

ENERGIAGAZDÁLKODÁS

Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

64. évfolyam 2024. 5-6. szám

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat



alfaped

Megtakarítjuk az energiáját.

**Kellemes Karácsonyi ünnepeket,
és Boldog új évet kívánunk!**

Szolgáltatásaink

EKR tanácsadás • EKR audit • EKR hitelesítés • EKR értékesítéstámogatás
Gyármentő elő- és utóaudit • Társasági adó (TAO) elő- és utóaudit
ISO 50001 bevezetés, támogatás • Energetikai audit • Energetikai szakreferens • Műszeres mérés
CO₂ megtakarítási projektek • Oktatás, szemléletformálás • LEAN folyamatfejlesztés • Energetikai K+F+I projektek

www.alfaped.hu • +36 30 alfaped • info@alfaped.hu
+36 30 2532733

2025. március 5–6. Hotel EGER&PARK, Eger

KLENEN'25

KLÍMAVÁLTOZÁS ENERGIATUDATOSSÁG ENERGIAHATÉKONYSÁG XX. KONFERENCIA ÉS KIÁLLÍTÁS

„Osszuk meg tapasztalatainkat, dolgozzunk együtt a természet egyensúlyának megőrzéséért”

Az energiahatékonysági kötelezettségi rendszer működtetésének tapasztalatai – az elszámolható energiamegtakarítás meghatározása, hitelesítése és forgalmazása

JELENTKEZÉSI HATÁRIDŐK:

Kiállításra és termékbemutatóra: 2025. január 15.
A konferenciára: 2025. január 31.

További információ és jelentkezés:

www.klenen.eu és klenen@congress.hu



aeecenter.org



ete-net.hu



eszk.org



mekh.hu



bpmk.hu



bkik.hu



mee.hu



zerocarbonhub.hu

Médiapartnereink:

ENERGIAGAZDÁLKODÁS

innotéka

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat

Főszerkesztő:

Dr. Gróf Gyula

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 Benjámin 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, az ETE elnöke

A szerkesztőség címe:

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

E-mail:

enga@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



www.observer.hu

TARTALOM • CONTENTS • INHALT

Energiatárolás * Energy storage * Energiespeicherung

Szuhaj Márk, Wirth Roland, Bagi Zoltán,
Kovács L. Kornél

Kevert és tiszta mikrobakultúrák
alkalmazása a „Power-to-Gas” (P2G)
technológiába 2

*Application of multi and mono microbial
cultures in Power-to-Gas (P2G) technology
Anwendung von multi- und monomikrobiellen
Kulturen in der Power-to-Gas (P2G)
Technologie*

Fehér Anna, Kovács Róbert, Kun Balog Attila,
Maróti János Endre, Orbulov Imre Norbert,
Sztankó Krisztián, Szücs Mátyás,
Balog Róbert, Takács Donát

Szintaktikus fémhabok termikus és
mechanikai tulajdonságai, valamint
alkalmazhatóságuk fázisváltó hőtároló
rendszerekben 6

*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*

Pap Tímea, Erzsíák Bence, Vallus Gábor,
Imre Attila

Hőhasznosítási esettanulmányok mobil
hőkonténeres hulladékő-szállításhoz
és felhasználáshoz 12

*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 hőhajtó Londonban?
Which way the heatbarge floats in London?
In welche Richtung schwimmt
der Wärmekahn in London? 22

Energiastratégia * Energy Strategy * Energie Strategie

Balogh Péter, Pintér Gábor, Kovács András,
Németh Kornél

Ipari szimbiózis jellegű rendszerek
megvalósításának lehetséges módjai 24

*Possible ways to establish industrial
symbiosis systems
Optionale Aufbau von industriellen
Symbiose-Systemen*

Klimaváltozás * Climate change * Klimawandel

Reményi Károly
Tézisek és szintézis, mint a globális
hőmérsékletváltozás kutatás eredménye 29
*Theses and synthesis as global
temperature change Research results
Thesen und Synthese als globale
Temperaturänderung Forschungsergebnisse*

Biomassza & Hulladékhasznosítás * Biomass & Waste recovery * Biomasse & Abfallverwertung

Szilágyi Zsombor
A biomassza felhasználása
energiatermelésre 32

*Utilization of biomass for energy production
Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung*

Németh Bence, Ferencz Mónika, Kovács
Sándor, Trif László, Lendvai Józse, Kolay
Kovács Ádám, Király Krisztina, Feczko
Tivadar

Fázisváltó hőtároló anyagok előállítása
hulladék zsírból és használt növényi olajból 35
*Preparation of phase change materials from
waste fat and used vegetable oils
Herstellung von Phasenwechselmaterialien
aus Abfallfett und gebrauchtem Pflanzenöl*

Napenergia * Solar Energy * Sonnenenergie

Pirityi László, Németh Bence, Feczko Tivadar
A Thermofoam Kft. hullámkarton üzemének
szolár meghajtású kísérleti abszorpciós
hűtőrendszer 43

*Solar powered experimental absorption
cooling system of corrugated board
plant of Thermofoam Ltd
Das solarbetriebene experimentelle
Absorptionskühlsystem des
Wellpappenwerks der Thermofoam GmbH*

ETE Hírek * ETE News * ETE Nachrichten

Ignácz Elek
Bátaapátiban jártunk 46
*We have visited Bátaapáti
Wir haben Bátaapáti besucht*

Kevert és tiszta mikrobakultúrák alkalmazása a „Power-to-Gas” (P2G) technológiában

Szuhaj Márk, Wirth Roland, Bagi Zoltán, Kovács L. Kornél

Szegedi Tudományegyetem, Biotechnológiai Tanszék, kovacs.kornel@bio.u-szeged.hu

A „Power-to-Gas” technológia a biometán termelés lehetséges megvalósítása, amikor a metán szintézis mikrobakultúrák alkalmazásával valósul meg. A folyamat a hidrogenotróf metanogének anyagcserefolyamatain alapszik. A mikrobakultúrák a rendelkezésre álló H₂ oxidációja révén jutnak energiához, a folyamatban CO₂-ot redukálva CH₄ keletkezik. A szerzők a tiszta és kevert kultúrákat alkalmazó metanizációs folyamatok előnyeit és hátrányait mutatják be.

*

One of the possible implementations of the hydrogen to methane conversion in Power-to-Gas technology is when methane synthesis is realized using microbial cultures. The process is based on the biological activity of hydrogenotrophic methanogens. The microbial cultures get energy through the oxidation of available H₂, while CO₂ is reduced to form CH₄. The authors present the advantages and disadvantages of methanization processes using pure and mixed cultures.

Földünk népességének rohamos növekedése és a technológia fejlődése egyre nagyobb kihívásokkal szembesíti az energetikai ipart, amely sajnos a megnövekedett energia igényt továbbra is legnagyobb mennyiségben a fosszilis energiahordozók elégetésével fedezi. Földünk ezen forrásai limitáltak, a készletek újratermelődése évmilliókban mérhető, emiatt a könnyen kiaknázzható források kimerülésével világszerte a világpiaci ár rohamosan emelkedik. Emellett sokkal súlyosabb következményekkel is szembesül társadalmunk, hiszen a fosszilis energiahordozók elégetése során a légkörbe kerülő széndioxid (CO₂) és egyéb üvegházhatású gázok a Földünkön végbe menő klimatikus változásokat tovább gyorsítják, elsődleges kiváltója a globális klímaváltozásnak [1,2].

A klímakutatók áldozatos munkájának köszönhetően társadalmunk talán nem szembesült később a klímaváltozás prognosztizált veszélyeivel. A globális klímaváltozás lassítása érdekében egyre nagyobb figyelem szegődik a megújuló energiahordozókra (víz, szél, nap, geotermikus, biomassza). Az energiahordozókat egyre hatékonyabb technológiák segítségével tudjuk hasznosítani. Az új technológiák fejlődése és széleskörű terjedése napjainkban nem csak teljes régiók energiaszükségletét képes fedezni, de helyenként már a felhasznált mennyiségen felül keletkező energia gazdaságos tárolása, hasznosítása állítja a kihívások elé a kutatókat. A megújuló energiahordozók optimális felhasználási módját geográfiai viszonyok és környezeti paraméterek napi-, illetve szezonális ingadozásai befolyásolják. A villamos hálózatok nem alkalmasak a termelt „zöld áram” hosszabb idejű tárolására és ezen felül az ingadozó áram betáplálására is érzékenyek, így alternatív megoldásokra van szükség [1–5].

Ígéretes alternatíva lehet a „Power-to-Gas” („P2G”) technológia (1. 1), aminek során a fel nem használt villamos energia hasznosítása történik elektrolízissel. A víz elektrolízis folyamata jól ismert,

egyik termékeként keletkező oxigén (O₂) sokoldalúan hasznosítható értékes gáz. Az energia tárolás szempontjából érdekes másik termék a hidrogén (H₂), amely tisztasága és energiasűrűsége (122 kJ/g) miatt ígéretes alternatív energiahordozó [6,7]. H₂ hasznosítható üzemanyagként, vagy további alternatív energiahordozók előállítására. A közvetlen H₂ helyett alternatívákban való gondolkodás fő okai, hogy a H₂ tárolására és szállítására alkalmazott technológiák jelenlegi hatékonysága, kapacitása alacsony és drága [8,9]. Könnyebb kezelhetősége miatt kézenfekvő megoldást biztosít az energia tárolása metán (CH₄) formájában, hiszen szállítására és tárolására a meglévő földgáz hálózatok alkalmasak és az energiaraktározó képessége is jelentősen előnyösebb (36 MJ/m³) a H₂-nél (10,88 MJ/m³). A biometán (bioCH₄) mikrobiológiai úton állítható elő H₂-ből a biogáz fermentáló mikrobaközösség fontos részét képező hidrogenotróf metanogének segítségével [3,10].

A „Power-to-Gas” (P2G) technológia mikrobiológiai háttere és jelentősége

A biogáz fermentációja egy komplex-, egymásra hangolt anyagcsereláncolat eredménye. Ebben az anaerob környezetben változatos mikrobák szintrópus működése (2. ábra) révén keletkezik a szerves molekulák lebontása során a biogáz elegy (50-70% CH₄, 30-50% CO₂, 1-2%-nál alacsonyabb koncentrációban jelenlevő egyéb gázok) [12]. Ennek a közegnek fontos résztvevői a hidrogenotróf metanogének, amelyek a „zöld áramból” előállított H₂ átalakítását végzik és a kulcs komponensei a „P2G” technológiának.

A hidrogenotróf metanogének anyagcserefolyamataik során a rendelkezésre álló H₂ oxidációja révén jutnak energiához, aminek a melléktermékeként CO₂-ot redukálva CH₄ keletkezik (1. egyenlet).

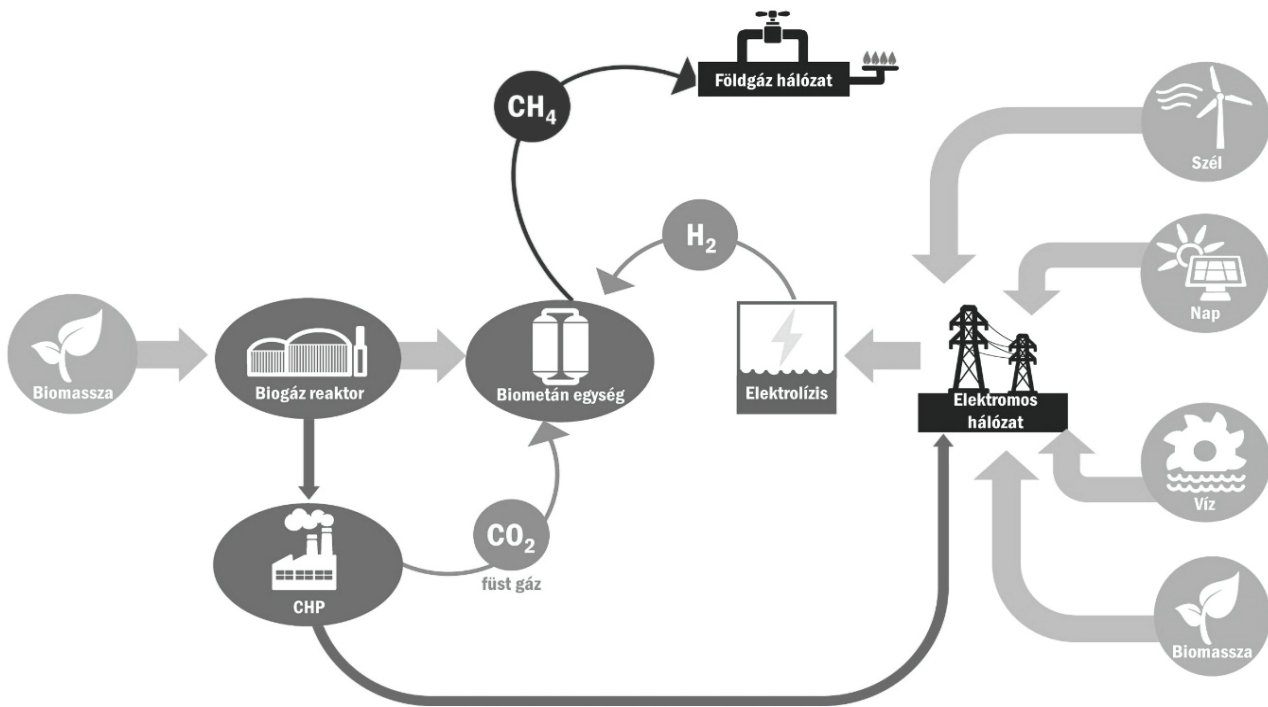


1. egyenlet: A hidrogenotróf metanogenezis és vele járó szabadenergia változás.



2. egyenlet: Az acetotróf metanogenezis és vele járó szabadenergia változás.

A hidrogenotróf metanogenezisnek nem csupán a CH₄ termelés szempontjából van elengedhetetlen szerepe, hanem a CO₂ redukciója révén „tisztítja” is a keletkező gázelegyet. A képződő bioCH₄ 95-98% feletti CH₄ tartalom mellett a földgáz hálózatokba vezethető, illetve jármű hajtóanyagként hasznosítható. A szerves savakat bontó mikrobák (acetotróf metanogének) aktivitása révén CO₂ is keletkezik a fermentáció során (2. egyenlet), ami környezeti és energetikai szempontból kevésbé kedvező. A H₂ elsődlegesen a természetes biogáz termelő rendszerekben a komplex szerves po-



1. ábra. A „P2G” technológia sematikus bemutatás [11]

limerek hidrolízise során szabadul fel, amely azonban nem csupán elektron forrásként szolgál a hidrogenotróf metanogének számára, hanem felhalmozódva gátló hatással bír a szerves sav hasító anyagcserefolyamatokra. A H₂ magas parciális nyomása 2 fő folyamatot akadályoz: a hosszú szénláncú szerves savak hasítását, valamint az acetotróf metanogenezist. A hidrogenotróf metanogének alacsony aktivitása vagy teljes hiánya magas H₂ parciális nyomást eredményez, ami gátló hatása révén hosszú-, rövid szénláncú szerves savak felhalmozódását váltja ki. A szerves savak magas koncentrációja veszélyezteti az érzékeny rendszer sav-bázis egyensúlyát, ami szintén a CH₄ termelés gátlását eredményezheti.

Figyelembe véve a mikrobiális anyagcsere hálózatban betöltött szerepe alapján a hidrogenotróf metanogének nem csupán nagy mennyiségű bioCH₄ előállításáért felelősek, de egy érzékeny és összetett szintrópus rendszer optimális működését is biztosítják.

A „Power-to-Gas” alapú kutatások, eljárások

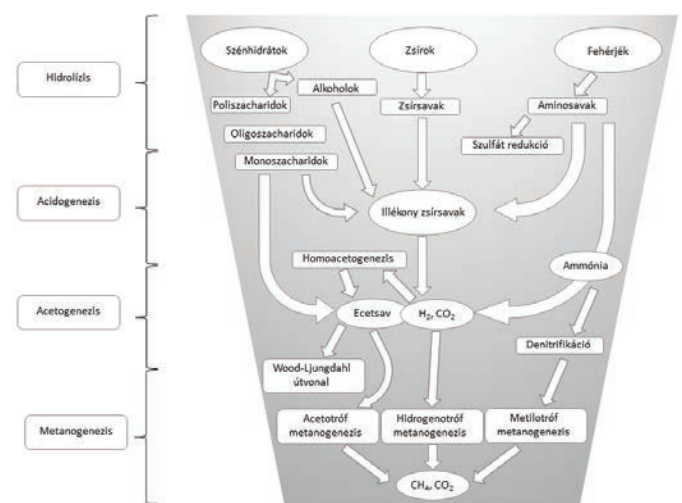
A „P2G” technológia nagy előnye, hogy biológiai úton is, hidrogenotróf metanogén mikrobákat alkalmazva tudunk megszabadulni a biogázban fő szennyezőként jelenlevő CO₂-tól. Ezek a mikroorganizmusok képesek a CO₂ CH₄-ná alakítani H₂ segítségével, amivel nem csak a keletkező gázelegy CH₄ tartalma növekszik, de a fő szennyező – a CO₂ – mennyiségét is csökkenti. Ezáltal nem csupán mennyiségi, de minőségi javuláson is keresztülmegy a fermentáció során keletkező gázelegy a „P2G” technológia során [13].

A biológiai úton történő „P2G” eljárás megvalósítható a mikrobák által előállított enzimek segítségével, vagy magukkal az élő mikrobákkal. Az enzimikus katalízis hatékonyabb, de az enzimek érzékenysége és aktivitás veszítése nehezebben kezelhetővé teszi a folyamatot. Az élő organizmusok által biztosított enzimikus és biokémiai komplexitás nagyobb stabilitást biztosít a rendszereknek. Mikrobák segítségével végzett „P2G” alapú kutatások, technológiák két csoportra oszthatók: a tiszta kultúrák, és a kevert mikroba közösségek segítségével végzett eljárásokra.

Tiszta kultúrákat alkalmazó technológiák

Napjaink széleskörű kutatásainak köszönhetően Földünk számos pontjáról sikerült már hidrogenotróf metanogén mikrobákat izolálni, azonosítani. Ezek tanulmányozásával, anyagcseréjük leírásával potenciálisan új törzsek kerülnek a figyelem fókuszába. Számos tanulmány számol be ígéretes eredményekről, melyek során tiszta metanogén kultúrákat alkalmaztak a H₂ és a CO₂ átalakítására CH₄-ná [14–16]. Ipari körülmények közötti hasznosításra az 1972-ben izolált *Methanobacterium thermoautotrophicus* a legjobb ma ismert hidrogenotróf törzs [17,18]. A törzset alkalmazó technológia a világ számos országában elterjedt már, így hazánkban is az *Electrochaeta* eljárás honosítása révén [15].

A tiszta kultúrákat alkalmazó technológiák előnye és egyben hátránya a kevert kultúrákkal szemben, a mikrobiológiai komplexitás hiánya. Mivel a CO₂ redukcióját H₂ segítségével egy törzs



2. ábra. A biogáz fermentáció vázlatos bemutatása

feldúsított kultúrája végzi így az anyagcsere folyamatok jól nyomon követhetők, könnyen szabályozhatók. A folyamat melléktermékeként egyéb gázok, toxikus melléktermékek nem keletkeznek, így a mikrobák gyakorlatilag tiszta bioCH₄-et állítanak elő. A mikrobiológiai diverzitás hiánya azonban bizonyos esetekben hátrányként is tekinthető, hiszen egy komplex közösség stabilitást biztosít a rendszernek. További nehézségeket okoz, hogy tiszta kultúrák fenntartása ipari körülmények között meglehetősen nehéz és költséges, megfelelő infrastruktúrát és szaktudást igényel. A tiszta kultúrák hosszútávú fenntartásához szükséges vitamin és nyomelem oldatok tovább növelik az üzemeltetési költségeket. Az ipari léptékű alkalmazás hátránya a hidrogenotróf metanogének viszonylag lassú szaporodása és alacsony sejtsűrűsége [19,20].

Kevert mikrobaközösséget alkalmazó technológiák

A kevert kultúrákkal végzett „P2G” alapú kutatások nagy számban találhatóak a releváns szakmai irodalomban [11, 21–29]. Ebben az esetben izolált, mikrobiológiailag tiszta hidrogenotróf törzs helyett biogáz fermentorból származó kevert mikrobaközösség segítségével történik a H₂ és CO₂ átalakítása CH₄-ná.

Kevert mikrobaközösség alkalmazásának legfőbb előnye a tiszta kultúrákkal szemben a könnyebb kezelhetősége. Mivel kevert közösségek végzik a H₂ és CO₂ átalakítást, így nincs szükség steril környezet fenntartására, ami az infrastruktúra kiépítésben és szakértettség tekintetében is könnyebbséget jelent. Ahogyan a tiszta kultúrák, úgy a kevert közösségek esetén is előnyként és hátrányként is felfogható a rendszerben található mikrobiális komplexitás. Előnye a komplex mikrobakonzorciumnak, hogy stabilitást biztosít a rendszernek, hiszen egy ennyire összetett közösség könnyebben képes adaptálódni változó körülményekhez, amely más esetben az anyagcsere folyamatok gátlását, leállását vetíthetné elő. Bizonyos megközelítésből azonban ez a mikrobiológiai komplexitás nehézségeket is eredményez, hiszen az anyagcsere folyamatok nehezen követhetők, szabályozásuk kihívást jelent. Ezen komplex közösség anyagcsere folyamatai során termelt metabolitok lehetnek kedvezőek (tápanyag-, nyomelem forrás) és hátrányosak (gátló metabolitok, szennyezők) a technológia szempontjából. Legnagyobb kihívást a „P2G” technológia szempontjából talán az jelenti, hogy a végtermékként keletkező gázelegy tisztasága versenyképes legyen a tiszta kultúrák, földgáz CH₄ tartalmával. Azonban számos kutatási eredmény bizonyította, hogy a közösség megfelelő adaptációjával elérhető a bioCH₄ 95% feletti tisztaságú gázelegy stabil termelése kevert kultúrák segítségével [11,22,25]. A komplex közösségből adódóan előfordulhat, hogy a rendelkezésre álló erőforrásokért kompetíció alakul ki. A kevert mikroba közösségekkel végzett „P2G” eljárásban kihasználható a metanogéneknek a szintrofikus együttműködésre irányuló igénye. A mikroba közösség jelentős átrendeződésen megy keresztül a „P2G” fermentációs körülmények szelekciós nyomása által kiváltott irányított evolúció folyamatában [30]. A biogáz termelő kevert mikrobaközösségekben elsősorban a hidrogenotróf metanogének és a homoacetogén baktériumok versengenek a rendelkezésre álló redukáló erőért. Energetikai szempontból a hidrogenotróf metanogének ($\Delta G^0 = -130,7$ kJ/mol) jóval előnyösebb anyagcsere révén hasznosítják a H₂-t, így mezofil és termofil körülmények között a homoacetogenezis ($\Delta G^0 = -55$ kJ/mol) termodinamikai hátrányban van a hidrogenotróf metanogenezissel szemben [31]. Gazdasági szempontból jóval kedvezőbb alternatívát kínál a kevert kultúrák alkalmazása a „P2G” technológiában. A hosszútávú működtetéshez nincs szükség a drága makro-, mikro-

és nyomelemek, valamint vitamin keverékek rendszeres adagolására, hiszen a fermentációs folyamatoknak nem csak szervesanyag tartalma magas, hanem igen gazdag a mikrobák számára essenciális vegyületekben [32]. Ipari, stratégiai szempontból is ígéretesebb megoldást biztosít a kevert kultúrák alkalmazása, hiszen a technológia léptékének növelésével a működtetési költségek kevésbé riasztóan emelkednek a nem-steril fermentációs technológiákban, így gazdasági megközelítésből jóval előnyösebb alternatívát biztosít a tiszta kultúrákat hasznosító technológiákkal szemben [13]. A hatásfok emelésében, a gazdaságosság javításában és fenntartható, stabil működés biztosításában komoly és ma még nagyrészt kiaknázatlan lehetőségeket kínál az optimálisan kialakított kevert mikroba közösség kifejlesztése és megfelelő mikrobiológiai kontroll mellett való alkalmazása [30].

Összegzés

A „P2G” technológia egy nagyon ígéretes megoldás a fel nem használt „zöld áram” gazdaságos tárolására és biztonságos szállítására a kiépített földgázhálózatok segítségével. A víz elektrolízise során előállított H₂, mikrobiális úton a hidrogenotróf metanogének segítségével egyszerűen és gazdaságosan alakítható át gyakorlatilag földgáz tisztaságú bioCH₄-ná, amelyet közvetlenül a földgázhálózatokba vezetés előtt csupán a potenciálisan szennyezőként jelenlévő vízgőztől és a kénhidrogéntől (H₂S) kell megtisztítani. Ezekre ismert és hatékony ipari technológiák állnak rendelkezésre.

A tiszta kultúrákat hasznosító eljárások előnye a könnyebb nyomon követhetőség, könnyebb szabályozás. Ellenben jóval drágább (makro-, mikro-, és nyomelemek, vitamin oldatok precíz adagolása szükséges), lépték növelhetősége limitált és a steril közösség fenntartás megfelelően képzett, szakavatott kezelést, költséges infrastruktúrát igényel. A kevert mikrobaközösség összetettsége révén stabilabb a változó, ingadozó környezeti paraméterekkel szemben, azonban az anyagcsere folyamatok nyomon követése, szabályozása kihívást jelent. Kevert mikroba közösségek, főként az un. irányított evolúcióval kifejlesztett mikrobiológiai rendszerek a tiszta kultúráknál olcsóbb megoldásokat kínálnak, a technológia ipari léptékben is egyszerűbben működtethető, gazdaságos technológia alakítható ki.

A „P2G” technológia megoldással szolgálhat a rohamosan fejlődő „zöld energia” szektor által előállított fluktuáló villamos energia gazdaságos tárolására.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az NKFIH 2020-3.1.2-ZFR-KVG-2020-00009, OTKA 143198-K és 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00117 projektek keretében elnyert támogatásért, valamint az egyéni kutatási projektek részleges támogatásáért.

Irodalomjegyzék

- [1] REN21, Renewables 2020 Global Status Report, 2020. <http://www.ren21.net/resources/publications/>.
- [2] S. Fawzy, A.I. Osman, J. Doran, D.W. Rooney, Strategies for mitigation of climate change: a review, Environ. Chem. Lett. 18 (2020) 2069–2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>.
- [3] M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, R. Reimert, T. Kolb, Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review, Renew. Energy. 85 (2016) 1371–1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>.

- [4] G. Pörzse, Z. Csedő, M. Zavarkó, Disruption potential assessment of the power-to-methane technology, *Energies*. 14 (2021) 1–21. <https://doi.org/10.3390/en14082297>.
- [5] M. Zavarkó, A.R. Imre, G. Pörzse, Z. Csedő, Past, present and near future: An overview of closed, running and planned biomethanation facilities in Europe, *Energies*. 14 (2021) 1–26. <https://doi.org/10.3390/en14185591>.
- [6] I.K. Kapdan, F. Kargi, Bio-hydrogen production from waste materials, *Enzyme Microb. Technol.* 38 (2006) 569–582. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.015>.
- [7] J.D. Holladay, J. Hu, D.L. King, Y. Wang, An overview of hydrogen production technologies, *Catal. Today*. 139 (2009) 244–260. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.08.039>.
- [8] S. Sharma, S.K. Ghoshal, Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 43 (2015) 1151–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>.
- [9] Z. Csedő, M. Zavarkó, B. Vaszkun, S. Koczás, Hydrogen Economy Development Opportunities by Inter-Organizational Digital Knowledge Networks, *Sustainability*. 13 (2021) 9194. <https://doi.org/10.3390/su13169194>.
- [10] L. Guerra, S. Rossi, J. Rodrigues, J. Gomes, J. Puna, M.T. Santos, Methane production by a combined Sabatier reaction/water electrolysis process, *J. Environ. Chem. Eng.* 6 (2018) 671–676. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.066>.
- [11] M. Szuhaj, N. Ács, R. Tengölics, A. Bodor, G. Rákhely, K.L. Kovács, Z. Bagi, Conversion of H₂ and CO₂ to CH₄ and acetate in fed-batch biogas reactors by mixed biogas community: A novel route for the power-to-gas concept, *Biotechnol. Biofuels*. 9 (2016). <https://doi.org/10.1186/s13068-016-0515-0>.
- [12] A. Schnurer, A. Jarvis, *Microbiology of the Biogas process*, 2018. ISBN: 978-91-576-9546-8
- [13] Z. Bai, A.; Balogh, P.; Nagy, A.; Csedő, Z.; Sinóros-Szabó, B.; Pintér, G.; Prajapati, S.K.; Singh, A.; Gabnai, Economic Evaluation of a 1MWe Capacity Power-to-Biomethane System, *Energies*. 16 (2023) 8009.
- [14] M. Thema, T. Weidlich, A. Kaul, A. Böllmann, H. Huber, A. Bellack, J. Karl, M. Sterner, Optimized biological CO₂-methanation with a pure culture of thermophilic methanogenic archaea in a trickle-bed reactor, *Bioresour. Technol.* 333 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125135>.
- [15] Electrochaea GmbH, Munich-based clean-tech startup Electrochaea and Hungarian utility MVM establish power-to-gas joint venture, (2016) 1–2. http://www.electrochaea.com/wp-content/uploads/2016/10/20161024_PI_Electrochaea_MVM_Joint_Venture.pdf.
- [16] M. Szuhaj, B. Kakuk, R. Wirth, G. Rákhely, K.L. Kovács, Z. Bagi, Regulation of the methanogenesis pathways by hydrogen at transcriptomic level in time, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 107 (2023) 6315–6324. <https://doi.org/10.1007/s00253-023-12700-3>.
- [17] M.R. Martin, J.J. Fornero, R. Stark, L. Mets, L.T. Angenent, A single-culture bioprocess of methanothermobacter thermotrophicus to upgrade digester biogas by CO₂-to-CH₄ conversion with H₂, *Archaea*. 2013 (2013). <https://doi.org/10.1155/2013/157529>.
- [18] J.G. Zeikus, R.S. Wolfe, Methanobacterium thermoautotrophicus sp. n., an anaerobic, autotrophic, extreme thermophile., *J. Bacteriol.* 109 (1972) 707–15. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4550816> (accessed July 5, 2017).
- [19] M. Lehner, R. Tichler, M. Koppe, *Power-to-Gas Technology and Business Models*, 2014. <http://www.springer.com/series/8903>.
- [20] S. Rönsch, J. Schneider, S. Matthischke, M. Schlüter, M. Götz, J. Lefebvre, P. Prabhakaran, S. Bajohr, Review on methanation - From fundamentals to current projects, *Fuel*. 166 (2016) 276–296. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.10.111>.
- [21] V. Corbellini, P.G. Kougiyas, L. Treu, I. Bassani, F. Malpei, I. Angelidaki, Hybrid biogas upgrading in a two-stage thermophilic reactor, *Energy Convers. Manag.* 168 (2018) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.074>.
- [22] I. Bassani, P.G. Kougiyas, L. Treu, I. Angelidaki, Biogas Upgrading via Hydrogenotrophic Methanogenesis in Two-Stage Continuous Stirred Tank Reactors at Mesophilic and Thermophilic Conditions, *Environ. Sci. Technol.* 49 (2015) 12585–12593. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03451>.
- [23] I. Bassani, P.G. Kougiyas, I. Angelidaki, In-situ biogas upgrading in thermophilic granular UASB reactor: key factors affecting the hydrogen mass transfer rate, *Bioresour. Technol.* 221 (2016) 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.083>.
- [24] B. Kakuk, R. Wirth, G. Maróti, M. Szuhaj, G. Rákhely, K. Laczi, K.L. Kovács, Z. Bagi, Early response of methanogenic archaea to H₂ as evaluated by metagenomics and metatranscriptomics, *Microb. Cell Fact.* 20 (2021) 1–18. <https://doi.org/10.1186/s12934-021-01618-y>.
- [25] M. Szuhaj, R. Wirth, Z. Bagi, G. Maróti, G. Rákhely, K.L. Kovács, Development of stable mixed microbiota for high yield power to methane conversion, *Energies*. 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14217336>.
- [26] D.G. Mulat, F. Mosbæk, A.J. Ward, D. Polag, M. Greule, F. Kessler, J.L. Nielsen, A. Feilberg, Exogenous addition of H₂ for an in situ biogas upgrading through biological reduction of carbon dioxide into methane, *Waste Manag.* 68 (2017) 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.054>.
- [27] R. Wahid, D.G. Mulat, J.C. Gaby, S.J. Horn, Effects of H₂:CO₂ ratio and H₂ supply fluctuation on methane content and microbial community composition during in-situ biological biogas upgrading, *Biotechnol. Biofuels*. 12 (2019) 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1443-6>.
- [28] G. Luo, S. Johansson, K. Boe, L. Xie, Q. Zhou, I. Angelidaki, Simultaneous hydrogen utilization and in situ biogas upgrading in an anaerobic reactor, *Biotechnol. Bioeng.* 109 (2012) 1088–1094. <https://doi.org/10.1002/bit.24360>.
- [29] G. Luo, I. Angelidaki, Hollow fiber membrane based H₂ diffusion for efficient in situ biogas upgrading in an anaerobic reactor, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 97 (2013) 3739–3744. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4811-3>.
- [30] N. Ács, M. Szuhaj, R. Wirth, Z. Bagi, G. Maróti, G. Rákhely, K.L. Kovács, Microbial Community Rearrangements in Power-to-Biomethane Reactors Employing Mesophilic Biogas Digestate, *Front. Energy Res.* 7 (2019) 1–15. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00132>.
- [31] V. Siritwongrunson, R.J. Zeng, I. Angelidaki, Homoacetogenesis as the alternative pathway for H₂ sink during thermophilic anaerobic degradation of butyrate under suppressed methanogenesis, *Water Res.* 41 (2007) 4204–4210. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.05.037>.
- [32] H. Feng, G.F. Qu, P. Ning, X.F. Xiong, L.J. Jia, Y.K. Shi, J. Zhang, The resource utilization of anaerobic fermentation residue, *Procedia Environ. Sci.* 11 (2011) 1092–1099. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.12.165>.

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 berendezés 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], űreszközökben [5-6], továbbá zajcsökkentés céljára is alkalmasak [4,7]. Mechanikai viselkedésük mellett termikus tulajdonságaik is jól hasznosíthatóak különböző műszaki problémák megoldására,

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 esetében különös tekintettel a porózus anyagokban gyakran megfigyelhető, a hagyományostól eltérő (nem-Fourier típusú) hővezetés [11] jelenségére. Az anyagtulajdonságok 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-modellt.

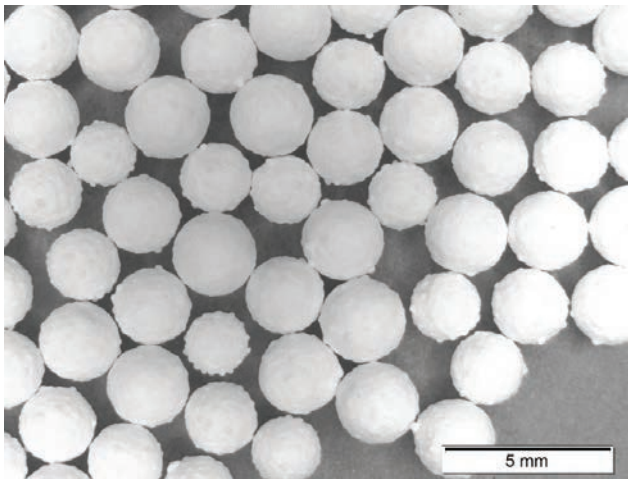
Fémhabok szerkezeti és mechanikai tulajdonságai

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 jelleget pedig a gömbhéjak és a fémmátrixba, erősítés céljából elhelyezett erősítő-részecskék adják.

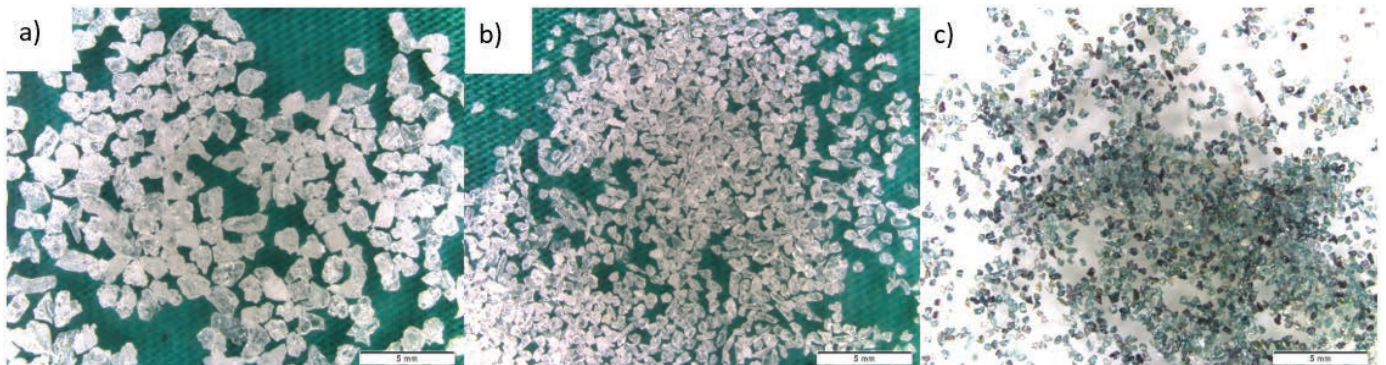
Fémhabok mátrixanyagaként általában kis sűrűségű, jó mechanikai és korróziós tulajdonságú, valamint a gyártásnál könnyen kezelhető fémeket használnak. Ezen kritériumoknak legjobban a különböző alumíniumötvözetek felelnek meg. Ezek miatt mi AlSi7Mg (A356) ötvözetű alumíniumot alkalmaztunk, a Si jelenléte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

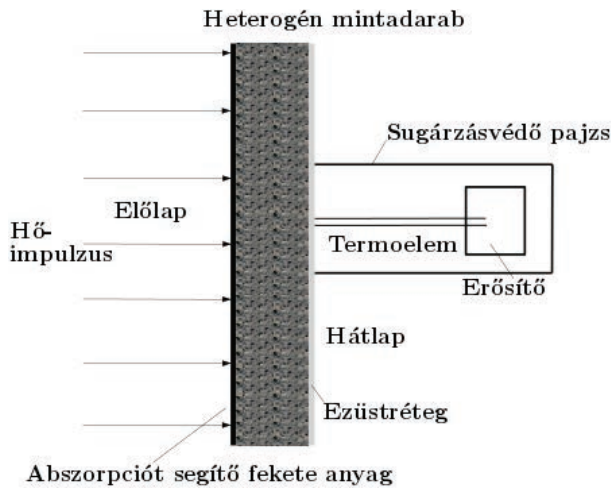
$$\sigma_c = 102,6 + 23,7d; R^2 = 0,981,$$

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

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

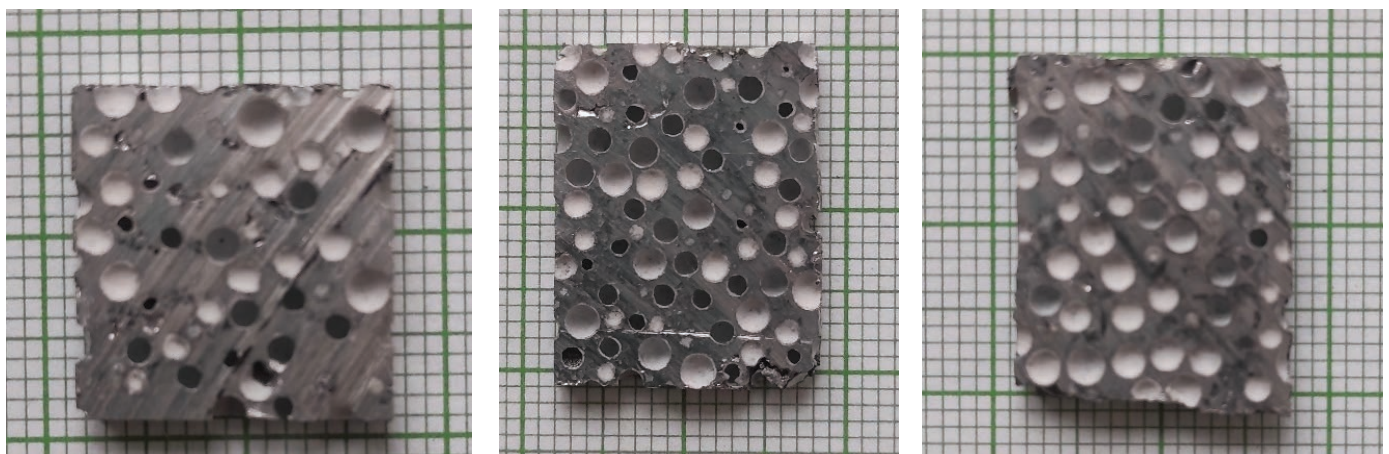
Termikus jellemzők meghatározása

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).

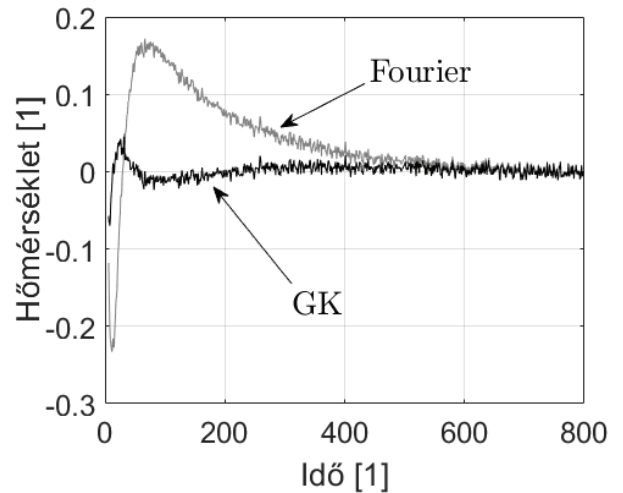
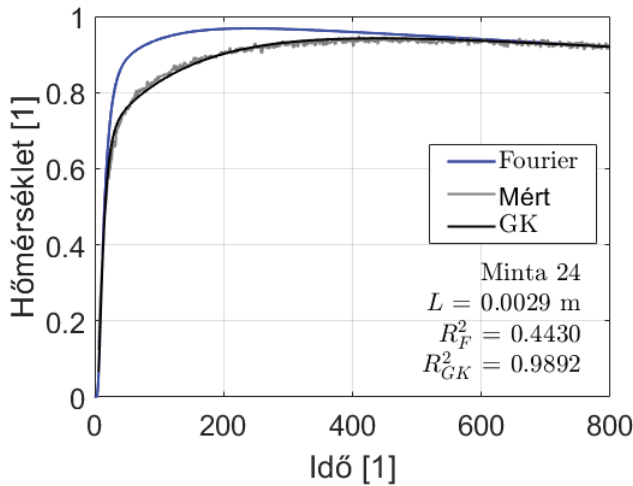
A rendszerben több időskála van jelen, ugyanis röviddel azután, hogy a hőimpulzus elnyelődik a próbatestben, majd eltűnik, és fokozatos természetes lehűlési szakasz következik. A Fourier-egyenlet használata nem feltétlenül illeszkedik megfelelően a hátsó oldal hőmérséklet-lefutásához, és az eltérés megakadályozza 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,

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

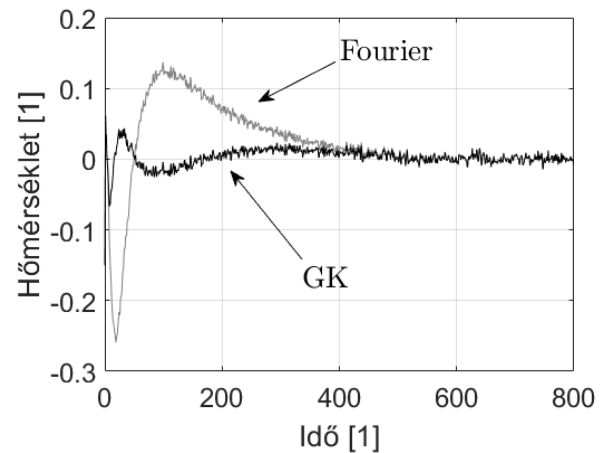
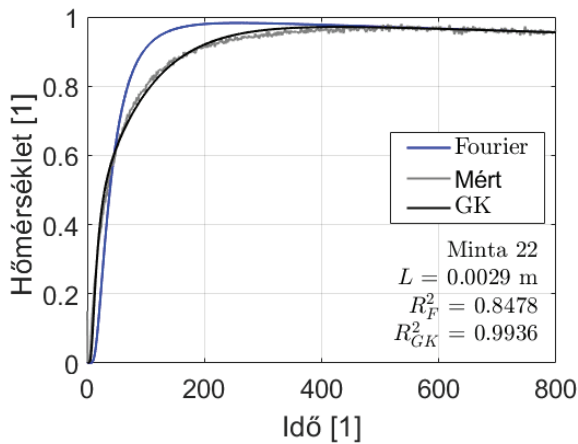
ami a Fourier-egyenletben használható effektív hőfokvezetési tényezőnek feleltethető meg. Itt α_{GK} a GK-egyenletben megjelenő hőfokvezetési tényező, ami definíciójában egyezik a klasszikus értelmezéssel, azaz a hővezetési tényező és a fajlagos hőkapacitás hányadosa. Az eltérés a Fourier és a GK modellek 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 paramétereit

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) tranzien viselkedésének előrejelzésére. Emiatt a két modell által adott lehülési szakaszok együttfutása egy megköthetként 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

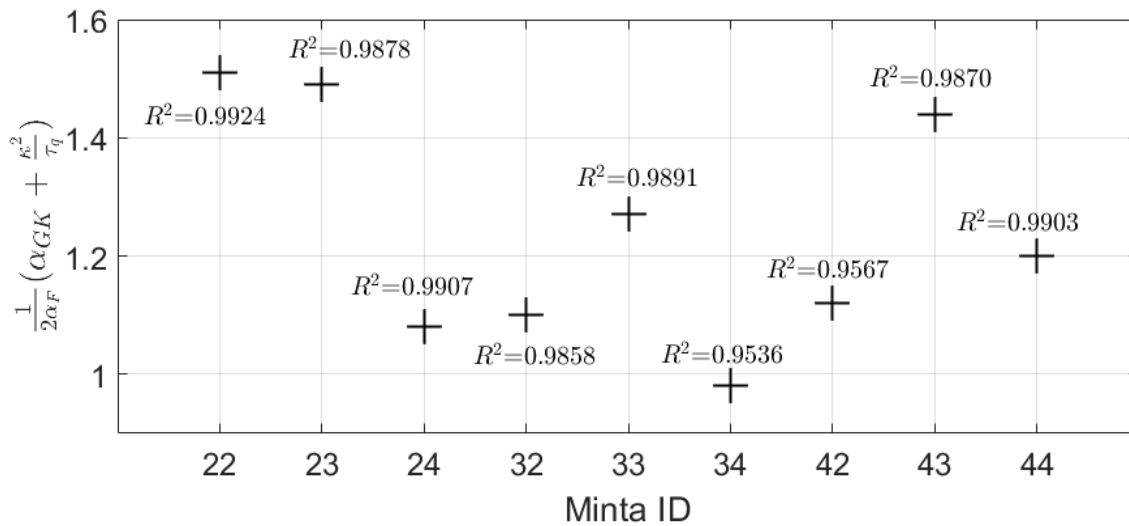
A fémhabbal és fázisváltó anyaggal töltött hőtároló koncepció hatékonyságának és előnyeinek meghatározásának, valamint a tervezést segítő szimulációk validálásának érdekében a berendezés, illetve a berendezésben lejátszódó folyamatok számszerűsítése szükséges. Az ipari körülmények között gyártott fémhabok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

zete csak statisztikusan jellemezhető, például porozitásukon és a fémátrixban 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 fémátrix (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 homogéne tölti ki a teljes térfogatot (ezáltal figyelmen kívül hagyva a fémátrixban 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

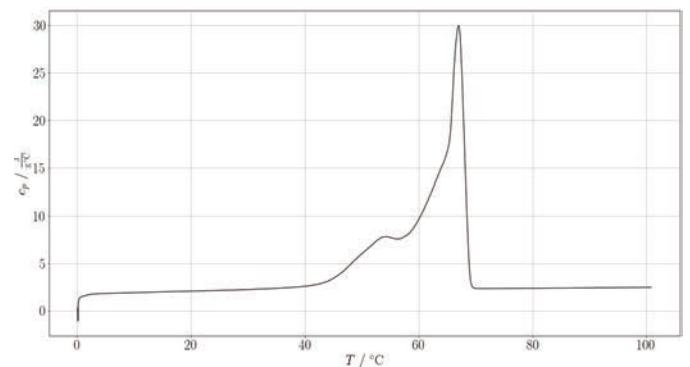
$$\rho c = \varepsilon \rho_{PCM} c_{PCM} + (1-\varepsilon) \rho_{MF} c_{MF},$$

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

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

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

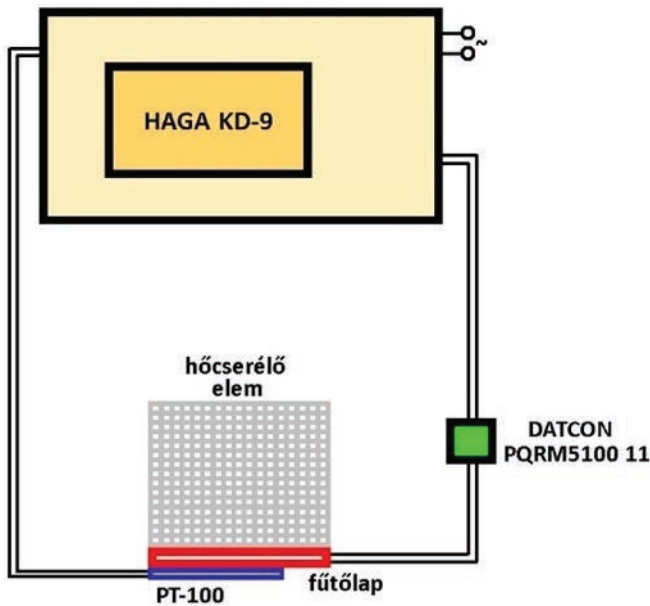
egyenletekkel írhatjuk le, ahol h egy hőátadási tényezőnek megfelelő jellemző, a pedig egy fajlagos hőátadó felület, ami az egységnyi térfogatban jelenlévő pórusok felülete, amit m^2/m^3 -ben mérünk. A két-hőmérsékletű modell előnye, hogy nincs szükség átlagos anyagjellemzők definiálására, a két közeg 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

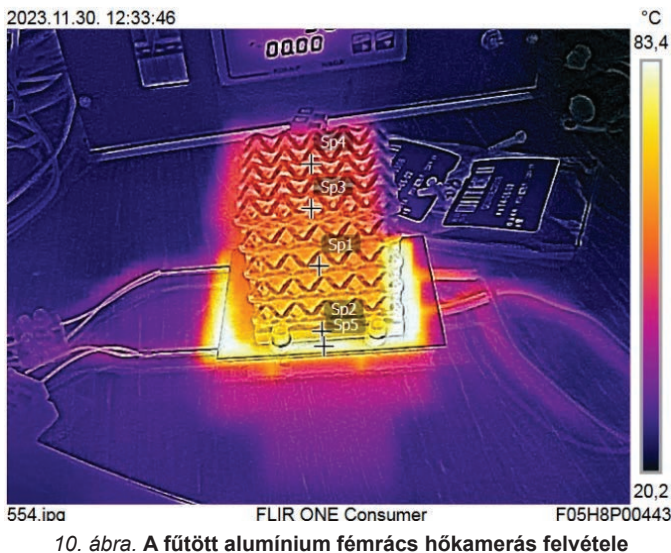
kenődésére, illetve termikus hiszterézisre (azaz, amikor az olvadási és fagyási hőmérséklet eltér) is számítanunk kell, ezeket szemlélteti a 8. ábra.

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 szolgáltat információkat 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.

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 valamekkora, 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 elvész, 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 hőtadó 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 hőtéljesítmény, 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 a 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	Nehéztvíz 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	Zöldségszárítás, gyapjúmosás és szárítás
		90	Intenzív fagymentesítés, épületek fűtése
		80	Üvegházak fűtése
		70	Háztartási melegvíz előállítása, élelmiszer-ipari felhasználások
Közvetlen fűtési célú hőhasznosítás	Hőszivattyús fűtés	60	Állattenyésztés
		50	Gombatermesztés, biomassa 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 lehet 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

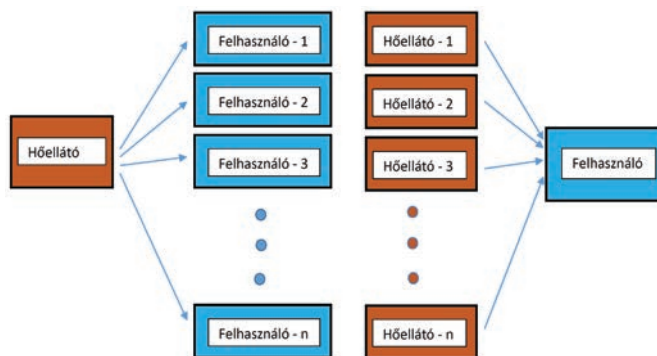
A mobil hőtárolás nem új ötlet; már generációkkal ezelőtt használtak például melegvizet palackot, amivel az ágyat fel lehetett melegíteni, de mobil hőtárolókról beszélhetünk a tárolt hővel működő járműveknél is, mint például az időnként még ma is használt tűzmentes mozdonyok [13]. Ilyeneket hazánkban 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, csővezetéken keresztül (általában víz hordozóközeget használva) biztosítják. A mobil hőtároló megoldást ez utóbbival érdemes összehasonlítani. Olyan esetekben lehet előnyös, ahol nem éri meg csővezeték 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 csővezeték 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+szupermarket) 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.

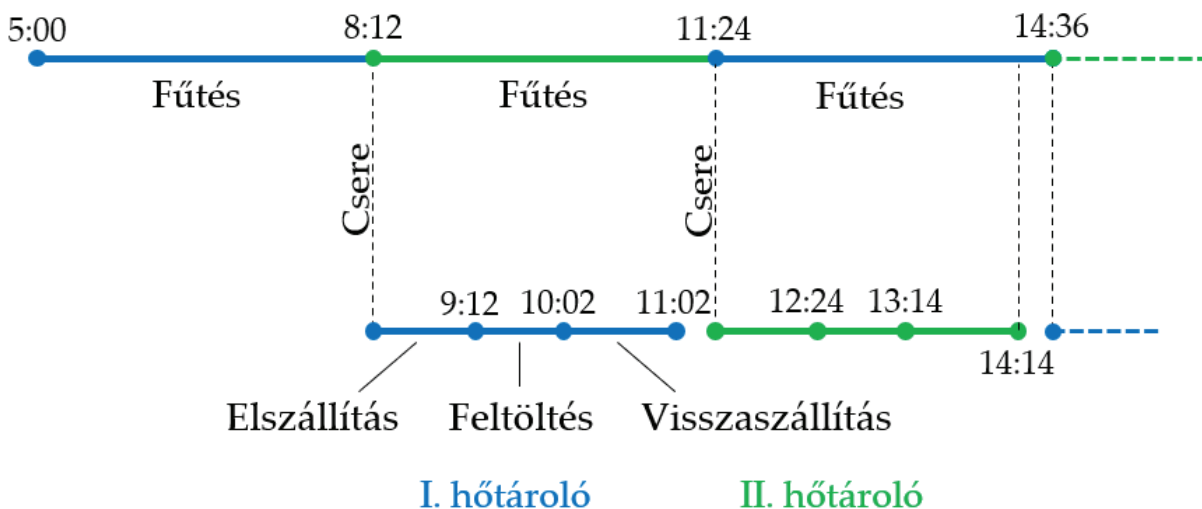
A rendelkezésre álló hőtéljesítmény, a hőtadás során jelentkező hőveszteségek, valamint az egyes hőtárolókra jellemző értékek figyelembevételével meghatároztuk a tárolók feltöltési idejét, ami a Sarawax esetén kb. 50 perc, míg az RT 70 HC esetén kb. 70 perc. Emellett a két pont közti távolság megtételéhez,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

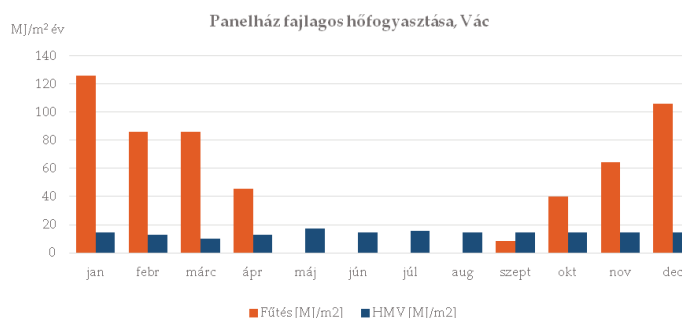
Mivel a rendelkezésre álló hő hőmérséklete 95 °C feletti, így a jelen esettanulmányban a kereskedelmi forgalomban elérhető anyagok közül az RT 90 HC paraffin alkalmazásával számoltunk, melynek olvadáspontja 90°C, olvadáshője pedig 170 kJ/kg [20]. Ebben az esetben az esetlegesebb magas hőmérsékletű igények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

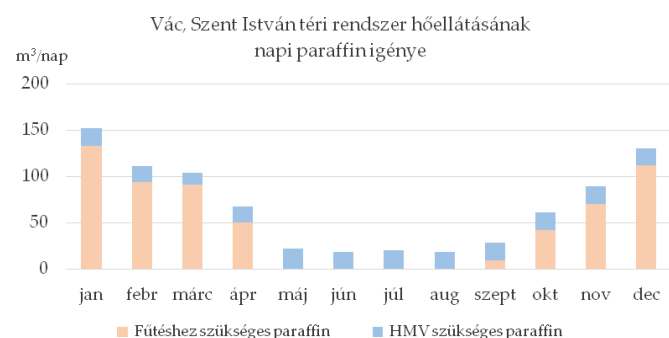
A Szent István téri rendszer hőigénye 4,1 TJ/év [24]. Ez ugyan csekély a város teljes igényéhez képest, de megfelelő egy ilyen típusú pilot projekt végrehajtásához és a kapcsolódó technológiák kiépíthetőségének, üzembiztonságának teszteléséhez. Emellett,

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 acéltipar 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 HMV 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.

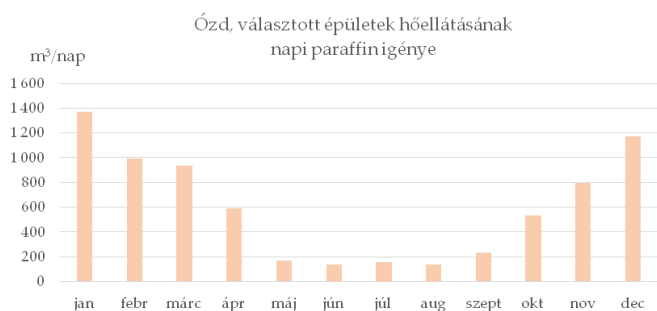
Ehhez Ózd városának térképét kellett elemezni (7. ábra), ami alapján elmondható, hogy az Acélművek a város észak-keleti szélén helyezkedik el, valamint, hogy a távhővel ellátott épületek jelentős számban vannak a városi vasútállomás környékén.



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 (egyét 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%2031-2016%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://iho.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=2ahUKEwiFruL4rPmHAXEhf0HHcO2FyIQFnoECBQQAQ&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://rhc.railcargo.com/hu/szolgáltatasaink/teherkocsi/berbeadas-es-ertesites/teherkocsitipusok/tartalykocsik>
- [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-feleslegből 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 tanszékkal 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 modell 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 hozzáadódnak 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 hővesztéségre.

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 energiatároló 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 ez-előtt 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.

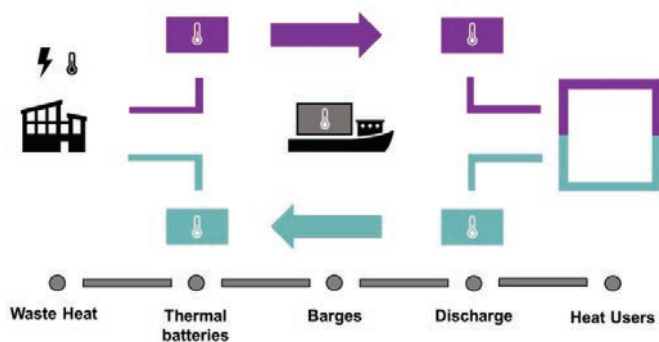
Mintaprojekt

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/>)

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.

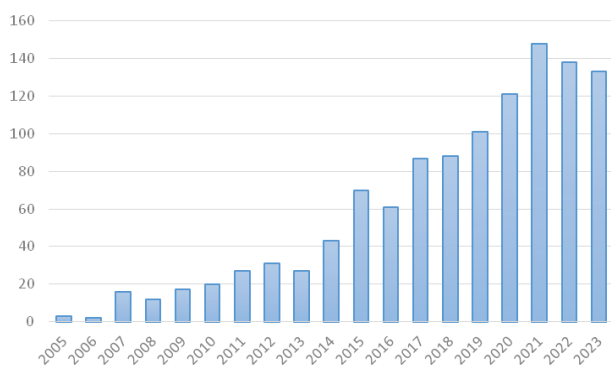
Anyag és módszer

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 nyitást 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 kontinensen található megvalósult példát, 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

- 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.
- Frosch, R.A.; Gallopoulos N.E. Strategies for Manufacturing. Scientific American 189 (3) 1989 152.
- McDonough, W. Braungart, M. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. North Point Press, 2002.
- Benyus, J. Biomimicry: Innovation Inspired by Nature. Harpel Perennial, 2002
- Pauli, G. The Blue Economy: 10 years – 100 innovations – 100 million jobs. Paradigm Publications, 2010
- 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)
- 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
- Katona, A.; Birkner, Z.; Péter, E.: Examining Digital Transformation Trends in Austrian and Hungarian Companies, SUSTAINABILITY 15 : 15 pp. 11891-1. Paper: 22 2023
- 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
- Chertow, M.R. INDUSTRIAL SYMBIOSIS: Literature and Taxonomy. Annu. Rev. Energy Environ. 2000. 25:313–37
- Chertow, M.R. "Uncovering" Industrial Symbiosis. Massachusetts Institute of Technology and Yale University Volume 11, Number 1 2007
- Neves, A.; Godina, R.; Azevedo, S. G.; Matias, J. C.O.: A comprehensive review of industrial symbiosis Journal of Cleaner Production 247 2020 119113
- 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)
- 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
- 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
- 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
- Oguntoye, O.; Geissdoerfer, M.; Nuwarinda, H.; Evans, S.: Facilitating industrial symbiosis programmes in developing countries: reflections from Gauteng, South Africa. Development in Practice. 2018
- Lowe, E.A: Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. Journal of Cleaner Production Volume 5, Number 1-2 1997

19. Côté, 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. Feiferyté-Skiriéné, 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.; Väiliso, 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.

Tézisek és szintézis, mint a globális hőmérsékletváltozás kutatás eredménye

Reményi Károly

MTA rendes tagja, kremnyi@gmail.com

A globális hőmérsékletváltozás és következményeinek széleskörű kutatása és elemzése során nyert eredmények és elemzések tézisszerű összefoglalását ismertetem. Szükségesnek tartom, hogy bizonyos alapfogalmak tisztázása és alap értékek elfogadása segítséget nyújtsanak a témával kapcsolatos konstruktív vélemény cseréhez.

*

I present a thesis-like summary of the results and analyzes obtained during the extensive research and analysis of global temperature change and its consequences. I consider it necessary that the clarification of certain basic values and the acceptance of basic values help to exchange constructive opinions on the subject.

Tézisek

1. A klímaváltozás evidencia
2. A szén-dioxid nem szennyezőanyag
3. A konszenzus nem tudományos érvelés
4. A hőmérséklet intenzív paraméter, így a meteorológiai állomásokon mért értékek összegzésének számtani átlagolásával nyert, globális hőmérsékletnek nevezett érték fizikailag nem értelmezhető.
5. A légköri rendszerben kaotikus folyamatok zajlanak, így a klíma változása is kaotikus jelenség, nem prognosztizálható.
6. A légkört alkotó gázok a közül a szén-dioxid mennyiség változása viszonylag gyorsan és a teljes légkörre kiterjedően érzékelhető. Ezért a számításokhoz kedvező paraméter.
7. A szén-dioxid változás és a globális hőmérsékletváltozás közötti korreláció nincsen tudományosan alátámasztva. A Vosztk jégfuratos módszerrel végzett mérések adatai, de az elmúlt száz év adatai alapján többézer éves, illetve több évtizedes ellentétesen változó szakaszokat mutatnak
8. A körülbelül százezeréves lehülési – felmelegedési ciklusoknál a lehülési szakasz lényegesen lassabb a felmelegedésénél.
9. A klímaváltozással kapcsolatos tevékenységet, ismeretterjesztést és intézkedéseket az IPCC uralja. E szervezet nem tudományos, bár az anyagaik kidolgozásában sok kutató is részt vesz. Az IPCC -n kívül világszerte számtalan kutatóhelyen folyik klímakutatás, modellezés.
10. A klímamodellezésnél bár mindig megjegyzik, hogy a klíma alakulásában igen sok tényező szerepet játszik, de végül mégis döntő szerepet tulajdonítanak a szén-dioxidnak. A szén-dioxid kibocsátás csökkentésének erőltetésével világméretben rossz irányba befolyásolták az energetikai fejlesztéseket és társadalmi méretű „klímastresszt” idéztek elő.
11. A modellekkel prognosztizált értékek lényegesen eltérnek a valóságban megvalósultaktól. Időszakonként jelentős korrekciókra kerül sor. A modellek részletei nem ismertek.
12. Az ismeretterjesztésnél megtévesztést is felhasználnak. Az erőművek és ipari létesítmények hűtőtornyainak gőzfelhőivel

hatásos kép készíthető a környezetszennyezésre. Hasonlóan szénhidrogén tüzelésnél a füstgázban lévő nedvességfelhő jól fényképezhető. A szén-dioxid összetevő nem szennyezőanyag.

13. De súlyos csalás is előfordult, amit igaz, jogtalan eszközökkel, sokezer e-mail meghekkelésével lepleztek le. Sajnos azonban a témában nem teljesen korrekt, irányított és „egyeztetett” eredmények is találhatóak. Egy ilyen eset a University of East Anglia kutatójához, Phil Joneshoz kötődik. A világ egyik meghatározó klímakutató központjaként számontartott, University of East Anglia számítógépes rendszereit feltörve, ismeretlenek közzétettek tizenhárom év alatt íródott több ezer, visszaélést sejtető e-mailt és egyéb dokumentumot. Az iratok szerzői között megtalálhatóak néhányan a világ legismertebb klímatudósai közül is, akik részt vettek például az ENSZ 2007-ben lezárult nagyszabású kutatásában.

A szerző téziseket alátámasztó cikkeinek szemelvényei

Az energiastratégia sarokpontjai

Magyar Tudomány 170. évf. (2009.) 3. sz. 323. oldal

A szén-dioxid-kibocsátás hatása a klíma felmelegedésre véleményem szerint a korábban közölt egyszerűsített számításokkal alátámasztva erősen eltúlzott. Csupán egy paraméterhez (nevezetesen a szén-dioxidhoz), a gyakorlat szerint alkalmazott szoros kötés erősségét, *horribile dictu* korrelációját vitatom. Az erre alapozott politikai, technikai, gazdasági intézkedések indokolatlan, túlzott terhet jelentenek a társadalom számára.

A konszenzus és az evidencia nem tudományos érv (A fosszilis tüzelőanyagok és a globálisfelmelegedés)

Magyar Tudomány 171. évf. (2010.) 1. sz. 44. oldal

A Föld hőmérsékletei – Miről is beszélünk?

Magyar Tudomány 171. évf. (2010.) 9. sz. 1052. oldal

A helyhez kapcsolódó információk jelentősége ... Sajnos a bonyolult éghajlati modellek elég nagyvonalúan határozzák meg az eredményeket, és saját függvényeik szerint számolják ki a többfokos változásokat, valamint konszenzussal állapodnak meg valamilyen középértékben. Bár a 2007-es IPCC-jelentés próbál javítani a korábban kifogásolható átlagoláson, de az alkalmazások még e módszert követik. Az állítások a modelleredmények teljes szórásának határait vagy pedig valamilyen megbízhatósági intervallumát adják meg eredményként (Például IPCC WG-I, 2007, 749., 2. hasáb teteje). A konszenzus nem nevezhető tudományosnak.

A szén-dioxid szerepe a klímaváltozásban

Magyar Tudomány 172. évf. (2011.) 3. sz. 354. oldal

Elméleti és mérési adatok alapos elemzésével a tudományos világ meghatározóan jelentős része, szigorúan tudományos szempontok alapján nem látja lehetségesnek, hogy az emberi társadalom léteéhez kapcsolódó CO₂ a klímaváltozás folyamatára befolyást gyakoroljon. A CO₂-csökkentésre alapozott energetikai tervezés erő-

tetése elhibázott. Azok az érvek, amelyek szerint kedvező hatása volt az energiagazdálkodásra, nem fogadhatók el, mert helytelen energiaforrás-elosztási arányok kialakulásához vezet. A karbon a környezetben nem szennyezőanyag, hanem az életfolyamatok mindegyikének szerves része.

A tudomány az etika határán az energetikai környezetszennyezés bemutatásakor (néhány „médiatudós” figyelmébe)

Magyar Tudomány 172. évf. (2011.) 8. sz. 1006-1009. oldal

A fosszilis tüzelésű erőművekből, bár nem látható, de kétségtelenül fajlagosan a legnagyobb mennyiségű a szén-dioxid-kibocsátás, ez tény. A szén azonban nem szennyezőanyag, az élet alapját szolgáló szén ciklus része. Szerepéről egyre világosabb képet kapunk.

Arrheniustól indult, és ...

Magyar Tudomány 173. évf. (2012.) 10. sz. 1217-1223. oldal

A CO₂ szerepének elméleti számításaihoz globális mértékű, mérésekkel is alátámaszthatóan használható adatok a következők • napsugárzás a légkör határán (napállandó), • a légkör tömege és összetétele, • a CO₂ abszorpció tényezője, • a gázon áthaladó sugárzás gyengülésének egyenlete. Az adatokból a légkör felső határára, a termikus egyensúly meghatározásához egy egyensúlyi hőmérsékletérték megfelelő közelítéssel számítható. A gázösszetétel változása okozta sugárzásgyengülés fokozódása miatt szükséges földközeli hőmérséklet-növekedés globális hőmérséklet-változási adatként kezelhető.

Én azonban nem a klímához szólok hozzá, nem vitatom a CO₂ fontos szerepét, csupán a fizika, kémia és biológia alapegyenleteiből az energetikát, hőtant, termodinamikát leírókat használva kísérlem meg a CO₂-t a szennyező anyagok közül kimenteni, az igaztalan vádak alól felmenteni. A szén-dioxid nem szennyezőanyag. Ezt tudományos érvek alapján és alapegyenleteket használva próbálom elérni, és nem a számos, átgondolatlan, kudarcot vallott, teljesíthetetlen elképzelés „eredményeivel” példálózva.

Globális lehűlés, globális felmelegedés, szén-dioxid

Magyar Tudomány 174. évf. (2014.) 9.sz. 1105-1116. oldal

A globális felmelegedésnél (hőmérsékletváltozás) egy intenzív mennyiség (hőmérséklet) megváltozásáról beszélünk, ez a folyamatok legfontosabb jellemzője. Bár egyértelmű, hogy hiányzik a globális hőmérséklet mérésekkel is alátámasztott meghatározása, a kutatásokban a végeredményt a szén-dioxid (vagy üvegházgázok) és a globális hőmérséklet közötti kapcsolattal szemléltetik. Az eddigi ábrák azt mutatták, hogy ez a szoros kapcsolat sem a régmúltban, sem a közelmúltban nem igazolható. A CO₂ a légkör egyik komponense, súlyos hiba ennek és a globális hőmérsékletváltozás értékének ilyen függvényes ábrázolása.

A szén-dioxid-adó torzító hatása az energetikában

Magyar Tudomány 176. évf. (2015.) 6.sz. 694-702. oldal

A szén-dioxid nem szennyezőanyag. Különösen bántóak azok az erőműi „környezetszennyezést” bemutató fényképek, amelyek a hűtőtornyokból (illetve kéményekből) kiáramló gőz látványával igazolják a nagymértékű „szennyezést”. Sajnos ilyen képek rendkívül elterjedtek mind a tudományos, mind a népszerűsítő médiában

Egyszerű módszerek a légköri szén-dioxid-koncentrációváltozás hatásának elemzésére

Magyar Tudomány 177. évf. 7. sz. (2016.) 842-850. oldal

Véleményem szerint e közelítő módszerek pontossága elegendő az elméletileg megfelelő definícióval és méréssel még vitathatóan alátámasztott globális hőmérséklet-változásban a szén-dioxid szerepének meghatározására. A konszenzus nem tudományos módszer. A klímaváltozás evidencia. A médiával túltámogatott pánikkeltés helyett helyesebb lenne az igen mélyreható kutatási eredményeket reális lehetőségekre hasznosítani.

A CO₂ nem a RÉMKIRÁLY

Magyar Energetika 2011. február

A tudományos megállapításokat ne konszenzussal, hanem érvekkel támasszuk alá. A közölt kutatásaimmal meg szeretném mutatni, hogy a CO₂-t elsődleges paraméterként felelőssé tenni a klíma alakulásáért tudományosan nem indokolt. Elismerve a szén-dioxid tényleges szerepét a hőenergetikai viszonyok alakulásában, egyszerű fizikai számításokkal pontosabban meg lehet közelíteni, mint bonyolult, a teljes, átfogó földi rendszert modellező számításokkal.

Párizsi megállapodás az USA nélkül

ENERGIAGAZDÁLKODÁS 58. évf. 2017. 4-5. szám

Korábbi munkáimban alapjaiban bíráltam a globális hőmérséklet értelmezését, mérését és a mérések feldolgozását. A klímát, az időjárást démonizálják, vallássá alakult. A Párizsi Egyezmény különböző változatainak összehasonlításához (pl. a Párizsi Egyezmény USA nélkül), azonban csak az irodalomban található adatokat tudom korábbi felhasználni.

Összefoglalva, a nemzetközi irodalomban található és fórumokon elhangzó értékek erősen eltúlzott mértékű felmelegedést prognosztizálnak a jelenlegi szén-dioxid változási trend alapján. A tényadatokból alkotott képletemet használva, ez a trend lényegesen mérsékeltebb változást eredményez. Az USA kilépése a Párizsi Egyezményből, az előzőleg vállalt szén-dioxid kibocsátás csökkentésének elmaradása 0,1-0,15 °C többlet hőmérsékletemelkedést eredményez.

Üvegházhatás, káosz, globális felmelegedés

Energiagazdálkodás. 2018. 6. szám

Természetesen a klímaváltozás evidenciájához nem fér kétség, vitatkozni csak az okokról és mértékéről lehet. Legsajnálatosabb a tudomány megosztottsága, amely ebben az esetben nem tudományos vitákat és véleménykülönbségeket jelent, hanem úgynevezett „konszenzus” alapján, megtévesztően, a tudósok többségének ki-nevezte magát a hangadó, az emberi hatást eltúlzó csoport. Ezért bemutatunk néhányat a jelentősen eltérő, mértékadó véleményekből. Bár jómagam, a jelen állapotban a „globális hőmérsékletnek” nevezett jellemzőnek az elméleti megfogalmazását is, és a mérési eredményeknek a feldolgozását is problémásnak tartom, továbbá fizikailag megalapozott használhatóságát is megkérdőjelezem, mégis a rendelkezésre álló irodalmat és mérési adatokat felhasználva alapvető problémákat mutatok be.

A káoszelmélet olyan egyszerű nemlineáris dinamikai rendszerekkel foglalkozik, amelyek viselkedése az őket meghatározó determinisztikus törvényszerűségek ellenére, a törvényszerűségekkel nem jelezhető hosszú időre előre. Az időjárás tehát kaotikus, mert szabadon változhat, az éghajlati változás jellemzőit azonban bizonyos szakaszokban adott fizikai törvények határozzák meg. Az éghajlati rendszer egy összekapcsolt nemlineáris kaotikus rendszer, ezért a jövőbeni éghajlati állapotok hosszú távú előrejelzése nem

lehetséges [11], [12]. A modellek bármennyire javulnak, az összes bizonytalanság marad a rendszer kaotikus jellege miatt. Az El Niño-viselkedés változatossága, évtizedekig és évszázadokig, bizonyítja a rendszer alapvetően kaotikus természetét, amelyet megpróbálunk megjósolni.

Gondolatok a globális hőmérsékletéről

Energiagazdálkodás 2016. 3-4. szám

„Az intenzív mennyiségek a tér egy pontjához rendelkeznek számot. Ilyen mennyiség például a hőmérséklet, a nyomás, a kémiai potenciál.”...

A paraméterek között a hőmérséklet és a környezet (pl. a levegő összetétele) kiemelt szerepet játszanak. Ez azt jelenti, hogy egyen-súlyi esetre a globális átlagolást, a folyamatoknak és a tömegarány-nak megfelelő súlyozással kellene elvégezni.

Az extenzív mennyiségek összege és átlaga fizikailag értelmes adatot szolgáltat, míg az intenzív adatok összege értelmetlen. Ha értelmetlen adattal valamilyen műveletet végzünk, pl. osztást, az eredmény is általában fizikailag értelmezhetetlen lesz.

A Föld történelmében melegedési, vagy lehülési szakaszok-ról lehet beszélni, de egy globális hőmérséklet érték általában az egyes időszakokhoz nem rendelhető.

A földi globális hőmérséklet értékkel kapcsolatos elméleti problémák mellett a definícióval és a mérésekkel is súlyos problémák adódnak.

k. A Föld korábbi jellemző hőmérsékleteinek megállapítására, a rendelkezésre álló kutatási technikák közül leginkább jégfuratok-ból kapott értékek használatosak. A hőmérsékletváltozás hajtóere-jeként leggyakrabban a szén-dioxidkoncentráció változását jelölik meg. A Vostok mérésekben olyan több-ezer éves szakaszok is találhatóak, amikor a két paraméter változásának jellege azonban ellentétes.

IPCC prognózisok és tényadatok

Energiagazdálkodás. 2015. 5-6. szám

Az Éghajlat-változási Kormányközi Testületet (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1988-ban a Meteorológiai Világszervezet (WMO) és az ENSZ Környezetvédelmi Program (UNEP) keretében hozták létre, hogy a rendelkezésre álló tudományos információk, értékelések felhasználásával elemezzék az éghajlatváltozást be-folyásoló tényezőket és az éghajlatváltozás hatásait... A klímavál-tozással kapcsolatosan előtérbe a „globális” felmelegedés került, amely egyesek szerint elsősorban az emberi tevékenység (az ún. üvegházgázok, különösen a szén-dioxid) következtében ért el jelentős értéket

Korábban a szén-dioxid-koncentráció és a globális hőmérséklet között korrelációról beszéltek... Ez a CO₂-koncentráció és a globális hőmérséklet változásakor nem igazolható. Számos időszak-szban tény az ellentétes irányú változás. A klímaváltozás evidencia. Helyesebbek azok a törekvések, amelyek a kedvezőtlen hatások-hoz való alkalmazkodást segítik elő.

Szén-dioxid Pandémia

Energiagazdálkodás. 2021. 6. szám

A globális hőmérséklet fogalmára bár definíció létezik, a valóságban ez is sok sebből vérzik. Elméleti probléma, hogy noha a hőmér-séklet intenzív paraméter, a globális hőmérséklet gyakorlati ellen-őrzésére alkalmazott módszer során, a világ sok ezer laboratóri-umában mért érték feldolgozásakor számtani összeadást végezve,

átlagolással nyerik a globális hőmérséklet értékét. Ennek így nincs fizikai tartalma, és semmilyen folyamatban sem használható para-méterként. Ugyanakkor nem csak a használt globális hőmérséklet fizikailag megalapozott használhatóságát kérdőjelezem meg, de további problémákat is felvetek, felhasználva a rendelkezésre álló irodalmat és mérési adatokat. Azért osztom meg kételyeimet, mert a 2021. évi megosztott fizikai Nobel Díjban két kutató tevékenysé-ge szorosan a klímamodellezéshez kapcsolódik. Közel ötven év-vel ezelőtti munkájuk képezte az alapot az elismeréshez. Az indok: Syukuro Manabe és Klaus Hasselmann: „a globális felmelegedés megbízható előrejelzését és mennyiségi variabilitását leíró modell készítéséért a Föld klímájáról”. A Föld klímáját számtalan paramé-ter és kölcsönhatás befolyásolja, de végső soron a klímát elemzők mindig a globális hőmérséklet változásánál és a szén-dioxid szere-pénél kötnek ki. Lényegesen felértékelik a szén-dioxid szerepe, az energetikában világméretű változásokat kiváltva.

Globális hőmérséklet és a szén-dioxid (a tényeket ismerni kell)

Energiagazdálkodás. 2023. 4-5. szám

A klíma kutatás rendkívül fontos. A probléma a kutatási eredmények nem megfelelő, vagy tudatos félre magyarázásával van. Ez tapasztalható az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), AR (Assessment Report) és FAR (First Assessment Report) jelentéseibe-n, a legutóbbi AR6-ban is.

A légkör globális felmelegedéseért a különböző kutatások és szervezetek jelentős mértékben az ipar, a közlekedés és az ener-getikában felhasznált fosszilis tüzelőanyagokból származó szén-di-oxidot okolják. A fosszilis tüzelésű erőművekből, bár nem látható, de kétségkívül fajlagosan nagyobb mennyiségű a szén-dioxid-kibocsá-tás, ez tény. A szén azonban nem szennyezőanyag, az élet alap-ját szolgáló szén-ciklus része. Szerepéről egyre világosabb képet kapunk. A klímaváltozással kapcsolatosan előtérbe a „globális” fel-melegedés került, amely egyesek szerint elsősorban az emberi te-vékenység (az ún. üvegházgázok, különösen a szén-dioxid) követ-keztében ért el jelentős mértéket. A szén-dioxid kitüntetett szerepét a fizikakémia törvényeivel elég jó számíthatóságának köszönheti, mert az egyéb tényezők hatásának számítása még inkább bizony-talan. A légköri paraméterek közül globális mértékben leginkább a szén-dioxidkoncentráció határozható meg (talán ezért választották a felmelegedés indoklásának legfontosabb tényezőjévé). A karbon-ciklus leglényegesebb szakaszát az élővilágban találjuk. A szén mind a növényi, mind az állati és emberi test tömegének meghatá-rozó része. A karbon a környezetben nem szennyezőanyag, hanem az életfolyamatok mindegyikének szerves része. A következőkben időrendben áttekintjük az eddig elfogadott tényeken alapuló kuta-tások alapján található problémákat, amelyek a szén-dioxid és a globálisnak nevezett hőmérséklet kapcsolatában szingularitásokat mutatva nem csak a korrelációt, de az ok-okozati összefüggést is cáfolják.

Az utóbbi néhány százézer évben kb. 100 000 éves periodicitás tapasztalható. A lehülés 90 000 év alatt, sok lépcsőben ment végbe, a felmelegedés pedig mindössze 10 000 év alatt

Összefoglalva tehát, a különböző korokból rendelkezésre álló adatokat felhasználva megállapítható, hogy a szén-dioxid és a globális hőmérsékletváltozás közötti ok-okozati kapcsolat szinte mindig kisebb-nagyobb (esetleg ezer évekre) időszakokra megbi-csaklik. Leghelyesebb a klíma kaotikus változásaira felkészülni és alkalmazkodni, a klímakutatást pedig a jelenségek minél mélyebb megismerésére fordítani.

A biomassza felhasználása energiatermelésre

Szilágyi Zsombor

mérnök; drszilagyzsombor@freemail.hu

2023. évben a hazai energiatermelés és felhasználás kismértékben csökkent, a klímaváltozás és a hazai ipari termelés alakulása miatt. A megújuló energiaforrások közül a napenergia hasznosításban nagyot léptünk előre, de a többi megújuló szerepe nem erősödött. A hazai megújuló energiaforrás felhasználásában a biomassza felhasználás alacsony szintű, az adottságokat alig használjuk ki. Az Európai Unió élen jár a megújuló energiaforrások fokozottabb használatában, ezzel a légkör védelemben is példát mutat.

*

The domestic energy production and consumption slightly decreased, due to climate change and the moderation of domestic industrial production in 2023. We have made great progress in solar energy utilization among renewable energy sources, but the role of other renewables has not strengthened. Biomass use in domestic renewable energy use is low, and we hardly use the capabilities. The European Union is at the forefront of increasing utilization of renewable energy sources, thus setting an example in protecting the atmosphere.

Magyarország lényeges megújuló energia felhasználás fejlesztési programokat indított. Kiemelkedő a napenergia hasznosítása, de a többi megújuló energiaforrás használata is kap különböző támogatásokat. A megújuló energiaforrásokat hőtermelésre és villamos áram előállítására használjuk elsősorban.

2023-ban a hazai megújuló energiatermelés 145 894 TJ szintet ért el: ebből éghető megújuló volt 109 789 TJ. A gyorsan növekvő megújuló hasznosítás a napenergia területén 2023-ban 25 792 TJ volt [2].

Hazánkban a megújuló biomassza mennyisége szárazanyagban kifejezve évi 55-58 millió tonna [3]. Energetikai célra hasznosítható 6-8 millió tonna, a 25-26 millió tonna mezőgazdasági és az 1-2 millió tonna erdőgazdasági melléktermékből. A nagyobb arányú hasznosításhoz megfelelő ökológiai, gazdasági és műszaki feltételek szükségesek. Az energetikai célra hasznosítható 6-8 millió tonna biomassza energia tartalma 17-23 TWh. Az energia mérlegben a tűzifa 3,5-5,8 TWh, az egyéb biomassza kb. 1,2 TWh energia tartalommal szerepel.

Az országban kb. 7,3 millió hektár termőterület van, ebből mezőgazdasági művelés alatt áll kb. 5 millió hektár [4].

A biomassza a biológiai úton létrejövő szerves anyag tömeg. A fotoszintézis során a zöld növények a Napsugárzás energiáját szerves vegyületek formájában halmozják fel, amelyet elsődleges biomassza anyagnak nevezünk. A biomassza az ökoszisztémában egy adott időpontban meghatározott mennyiségű szervezetet jelent: a fitomassza (növények), zoomassza (állatok) és egyéb élőlények tömegének összege.

A biomassza általában rövid életciklusban újra termelődik, ezzel bányászható tüzelőanyagokat tud kiváltani. A keletkező biomasszában kb. 50 % szén van, ami miatt a biomassza energetikai célú hasznosítása az utóbbi időben nagyobb hangsúlyt kapott. A biomassza ugyanakkor elsősorban élelem, takarmány, ipari alap-

anyag, tápanyag a mezőgazdasági termelésben, és csak ezt követi az energetikai hasznosítás.

A biomassza szokásos csoportosítása:

- szilárd: tűzifa, fűrészszerű hulladék, szalma, energiafű
- elgázosítható biomassza: cukor tartalmú növényi hulladék, egyéb zöld növényi hulladék, állati trágya, lakossági és kommunális hulladék, vágóhídi hulladék, éttermi hulladék
- gépjármű üzemanyagok: biodízel és bioetanol

A biomassza energetikai hasznosításával fosszilis tüzelőanyagot lehet kiváltani, kihasználható az a megállapítás, hogy a biomassza elégetése során keletkező és a légkörbe kerülő szén-dioxid mennyisége megegyezik az eltűzelt szerves anyag keletkezése során megkötött szén-dioxid mennyiségével. (Célszerű megjegyezni, hogy a légköri szén-dioxid mennyisége ezzel nem csökken.)

Biomassza és hulladék

Hazánkban az energetikai célra felhasznált biomassza mennyiség alakulását 2022-23 évben az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Hazai energetikai célra felhasznált biomassza mennyiség, [4]

Biomassza fajta	2022	2023
	ezer tonna	
tűzifa	347 281	256 733
fa-apríték összesen	1 258 434	824 531
lágyszárú	204 427	186 081
mezőgazd. termék összesen	696 775	723 424
feldolgozóipari melléktermék	842 266	952 927
összesen	3 649 183	2 943 696

A világon a klímaváltozás legfőbb okának a légkörbe kerülő üvegházhatású gázok mennyiségének növekedését tekintjük. Ezen gázok közül a legjelentősebb a szén-dioxid. A világon bárhol a levegőbe kerülő szén-dioxid eloszlik a Föld légkörében.

Az Európai Unió számos kezdeményezést indított a légkörbe kerülő szén-dioxid mennyiségének csökkentésére. Például, a hulladékkal kapcsolatosan az EU döntése a légkörvédelem érdekében:

2035-re a települési hulladék legfeljebb 10 %-a kerüljön lerakóba, 65 %-a pedig újra hasznosításra.

A hulladékok kezelése és a biogáz hasznosítás még sok fejlesztési lehetőséget kínál Magyarországon. 2035-re az EU hulladékkezelésre vonatkozó fenti elvárása a jelenlegi hazai állapot és a hulladékkezelés jelenlegi fejlesztési programjai mellett nem teljesíthető.

2023-ban a hazai energetikai célú biomassza felhasználás 2,94 millió tonna volt, amelyből 268 ezer tonna behozatalból származott [1].

A közszolgáltatás keretében begyűjtött települési hulladék mennyisége hazánkban 2022-ben 3,9 millió tonna volt [4].

A begyűjtött hulladék összetétele:

- 75% vegyes
- 9% bio- és zöldhulladék
- 8% csomagolási

- 4% lom
- 1% üveg
- 3% egyéb

A hulladékból mintegy 2 millió tonna lerakásra került. A hulladék lerakók hiányos kialakítása miatt ez a mennyiség nagyon nagy.

2. táblázat. A keletkező hulladék mennyiségének alakulása, [4]

Hulladék forrása	2005	2010	2015	2022
	ezer tonna			
Mezőgazdasági és élelmiszer-ipari hulladék	4 828	773	681	493
Ipari hulladék	8 784	5 806	5 900	4 516
Építési-bontási hulladék	4 130	4 167	4 735	10 840
Veszélyes hulladék	1 203	569	498	671
Települési hulladék	4 645	4 033	3 710	3 911
Összesen	23 590	15 348	15 524	20 431

A biogáz üzemekben felhasznált biomassza mennyisége összesen 1364 ezer tonna volt 2023-ban, Ennek döntő többsége mezőgazdasági termék volt: 691 ezer tonna.

A biomassza és a biogáz részesedését a megújuló energiaforrásokból származó villamos energiatermelésben mutatja a 3. táblázat, [4].

3. táblázat. Biomassza és a biogáz részesedése (%) a megújuló energiaforrású villamos energiatermelésen belül

Forrás	2018	2019	2020	2021	2022
biomassza	47,8	37,7	30,1	25,7	22,1
biogáz	8,9	6,8	5,9	4,3	4,1

A biomassza és a biogáz szerepének folyamatos csökkenése több okra vezethető vissza, de ezen a területen leginkább a beruházások állami támogatása hiányzik.

Az állam átvette a települések önkormányzataitól a hulladékkezelést, és koncessziós pályázatot írt ki az országos hulladékkezelési rendszer működtetésére. A pályázatot a MOL Rt. nyerte el 35 évre. A hulladék kezelés új rendszerét a MOL Rt. 2023-ban indította el. A rendszer kialakítása és működtetése a MOHU Hulladékgazdálkodási Zrt. feladata.

Fő céljai: körforgásos gazdaság kialakítása;

egységes hulladékgazdálkodási rendszer kialakítása az országban;

a hulladékgazdálkodás állami kézbe vétele.

2024-ben még nem lehet prognosztizálni, hogy a MOHU működésével teljesülhet-e az EU hulladékgazdálkodásra vonatkozó feladat meghatározása.

Hulladék és az üvegházhatású gázok kibocsátása

A hulladék keletkezése és kezelése szoros összefüggésben van a légkörbe kerülő üvegházhatású gázok (ÜHG) mennyiségével. Az üvegházhatású gázok között a szén-dioxid a legnagyobb mennyiség, de a többi káros gáz (metán, fluor tartalmú gázok, stb.) hatása a légkörre többször veszélyesebb, mint a szén-dioxid.

A káros gázok kibocsátásának csökkentésében nem értünk el jelentős eredményt. A csökkenést legnagyobb mértékben a szén-dioxid kibocsátási kvóta-szabályozásnak köszönhetjük. Jelentős

eredményt értünk el a fluor tartalmú gázok használatának vissza-

	2010	2015	2021
	ezer tonna		
Összes ÜHG (CO ₂ egyenértékben)	83 828	80 609	79 502
Ebből: energia ellátás	21 353	16 714	14 128
mezőgazdaság	7 639	9 261	9 841
szállítás, raktározás	7 036	6 325	5 703
háztartások	24 235	24 135	23 869
Szén-dioxid összesen	69 330	65 072	40 980
Ebből: energia ellátás	19 761	15 148	12 589
mezőgazdaság	1 903	2 374	2 512
szállítás, raktározás	6 886	6 148	5 512
háztartások	23 241	23 037	22 836

szorításában. A kibocsátásban legjelentősebb ágazatok közül a mezőgazdaság kibocsátásának emelkedése indokolttá tenné szabályozás bevezetését ezen a területen.

A háztartások kibocsátásának kismértékű csökkenése a légköri hőmérséklet emelkedéssel, és ennek köszönhetően a fűtési igények csökkenésével függ össze.

Biológiai eredetű gázok

Depóniagáz

A lerakóba került hulladék szerves anyag tartalma az oxigéntől elzárt környezetben bomlani kezd. A folyamat gáztermeléssel jár, a keletkezett gáz mintegy 50%-a metán. A lerakott hulladék szennyvezetheti a környező talajt is, a hulladéklerakóban talajszigetelésnek kell lenni. A hulladékból való gáz képződés legalább 10 évig tart. A hulladékdepóniákból a légkörbe lépő depóniagáz a hazai üvegházhatású gáz kibocsátás 20%-t adhatja. A lerakókba kerül évente mintegy 3,8 millió tonna hulladék. A települési hulladékot 2570 lerakóba helyezik el. Ezek közül: 72 előírások szerint üzemel, 93 üzemelő, de a hulladékkezelést javítani kell, 2405 környezetvédelem nélküli. A hulladék lerakók közül 21 üzemben működött depóniagáz szívás és gázkezelés. A hasznosított depóniagáz mennyiség kb. 27 millió m³ metánt jelentett évente. A depóniagázt hasznosított üzemekben általában gázmotorok üzemelnek.

Szennyvízgáz

Az ország településein gyűjtött vezetékesszennyvíz mennyisége 2023-ban 700 ezer m³ volt. A szennyvizet különböző technológiákkal tisztítják, és utána élővízfolyásokba juttatják. 602 szennyvíztisztító telep működik kétezer fő feletti településhez kapcsolódva, és van 236 ennél kisebb kapacitású tisztító üzem is. A szennyvíztisztítóban leválasztott iszapot 29 agglomerációs központban kezelik. A kezelt szennyvíziszapból kb. 50% metán tartalmú gáz válik ki, és 2021-ben 26 üzemhez kapcsolódott szennyvíziszap-gáz hasznosító létesítmény. 2019-ben a szennyvíziszap-gáz hasznosítás 35 millió m³ metán egyenértékű volt.

Biogáz

Biogáznak nevezzük a folyékony-, vagy szilárd halmazállapotú, szerves-anyag tartalmú biomasszából, oxigéntől elzárt módon, baktériumokkal előállított metán tartalmú gázt. A biogáz megújuló

energiahordozó. Magyarország biogáz potenciálja: 121-177 millió m³/év 2H minőségű biometán. A biogáz üzemeknél elsődleges a környezetvédelmi funkció.

A biogáz termelésben felhasznált alapanyagok mennyisége 2023-ban:

mezőgazdasági termékek	691,7 ezer tonna
állati trágyák	593 ezer tonna
feldolgozóipari alapanyagok	560,9 ezer tonna
szeszipari melléktermékek	196 ezer tonna

Biogáz üzemek

2022-ben 38 biogáz üzem működött az országban [3]. Ezek az üzemek évente mintegy 3,2 millió tonna nedves, szerves anyagot és hulladékot dolgoztak fel. A beszállított anyagok között van vágóhidak hulladéka, állattartó telepek trágyája, mezőgazdasági szálas hulladék, szennyvíziszap, éttermi ételmaradék. A hulladékokat megfelelő arányban keverve tartályokban, oxigéntől elzárt térben, baktériumokkal érlelik. Az anaerob bomlás eredményeként kb. 50% metán tartalmú gáz keletkezik, melynek hasznosításának módjai:

- kéntelenítés után gázmotorok hajtása. A gázmotor villamos generátort hajt, a termelt villamos áram értékesíthető és a biogáz üzem villamos ellátását is szolgálhatja;
- a biogáz kén-, nitrogén- és szén-dioxid tartalmának kivonása után elérhető a 2H földgáz minőség, a gáz földgázhoz keverhető.

A hasznosított energia kb. 85 millió m³ metán egyenértékű [3]. A hazai biogáz potenciál 2040-re elérheti a 100 millió m³-t. Jelenleg 3,2 PJ energiát állítunk elő a biogáz üzeinkben. Optimális esetben 3 milliárd m³ földgáz lenne helyettesíthető biometánnal. A biogáz üzemek létesítési költsége napjainkban 1-2 millió Ft/kW. A beruházás megtérülési ideje 10-12 év. A veszélyes hulladékok befogadásáért a biogáz üzemeknek fizetnek a beszállítók.

Magyarország biogáz felhasználása 2023-ban:

- mezőgazdasági biogáz: 550 GWh
- depóniagáz: 120 GWh
- szennyvízgáz: 300 GWh
- földgázhoz kevert: 60 GWh

2023-ban a biogázból 259 GWh, a biomasszából 1123 GWh villamos energiát termeltek. A kommunális hulladék megújuló részéből 116 GWh villamos energiát termeltek. A biomassza, a biogáz és a hulladékhasznosítás új erőművek létesítésével lényegesen növelhető.

A hulladékgazdálkodás rendszerének átrendezésére született kormányzati elhatározás várhatóan növeli a hulladékok energetikai hasznosítását, a légkörvédelmi célokkal együtt.

A biogáz termelés és hasznosítás növelésének akadályaként több okot sorolnak fel [3]:

- változó jövedelmezőség: az alapanyagok és a végtermék árának változásai
- megfelelő minőségű és olcsó alapanyag hiánya
- körülményes és drága engedélyezési eljárás: minimum 24-25 engedélyt kell beszerezni egy biogáz üzem építéséhez és üzemeltetéséhez
- a biometán termelés állami támogatásának hiánya

2023-ban a bruttó villamosenergia-termelés 26,4%-a (9376 GWh) megújuló energiaforrásokból származott. Ezen belül a napenergia

74,2%, a szélenergia 6,9%, a vízenergia 2,4%, a hulladékok 1,3%, a biogáz 3,1%, a biomassza 12%, a geotermikus energia 0,2% voltak.

Források

- [1] Agrárközgazdasági Intézet: Biomassza-felhasználás energetikai célra V. évfolyam 1. szám 2024
- [2] <https://www.mekh.hu> Energiastatisztika 2023. éves riport
- [3] Klímapolitikai Intézet: A biogáz-termelés helyzete és jövője Magyarországon – szakpolitikai elemzés 2022. szeptember 7.
- [4] www.ksh.hu

Elhunyt Juhos László (1938-2024)



Szomorúan tudatjuk, hogy a Gyémántdiplomás gépészmérnök, energetikai és reaktor szakmérnök november 12-én, 86 éves korában csendesen eltávozott. Egész életében a villamosenergia-rendszert érintő feladatok elvégzése, szakmai kérdések megválaszolása területén munkálkodott. A Magyar Villamosművek ZRt. (MVM)

jogelődjének erőművek folyamatirányítási területén működő szakszolgálatnál (KHSZ) dolgozott osztályvezetőként.

Munkássága eredményeként korszerűsödött az erőművi ellenőrző mérésekhez használt eszközpark; bevezette a szabadon programozható folyamatirányító rendszerek erőművi alkalmazását; a környezet védelmét támogató létrehozott egy mérőbuszt az erőművek emissziós értékeinek meghatározására. Számos műszaki fejlesztési témát kezdeményezett különböző egyetemi tanszékekkel, kutatóintézetekkel. Részt vett a Paksi Atomerőmű létesítésének szakterületi feladataiban, a Bős-Nagymaros-i vízlépcső előkészítési munkáiban. Rendszeres továbbképzéseket szervezett az erőműves kollégáknak. Tagja volt az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesületnek (ETE), a Magyar Elektrotechnikusok Egyesületének, a Magyar Energetikai Társaságnak (MET pedig egyik alapítója.

1992-ben az erőműves szakszolgálatok megszűnésekor ő az előnyugdíjazást választotta. Nem távolodott el bővebb szakterületétől, még abban az évben megalapította a Reális Zöldek Klub egyesületet. Honlapján számtalan neves szakember szólalt meg az energetikát, a környezetvédelmet és a klímaváltozást érintő kérdésekben. Szakmai véleményét mindenkor közérthetően, szókimondóan képviselte. Mint szakújságíró rendszeresen tájékoztatót az országgyűlés e témákat érintő bizottsági üléseiről. Ugyanitt sokat lobbizott Paks II. megépítése mellett, szorgalmazta a dunai vízerőművek kérdésének napirendre vételét és a klímaváltozás okainak tudományos alapokon történő megvitatását.

Nyugodjék Békében!

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 fahőjük 2,9 kJ/kgK [4], míg az építőanyagok fahője 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 hulladék hő 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, biodizelt 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 zsiradékot 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 hulladék hő hasznosítása szempontjából ezen anyagok nem is iga-

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

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 környezet-terhelést.

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 szénnel 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 szénnel 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 zsiradékok jellemző zsírsav összetétele [24].

Zsiradék	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 üvegfríten 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 ülepítettük 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.

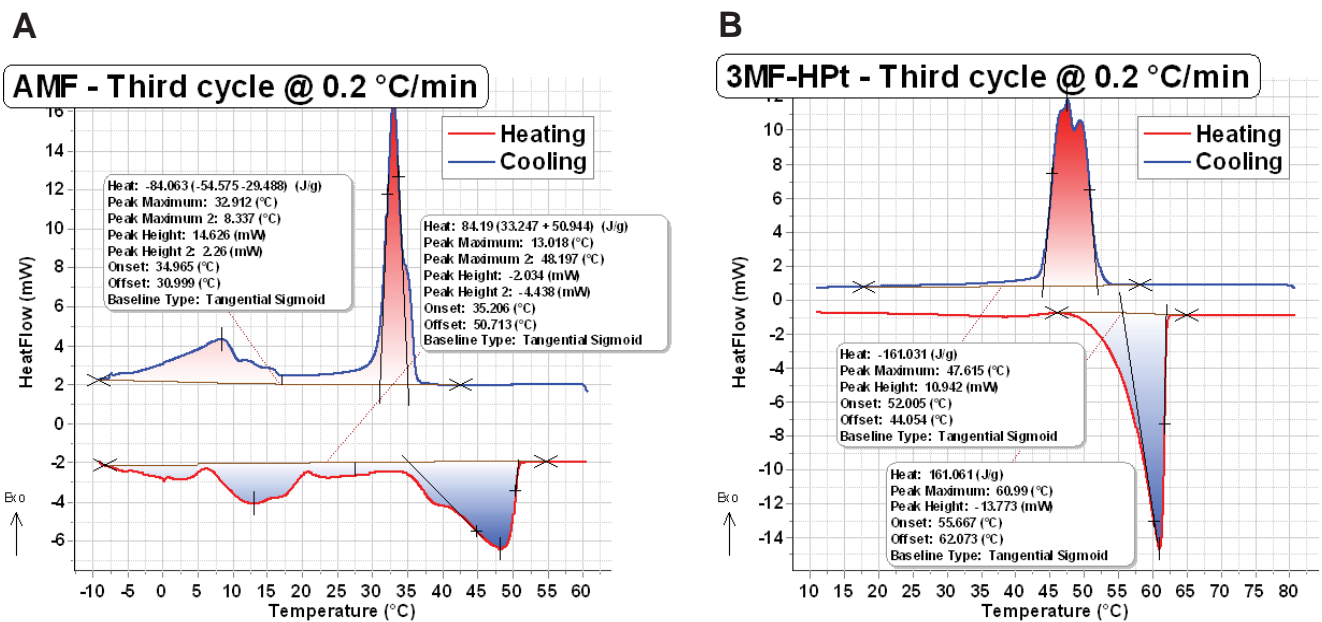
A hidrogénezett trigliceridek és a hidrolízissel előállított zsírsavak termikus tulajdonságait Setaram µDSC3evo differenciál pásztázó mikrokaloriméterrel (Setaram, Franciaország) határoztuk meg. A mintákat háromszor ciklikusan -10 °C és 80 °C között, 0,2 °C/perc pásztázási sebességgel vizsgáltuk. Az 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.

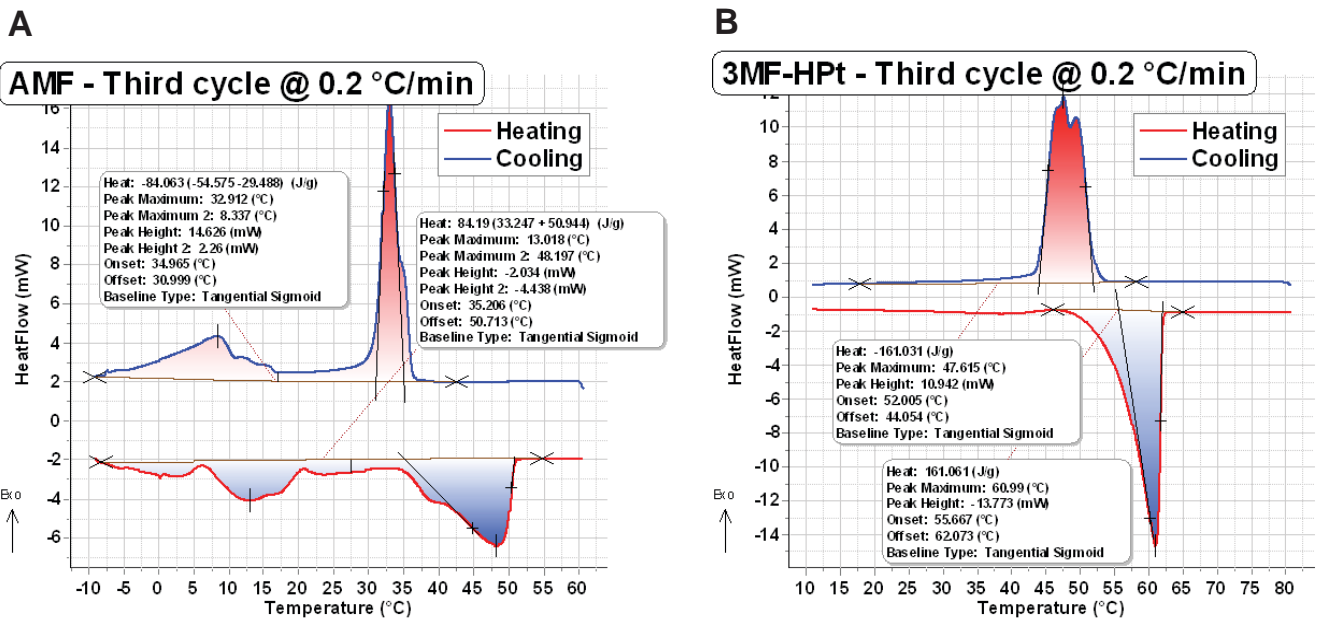
Kísérleti eredmények

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

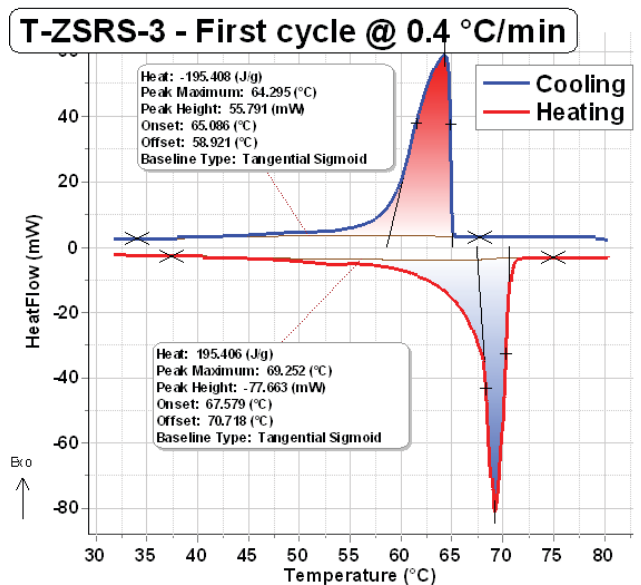
eredményre jutottunk, mint a szarvasmarhafaggyúnál, azaz szűk olvadás és dermedés tartományú anyagot kaptunk (2. A ábra) magas látens hőkapacitással (151,5 J/g olvadási, 150,8 J/g fagyási entalpiaváltozás). Az eredeti napraforgóolaj nagy telítetlen zsírsav aránya (jódszám: 124,2, lásd még 1. táblázat) 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 kezelésével kell számolni.

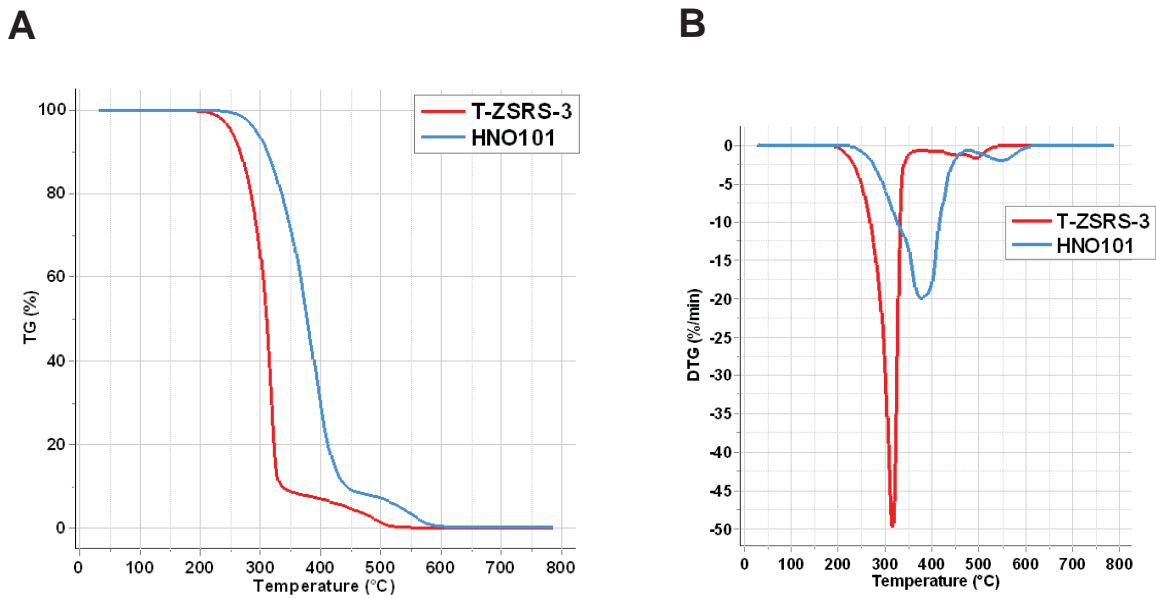


3. ábra. Hidrogénezett használt napraforgóolaj hidrolízisével és savasavazással nyert zsírsavak DSC-je

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 kémiai sokkal stabilabb, az oxidációra (avasodásra) nem hajlamos PCM terméket eredményez. A hidrogénezett trigliceridek látens hőkapacitása jelentősen (kb. 20%-kal) növelhető és a túlhűlése számottevően csökkenthető, amennyiben zsírsavvá alakítjuk azokat, ez azonban további vegyszerek alkalmazását és szennyvíz keletkezését vonja maga után, ezért további kutatási feladatunk a túlhűlés 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 energiaforrásuk (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 világpiaci 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 közcsatornába - 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 (átemelőkből, aknákból, szivattyúkból stb.), más anyagokkal összeragadva tömedékelik a csatornát, stb. Ezek növelik a hálózat mosatásához felhasznált vizet, és végeredményben a szennyvíztelep határfokát 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 elégetik. 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 zsíradékot egy kereskedelmi terméként viszi a piacra. Ez a feldolgozott zsíradék alapvetően állati takarmányokhoz előkészített anyag, ami a PCM előállításához alkalmazott technológiában nem alkalmazható hatékonyan, mivel nagy mennyiségben tartalmaz egyéb összetevőket, mint pl. fehérjét. Az állati zsírok hidrogénezése katalizátor alkalmazása mellett történik, így fontos, hogy a faggyú illetve az állati zsíradék-termék ne tartalmazzon semmi olyan anyagot, ami katalizátor inhibitor (pl. fehérjét).

Jelenleg az állati zsírokat keverik, és mivel Magyarországon ehhez a feldolgozáshoz képest kevés szarvasmarhát vágnak, az elérhető állati zsírtérmékek 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, Jianhua 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. & Aleksyuk, 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.).

Elhunyt Penninger Antal decanus emeritus

(1943-2024)

Dr. Penninger Antal 1943. november 18-án született Budapesten. Tanulmányait a BME-n végezte 1962-67 között, utána 2 évet dolgozott az Erőmű Javító és Karbantartó Vállalatnál, mint csoportvezető mérnök, majd visszahívták az akkori Kálorikus Gépek Tanszékre, a BME Gépészmérnöki Karára, mint egyetemi tanársegéd. 1978-tól egyetemi adjunktus, 1989-től egyetemi docens és tanszékvezető. Az Ő vezetésével alakult meg a Tanfolyami és Nemzetközi Oktatási Központ (TANOK), melyet 1991-től mint igazgató vezetett. Ennek keretében indult meg az angol nyelvű képzés és lehetőség külföldi hallgatók oktatására. Megszerezte az MTA doktora címet és 1995-ben nevezték ki egyetemi tanárnak. 2001-2008 között a BME Gépészmérnöki Kar dékánja volt. Ebben az időszakban számos átalakulás történt a Gépészmérnök karon, többek között elindult el az átállás a kétféle (BSc-MSc) bolognai-i rendszerű képzési struktúrára. Szintén a nevéhez kapcsolódik az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék létrejötté 2002-ben az Energetika Tanszék és a Kálorikus Gépek Tanszék összevonásával.

Az oktatás és a kutatás mellett Penninger professzor úr fontosnak tartotta az ipari partnerekkel való kapcsolatok intézményesítését, így kulcsszerepet játszott a 2010-ben alakult BME-AUDI Kooperációs Kutatóközpont megalakulásában, melyet nyugdíjba vonulásáig vezetett. Fő kutatási területe a tüzeléstechnika volt, részt vett a Diesel motor előmelegítő lüktető tüzelőberendezés kialakításában, a tüzelőberendezések periodikus lengés vizsgálataiban és a palaolaj kitermeléséhez szükséges nagynyomású tüztér kifejlesztésében.



A számítástechnika térnyerésével megjelenő matematikai modellezési lehetőségeket hatékonyan alkalmazta a tüzeléstechnikai jelenségek vizsgálatára. Több évtizeden keresztül a Kálorikus Gépek és a Tüzeléstechnika tárgy előadója volt, ehhez készített egyetemi jegyzeteket. Kiemelkedő munkásságát számos díjjal jutalmazták: BME Nívódíjak, Széchenyi Professzori Ösztöndíj, József Nádor Emlékérem, Gruber Díj, GPK Életmű Díj és Magyar Érdemrend Lovagkeresztje. Számos akadémiai és más szakmai testület tagja és vezetője volt.

Egyetemi tevékenysége mellett fontosnak tartotta a szakmai ismeretek, tapasztalatok megosztását, konferenciák szervezését és a társadalmi szervezetekben végzett munkát. Kezdeményezte és elnöke volt a Heat Engines and Environmental Protection konferenciáknak. 2005 és 2011 között elnöke volt a Magyar Energetikai Társaságnak. Elnöke volt a Magyar Mérnöki Kamara Gépészeti Tagozatának 2004-től 2007-ig, továbbá 2005 és 2007 között az Oktatási Bizottságnak.

Professzor úr emlékét megőrizzük! Nyugodjék békében!

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 klímasemleges hűtőközegeikkel, az átlagosnál hosszabb élettartamukkal és kis karbantartási igényükkel az elterjedt hűtéstechonikai 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 igényel egyútt. 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 szállításra tervezett 250 kWh kapacitású hőakkumulátor feltöltésével és kiszállításával a helyi óvodának ajándékozunk a megtermelt hőt.

Az abszorpciós hűtőberendezések alkalmazásának reneszánszáról beszélhetünk azáltal, hogy klímasemleges hűtőközegeikkel, 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 hűtéstechonikai 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 folyadékaként 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 áramkörtön 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 csúcsideszakban, 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.

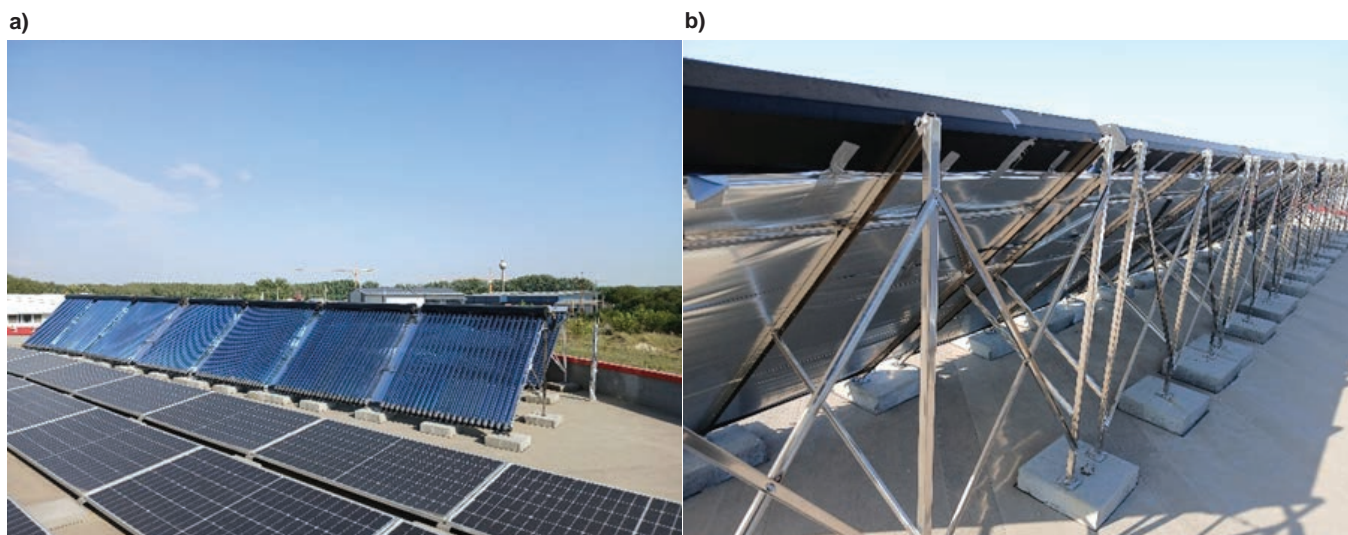
A 3. b ábrán figyelhetők meg a vezérlő és mérésadatgyűjtő villamosszekrénye, az in situ fel nem használt hidegenergia tárolására szolgáló fázisváltó hőakkumulátor (látens hőtároló egység), valamint az abszorpciós hűtőberendezés. A keringtetett hűtővíz hőmérsékletének limitálásával a nemkívánt kondenzációs 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” üzemcsarnok tetején elhelyezett vákuumcsöves napkollektor sorának elülső (a) és hátsó nézete (b)



3. ábra. Az üzemcsarnok 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 lét-rejövő 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.

Bátaapátiban jártunk

Ignáczy Elek

üzemmémők, igelek@t-online.hu

Egy szép őszi napon 2024. szeptember 26-án az ETE Székesfehérvári Csoport a MEE Székesfehérvári Szervezettel közösen szervezett utóbuszos tanulmányi kiránduláson vettünk részt, a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Kft. (RHK) Bátaapátiban lévő telephelyén. Az egyeztetett időpontra csoportos belépési engedélyt kaptunk, megérkezésünkön személyi ellenőrzés után beléphettünk a látogató központba.

Dr. Molnár Balázs stratégiai és műszaki igazgató úr tájékoztató előadásában ismerhettük meg tevékenységük megkezdésének előzményeit, valamint a radioaktív hulladék-kezeléssel kapcsolatos feladatokat.

Az egyre növekvő energiaigények kielégítését atomenergia nélkül nehéz lenne megoldani. Másrészt Radioizotópokat és a nukleáris technológiát hazánkban is széles körben alkalmazzák ipari, egészségügyi és kutatási célra. Ezen tevékenységek, valamint az atomerőművek reaktorainak működése radioaktív hulladékok és kiégett fűtőelemek képződésével jár. Joggal vetődik fel a kérdés, hogyan lehet ezeket biztonságosan tárolni, véglegesen elhelyezni.

Az 1996. évi CXVI. törvény (atomtörvény) előírja, hogy a radioaktív hulladék és a kiégett fűtőelemek elhelyezésével kapcsolatos minden feladatot egy, a kormány által kijelölt szervezet végezze. **Így 1998. júniusában megalakult a Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft. vagyis a RHK Kft.**

A Társaság működését a nemzetközi előírások és a hazai szabályozások befolyásolják. Új feladatokat írt elő a 2011./70/EURATOM tanácsi irányelv a biztonságos kezelést szolgáló közösségi keret létrehozásáról, amit 2011-ben fogadott el az Európa Tanács. A tagállamok a kiégett fűtőelemek és a radioaktív hulladékok kezelésére vonatkozóan nemzeti politikákat dolgoznak ki és tartanak fenn, valamint nemzeti programot kell kidolgozniuk annak érdekében, hogy a politikai döntések egyértelmű előírások révén jussanak érvényre. Mindezen feladatok az RHK Kft közreműködésével valósultak meg. Az elkészült dokumentumokat az országgyűlés határozat formájában jóváhagyta, felülvizsgálatukra ötvenként kerül sor.

Nonprofit szervezetként a tevékenység ellátásához szükséges anyagi forrásokat a Központi Nukleáris Pénzügyi Alap biztosítja, amelynek kezelője az Energiaügyi Minisztérium. A Társaság létesítményeinek hatósági felügyeletét az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) látja el.

1. táblázat. Radioaktív hulladékok osztályozása

Halmazállapot szerint	Folyékony és szilárd	Radioaktív hulladék véglegesen csak szilárd formában helyezhető el.
Aktivitás szerint	Nagyon kis aktivitású, Kis és közepes aktivitású, Nagy aktivitású	Ha a radioaktív hulladék tárolása folyamán a hőtermelést is számításba kell venni, akkor az nagy aktivitásúnak minősül.
Élettartam szerint	Rövid élettartamú, Hosszú élettartamú	Rövid élettartamú az a kis vagy közepes aktivitású radioaktív hulladék, amelyben csak korlátozottan található 30 évnél hosszabb felezési idejű radionuklid.

2. táblázat. Magyarországon lévő radioaktív hulladék-tárolók, programok

Tároló megnevezése	Feladat
Püspökszilágyi és Kisnémedi RHFT	Kis és közepes aktivitású hulladék tárolás
Bátaapáti NRHT	Kis és közepes aktivitású hulladék tárolás
Paks KKÁT	Kiégett Kazetták Átmeneti tárolója
Nyugat Mecsek	Nagy aktivitású és hosszú élettartamú radioaktív hulladék, valamint kiégett fűtőelemek végleges elhelyezését célzó kutatások

Bátaapáti tároló helyszín kiválasztása

1996-ban elkezdődtek a kutatások Bátaapáti térségében. A földtani zárójelentés alapján a Geológiai Szolgálat Dél-dunántúli Területi Hivatala elfogadta a terület földtani alkalmasságát.

2005-ben a lejtaknák mélyítésével megkezdődtek a felszín alatti kutatások. A Mecsekérc Zrt. irányításával a szakemberek mintegy 190 ezer köbméter gránitot mozgattak meg. Vízföldtani és geodinamikai monitoring rendszert alakítottak ki, amely a mai napig üzemel.

Bátaapátiban a képviselő testület kezdeményezésére vélemény nyilvánító népszavazást tartottak a tároló megépítéséről, 75%-os részvétel mellett a résztvevők 90,73%-a igennel szavazott. A hosszú kutató munka és az érintett térséggel folytatott társadalmi párbeszéd, valamint a Bátaapáti lakossági népszavazási eredménye után döntés született, hogy itt épüljön meg a hulladéktároló.

Az Állami Népegészségügyi és Tisztiorvosi Szolgálat 2008-ban kiadta a létesítési engedélyt az NRHT létesítéséhez. Még ez év végén elindult az első szállítás az atomerőműből a radioaktív hulladék-tároló felszíni létesítményébe – ekkor még a föld alatti kamrák nem készültek el.

A hulladék végleges elhelyezése a felszín alatt 250 méteres mélységben, gyakorlatilag a Balti tenger szintjén (0 mBf) valósult meg. A mélybe két 1,7 km hosszú párhuzamos lejtőszakna vezet le 10%-os lejtéssel, melyet 250 méterenként keresztvágtatok kötnek össze, így biztosítva a menekülési útvonalat veszély esetén. Az alagútrendszerben (közel 6 kilométer hosszú) két részt különítenek el, az ellenőrzött zónát a tároló kamrákkal és az építési területet, melyeket leplombált kerítés választ el egymástól.

Az RHT feladata a szilárd és a folyékony, kis és közepes aktivitású radioaktív hulladék végleges elhelyezése. Az Atomerőmű üzemeltetése során keletkező szilárd halmazállapotú radioaktív hulladék többségét 200 l-es acélhordókban tömörített formában tárolják. (A folyékony radioaktív hulladékot tartályban gyűjtik az atomerőműben, a szilárdítására is az atomerőműben kerül sor az elszállítás előtt). A hordókba főként elhasznált védőeszközök, védőruházat, szerszámok kerülnek. A későbbiekben ioncserélt gyantát és az atomerőmű leszerelésekor keletkező egyéb hulladékokat is az NRHT-ban kell majd elhelyezni.

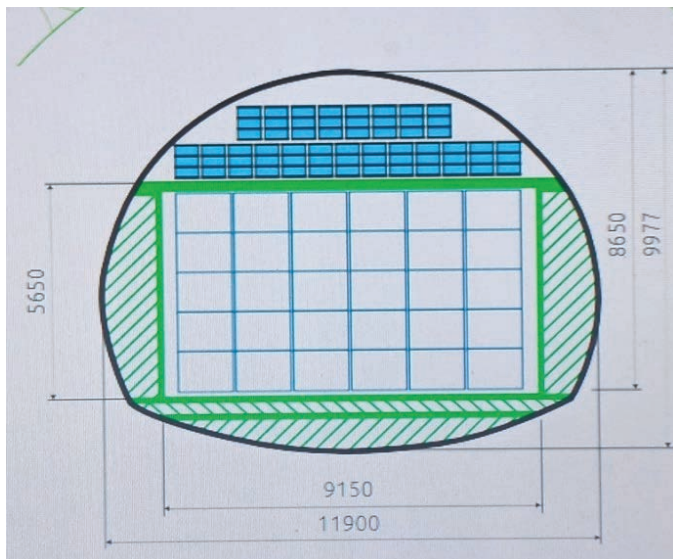
Az eredeti koncepció szerint a K1 megjelölésű ~90 m hosszú, 96 négyzetméter szelvényméretű tárolókamrában elhelyezendő hulladék az atomerőműben került 200 l-es acélhordókba, majd összepréselés után a hordókat lezárták. Az RHK Kft. szakemberei szigorú ellenőrzések után (sérülésmentesség, felületi dózismérés) minden hordót egyedi azonosítóval és plombával láttak el, majd a speciálisan kialakított szállítójárműre kerültek, ahol 16 fért el egy-egy szállítás alakalmával. A szállítás az RHK Kft. teherautójával a 6-os úton Paks-Bátaszék-Bátaapáti útvonalon történt, a Veszélyes Áruk Nemzetközi Szállításáról szóló Európai Megállapodás alapján.

A hordókat szállító jármű az NRHT központi épületénél hajtott be telephelyre, az úgynevezett ellenőrzött zónában a technológiai épület üzemcsarnokába állt be. A 3000 hordó befogadására alkalmas csarnokban a minőségellenőrző vizsgálatok zajlanak, illetve a hulladék föld alatti tárolására való előkészítést is itt végezték. A hordókat kilencesével vasbeton konténerbe helyezték, és a közöttük levő hézagot inaktív betonnal öntötték ki. A feltöltött és lezárt konténernek a száradás idejére ideiglenesen a technológiai épületben maradtak.

A kész legfeljebb 16 tonnás beton konténerrel az ellenőrzött zónában kialakított útvonalon ment le a felszín alá a szállítójármű, majd a lejtakna végén, a tárolókamra bejáratánál a targonca vette át, és emelte a végleges helyére. A K1 jelű tárolókamra 2017-ben telt meg: 537 konténerben 4833 hordó került végleges tárolási helyére.

Az új koncepció szerint a vasbeton konténer helyett kompakt csomagokat készítenek a Paksi Atomerőműben a szakemberek. A szintén 200 literes acélhordók négyesével kerülnek egy vékonyfalú acél konténerbe, és a hordók közti tér kitöltésére folyékony radioaktív hulladékból kevert cementpépet használnak, így a konténer holt terét is radioaktív hulladék tölti ki. Az így előkészített acélcsomagokat szállítják át az RHK Kft munkatársai négyesével Bataapátiba.

Az acélkonténereket nem közvetlenül helyezik el a felszín alatt mint az egyes kamrában, hanem a K2 kamrában kialakított vasbeton medencébe kerülnek. A kamrát szakaszosan töltik fel, melyeket körülbelül 19 méterenként vasbeton elemekből készült falakkal zárnak le, és a konténer körüli hézagokat cement habarccsal töltik fel. A még jobb helykihasználás érdekében hordók is kerülnek a lezárt medence tetejére, végül az egész kamra feltöltésre kerül.



1. ábra. Új elhelyezési rendszer acélkonténerekkel és tetején acélhordókkal

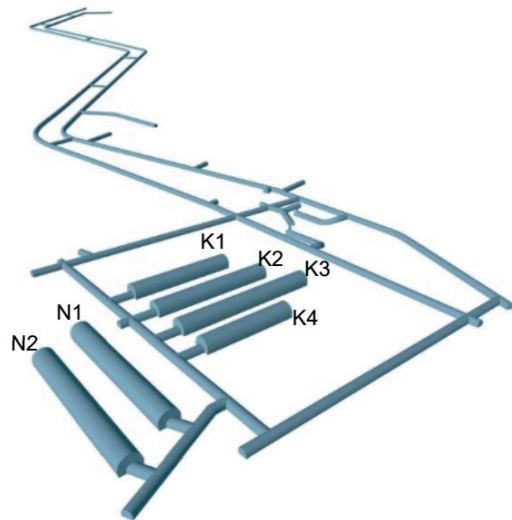
Ez egy hatékonyabb megoldás, ugyanis a 7 köbméteres vasbeton konténer helyett a kompakt csomagok mérete 2 köbméter, de a tárolt hulladék mennyisége a csomagokban mindkét esetben 1,8 köbméter. Az új rendszer a kamrakialakítás szükségességének tekintetében kétszer olyan helytakarékos mint az előbbi, így az atomerőműteljes üzemideje, valamint a leszerelés során keletkezett kis és közepes aktivitású radioaktív hulladékot feleannyi tárolókamrában lehet elhelyezni, mint az eredeti tervek lehetővé tették volna. Ez jelentős, 57 milliárd Ft megtakarítást jelent a teljes projektre vetítve, miközben a szigorú biztonsági követelményeknek továbbra is megfelel a tároló.

A tároló végleges kiépítése

A betárolással egyidőben zajlik az ellenőrzött zónán kívül a további tárolókamrák kialakítása. A K1 tárolókamra megtelt, a K2 már az új kompakt hulladékcsomagokat fogadja.

K3 és a K4 tárolókamrák bányászati kialakítása elkészült, technológiai kialakításuk folyamatban van.

További N1 és N2 tárolók kialakítása a - jelenlegiekkel azonos szinten – a következő néhány év feladata, mellyel a teljes tároló kapacitás 20 000 köbméter lesz.



2. ábra. A lejtős akna és a tároló kamrák elhelyezkedése

A tájékoztató előadást követően Kern Zoltán kommunikációs főmunkatárs vezetésével fémdetektoros vizsgálatot követően indultunk az ellenőrzött zónában lévő technológiai csarnok, és a radioaktív hulladéktároló kamrák megtekintésére. Valamennyien a belépés előtt fehér védőköpenyt, és védősisakot kaptunk. Közvetlen belépéshez cipőinkre védő zacskót kellett felhúzni.

Első utunk a dozimetriai vezérlőbe vezetett. Az üzem területét sugárvédelmi ellenőrző rendszer felügyeli, melynek adatai, illetve a riasztási jelzések a dozimetriai vezérlőben jelennek meg. Kísérőnk dózismérőt kapott, mely rögzíti az általunk is kapott dózis mennyiséget.

A vezérlő megtekintése után indultunk a tároló kamrák megtekintésére, az ellenőrzött zónán keresztül. Az ellenőrzött zónába belépő és kilépő személyeket, valamint a be- és kilépés időpontját a számítógép rögzíti.

A technológiai csarnokban megnéztük az ideiglenesen itt tárolt, végleges tárolásra előkészített acél konténereket, és hulladékos



1. kép. Látogató csoportunk a K1 tárolókamra előtt

hordókat. A technológiai csarnokon belül a szükséges munkavégzéshez (esetleges betonozás, szállítás) alkalmas hely védőfallal van leválasztva a radioaktív hulladékcsomagok közvetlen tárolási helyétől.

A technológiai csarnokból kilépve cipőnkről a védőzacskók kukába kerültek. Itt kisbuszba szálltunk, mely a lejtősaknán keresztül vitt le minket 250 méter mélységbe, a tárolókamrákig.

Látható volt az első K1 jelű tárolókamra, melynek a betonnal való feltöltését a kedvező radiológiai viszonyok, és így a kiváló monitoring lehetőség miatt későbbre halasztották.

Az üzemelő tárolókamra mellett párhuzamosan készült el a K2 jelű tárolókamra, melynek vasbeton medence falai már ki voltak alakítva. Ebbe a tárolókamrába be is sétáltunk.

A tárolóban folyamatos a szellőztetés, hogy a gránit kőzetből természetes úton szivárgó radioaktív radongázt a felszínre juttassák.

A K3, és a K4-es tárolókamrák bejárata az ellenőrzött zónai oldalról látható volt, de a munkaterület már az építési oldalon található, így az ellenőrzött zónai oldalról nem volt megközelíthető.

A tárolókamrák látogatását befejezve, a kisbusz felvitt a felszínre. Az ellenőrzött zónán át élménydúsan értünk vissza a fogadó épületbe. Kísérőnk, Kern Zoltán kommunikációs főmunkatárs a dózismérőn megállapította, hogy a tárolóban töltött másfél órás látogatásnak köszönhetően 100 nanosievert sugárterhelést szenvedtünk el, amely egyenértékű egy banán elfogyasztásával a gyümölcsben található ^{40}K radioaktív izotóp miatt.

A környezet biztonsága – monitoring

Egy Radioaktív Hulladéktároló esetében a legfontosabb társadalmi elvárás a biztonság, melyet bizonyítani kell. A megfelelően kialakított monitoring rendszer működtetése, eredmények feldolgozása, bemutatása megeremti a térségben élők bizalmát a biztonság tekintetében.

A radiológiai biztonságot telepített mérőállomások, 0-24 órás ügyelet, eseti mintavétel (levegő, víz, iszap, csapadék, növény, állat) biztosítja és saját labor is rendelkezésre áll a minták kiértékelésére, illetve külsős laboratóriumot is bevonnak a munkába. A tevékenységet a hatóság ellenőrzi és elmondható, hogy az előírt környezetellenőrzési, kibocsátásellenőrzési és sugárvédelmi feladatok maradéktalanul teljesülnek évről-évre. A tárolóra szigorú radioaktív anyag kibocsátási korlát van megszabva (az éves természetes háttérsugárzás kb harmincad része lenne engedélyezett) amelynek töredékét sem éri el a létesítmény.

A nem radiológiai monitoring szintén fontos a létesítmény esetében, melynek keretében vízkémiai, geológiai, geotechnikai és egyéb vizsgálatokat végeznek a biztonsági értékelésben szereplő paraméterek pontosítása és megalapozása érdekében, ezzel biztosítva az elhelyezési rendszer hosszú távú megfelelőségét.

A látottak, és a kérdéseinkre adott teljesen nyitott, és szakszerű válaszok számunkra megnyugtatók voltak.

Az RHK-t elhagyva, ugyancsak Bábaapáti takaros kis község szép környezetében, a Naspolya Panzióban fehér asztal mellett beszélgettünk a látottakról.

ELŐZETES PROGRAMTERV

2025. március 5, szerda				2025. március 6, csütörtök			
	Plenáris terem	Szekcióterem I.	Szekcióterem II.	Plenáris terem	Szekcióterem I.	Szekcióterem II.	
08:30 – 09:30	REGISZTRÁCIÓ Érkezési kávészünet			REGISZTRÁCIÓ			08:00 – 08:30
09:30 – 10:00	Megnyitó, díjátadások			4.1. SZEKCIÓ INNOVÁCIÓ az energetikában	4.2. SZEKCIÓ MÉRÉSI RENDSZEREK/ ALMÉRÉS	4.3. SZEKCIÓ ALTERNATÍV HAJTÁSOK	08:30 – 10:30
10:00 – 12:00	Plenáris előadások			Kávészünet			10:30 – 11:00
12:00 – 13:30	Ebéd			5.1. SZEKCIÓ ÉPÜLET ENERGETIKA I.	5.2. SZEKCIÓ IPARI ENERGETIKA	5.3. SZEKCIÓ Tehetséges fiatalok az energetikában I.	11:00 – 13:00
13:30 – 15:30	2. SZEKCIÓ EKR aktualitások			Ebéd			13:00 – 14:00
15:30 – 16:00	Kávészünet			6.1. SZEKCIÓ ÉPÜLET ENERGETIKA II.	6.2. SZEKCIÓ ESG kötelezettségek és lehetőségek	6.3. SZEKCIÓ Tehetséges fiatalok az energetikában II.	14:00 – 16:00
16:00 – 18:00	3.1. SZEKCIÓ Az energia stratégia kihívásai	3.2. SZEKCIÓ Energia audit	3.3. SZEKCIÓ BME GPK Energetikai Gépek és Rendszerek tanszék – együtt- működési lehetőségek	Konferencia zárás, szekciók értékelése			16:00 – 16:30
18:00 – 19:30	Kiállítás, az Eger&Park Hotel gépészeti rendszerének megtekintése, un. "walk through audit", kötetlen beszélgetések, szabadidő, wellness			Az előzetes program változtatásának lehetőségét fenntartjuk.			
19:30 – 22:00	GÁLA VACSORA Tombola, meglepetés műsor			A szekciók részletes programja, és annak frissülése a www.klenen.eu honlapon követhető.			
				Köszönjük, hogy részvételükkel támogatják a konferenciát!			
				Várjuk szíves jelentkezésüket 2025. január 31-ig!			

Juhász Gyula
KARÁCSONY FELÉ

Szép Tündérország támad föl szívemben
Ilyenkor decemberben.
A szeretetnek csillagára nézek,
Megszáll egy titkos, gyönyörű ígézet,
Ilyenkor decemberben.

...Bizalmas szívvel járom a világot
S amit az élet vágott,
Beheggesztem a sebet a szívemben
És hiszek újra égi szeretetben,
Ilyenkor decemberben.

...És valahol csak kétkedő beszédet
Hallok, szomorúan nézek,
A kis Jézuska itt van a közelben,
Legyünk hát jobbak s higgyünk rendületlen
S ne csak így decemberben.

Kellemes karácsonyi ünnepeket és boldog
új esztendőt kíván minden kedves olvasójának az

ENERGIAGAZDÁLKODÁS