér is.

A korábbi, nagyobb méretű mobil alkalmazásokról egy jó összefoglaló található Demchenko és Konyk cikkében [16], az alkalmazható anyagokról pedig Du és munkatársai 2021-es cikkében [17]. A jelenlegi projektek közül megemlítenénk az egy lakóház fűtésére fókuszáló lengyel projektet (45 kWh hő, 70-80 °C közti hőmérséklet, kicsivel több, mint 8 órányi fűtési idő) [Kuta 2023] és a Surrey (BC, Kanada) város távfűtőrendszerére rásegítő tervezett mobil hőtároló rendszert, amivel 2035-re a belvárosi 130300 MWh hőenergia-szükséglet kb. 7%-át, 9100 MWh-t akarják biztosítani, egy maximum 45 km-es körzetből gyűjtött hővel [18].

Esettanulmányok

A továbbiakban három scenáriót mutatunk be. Ezeknél az eseteknél mind a hulladékhő források típusa, mind a hőforrások hőárama, mind pedig a hőfelhasználók igényei különböznek, így jól demonstrálják a technológia széleskörű felhasználhatóságát.

Kis forrás, kis igények – gázmotor köpenyhűtésének hasznosítása egy épület fűtésére

Az első esettanulmányban egy kis hőkibocsátó-hőfelhasználó párt (biogáztelep+süpermarket) vizsgáltunk (sajnos a konkrét helyszín megnevezése nem áll módunkban). Az igények illesztése mellett megvizsgáltuk a szállítás idő- és térbeli nehézségek okozta problémák megoldását [19].

Az általunk vizsgált hőkibocsátó egy GE Jenbacher J312 típusú gázmotor, melynek teljesítmény görbéje ismert. A motor az év szinte minden napján üzemel, naponta csupán 4,5 órát szünetel a termelés, többnyire 2:00 és 6:30 között. A rendelkezésre álló műszaki adatok alapján megállapítható, hogy 500 kW-os villamosteljesítmény mellett kb. 179 kW hőteljesítmény áll rendelkezésre kizárólag a motor köpenyhűtésének kiaknázásával, azzal a feltételezéssel, hogy jelenleg ez a hőmennyiség nincs hasznosítva és a telephely hőigényeinek esetleges ellátására lehetne fordítani. Napi 19 óra hőkiadást feltételezve kizárólag a fűtési idő során (veszteségeket is figyelembe véve) összesen legalább 450 000 kWh hőmennyiség válna felhasználhatóvá. A folyamatos hőellátást ugyan megnehezítheti az éjjel fennálló üzemszünet, azonban ez a probléma is kiküszöbölhető egy megfelelően méretezett mobil hőtároló segítségével. Ilyen gázmotorokat pl. kisebb városok biogáz-telepein találhatunk; ezek a telepek jellemzően a város szélén, a sűrűbben lakott részeketől pár, gyakran 2-3 km-re találhatóak. Ilyen távolságra ekkora hőteljesítmény mellett nem lenne érdemes csővezetékén továbbítani a hőt, így itt a mobil szállítás jó megoldás lehet.

A potenciális hőfelhasználó egy, a településen található szupermarket, melynek megközelítő éves fűtési energiafelhasználása 53 000 kWh-ra tehető, így látható, hogy a rendelkezésre álló többlet hőenergia bőségesen elegendő ennek ellátására.

A hőtároló kialakításának meghatározásához elengedhetetlen volt, hogy ismerjük a szállítóeszközt, valamint annak terhelhetőségét, hiszen ez befolyásolta legfőképp a szállítható mennyiséget és a konténer méreteit. A két létesítmény között ~3,2 km távolságra helyezkedik el, így megvizsgáltuk a lehetséges közúti szállítóeszközöket, melyek alkalmasak lennének a feladatra: egy hagyományos, belső égésű motorral rendelkező teherautót, egy tisztán elektromos meghajtású tehergépkocsit és egy elektromos targoncát (eltekintve attól, hogy ez utóbbinak közúti használata speciális engedélyt igényelhet).

Az összehasonlíthatóság érdekében elvégeztünk egy egyszerű számítást. Meghatároztuk, hogy az egyes járművek mennyi energiát használnak fel az oda-vissza szállítás során, valamint azt, hogy egy ilyen „kör” mekkora károsanyag-kibocsátással jár együtt és mekkora a költsége. A választásunk egy elektromos targoncára esett (nem vizsgálva ennek közúti engedélyeztetési feltételeit), mivel ilyen targonca már eleve rendelkezésre állhat a hőhasznosító szupermarketben vagy a hőkibocsátó biogáz-telepen, így a projekthez nem lesz szükség egy kis karbonlábnyomú szállítóeszköz beszerzésére. Napenergiát hasznosító rendszer megléte esetén a targonca által felhasznált villamos energia költsége és ezzel együtt

a közvetett környezetkárosító hatása is csökkenthető. Azonban azt is fontos megjegyezni, hogy ezek a kisebb eszközök korlátozott teherbírásúak, egy átlagos targonca 2-5 tonnát képes elszállítani, így ez határt szab a fázisváltó anyag megválasztásakor és a hőtároló kialakításában is.

A hőtároló illesztésekor másik fontos feladat a fázisváltó anyag megválasztása; a kiválasztásnál több független szempontot kell figyelembe venni. Ilyenek – a teljesség igénye nélkül – az ár, korrozivitás, aláhűlés képessége, olvadási és megszilárdulási hőmérséklet-tartományok, stb. Ez utóbbi a mi esetünkben, ahol egy hagyományos radiátoros fűtőrendszer igényét kell kielégíteni, kb. 60-65 °C között van. Előzetes szűrések után két anyagot vizsgáltunk (RT 70 HC és Shell Sarawax [21,22]), mindkettőnek 70 °C körül van az olvadási tartománya. Ezek részletesebb jellemzőit összevetve számításokat végeztünk a napi átlagos fűtési igények figyelembevételével és meghatároztuk a szükséges tömeget, azonban ez mind a két anyag esetén meghaladta a kiválasztott szállítóeszköz teherbírását. Ebből következik, hogy a hőfelhasználó ellátásbiztonsága érdekében legalább kettő hőtároló konténerre van szükség. Amíg az egyik tároló éppen kisütés alatt van, addig a másik feltölthető és az üzlethez szállítható, így egy megfelelően kialakított rendszer segítségével folyamatosan biztosítható az üzlet fűtési energiaellátása.

A szállítható mennyiségnek határt szab a targonca teherbírása, ami az esetünkben 4000 kg. Számításba kell venni azt is, hogy a tárolóeszközt jelentő konténer szintén nagy tömeggel rendelkezik, valamint a tárolóban elhelyezett hőcserélő ugyancsak jelentős terhet jelent. A piacon elérhető 4-5 m³-es, zárt konténerek tömege 400-500 kg, a benne levő hőcserélő kb. 1000 kg; ez utóbbi a konténer térfogatának kb. 30%-át foglalja el.

A drágább hőtároló anyag, a RT 70 HC 39%-kal több hőt képes tárolni, ellenben két és félszer több a bekerülési költsége. Összevetve a tárolható hőmennyiséget a legmagasabb napi hőigénnyel elmondható, hogy a Shell Sarawax-szal töltött tároló esetén négyszer szükséges feltölteni és kisütni a tárolót, míg az RT 70 HC esetén elegendő ezt csupán háromszor megtenni.

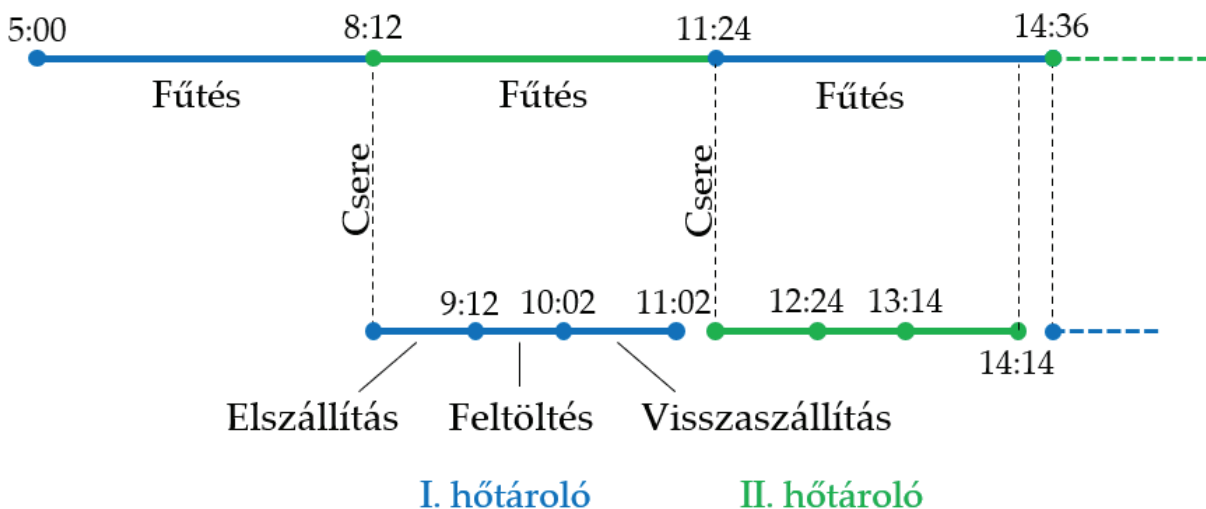
A rendelkezésre álló hőtéljesítmény, a hőtárolás során jelentkező hőveszteségek, valamint az egyes hőtárolókra jellemző értékek figyelembevételével meghatároztuk a tárolók feltöltési idejét, ami a Sarawax esetén kb. 50 perc, míg az RT 70 HC esetén kb. 70 perc. Emellett a két pont közti távolság megtételéhez, valamint a

rendszerek fel- és lecsatlakoztatásához mindösszesen 45-60 percre van szükség, ami összességében nem kevés idő, így ellenőrizni szükséges, hogy biztosítható-e a folyamatos energiaellátás. Az ellenőrzéskor a legnagyobb hőigényű napot vettük alapul, ekkor átlagosan 499 kWh hőenergia biztosítása a feladat a nap során. Az ellátandó szupermarket reggel 6:30-tól este 20:00-ig tart nyitva hétköznapokon, de a fűtés üzemideje ezt meghaladhatja, napi 15-16 órának feltételezzük. Az éjjeli órákban az üzletet csak temperálni kell, így annak a fűtési igénye igen alacsony, így ezt a jelen számítás során nem vettük figyelembe. Természetesen a hőtároló kisütésekor is jelentkezni fog veszteség, ezt 10%-nak becsültük. A Sarawax-szal töltött tároló esetén ötször, míg a másikban háromszor kell fordulni a biogáztelep és a felhasználó között, ami azt jelenti, hogy a fűtési rendszer vizének tömegáramát megfelelően beállítva az egyes tárolók kisütésének optimális időtartama (konstans hőigény mellett) rendre 3 óra 12 perc és 5 óra 18 perc. Ezen időtartamok alatt a már kisütött tárolót a helyszínről el kell szállítani, fel kell tölteni és vissza is kell juttatni az üzlethez, valamint a rendszerre rácsatlakoztatni.

A rendszerről történő lecsatlakoztatáshoz, az út megtételéhez, valamint a gáztelepen történő felcsatlakozáshoz legfeljebb 1 órára van szükség, ami így egy forduló esetén 2 órát jelent. Ehhez hozzáadva a feltöltéshez szükséges időtartamot, a Sarawax esetén összesen (töltés-szállítás-bekötés) 2 óra 50 percre, míg az RT 70 HC esetén 3 óra 8 percre van szükség. Így mindkét esetben elegendő idő jut a „csere” tároló feltöltésére és szállítására, valamint a rendszerre történő csatlakozásra, így, amennyiben a folyamatos üzemmenet (beleértve a szállítást is) biztosított, elegendő lesz két tárolót (egy töltési, egy kisütési fázisban) használni.

A 3. ábrán ez egyszerű folyamatábra látható a fenti esetre, Sarawax-szal töltött hőtárolóra.

Természetesen fennállhat olyan eset is, mikor a hőigény ennél magasabb, valamint a nap folyamán is változnak az igények, így a reggeli és esti időszakban kevesebb idő állhat rendelkezésre. Ezzel szemben ennél alacsonyabb igények is jelentkeznek, a teljes fűtési időre számított átlagos napi igény 349 kWh/nap-ra adódott. Az ilyen esetekben kevesebb kört kell megtenni egy nap, és a rendelkezésre álló idő is növekszik, így az ellátásbiztonság is nőni fog. Azonban a magasabb igények fennállása esetén érdemes az ellátásbiztonság érdekében egy tartalékberendezést fenntartani, ami



3. ábra. A Sarawax-szal töltött hőtároló használati sémája ([19] alapján)

lehet esetleg a korábban már a helyszínen üzemelő, és így további beruházást nem igénylő gázkazán. Ugyancsak megoldás lehet egy harmadik hőtároló konténer alkalmazása.

A 2. táblázatban összehasonlítjuk a hőellátás két esetét, a Shell Sarawax SX70-nel töltött- és az RT 70 HC-t tartalmazó tároló segítségével történő fűtés egész idényen át tartó megszervezését. Ehhez az éves hőfelhasználásból számított hőigényt és az egyes tárolók kapacitását vettük alapul. Ezek hányadosát képezve kiszámítható, hogy hozzávetőlegesen az év során hányszor kell megtenni a biogáztelep és a szupermarket közti távolságot a megfelelő energiaellátás érdekében, mely értékből adódik a szállítás energiaigénye és költsége is.

2. táblázat. a „Kis forrás, kis igények” esetben megvizsgált lehetőségek áttekintése, két különböző fázisváltó hőtároló anyagokkal

| Fázisváltó anyag | Shell Sarawax SX70 | RT 70 HC |
|--|--------------------|---------------|
| Éves fűtési igény [kWh/év] | 48 508 | 48 508 |
| Tárolókban lévő hasznosítható hőmennyiség [kWh] | 117 | 163 |
| Megtett oda-vissza utak száma évente | 415 | 299 |
| Egy oda-vissza út megtételéhez szükséges idő [h] | 1,91 | 1,91 |
| Targonca fajlagos villamosenergia-felhasználása [kWh/h] | 10,8 | 10,8 |
| Targonca éves villamosenergia-felhasználása [kWh/év] | 8580 | 6182 |
| Fázisváltó anyag egységára [EUR/kg] | 1,9 | 4,8 |
| Tárolt fázisváltó anyag teljes költsége [EUR] | 4 750 | 12 000 |
| Felhasznált villamosenergia éves költsége [EUR/év] | 814 | 587 |
| A 2022-es évre számított átlagos villamos energia-ár [EUR/MWh] | 94,93 | 94,93 |

Látható, hogy a nagyobb látens hővel rendelkező RT 70 HC esetén majdnem háromszoros árat kellene fizetnünk a fázisváltó anyagért; ezt a különbséget nem kompenzálja a kisebb tömeg szállítási költségeinek csökkenése. Ennek megfelelően a célra legalkalmasabb anyag a Shell által forgalmazott Sarawax SX70.

Egy adott hőkibocsátó-hőfelhasználó pár esetén a hőellátás megszervezését és a hőtároló(k) kialakítását nagymértékben befolyásolja a rendelkezésre álló szállítóeszköz. A mi esetünkben ez egy nagy teherbírású (max. 5 tonna) elektromos targonca, melyet alacsony fajlagos energiafelhasználással, egyszerű anyagmozgatással, gyors töltéssel jellemezhetünk, továbbá feltételezhetjük, hogy egy hasonló jármű ma már rendelkezésre áll a legtöbb telephelyen, így nem kell külön beruházni rá, szemben egy viszonylag magas bekerülési költségű elektromos kamionnal, viszont eltekinthetünk attól, hogy közúton milyen speciális feltételekkel közlekedhetne. A targonca teherbírása határt szab a szállítható hőtároló anyag mennyiségének. Mivel maga a konténer és a hőcserélő is jelentős tömeggel bír (a kettő együtt kb. 1,5 tonna), így ömlesztve, 2,5 tonna fázisváltó anyaggal tölthetjük meg a konténeret, amit így még képes elszállítani az elektromos targonca. Fázisváltó anyagnak a 187,3 kJ/kg olvadáshővel rendelkező, igen olcsó, 1,9 EUR/t egységárú, Shell által forgalmazott Sarawax SX70 elnevezésű anyagot választva ez a szállítóeszköz – a konténer megfelelően gyors

fűtési rendszerbe való fel- és lecsatlakoztatást feltételezve – lehetővé teszi hőfelhasználó megfelelő ellátását két konténer segítségével.

A tárolók alkalmazásával a fosszilis tüzelőanyag-felhasználás jelentősen vagy akár közel nullára csökkenthető. Az év folyamán néhányszor tapasztalható igen magas fűtési igény, mely esetekben a tároló nem feltétlen képes megfelelően kielégíteni ezeket a megnövekedett igényeket. Erre az esetre – ahogy korábban is említettük – feltétlen szükséges egy tartalékberendezés, ami jelen esetben a már meglévő gáztüzelésű kazán lehet. Ennek megfelelően jelen vizsgálat során azzal a feltételezéssel élünk, hogy az éves tüzelőanyag-felhasználás 90%-át leszünk képesek kiváltani a hulladékhőt hasznosító hőtároló berendezések segítségével. Az általunk vizsgált esetben a kiváltható földgázmennyiség 4500 m³ körül lenne.

Látható, hogy amennyiben a biogáztelepet és a szupermarketet egy rendszernek, vagy „energiaközösségnek” tekintjük, jelentős végsőenergia-megtakarítás realizálható és a jelenlegi energiapiaci helyzetet tekintve akár több, mint 2 millió forint költségmegtakarítás érhető el egy fűtési idény alatt. Így – már meglévő gázmotorral, szállítóeszközzel, sofőrrel, minimális átalakítást kívánó fűtőrendszerrel és kellően olcsó hőtároló konténerrel – akár 3-4 éves megtérülési idő is elérhető lenne.

Nagy forrás, közepes igények – épületcsoport fűtése ipari hulladékhővel

A következő esettanulmányban egy jelentős hőforrást, valamint egy, az előbbinél nagyobb, közepes hőigényű fogyasztó esetét vizsgáltuk. Az alternatív hőellátás megtervezéséhez a Vác városában távhővel ellátott lakossági épületeket, valamint a város szélén található Duna-Dráva Cementgyár által kibocsátott hulladékhőt vettük figyelembe. A váci távhőközpontok elhelyezkedését, illetve a hőforrásként szolgáló cementgyárat mutatja az alábbi térkép (4. ábra).



4. ábra. Vác távhőközpontjai és a Duna Dráva Cementgyár elhelyezkedése ([22] alapján saját szerkesztés)

A cementgyártás során a cement kiégetése jelentős mennyiségű hő termelésével jár együtt. Ugyan nemzetközi szinten vannak törekvések alternatív tüzelőanyagok használatára, ma még a fosszilis

3. táblázat. Hasznosítható hulladékhő, Duna Dráva Cementgyár [7]

| Jelenlegi hőhasznosítás mellett megmaradó hőmennyiség [TJ/év] | | | Maximális hőhasznosítás mellett megmaradó hőmennyiség [TJ/év] | | |
|---|----------------------|----------------------|---|----------------------|----------------------|
| 25°C-ra hűtés esetén | 55°C-ra hűtés esetén | 95°C-ra hűtés esetén | 25°C-ra hűtés esetén | 55°C-ra hűtés esetén | 95°C-ra hűtés esetén |
| 683.486 | 561.196 | 507.99 | 283.52 | 199.212 | 159.778 |

tüzelőanyagokkal, elsősorban földgázzal üzemelő forgókemence használata a legelterjedtebb. A cementgyárakban a forgókemence, az előmelegítők, illetve a kalcinálók kilépő gázait, hőhasznosítás céljából sok esetben a beérkező anyagok hevítésére, szárítására használják, majd az így lehűlt gázok a környezetbe távoznak [23]. A Duna Dráva Cementgyár esetében a jelenlegi belső hőhasznosítás után megmaradó hőmennyiséget mutatja az 3. táblázat, a közeg különböző hőmérsékletekre történő lehűtése esetén.

Ahogy az a 3. táblázatban is látható, a keletkező hulladékhő nem 100%-ban hasznosítható fűtési célokra; a jelenlegi fűtőrendszerek többsége a három kategóriából csak a legnagyobb hőmérsékletű részt tudná – hőcserélőkön keresztül – hasznosítani. Feltételezve, hogy 95 °C-ra kerül lehűtésre a füstgáz – ami a fázisváltó hőtároló anyag felfűtését megfelelően biztosítja is - belátható, hogy a jelenlegi és a legjobb technológia esetében 348,21 TJ/év különbség adódik. Tehát, ez az a hőmennyiség, amelyet hasznosítani tudunk a városi hőigények ellátására.

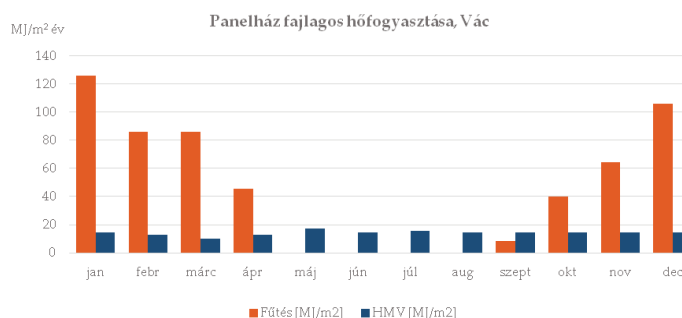
Mivel a rendelkezésre álló hő hőmérséklete 95 °C feletti, így a jelen esettanulmányban a kereskedelmi forgalomban elérhető anyagok közül az RT 90 HC paraffin alkalmazásával számoltunk, melynek olvadáspontja 90°C, olvadáshője pedig 170 kJ/kg [20]. Ebben az esetben az esetlegesebb magas hőmérsékletű igények (pl. éttermi mosogatók) is kielégíthetővé válnak.

A lakossági hőigények felméréséhez, Vác városának távhőellátása szolgált bázisul, ami 112,15 TJ éves hőigénnyel rendelkezik [24]. Ez a hőigény, a vizsgált cementgyár esetében hasznosíthatóan minősülő hulladékhőből fedezhető, ezért érdemes volt tovább vizsgálni a rendszert. Fontos kiemelni, hogy a város négy távhőrendszere közül, egyik sem hasznosít megújuló energiaforrást [25], az összes váci távhőrendszer földgázt hasznosító csúcscsazánal, illetve gázmotorral látja el a lakossági hőigényeket [24]. Ezáltal a tervezett alternatív hőellátás kiépítésével, az ipari hulladékhő hasznosításával, jelentős mértékben csökkenthető a hazai fűtési célú földgáz-felhasználás is.

Mivel a konténeres hulladékhő-alapú fűtésnél a nem megfelelő szállítás karbonlábnyma tönkre teheti a módszer alacsony CO₂ kibocsátását, ezért érdemes olyan szállítási módszert választani, amely megújuló villamos energiát használ és képes nagyobb mennyiségek szállítására is. Vácott érdemes a vasúti szállítást vizsgálni, mivel - ahogy a 4. ábrán is látható – a város vonatállomása közvetlen a Szent István téri hőközpont közelében (tőle kb. 250 méterre) található, viszonylag rövid – és így nem túl költséges – csővezetékekkel is összeköthető. Emellett a cementgyár iparivágánya becsatlakozik a városi közforgalmú vasúthálózatba. Mivel a Szent István téri hőközponthoz a hőtároló konténer – ami ez esetben akár egy átalakítottvasúti tartálykocsi is lehet – vasúti szállítása tehervonattal könnyen megoldható, így ide az alternatív hőellátási rendszert vasúti szállításra alapozva érdemes kiépíteni.

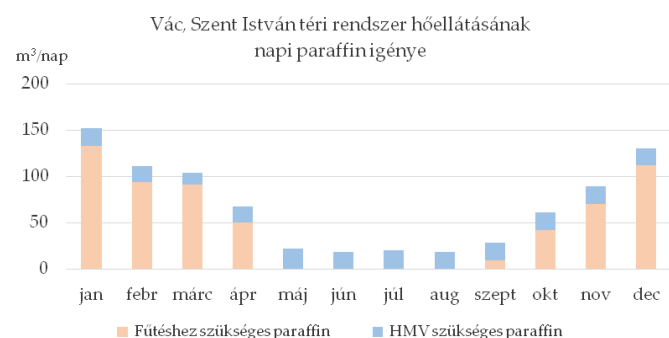
A Szent István téri rendszer hőigénye 4,1 TJ/év [24]. Ez ugyan csekély a város teljes igényéhez képest, de megfelelő egy ilyen típusú pilot projekt végrehajtásához és a kapcsolódó technológiák kiépíthetőségének, üzembiztonságának teszteléséhez. Emellett,

Magyar és Baráth 2014-es [26] épületkorszerűsítéssel foglalkozó kutatása alapján rendelkezésre állt a Vácott távhővel ellátott panelházak négyzetméterre vetített hőfogyasztása és annak fűtési és HMV célok közti megoszlása is. Az adatok az 5. ábrán láthatók.



5. ábra. Panelház fajlagos hőfogyasztása, Vác ([26] alapján saját szerkesztés)

Ezen adatok segítségével megbecsülhetővé vált a vizsgált Szent István téri távhőközvetítő hőigénye és ennek fűtési és HMV célú megoszlása. A távhőrendszer fűtési és HMV hőigényeinek havi megoszlását ismerve megadható, hogy egy adott hónapokban, átlagosan napi szinten mekkora hőigény jelentkezik, azaz mennyi hőtároló közegegre van szükség. Az adott hónapra jellemző napi átlagos hőigény ismeretében, egy 97%-os hatékonyságú hőcserélőt feltételezve meg tudjuk adni, hogy mennyi a hőcserélő túoldalán található fázisváltó anyagban tárolt hőmennyiség. A paraffin hőmennyisége pedig visszavezethető az ipari hulladékhő hőmennyiségére, hasonlóan egy hőcserélőn keresztül. Emellett a fázisváltó anyag olvadáshője és a benne tárolt hőmennyiség ismeretében, a szükséges paraffin mennyisége is számolható. Az így számolt napi átlagos szállítandó paraffin térfogatát mutatja a 6. ábra.



6. ábra. Szent István téri távhőközvetítő átlagos, napi paraffin szükséglete

Egy szabvány Zas 7850 vagy Zaes 7887 vasúti tartálykocsi [27] térfogata 63 m³; ennek kb. harmadát a hőcserélő tölti ki, így a szállítható paraffin-mennyiség 42 m³. Amennyiben a beépített hőcserélő

lő tömege túl nagy, az átalakított tartálykocsi össztömege meghaladhatja az ezekhez a típusokhoz engedélyezett felső határt és ez esetben a hőtároló anyag mennyisége csökkentendő. Ezek alapján a napi hőigény ellátásához – évszaktól függően – napi 1-5 átalakított vasúti tartálykocsira van szükség. Amennyiben több, mint egy tartálykocsira lenne szükség, akkor megfontolandó lehet, hogy pl. ne egyszerre egy négy tartálykocsis szerelvényt szállítsanak, hanem két tartálykocsit alkalmazzanak, 6 órás szállítási intervallumokkal. Ez a megoldás a beruházási költségeket csökkenti, de a működési költségeket növelheti. A hővel feltöltött tartálykocsikat a vasútállomáson egy megfelelő helyen, mellékvágányon kell leállítani; ennek a helynek a távolsága nagyobb lehet a korábban említett 250 m-nél, így a hőközpont és a hőkinyerés helyszíne közt kiépítendő hőszigetelt csővezeték költségei emelkedni fognak.

A vasúti szállítás mellett szól, hogy kötött pályás szállítás esetén a nagy mennyiségű, bizonyos esetekben (pl. paraffin alkalmazásakor) tűzveszélyes, folyékony állapotú hőtároló anyag szállítása egyszerűbb lehet és várhatóan kisebb lenne a lakosság ellenszenvé is az új technológia iránt, mint a közúti szállítás esetén.

A fentiek alapján látható, hogy a rendelkezésre álló magas hőmérsékletű maradványhő nem egészen másfél százaléka elég lenne a városközpontban levő három „toronyház” hőigényeinek ellátására. A javasolt hő-hasznosító rendszer mellett, hogy nem használ földgáz tüzelőanyagot, elősegíti a cementgyár energiahatékonyabb működését is, hiszen kevesebb lesz a kibocsátott hulladékhő a gyárban. A rendszer egyszerű megtérülése a jelenlegi árak mellett ~16 évre becsülhető. Megjegyzendő, hogy a cementgyár által kibocsátott hulladékhővel akár Vác mind a négy hőközetének hőigénye kielégíthető, így javasolt a teljes városi távhőellátás esetében megvalósíthatósági tanulmányt készíteni.

Nagy forrás, nagy igények – lakótelepi hőközpont(ok) ellátása ipari hulladékhővel

Az utolsó esettanulmányban egy jelentős hőforrást, valamint egy, a korábbiaknál nagyobb, a rendelkezésre álló hulladékhőt meghaladó hőigényű fogyasztó esetét vizsgáltuk.

Magyarországon az ipari létesítmények közül jelentős hulladékhőt bocsát ki az Ózdi Acélművek. Az acélipar az energiafelhasználás szempontjából legintenzívebb iparág, amely villamos energiát, földgázt és szenet is hasznosít. Az acél termékek gyártási folyamatai során magas hőmérsékletre van szükség és így jelentős hulladékhő is tud keletkezni. A hulladékhő megjelenik füstgázok formájában, valamint belekerül a hűtővízbe is [28].

Az Ózdi Acélművek esetében a jelenlegi belső hőhasznosítás után megmaradó hő-mennyiségeket mutatja az 4. táblázat, a közeg különböző hőmérsékletekre történő lehűtése esetén.

Mivel a közeg 95°C-ra történő lehűtése a hőtároló anyag fel-fűtését megfelelően biztosítja, belátható, hogy jelenleg legalább 48,297 TJ/év az a hőmennyiség, ami az ipari hőforrás oldaláról rendelkezésre állhat, ezzel tudunk gazdálkodni a lakossági hőigények ellátásakor.

4. táblázat. Hasznosítható hulladékhő, Ózdi Acélművek [7]

| Jelenlegi hőhasznosítás mellett megmaradó hőmennyiség [TJ/év] | | | Maximális hőhasznosítás mellett megmaradó hőmennyiség [TJ/év] | | |
|---|----------------------|----------------------|---|----------------------|----------------------|
| 25°C-ra hűtés esetén | 55°C-ra hűtés esetén | 95°C-ra hűtés esetén | 25°C-ra hűtés esetén | 55°C-ra hűtés esetén | 95°C-ra hűtés esetén |
| 57,853 | 56,173 | 53,911 | 9,122 | 7,627 | 5,614 |

A városban egy távhőrendszer található, az Ózd városi távhőrendszer, amely csak földgáz felhasználásával 2021-ben 211,58 TJ fűtési hőt szolgáltatott, továbbá 26,19 TJ HVM célú hőt [24]. Ez tehát a kutatás szempontjából megadja, hogy összesen 237,77 TJ hőigény jelentkezik a fogyasztói hőközpontokban. Azonban a hőforrás oldalán csak 48,297 TJ/év hőmennyiség áll rendelkezésre, amit hasznosítani lehet, így a hőigény oldalra fókuszálva, az alternatív rendszer kiépítésére legalkalmasabb épületek felderítése volt a következő feladat.

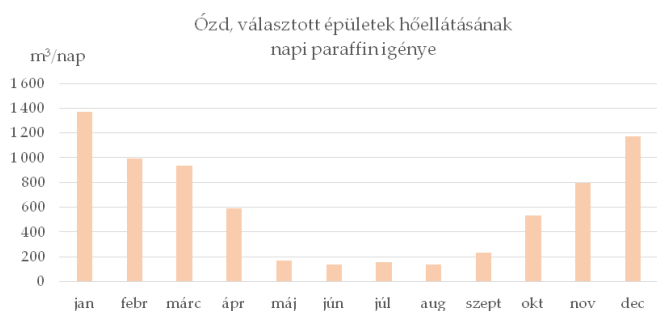
Ehhez Ózd városának térképét kellett elemezni (7. ábra), ami alapján elmondható, hogy az Acélművek a város észak-keleti szélén helyezkedik el, valamint, hogy a távhővel ellátott épületek jelentős számban vannak a városi vasútállomás környékén.



7. ábra. Ózd város térképe [29]

Mivel az Acélművek iparvágánya becsatlakozik a város vasútvonálára, így a hőtároló anyag, illetve az azt tároló konténer szállítása megvalósítható vasúton. Ez alapján összegyűjtésre kerültek a városi vas-útállomáshoz közel elhelyezkedő nagyobb méretű panelházak, háztömbök, mivel ezek esetében koncentráltan jelentős hőigény elégíthető ki, rövid szállítási útvonalon keresztül.

A vizsgált épületek összesen 89190 m² becsült fűtött alapterülettel rendelkeznek. A fűtendő alapterület ismeretében, valamint Koltai és munkatársai 2021-es [30] tanulmánya alapján megadott panelházakra vonatkozó fajlagos távhőigényeket – 409 MJ/m² – felhasználva, számíthatóvá vált az éves becsült hőigény. A hőigények ismeretében két 97%-os hatékonyságú hőcserélőt feltételezve adódtak az épületek ellátásához szükséges ipari oldali hulladékhő mennyiségek. A fennmaradó hulladékhő hőmennyiségének ismeretében, a választott paraffin olvadáshőjét felhasználva pedig számítható a szükséges paraffin mennyisége is.



8. ábra. Ózdon vizsgált épületek összeített átlagos, napi paraffin szükséglete

A vizsgált épületekben, az egyes hónapokban várható hőigények kielégítésére az 8. ábrán szemléltetett napi átlagos mennyiségű paraffin szállítása szükséges.

A korábban ismertetett vasúti tartálykocsikat használva a napi hőigény ellátásához – évszaktól függően – napi 5-40 átalakított vasúti tartálykocsira van szükség. Ebben az esetben nem lenne megoldható a probléma csupán két tartálykocsival (egyet töltünk vagy szállítunk, egyet kisütünk), mert a töltésre-szállításra és csatlakoztatásra rendelkezésre álló idő túl rövid lenne, alig fél óra. Természetesen ez esetben lehetne több tartályos blokkokat (pl. 2*5 tartály) használni. Egy ilyen blokk 3 órás fűtési igényt elégítene ki; ez az idő elég lenne az éppen már „kiürült” tartály újramelegítésére és szállítására. Ezzel a beruházási igények jelentősen csökkenthetők (a konténeres és a hőtároló anyag mennyisége negyedelhető).

A „feltöltött” tartálykocsikat a vasútállomáson egy megfelelő helyen, mellékvágányon kell leállítani; mivel innen több hőközpontot is el kell látni, így szükség lehet egy bonyolultabb elosztórendszer, illetve csőhálózat kiépítésére, ami viszont jelentősen emelheti a költségeket, úgy, hogy közben csak a csúcsszükségletek kb. 20%-át tudjuk kielégíteni, azaz mindenképp szükség lesz a korábbi fűtőrendszerek megtartására is. Így ebben az esetben nem biztos, hogy érdemes lenne a hulladékhőt ilyen célra és arányban alkalmazni.

Az Ózdi Acélművek ipari tevékenysége során keletkező és hasznosítható 48,297 TJ/év hulladékhővel – vasúti szállítással, és hőtároló anyagként RT 90 HC paraffin alkalmazásával – elvileg elég lehet a kiválasztott panelépületek 36,48 TJ/év hőszükségletének ellátására. Egy egyszerűsített költségbecslés és pénzügyi kalkuláció alapján a rendszer megtérülése 7,5 évre becsülhető.

További potenciális lehetőségek – geo- és petrotermális hőforrások

Az ipari és egyéb maradványhők mellett más lokalizált hőforrások esetén is jó megoldás lehet a mobil hőtárolók használata.

A geotermális és petrotermális hőforrásoknál az ipari hulladékhőhöz hasonlóan, fűtési célra jól felhasználható hőmérséklettartományban gyakran találkozhatunk kihasználatlan potenciállal. Az ilyen kutak jelentős része nem a településeken belül, hanem azok pár kilométeres körzetében helyezkedik el, azaz szállítási szempontból éppen beleferne a mobil hőtárolók „hatáskörzetébe”. A kutatás célja az volt, hogy bemutassuk, hogyan hasznosítható a hazánkban lévő, több ezer kihasználatlan, olajfúrásból megmaradt kút geotermikus fűtési célokra.

Előzetes vizsgálatokat végeztünk egy száraz kútra vonatkozóan. A száraz kutakból sem termálvíz, sem szénhidrogének nem lépnek ki (jelentős mennyiségben), így a hő csak hőcserélő segítségével nyerhető ki a mélységi kőzetekből.

A hőhasznosítás vizsgálata a WeHEAT technológia alkalmazásával történt [31]. A Kiskunhalas városában található, mélyfúrásból megmaradt Kiha-ÉK-14 kút jelentette a kutatás alapját, mely esetében modellezések és szimulációk eredményeként számos paraméter rendelkezésre állt a kutatáshoz. A kútból periodikusan, azaz csak a fűtési időben 1 047 MWh/év hőteljesítmény hasznosítható. A kút közelében található ipari jellegű társasházakból pedig 2 db ház - az Esze Tamás lakótelep 1. és 8. szám alatti társasházak – fűtése ellátható a kútból kinyert hővel.

Mivel számos további hasonlóan kihasználatlan kút van még Magyarországon, érdemes további kutatásokkal felderíteni, hogy mely kutak esetében lehet valóban kivitelezni a technológia alkalmazását és a közelben lévő lakossági hőigények kielégítését.

Összefoglaló

A tanulmányban a mobil hőtárolók felhasználhatóságát vizsgáltuk. A koncepció ismertetése után hazai esettanulmányokat mutattunk be. Ezek közt szerepel egy kis hőforrás – kis hőigényű felhasználó, egy nagy hőforrás – kis hőigényű felhasználó és egy nagy hőforrás – nagy hőigényű felhasználó eset is. Bár a megtérülési idő minden esetben elég hosszúnak tűnik, de a változó energiaköltségek és az egyre fontosabb fenntarthatósági kritériumok miatt már a közeljövőben is lehetnek olyan esetek, amikor a mobil hőtárolás alkalmazása akár piaci alapon is megtérülő lehet.

A tanulmányban leírtak alapján megállapítható, hogy több iparág esetében is felmerül a hulladékhő hasznosításának lokális, lakossági igényeket kiszolgáló hasznosítása. Magyarországon számos olyan ipari szereplő található, aki jelentős hulladékhőt kibocsátó iparágban tevékeny. Ezeknél a szereplőknél érdemes a helyi hőigények felmérése és a fázisváltó anyagok alkalmazásával megvalósítható hőigények ellátásának felderítése. Érdemes elsősorban a jelenleg fosszilis eredetű anyagokat felhasználó hőellátási rendszereket vizsgálni, hiszen a hőigények alternatív rendszerekkel történő kielégítése a károsanyag kibocsátást is csökkentheti.

Köszönetnyilvánítás

A munka részben a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HŐ pályázati program finanszírozásában valósult meg, részben az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta.

Irodalomjegyzék

- [1] Marta Kuta: Mobilized thermal energy storage (M-TES) system design for cooperation with geothermal energy sources, Applied Energy, Applied Energy 332 (2023) 120567
- [2] Gudmundsson, J.; Freeston, D.; Lienau, P. The Lindal diagram. GRC Trans. 1985, 9, 15–17.
- [3] Operacz, A.; Chowaniec, J. Prospective of geothermal water use in the Podhale Basin according to geothermal step distribution. Geol. Geophys. Environ. 2018, 44, 379–389.
- [4] Kaczmarczyk, M.; Tomaszewska, B.; Operacz, A. Sustainable Utilization of Low Enthalpy Geothermal Resources to Electricity Generation through a Cascade System. Energies 2020, 13, 2495. <https://doi.org/10.3390/en13102495>
- [5] Yufei Wang, Qikui Tang, Mengying Wang, Xiao Feng: Thermodynamic performance comparison between ORC and Kalina cycles for multi-stream waste heat recovery, Energy Conversion and Management, 143 (2017) 482-492, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.026>
- [6] Axel Groniewsky, Réka Kustán and Attila Imre: Efficiency increase

- of biological methanation based Power-to-Methane technology using waste heat recovery with Organic Rankine Cycle, *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(2022)596-608, <https://doi.org/10.3311/PPCh.20428>
- [7] sEEnergies Open Data: D5 1 Industry Dataset https://s-energies-open-data-euf.hub.arcgis.com/datasets/a6a1e8e-95514413a90bbb2e40515fdb2_0/explore?location=48.094343%2C21.083098%2C6.78&style=Eurostat_Name letöltve: 2023.05.01.
- [8] Use of energy explained, U.S. Energy Information Administration, <https://www.eia.gov/energyexplained/use-of-energy/industry.php>.
- [9] Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery, Terry Hendricks, Pacific Northwest National Laboratory, William Choate, BCS Incorporated, Report to U.S. DOE Industrial Technologies Program, November 2006
- [10] Combined Heat and Power (CHP) Technical Potential in the United States, U.S. Department of Energy, March 2016, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2016/04/f30/CHP%20Technical%20Potential%20Study%203-31-2016%20Final.pdf>.
- [11] Clemens Formann, Ibrahim Kolawole Muritala, Robert Pardemann, Bernd Meyer: Estimating the global wasteheat potential, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57(2016)1568–1579
- [12] Gerse Károly: Energiatárolás, Akadémiai Kiadó, 2020, <https://mersz.hu/kiadvany/707/info/>
- [13] Angas, W.M., 'Fireless Steam Locomotives Fireless Steam Locomotives - The Successful Revival of an Idea That Was Considered a Failure Forty Years Ago', *Scientific American*, Vol. 164, pp. 30–32, 1941
- [14] Kemsei Zoltán: Nem kár a gőzért!, *Indóház online*, <https://ih.hu/hirek/hem-kar-a-gozert-150206> (2015)
- [15] Ioan Sarbu, Calin Sebarchievici (2018): A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage, Department of Building Services Engineering, Polytechnic University of Timisoara, Romania
- [16] Volodimir Demchenko, Alina Konyk: Mobile thermal energy storage (M-TES), *Journal of New Technologies in Environmental Science*, 6 (2022) 91—96, DOI 10.53412/jntes-2022-3-2
- [17] Kun Du, John Calautit, Philip Eames, Yupeng Wu: A state-of-the-art review of the application of phase change materials (PCM) in Mobilized-Thermal Energy Storage (M-TES) for recovering low-temperature industrial waste heat (IWH) for distributed heat supply, *Renewable Energy* 168 (2021) 1040-1057, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.057>
- [18] Shehadeh, M.; Kwok, E.; Owen, J.; Bahrami, M. Integrating Mobile Thermal Energy Storage (M-TES) in the City of Surrey's District Energy Network: A Techno-Economic Analysis. *Appl. Sci.* 2021, 11, 1279. <https://doi.org/10.3390/app11031279>
- [19] Erzsíák Bence: Hulladékhő-hasznosítás mobil hőtároló berendezéssel, diplomamunka (tv: Imre Attila), BME 2022
- [20] Rubitherm GmbH: Produkte, PCM RT-Serie: vielfältige organische PCM <https://www.rubitherm.eu/produktkategorie/organische-pcm-rt> letöltve: 2023.05.05.
- [21] Shell GTL Sarawax SX70 Datasheet, https://www.shell.com.my/content/dam/shell/assets/en/malaysia/motorist/documents/sarawax-sx70.pdf&ved=2ahUKEwiFruL4rPmHAXEhf0HHC02FyIQFnoECBQQAQ&usq=AOvVaw3h4qeW9DSUxBU15uVrMh3_
- [22] OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/>
- [23] S. N. Priyadarshini, D. B. Sivakumar (2014): Waste Heat Recovery in Cement plant, *International Journal of Engineering Research & Technology* (IJERT) ISSN: 2278-0181 Vol. 3 Issue 5, May – 2014, <https://asset-pdf.scinapse.io/prod/1554228361/1554228361.pdf>
- [24] MaTáSzSz (2022): Magyar Távhőszolgáltatók Szakmai Szövetsége által nyújtott adatszolgáltatás
- [25] Váci Távhő Nonprofit Közhasznú Kft. (2022): Távhőszolgáltatók 7/2006 (V.24) TNM rendelet szerint adatszolgáltatása a Lechner Tudásközpont felé, Lechner Tudásközpont adatbázis: <https://www.e-epites.hu/e-tanusitas/tavho/nyilvanos/lekerdezes> letöltve: 2022.10.29.
- [26] Dr. Magyar Zoltán, Baráth Géza (2014): Panel lakóépületek komplex energetikai felújítása, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszék, *Magyar Épületgépészet*, LXIV. évfolyam, 2015/6. szám https://comfortconsulting.hu/images/pdf/publikaciok/%C3%89p%C3%BCletenergetikai-audit/Panel_lakoepuletek_komplex__energetikai_fel%C3%BAj%C3%ADt%C3%A1sa.pdf letöltve: 2022.10.29.
- [27] RailCargo, <https://r.ch.railcargo.com/hu/szolgáltatasaink/teherkocsi/berbeadas-es-ertesites/teherkocsitipusok/tartalykocsi>
- [28] ESTEP European Steel Technology Platform (2021): Waste Heat Recovery & Utilization for Steel Plants, Report, Webinar & Workshop Series, 10/06/2021, pp 5-7, <https://www.estep.eu/assets/Uploads/Workshops/ESTEP-WHR-Webinar-Workshop-Report-202106-Final.pdf> letöltve: 2023.05.22.
- [29] E-KÖZMŰ: közműtérkép, letöltve: 2023.05.05. <https://ekozmu.e-epites.hu/alkalmazas/lakossag/menu/terkep/tajkoztatas/koz-muterkep>
- [30] Koltai L., Szabó T., Tóth K., Varró A. (2021): A legrosszabb energiatékonyságú hazai lakóépületek felújításának gazdasági és társadalmi hatásai, A Habitat for Humanity Magyarország Alapítvány részére, Budapest, HÉTFA Kutatóintézet, https://hetfa.hu/wp-content/uploads/2022/09/HE%CC%81TFA_Tanulma%CC%81ny_Habitat.pdf letöltve: 2023.06.01.
- [31] Adrienn Szekszárdi, Eszter Békési, Krisztina Tóth, István Sulyok, Mátyás Gáti: WeHEAT SYSTEMS: a sustainable closed loop heating technology in the field of geothermal energy, *European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany | 17-21 October 2022*, www.europeangeothermalcongress.eu

A BME GPK Energetikai Gépek és Rendszerek tanszéke az utóbbi években a fenti cikkben ismertetetten kívül több energiátárolással kapcsolatos K+F projektben is részt vett, illetve jelenleg is részt vesz.

Az NKFIH finanszírozású "Power-to-Gas – Szezonális energiatermelésre alkalmas metanizáló berendezés fejlesztése" (2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00006) célja egy olyan berendezés felépítése volt, amelyben a pillanatnyi, zömmel PV alapú villamosenergia-felesleget felhasználásával vízből hidrogént állítanak elő, majd a hidrogént biogázhoz keverve metanizáló ősbaktériumok segítségével a biogáz CO₂-tartalmát is metánná alakítják. Az így nyert "szintetikus földgáz" a hidrogénnél könnyebben tárolható, szállítható és felhasználható, valamint származása miatt karbonmentes.

A szintén NKFIH finanszírozású "A vanádium-redox akkumulátorok hálózati szerepének vizsgálata a naperőmű-szabályozásban" (2021-2.1.1-EK-2021-00001) és "Tesseract Energiátároló" (2021-2.1.1-EK-00002) projektekben a széleskörben használt Li-ion akkumulátorok helyett a nagy kapacitású vanádium-redox, illetve nátrium-kén akkumulátorok hazai rendszerbe való illeszthetőségét vizsgáljuk. A projekt keretében több ilyen rendszer telepítése is megtörténik.

A tanszék (több más egyetemi tanszékkel együtt, de különálló kutatási profillal) részt vesz a Megújuló Energiák Nemzeti Laboratóriumában; ezen belül a tiszta hidrogén, földgázba kevert hidrogén és kémiaiilag tárolt hidrogén (ammónia) felhasználásával foglalkozik. Emellett vizsgáljuk a hazai, helyi hidrogéntermeléssel ellátható közúti töltőállomás-hálózat megvalósíthatóságának kérdéseit, nap-elemes, illetve geotermikus kísérőműves alapon.

Ugyancsak részt veszünk az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program Fenntartható Technológiák Alprogramjában; ezen belül a fenntartható energetikához kapcsolódó, alap kutatás-jellegű vizsgálatokat végzünk, beleértve a hő- és villamosenergia-tárolással kapcsolatos témákat is.

Merre úszik a hőhajó Londonban?

Götz Sándor, fejlesztőmérnök

Környey Balázs, projektmenedzser

Sztilkovics Szávó vezérigazgató

Mahart Magyar Hajózási Zrt.

Mahart-Szabadkikötő Zrt.

A XX-XXI. században az emberiség addig soha nem látott mértékű energiát használt, használ fel. Ez a mai fejlett civilizációnk alapja. Az energiabőséget a fosszilis források rohamos feltárása és kiaknázása biztosítja, amely energiaellátási modellt a kapitalizmus tökekonzentrációs logikája mentén nagy, központi ellátórendszerek létrehozását eredményezte. Ma ezt a rendszert kellene felülírnia és belátható időn belül kiváltania egy megújuló energiaforrásokon alapuló, diverzifikált rendszernek. Kívánatos, hogy az energia megtermelésével, szállításával és tárolásával kapcsolatos ráfordítások jelentősen csökkenjenek, hiszen ezek mind hozzáadónak a fosszilis energia felhasználásának szénlábnyomához. Ezért is kiemelten fontos a takarékoság, az előállított energia mind nagyobb hányadának hasznosítása.

A hőhajó projekt célja, hogy egyszerű, környezetbarát és költséghatékony megoldást kínáljon a bármilyen forrásból származó, hasznosítható hőmérsékletű hő és hulladékhő tárolására, illetve szállítására, amelynek forrása lehet például egy fosszilis üzemanyagú erőmű vagy valamely nagy hőenergiát igénylő gyártási folyamat.

*

In the 20th and 21st centuries, humanity has used and is using energy on an unprecedented scale. This is the basis of our advanced civilisation today. The abundance of energy is ensured by the rapid exploration and exploitation of fossil resources, an energy supply model that has led to the creation of large, centralised supply systems along the lines of capitalism's logic of capital concentration. Today, this system should be superseded and replaced in the foreseeable future by a diversified system based on renewable energy sources. The costs of producing, transporting and storing energy should be significantly reduced, as these all add to the carbon footprint of fossil energy use. This is why it is so important to save energy and to use more and more of the energy produced.

The heat ship project aims to offer a simple, environmentally friendly and cost-effective solution for the storage and transport of heat and waste heat from any source, such as a fossil fuel power plant or a manufacturing process that requires a high level of thermal energy.

Általánosan megállapítható, hogy míg a motorok, gépek, berendezések és hálózatok hatékonyságát egyre magasabb szintre sikerült emelni, a hasznosítatlan hőenergia formájában még mindig hatalmas veszteségek keletkeznek. Ez ugyanúgy igaz a fosszilis energiával működő erőművekre, mint a különböző gyártási folyamatokra, illetve az épületek fűtésének hőveszteségére.

A jövőben a hőtermelés leginkább kívánatos módja a megújuló energiaforrások felhasználása. Napkollektorokkal közvetlenül lehet

hőt előállítani, míg a napelemek vagy szélérőmű parkok által termelt elektromos energia is egyszerűen átalakítható hővé. A megnyert hőt a helyben vagy máshol történő felhasználásáig tárolni, akkumulálni szükséges. Miként az elektromos energiát tároló akkumulátorok, akként a hőtároló „hőakkumulátorok” is nagy tömegűek, míg utóbbiak fajlagos energiátároló képessége az előbbieknél nyilvánvalóan alacsonyabb. Ez nem jelent hátrányt abban az esetben, ha a beépített, rögzített hőakkumulátor feladata csupán a nappal megtermelt energia eltárolása az esti, éjszakai időszakban történő felhasználásig. Abban az esetben viszont, amikor az eltárolt hőenergiát más helyszínen kívánjuk felhasználni, a szállítási módok és költségek fogják meghatározni a felhasználás gazdaságos hatótávját.

Tekintettel arra, hogy jelentős mennyiségű hőt csak nagy tömegű hőtároló anyag mozgatásával lehet szállítani, így a kezdetektől fogva a nagy tömegű áruszállítás leghatékonyabb módja, a vízi szállítás volt a kézenfekvő fejlesztési irány.

A vízi úton történő hőszállítás területén komoly lehetőséget nyitnak a XXI. századi technológiai fejlesztések.

- A távirányítás, illetve az önvezető képesség hamarosan a vízi áruszállításban is el fog terjedni, hiszen ott nagy tömegű, ugyanakkor lassan haladó járművek mozgását kell irányítani, koordinálni. A hőszállító bárkák, hajók esetében a szokásos be- és kirakodás feladata és költsége nem is jelentkezik, voltaképpen csak a hőfelvételkor és a hőleadáskor kell a megfelelő dokkoló csatlakozást a hajóhoz illeszteni.

Érdekesség, hogy Nicola Tesla több mint 125 évvel ezelőtt dolgozta ki és nyújtotta be a bárkák és más járművek távirányítására kidolgozott szabadalmát és be is mutatta egy távirányítású tengeri hajó működő modelljét.

- Külön előny, hogy a hőt szállító hajók meghajtása is lehet környezetbarát, CO₂ semleges. Mivel ezek a járművek jellemzően csupán néhány tíz kilométeres hatókörben közlekednének, ezért esetükben újra alkalmazni lehetne az immár elfeledett gőzhajtást.^{1,2} A szükséges gőzt pedig a vételezett hulladékhővel lehetne előállítani.

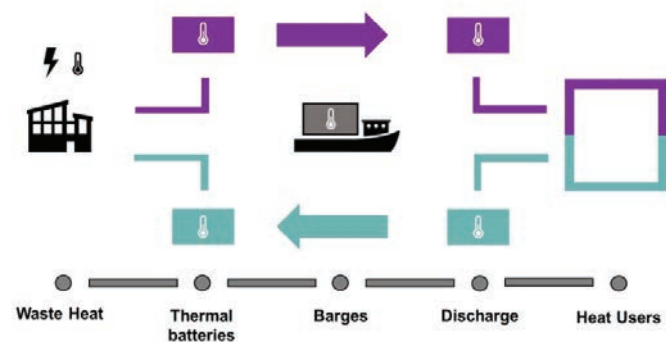
Mintaprojekt

A vízi úton történő hőszállítás témájában ígéretes mintaprojektet valósított meg az elmúlt két évben Londonban a három tagból álló Thames Mobile Heat Consortium.³ Az egyik tag az innovatív alacsony szén-dioxid-kibocsátású infrastrukturális projektek szervezője, a Sheen Parkside Ltd. Másik a Cory hulladékgazdálkodási vállalatcsoport, amely Londonban és környékén évente több mint 900.000 tonna nem szelektív hulladékot gyűjt össze és szállít víziúton, a Temzén, a folyóparton lévő hulladékégető erőművébe.



1. ábra. Hőkibocsátó és hőfogadó pontok a Temze mentén
(Forrás: <https://www.sheenparkside.com/mobile-heat>)

A harmadik tag a közel 20 éve alapított Sunamp Ltd., amelynek fő célja hőtároló anyagok és eszközök fejlesztése, alkalmazási lehetőségeik feltárása. A társaság által már kifejlesztett háztartási méretű hőakkumulátorok technológiáját ebben a projektben 33 köbméter hasznos térfogatú kereskedelmi konténerekbe építették be, amelyekből 20-20 darabot helyeztek el két folyami bárkán. Egy vontatóhajóval a 2 bárkán együttesen így akár 600 tonna fázisváltó hőtároló anyagot tudnak szállítani.⁴ A hőforrás a Cory hulladékégető mű, ahol az eddig fel nem használt hulladékhővel felmelegítik a fázisváltó anyagot, amelyet ezután víziúton egy 28 km-re lévő távfűtő műhöz szállítanak.



2. ábra. Hőtranszfer

(Forrás: <https://www.sheenparkside.com/mobile-heat>)

Nagy előnye a módszernek, hogy a hőtároló konténerek a teljes folyamat során a bárkán maradnak. A hulladékégető műben és a hőleadás helyszínén a partot a bárkán lévő konténerekkel egy-egy vízvezeték köti össze, amely egy belső hőcserélőn keresztül adja át, illetve vonja el a hőt. Első partnerként a hőt a Westminsterben működő földgáz üzemű Pimlico Fűtőmű veszi majd át, amely mintegy 3000 lakást és 50 további épületet lát el fűtéssel, melegvízzel. Ezt a gázfogyasztást csökkenti a bárkákon átszállított és a fűtőműnek átadott hő, amely egy-egy feltöltéssel mintegy 120 MWh energiamennyiséget jelent. A konzorcium számítása szerint a hulladékégető mű egyébként nem hasznosítható hőjének betárolása, folyami szállítása, kinyerése együttesen kilowattóránként 12 gramm

CO₂ kibocsátással jár, míg a földgáz égetésével az energia előállítás kilowattóránként 216 gramm CO₂ kibocsátást eredményez.⁵

A hőakkumulátorok víz-sóhidrát keveréket tartalmaznak, amely anyag nagy energiasűrűséget biztosít. A Sunamp Ltd. által kifejlesztett Plentigrade P58 elnevezésű anyag és a hozzáadott adalékanyagok együttesen olyan oldatot képeznek, amely egyenletesen olvad, ugyanakkor újra és újra összeáll a megfelelő kristályszerkezetté.

A fázisváltó anyaggal töltött hőtároló konténerek várható hasznos élettartama nagyon hosszú. A Sunamp Ltd. mérései alapján napi két feltöltés és kisütés esetén 40000 ciklussal, azaz több mint 50 évi mindennapos használatlal lehet számolni. A fejlesztő cég az innovatív tevékenységéért 2023-ban III. Károly brit királytól „King’s Award for Enterprise” kitüntetésben részesült.

A londoni konzorcium célja, hogy a vízi úton történő hőakkumulátoros hőszállítást az Egyesült Királyságban minél szélesebb körben elterjessze és ezzel környezetbarát módon elősegítse a CO₂ kibocsátás csökkentési célok teljesülését.

Köszönetnyilvánítás

A munka a 2021-2.1.2-HŐ-2021-00004 számú projekt keretén belül a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2021-2.1.2-HŐ pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- 1 Potential for Propulsive Thermal Energy Storage in a Modern Steam Powered Ship Harry Valentine, 2012.12.17) (<https://maritime-executive.com/features/potential-for-propulsive-thermal-energy-storage-in-a-modern-steam-powered-ship>)
- 2 Angas, W.M., ‘Fireless Steam Locomotives Fireless Steam Locomotives – The Successful Revival of an Idea That Was Considered a Failure Forty Years Ago’, Scientific American, Vol. 164, pp. 30–32, 1941.
- 3 Thames Mobile Heat Consortium to transport waste heat by barge (2024.03.20) (<https://sunamp.com/blog/thames-mobile-heat-consortium-to-transport-waste-heat-by-barge/>)
- 4 <https://www.sheenparkside.com/mobile-heat>
- 5 Cory and Sheen Parkside partner to decarbonise heating (2024.03.20) (<https://www.corygroup.co.uk/media/news-insights/cory-and-sheen-parkside-partner-decarbonise-heating/>)

HŐTECHNIKAI LABORATÓRIUM

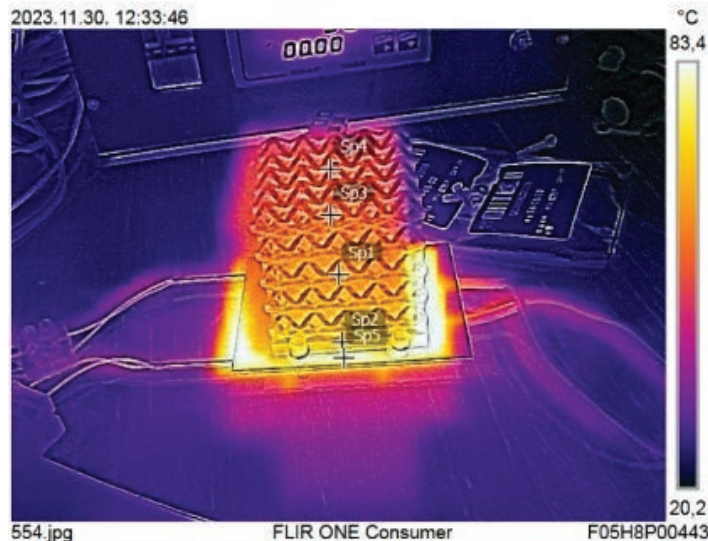
KONTAKT: DR. KOVÁCS RÓBERT

kovacsrobert@energia.bme.hu

TERMODINAMIKAI MODELLEZÉS

TERMIKUS SZIMULÁCIÓK ÉS MÉRÉSEK

TERMIKUS ANYAGJELLEZMŐK MEGHATÁROZÁSA



TÜZELÉSTECHNIKAI LABORATÓRIUM

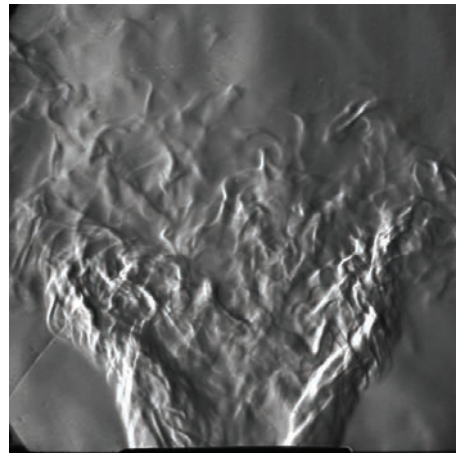
KONTAKT: DR. JÓZSA VIKTOR

jozsa@energia.bme.hu

FOLYÉKONYY ÉS GÁZNEMŰ TÜZELŐANYAGOK VIZSGÁLATA

PORLASZTÁS

TÜZELÉSMODELLEZÉS



**ENERGETIKAI GÉPEK ÉS
RENDSZEREK TANSZÉK**



**ENERGETIKAI GÉPEK ÉS
RENDSZEREK TANSZÉK**

ENERGIA ÁTALAKÍTÁS ÉS TÁROLÁS

MEGÚJULÓ ENERGIAFORRÁSOK

KÖRNYEZETI FENNTARTHATÓSÁG

ÉLETCIKLUS ELEMZÉS

TERMODINAMIKAI MODELLEZÉS

TÜZELÉSTECHNIKA

KAZÁNOK ÉS TÜZELŐBERENDEZÉSEK

IPARI MÉRÉSTECHNIKA ÉS ESETTANULMÁNYOK

www.energia.bme.hu