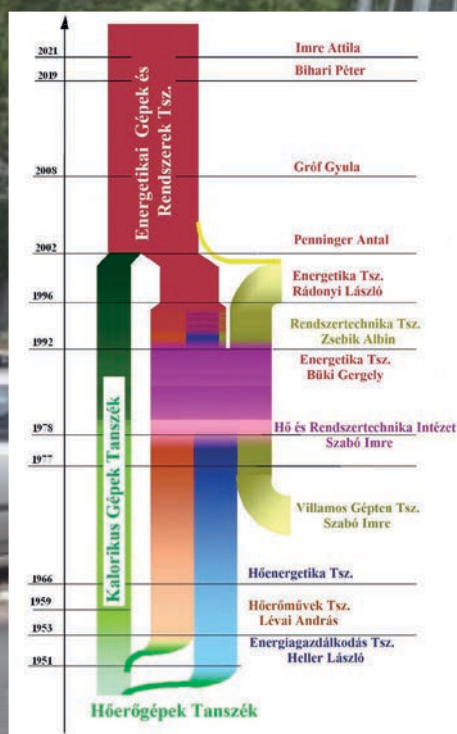


# ENERGIAGAZDÁLKODÁS

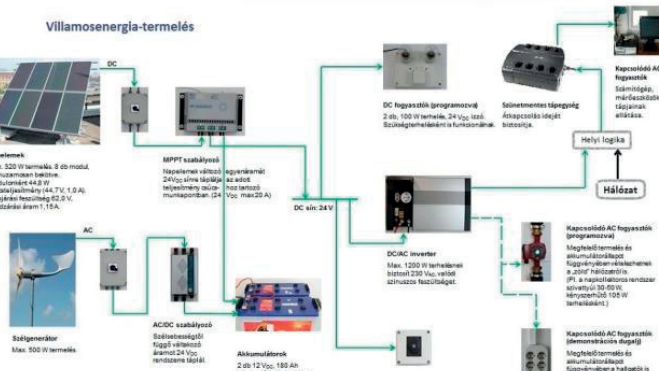
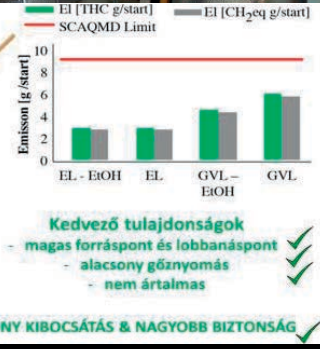
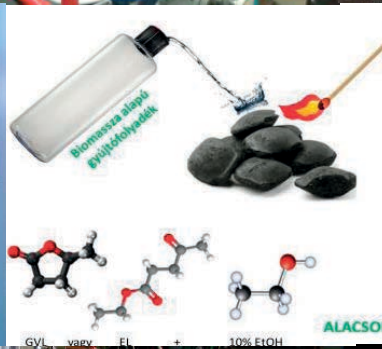
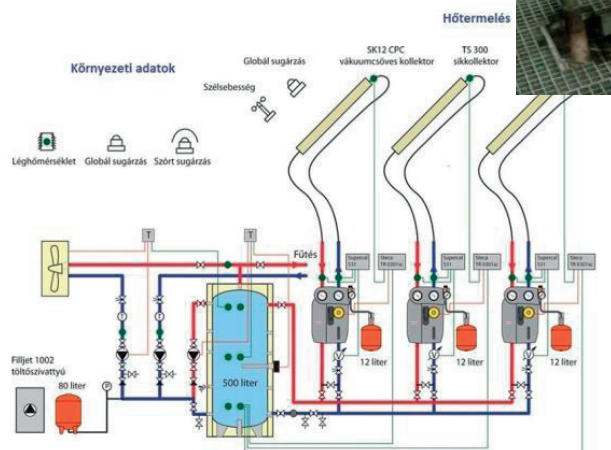
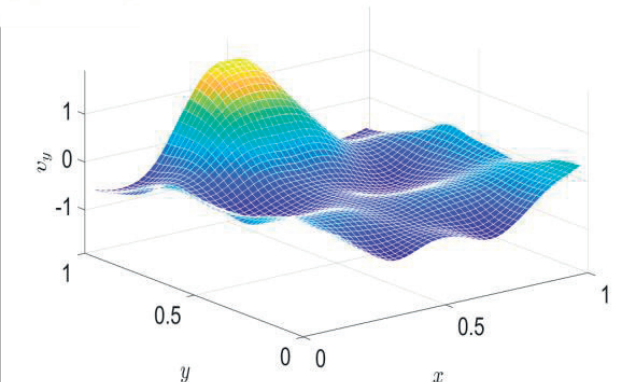
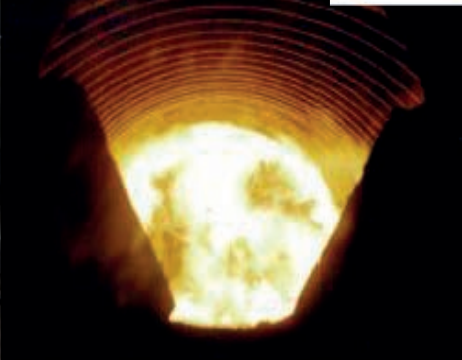
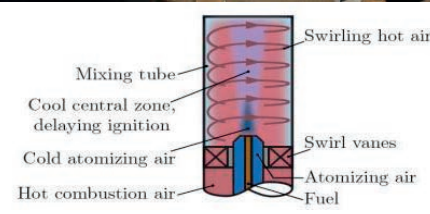
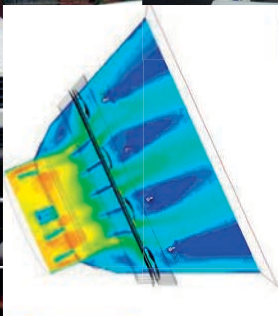
Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

64. évfolyam 2023. különszám

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat









# ENERGIAGAZDÁLKODÁS

Az Energiagazdálkodási Tudományos Egyesület szakfolyóirata

64. évfolyam 2023. különszám

A magyar energiagazdaság problémáit tárgyaló tudományos és gyakorlati folyóirat

## Főszerkesztő:

Dr. Gróf Gyula

## Vendégszerkesztő:

Dr. Cséfalvay Edit

## 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:

Bakács István, az ETE elnöke

## A szerkesztőség címe:

BME Energetikai Gépek és  
Rendszerek Tanszék

1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3.

D épület 208 sz.

Telefon: +36 1 463 2613.

Telefax: +36 1 353 3894.

E-mail: [enga@ete-net.hu](mailto:enga@ete-net.hu)

Megjelenik kéthavonta.

Előfizetési díj egy évre: 4200 Ft

Egy szám ára: 780 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 Bt.

[bukiandras@t-online.hu](mailto:bukiandras@t-online.hu)

## Nyomdai munkák:

EFO Nyomda

[www.efonyomda.hu](http://www.efonyomda.hu)

Lapunkat rendszeresen  
szemlézi a megújult



[www.observer.hu](http://www.observer.hu)

## TARTALOM • CONTENTS • INHALT

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tartalom<br>Content<br>Inhalt                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 1  |
| Tanszékvezetők előszava<br>Forewords of the department's heads<br>Vorwort der Lehrstuhlleiteren                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2  |
| Penninger Antal, Bereczky Ákos, Cséfalvay Edit, Józsa Viktor, Kovács Viktória Barbara,<br>Könczöl Sándor, Laza Tamás, Lezsovits Ferenc<br>Alkalmazott tüzeléstechnikai kutatások az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken<br>Applied Combustion Research at the Department of Energy Engineering<br>Angewandte Verbrennungsforschung am Lehrstuhl für Energiemaschinen und -systeme                                                                                                      | 3  |
| Ősz János, Cséfalvay Edit<br>Gőzerőművek vízüzeme – az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék<br>szakértői szerepe és kutatási eredmények az elmúlt 20 évben<br>Water Regime of Thermal Power Plants – Expert Role and Research<br>Results of the Department of Energy Engineering in the Last 20 Years<br>Wasserbetrieb der Dampfkraftwerke. Die Rolle des Lehrstuhl für Energiemaschinen<br>und -systeme und die Forschungsergebnisse der letzten 20 Jahre.                               | 12 |
| Lukács Kristóf, Meggyes Attila, Bereczky Ákos<br>Belsőégésű motorokkal kapcsolatos kutatások az Energetikai Gépek és<br>Rendszerek Tanszéken<br>Internal Combustion Engines Related Research at the Department of Energy Engineering<br>Forschungen im Bereich der Verbrennungsmotoren am Lehrstuhl<br>für Energiemaschinen und -systeme                                                                                                                                                     | 20 |
| Környey Tamás, Kiss László, Ván Péter, Fülöp Tamás, Kovács Róbert, Szücs Mátyás<br>Hőtechnikai és irreverzibilis termodinamikai kutatások és alkalmazásai az<br>Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken<br>Thermal Engineering and Irreversible Thermodynamical Research Activities and<br>Their Applications at the Department of Energy<br>Engineering<br>Forschung und Anwendung von Wärmeübertragung und irreversiblen Thermodynamik<br>am Lehrstuhl für Energiemaschinen und -systeme | 24 |
| Molnárné Döry Zsófia, Mayer Martin János,<br>Megújuló energia laboratórium és a kapcsolódó kutatások az Energetikai Gépek és<br>Rendszerek Tanszéken<br>Renewable Energy Laboratory and the Related Research<br>at the Department of Energy Engineering<br>Labor für erneuerbare Energien und damit verbundene Forschung am Lehrstuhl<br>für Energiemaschinen und -systeme                                                                                                                   | 28 |
| Sztankó Krisztián, Lezsovits Ferenc, Groniewsky Axel<br>Ipari projektek az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken<br>Industrial Projects at the Department of Energy Engineering<br>Industrielle Projekte am Lehrstuhl für Energiemaschinen und -systeme                                                                                                                                                                                                                                  | 35 |
| Zsebik Albin<br>Két Smaragdfa története<br>History of two Emerald Trees<br>Geschichte zweier Smaragd Baum                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 42 |

## Tisztelt Olvasóink!

A 2022-23-as tanévet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen az évfordulók tanévének is nevezhetjük. Alapításától, 1782-től 240 év telt el. A Gépészmérnöki kar is betöltötte a 150-ik születésnapját, de a gépészmérnök képzés ennél is régebbi, 1862 óta tart.

Az energia szektor – ha korábban nem is így nevezték – a társadalom szövetének mindig fontos része volt és az marad a jövőben is. Az 1867-68-as tanév gépészmérnöki osztály hallgatóinak tanmenetében szerepeltek például olyan tantárgyak, mint az Erőműtan és géptan és a Gőzgépek és léggépek elmélete. A Kalorikus Gépek Tanszék elődjét 1881-ben, I. számú Gép szerkezet-tani Tanszék néven alapították. Az energetika területét gondozó és a magyar energetikai szektor megteremtésében jelentős szerepet betöltő tanszékeket, tanszékünk elődjét, azaz, a Hőenergetika Tanszékét 1951-ben, a Hőerőművek Tanszékét 1953-ban és a Kalorikus Gépek Tanszékét 1959-ben hozták létre.

A mai formában működő Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék 2002-ben jött létre az Energetika Tanszék és a Kalorikus Gépek Tanszék összevonásával. A tanszék létrejöttét Büki Gergely professzor a „kör bezárult” kifejezéssel illette. A kifejezés arra utalt, hogy ekkor kerültek egy tudományos műhelybe az energiaátalakítás berendezéseivel, gépeivel és azok alkotta rendszerekkel foglalkozó oktatók és kutatók.

Az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéknek mai formájában, összehasonlítva elődjeivel még csak kettő évtizedes múltja van. Az évfordulók megemlékezés egy „szellemi híd” mely összeköt elődöket és a jelenben aktív munkatársakat. Ebben az ünnepi Energiagazdálkodás címszámában munkatársaink által írt cikkek a tanszéki közösség elmúlt 20 évben végzett különféle tevékenységeiről és azok eredményeiről számolnak be.

A beszámolókat korántsem tudnak teljesek lenni, elsősorban a terjedelmi korlátok miatt, de az idő múlásával visszatekintve is más és más lesz fontos vagy jelentős vagy még olyan közeli vagy éppen napjainkban is folyó tevékenységekről van szó, amelyek majd a következő, 30, 40, 50 ... éves jubileumi megemlékezésekben tűnnek fel.

Az utóbbi két év nemcsak az évfordulóink éve volt, hanem olyan változásoké is, amelyek az energetikát a közbeszéd egyik kiemelt témájává tették. A megújuló energiaforrások lakossági szintű használata (napelemek), illetve a részben a szomszédunkban folyó háború, részben az egész világban lezajló változások miatt az energiaárak növekedése és az ellátásbiztonsággal kapcsolatos problémák

az energetikát az eddigénél sokkal jobban bevitték az otthonokba, hazánkat a tízmillió energetikai szakember országává téve.

Ez a hirtelen rivaldafény részben jót is tett a szakmánknak, hisz olyan területeken is elkezdődhetnek a kutatások, amelyekkel korábban nem volt alkalmunk foglalkozni, mint például a geotermikus energia hasznosítása, a hidrogénenergetika, a telepített akkumulátoros energiátárolás, illetve más, korábban is vizsgált területekkel is intenzívebben foglalkozhatunk. Másrészt viszont felelősséget is jelent. Nemcsak azért, mert a növekvő számú energetikai projekt egyre több munkát jelent, hanem azért is, mert krízishelyzetekben mindig előkerülnek a csodatevők, akik a problémákra azonnali és egyszerű megoldásokat ajánlanak. Az energetika – még a csendesebb időszakokban is – vonzotta a csalókat, akik féligazságokat hangoztatva kínáltak nagyon tetszetős megoldásokat az energetika minden problémájára. A féligazság mindig veszélyesebb, mint az egyértelmű hazugság, hisz igen, vízzel lehet autót hajtani (bár előtte át kell alakítani hidrogénné), de nem az ígért, egyszerű és kényelmes úton lehetett ehhez az eredményhez eljutni.

Két-, vagy inkább több fronton kell most a szakmának helyt állni. Egyrészt egyre sürgősebb, hogy a rendelkezésünkre álló energiát fenntartható módon, egyre kisebb környezeti hatást okozva állítsuk elő, másrészt ennek elegendőnek és kellően hozzáférhetőnek (olcsónak) kell maradnia, harmadrészt figyelni kell arra, hogy az ehhez rendelkezésre álló erőforrásokat a lehető legjobban használjuk, nemcsak az egyértelműen rossz megoldásokat kiszűrve, hanem két jó közül is a jobbat választva, negyedrészt gondoskodnunk kell, hogy megfelelő létszámú, a gyorsan változó szakmai környezethez is alkalmazkodni képes új szakembereket képezzünk ki, meg ötöd-részt, meg hatodrészt....

Hogy ez mennyire sikerült, arról majd valaki más ír, talán 2027-ben, talán 2043-ban vagy 2053-ban, talán később. Remélhetőleg lesz, még aki megírja és lesz, aki elolvassa.

Budapest, 2023. május 15.

Dr. Imre Attila  
egyetemi tanár (tanszékvezető, 2021- )  
Dr. Bihari Péter  
egyetemi docens (tanszékvezető, 2019-2021)  
Dr. Gróf Gyula  
c. egyetemi tanár (tanszékvezető, 2008-2019)  
Dr. Penninger Antal  
Decanus Emeritus (tanszékvezető, 2002-2008)



Dr. Imre Attila



Dr. Bihari Péter



Dr. Gróf Gyula



Dr. Penninger Antal



# Alkalmazott tüzeléstechnikai kutatások az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken

**Józsa Viktor**

MSC gépészmérnök, jozsa@energia.bme.hu

**Cséfalvai Edit**

okl. környezetmérnök, csfalvai@energia.bme.hu

**Könczöl Sándor**

okl. gépészmérnök, skonczol@gmail.com

**Laza Tamás**

okl. gépészmérnök, laza@energia.bme.hu

**Lezsovits Ferenc**

okl. gépészmérnök, lezsovits@energia.bme.hu

**Kovács Viktória Barbara**

okl. környezetmérnök, kovacs@energia.bme.hu

**Bereczky Ákos**

okl. gépészmérnök, bereczky@energia.bme.hu

**Penninger Antal**

okl. gépészmérnök, penninger@energia.bme.hu

Jelen cikkben az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék 2002-es alakulását követő időszak projektjeit, illetve kutatási portfólióját mutatjuk be a tüzeléshez kötődően, kiemelve a technikát, az alkalmazásközpontú gondolkodást. Mivel az ember többtízezer éve használja célzottan a tüzet, így érthető módon a kapcsolódó kutatások a BME-n már az elődtanszékek esetén is megtalálhatók voltak. Ezeket tekintjük át az első fejezetben, elsősorban a XX. század munkásságára fókuszálva az előd tanszékeken. A második fejezet többségében a megbízásos munkák publikus eredményeit mutatja be immáron az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken, melyek a feladat jellegéből adódóan beépültek, megvalósultak a megbízó telephelyén. A harmadik fejezet az aktuális tanszéki kutatásokat és a 2017-ben alakult BME Tüzeléstechnikai Kutatócsoport kutatási tevékenységét tekinti át az előzményekkel együtt.

\*

In this paper, the projects and research portfolio of the Department of Energy Engineering is overviewed after its formation in 2002, with a focus on combustion, emphasizing the technology part and application-oriented mindset. Since humans have been using fire purposefully for tens of thousands of years, related research was already present in the BME at the predecessor departments. These will be reviewed in the first section, focusing on activities in the predecessor departments in the 20th century. The second section mainly presents the public results of the industrial contracts, now at the Department of Energy Engineering. Due to the nature of these projects, the outcomes were implemented at the site of the contractor. The third section reviews the research activities of the department and BME Combustion Research Group, established in 2017, together with the preceding research.

\*\*\*

## 1. Bevezetés és tüzeléstechnikai kutatások a XX. században

A tanszék egyes kutatási területeinek történeti áttekintését más szerzők már megtették tematikus folyóiratcikkek keretein belül, azonban a tüzeléstechnikai kutatások összefoglalása hazai viszonylatban, de a tanszék szemszögéből még nem történt meg, amit jelen mű pótol. Az első fejezet Gerse Károly visszaemlékezése alapján készült, míg a 2. fejezetben említett projektek Lezsovits Ferenc közreműködésével valósultak meg. A 3. fejezet az aktuális tanszéki kutatásokat és a Józsa Viktor által vezetett kutatócsoport (crg.energia.bme.hu) munkásságát mutatja be.

A BME Gépészmérnöki Karának 1871-es születésekor már önálló tantárgy volt az erőgéptan és erőműtan, melyekből a terület lendületes fejlődése miatt alakultak meg a későbbi elődtanszékek. Az 1940-es évekig az ipar igényeit kiszolgáló tüzeléstechnikai kutatások az üzemi berendezéseken folytak. Egy példa a Kelenföldi Erőműben poros kőszénnek eltüzelésére kifejlesztett Szikla-Rozinek féle tüzelés, amely a cirkulációs fluidtüzelés korai változatának tekinthető. Változás a Hőtechnikai Kutatóintézet 1947-ben történt megalapításával kezdődött Komondy László vezetésével, aki a Gőzgépek és Hűtőgépek Tanszék professzora volt, így a kutatási eredmények az oktatásban is hasznosulhattak. A vezető kutatók az oktatásba is besegítettek. Az intézet is elsősorban az ipar igényeinek kielégítésére törekedett, ennek jellemző példája a nagyon poros, gyenge minőségű szén eltüzelésére kifejlesztett HK vegyes tüzelés, amely a darabos és por frakció szétválasztásával egyidejű rostély- és szénporttüzelést tett lehetővé vagy a lángcsöves kazánoknál alkalmazható szénporttüzelés. A vezető kutatók közül Beér Jánost, a Szénporttüzelési Osztály vezetőjét kell megemlíteni, aki a tüzeléstechnika témakör előadásával a Műegyetemi oktatásban is aktívan részt vett, később az ijmuideni Nemzetközi Lángkutató Alapítványnál végzett kutatásai után előbb a sheffieldi egyetem, majd az MIT professzora lett. Későbbi tanszékvezetőnk, Bassa Gábor is a Hőtechnikai Kutatóintézetben kezdte pályafutását.

Tüzeléstechnikai kutatások a tanszéken ez időben, és a Hőtechnikai Kutatóintézet Villamosenergiaipari Kutatóintézetével – az 1960-as években – történt összeolvadását, VEIKI megalakulását követően sem folytak, a tanszék tüzeléstechnikával, kazánokkal foglalkozó oktatói félállásban a VEIKI-ben folyó kutatásokban vettek részt.

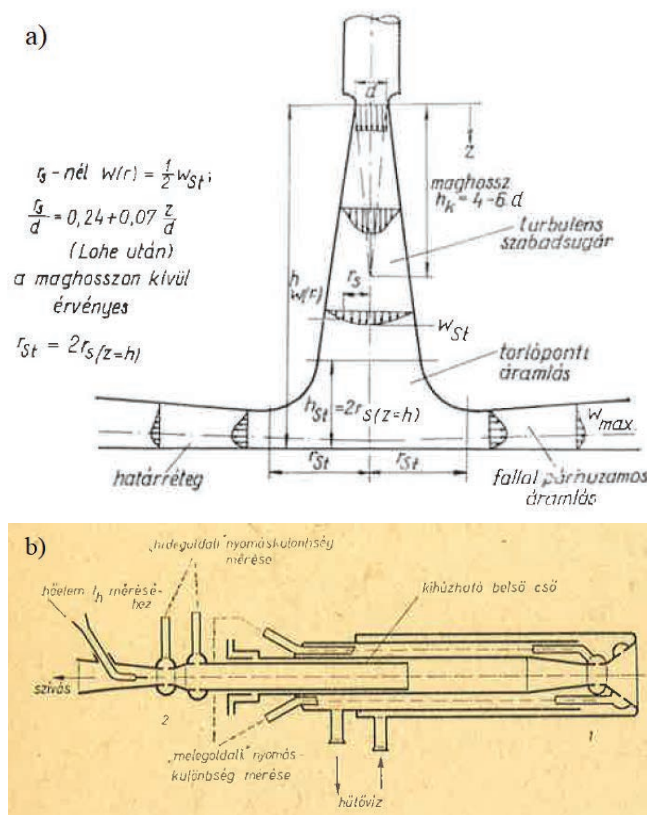
A tanszéken a tüzeléstechnikai kutatások 1972-től indultak meg, miután a Villamosenergiaipari Kutatóintézet korábbi tüzeléstechnikai főosztályvezetőjét Bassa Gábort tanszékvezetővé nevezték ki, aki az alkalmazott kutatások mellett, lángok áramlása, hőátadása témakörben elméleti kutatásokat is kezdeményezett:

- szabadsugár lángok ütközésénél lejátszódó folyamatok (1a ábra),
- áramlás ütközésének vizsgálata kazántüzetekben, lángok áramlásának egymásra hatása,
- koromréteg hatása a sugárzásos hőátadásra, és
- kerámialapok sugárzási tulajdonságai.

A kutatásokban a tanszék munkatársai, hazai kutatók mellett vietnámi, egyiptomi aspiránsok is részt vettek, az eredményekről a hazai konferenciák, folyóiratok mellett nemzetközi konferenciákon is beszámoltak. A karlsruhei egyetemmel fennálló kapcsolatok alapján



a Schmidt-módszer (lánghőmérséklet mérés a falazat tulajdonságainak figyelembevételével) különféle változatainak ellenőrzésére a tanszék koordinálásával a VEIKI százhalombattai Olaj- és gázégés Vizsgáló Állomáson került sor.



1. ábra. a) Ütköző szabadsugár [1]. b) Venturi pirométer [2]

Az ipari megbízások alapján végzett, alkalmazott kutatások közül a következő témák emelkednek ki:

- salakolvasztó tüzelőberendezés salakgyapot előállításához,
- Venturi-pirométer (1b ábra),
- Szalma körbála tüzelő berendezés (több szabadalmi bejelentés is történt)
- terményszárító,
- lüktető tüzelőberendezés,
- lángütközésnek kitett csőfalak méretezési eljárásának kifejlesztése,
- kisteljesítményű olajégők összehasonlító vizsgálata,
- szénhidrogén-tüzelő berendezések biztonsági előírásainak kidolgozása, valamint
- technikai minimum fűtőérték megállapítása.

Az MTA Áramlás és Hőtechnikai Akadémiái Bizottságának felkérésére 1973-ban a hazai kutató, fejlesztő intézetek bevonásával a tanszék munkatársainak irányításával tanulmány készült a hazai égőgyártás helyzetéről, amely a különböző helyeken folyó, égőkkel kapcsolatos kutatásokat is érintette. 1977-ben az Országos Műszaki Fejlesztési Bizottság felkérésére Olaj- és gázégők fajlagos teljesítményének növelési lehetőségei címmel készült ismertető tanulmány készítését koordinálták a tanszék munkatársai. Az olaj- és gáztüzelés fejlődése, a gyakorlatban szükséges alapismeretek bővülése, az 1970-es évek közepén indokoltá tette az addig a Gőzkazánok tárgy keretében előadott tüzeléstechnikai ismeretek külön Tüzeléstechnika tantárgyként történő bevezetését. A tananyag elsajátításának elősegítésére Bassa Gábor professzor az 1980-as

években Tüzeléstechnika, illetve Lángok áramlása című jegyzetek kiadását is kezdeményezte.

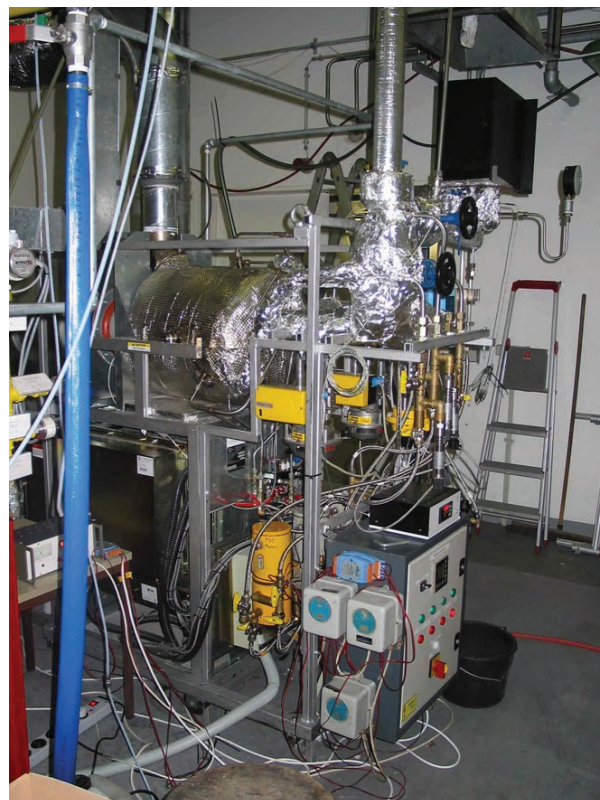
A fentebb említett tüzeléstechnikai kutatási területek közül a lüktető tüzelés kísérleti és elméleti vizsgálatát Penninger Antal folytatta, eredményeit a 21. International Symposium on Combustion konferencián ismertette [3]. Az égési instabilitásokkal kapcsolatosan több szabadalmat is jegyez [4,5] a hazai és nemzetközi fórumokon publikált kutatási eredmények mellett [6,7]. Vizsgálatokat a laboratóriumi mérőrendszerek mellett ipari berendezéseken is végzett, szilárd, folyékony, valamint légnemű tüzelőanyagok esetén egyaránt. Penninger Profeszor három fő kutatási területe a: Diesel motor előmelegítő lüktető tüzelőberendezés vizsgálata, a periodikus tüzelés lengés vizsgálatai valamint szénportüzelés változó ballaszt tartalma miatt kialakuló lengések voltak. Fülöp Zoltánnal és Scharle Erzsébettel a palaolaj kitermeléséhez nagynyomású tűzteret fejlesztettek ki a '80-as években, mely 60 bar nyomáson is képes volt üzemelni. A számítástechnika térnyerésével megjelenő matematikai modellezési lehetőségeket hatékonyan alkalmazta a tüzeléstechnikai jelenségek vizsgálatára [8]. A tüzeléstechnikai alkalmazások mellett aktívan részt vett hőerőgépes projekteken, a Kalorikus Gépek és a Tüzeléstechnika tárgy előadója volt több évtizeden keresztül, melyekhez jegyzetet is írt [9,10]. 1989-től a Kalorikus Gépek Tanszék tanszékvezető egyetemi docense, 1995-től tanszékvezető egyetemi tanára. A 2002-ben az Energetika Tanszékkel való összeolvadás után, egészen 2008-ig az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék vezetője, 2001–2008-ig a Gépészmérnöki Kar dékánja. Kulcsszerepet játszott a 2010-ben alakult BME-AUDI Kooperációs Kutatóközpont megalakulásában, melyet nyugdíjba vonulásáig vezetett, egyúttal támogatta a belső égésű motorokkal kapcsolatos kutatási munkát [11,12]. Témavezetésével a tanszék jelenlegi munkatársai közül Laza Tamás, Lezsóvits Ferenc és Sztankó Krisztián szereztek PhD fokozatot.

## 2. Tüzeléstechnikai kutatás-fejlesztési projektek az energetikai gépek és rendszerek tanszéken

A két elődtanszék összeolvasásának évében indult a BIOHPR-NAS című, EU FP5 (ENK5-CT-2000-00311, 2002-2005) kutatás-fejlesztési projekt a TU München vezetésével, melynek keretein belül a környezetinél többször magasabb nyomáson üzemelő biomassa elgázosító berendezést fejlesztettek. Tanszékünk feladata az ebből kilépő prolíziszgáz hasznosítása volt kogenerációs céllal. A pirolíziszgázban található kátrány kiszűrése helyett a gázt 300 °C feletti hőmérsékleten hasznosította egy Capstone C30 típusú mikro-gázturbina. Az előkísérletek a tanszéki laboratóriumban kaptak helyet. Létrehoztunk egy szintetikus pirolíziszgáz keverő, valamint egy gázturbina fúvóka vizsgáló rendszert, ahol vizsgálták a lehetséges pirolíziszgáz összetételek égéstechnikai tulajdonságait. Ezt követően létrehoztunk egy alternatív tüzelőanyagellátó rendszert a mikro-gáztubinához, amelyet szintén teszteltünk a szintetikus gázzal. A kiegészített gázturbinát a TU München telephelyén sikeresen összekapcsolták a nagynyomású gázosítóval [13,14]. A projektben Penninger Antal, Bereczky Ákos, Gróf Gyula, Kovács Viktória, Könczöl Sándor, Sztankó Krisztián, Bednarik József és Lezsovsits Ferenc vettek részt.

A BIOHPR-NAS projekt folyamánként az IZES GmbH – Saarbrücken kutatója a tanszékünkön folytatott doktori tanulmányokat biomassza kazánok por és emisszió csökkentési lehetőségek vizsgálata területén. A kutatás témája a háztartási méretű biomassza kazánok por-emisszió csökkentési lehetőségek vizsgálata és egy alkalmas leválasztó berendezés fejlesztése volt. A projekt





2. ábra. A Münchener egyetem laboratóriumába próbaüzemre beépített mikrogázturbina

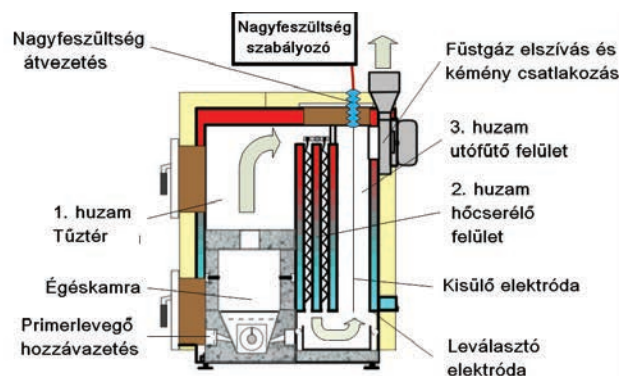
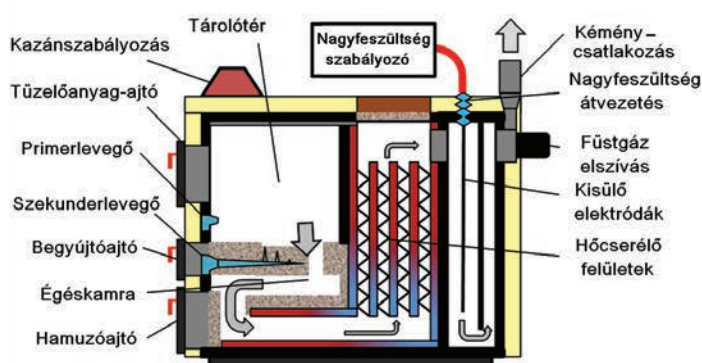
keretében egy akár utólag is a legtöbb ilyen kazánhoz illeszthető elektrosztatikus porleválasztó kifejlesztése történt meg. Az elkészült kísérleti rendszeren végzett mérések igazolták a módszer hatékonyságát. [13, 14] A projektben Alexander Bernhardt, Gróf Gyula és Lezsovits Ferenc vettek részt.

Az NKFP 3/018/2001: Az alacsony fűtőértékű gázok környezetbarát hasznosítása (2002-2006) projekt tüzeléstechnikához kapcsolódó célkitűzése a különböző összetételű alacsony és időben változó fűtőértékű gázok hasznosításához az égési folyamat vizsgálata és a szabályozás kidolgozása volt. Ennek során különböző alacsony fűtőértékű gáz égési tulajdonságait vizsgáltuk mind laboratóriumi, mind helyszíni mérések során. Továbbá meghatároztuk az oxigéndúsítás hatását és annak szükségességét a felhasználáshoz. A mérésekhez épült meg az EGR Tanszék emissziómérő mozgó laboratóriuma [15], amely lehetőséget teremtett különböző berendezések emissziójának helyszíni mérésére. Továbbá az égési folyamatok vizsgálatára egy tanszéki fejlesztésű lángterjedési sebesség mérésére alkalmas

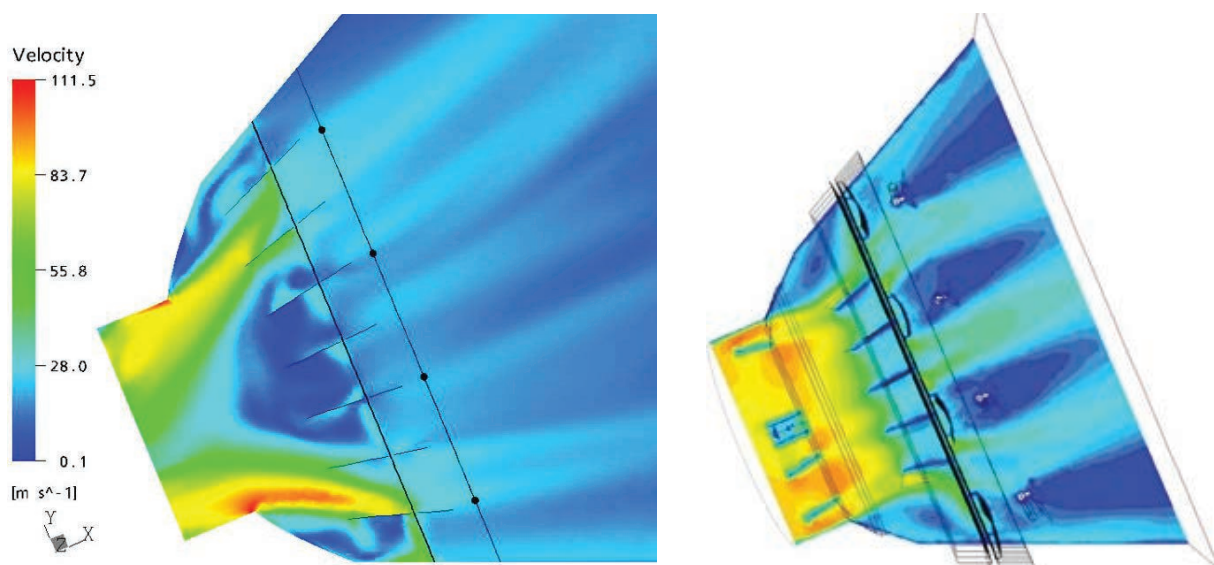
rendszer készült, mely később hallgatói mérésenként is megjelent több tárgyban. A mozgó laboratóriummal számos helyszínen különböző gázokat vizsgálhattunk meg, pl. biogázok, depónia gázok, nagy inerttartalmú gáz, „fagáz” és szennyvíziszap-gáz. Továbbá meghatároztuk a felhasználáshoz szükséges oxigéndúsítás mértékét.

Tanszéki résztvevők: Dr. Ősz János, mint projekt vezető, a tüzeléstechnikai vizsgálatok témafelelőse Dr. Meggyes Attila volt, résztvevők: Dr. Bereczky Ákos, Bednarik József, Petró Balázs, Cséfalvay Edit, Horváth Anita, Kovács Viktória. Több későbbi kolleginánk ekkor még egyetemi hallgatóként csatlakozott a projekthez.

A Transelektro által Rigában kivitelezett kogenerációs fűtőműben a gázturbina után beépített csatornaégő magas CO és NO<sub>x</sub> emisszió mellett üzemelt. A vizsgálat során kiderült, hogy a nagy CO emisszió a rendezetlen, jelentős turbulenciával rendelkező füstgáz-áram miatt alakul ki. Javaslatot tett tanszékünk egy további áramlásrendező beépítésére, ami kihívás volt a rendelkezésre álló szűkös hely és a nagy nyílásszögű diffúzor miatt. A koncepció lényege



3. ábra. Két integrált elektrosztatikus porleválasztó rendszerrel ellátott biomassza tüzelésű kazán egyszerűsített sémája



4. ábra. Az áramlásrendezés előtti és utáni áramkép CFD szimulációs eredménye

az volt, hogy lokálisan a csatornaégők környezetében csökkenteni kell a közegsebességet. Végül a javaslat szerinti áramlásrendező beépítésével, a projekt sikerrel zárult [16]. A projektben Könczöl Sándor, Sztankó Krisztián és Lezsovits Ferenc vettek részt.

### 3. Tüzeléstechnikai kutatások az Energetikai gépek és rendszerek tanszéken

A 2. fejezetben említett EU5-ös projekt folytatásaként több ötlet is felmerült megújuló tüzelőanyagok gázturbinás alkalmazása kapcsán. Az egyik ilyen ötlet az új Tanszék és a Karlsruhei Műszaki Egyetem (TH) Institut für Thermische Strömungsmaschinen közötti együttműködés keretében valósult meg. Ennek a projektnek a keretében Laza Tamás dolgozott két évet kiküldetésben, és vizsgált meg gázturbinákban alkalmazott segédközeges porlasztók porlasztási tulajdonságait, lángstabilitását, emissziós értékeit kerozin Jet-A és nyers, hidegen préselt repceolaj tüzelőanyaggal. A mérések során a világ élvonalába tartozó PIV, LDA, PDA mérőműszerek segítségével a képződő cseppek sebességét, átmérőjét térképeztük fel, különböző levegő és tüzelőanyag hőmérsékletek esetén.

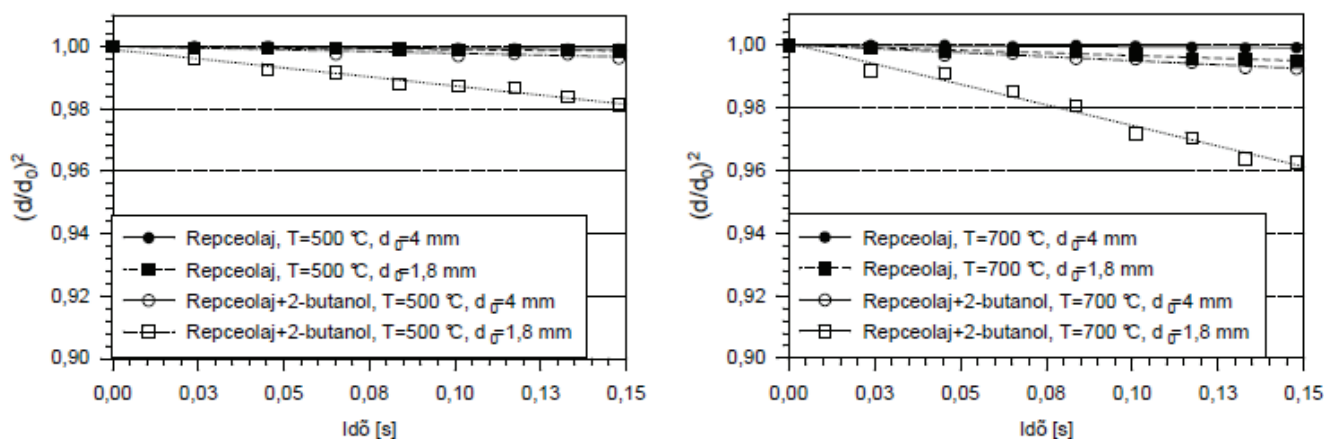
A repceolaj a repülésben használt kerozinétől eltérő, porlasztásnál lényeges tulajdonságai miatt a párolgási sajátosságait tüzetesebb kísérleti vizsgálatoknak vetettük alá, hogy a karlsruhei együttműködés során nyert eredményeket pontosabban értelmezni lehessen. Ehhez a portugáliai ISEL-el történő együttműködés keretében végez-

tünk vizsgálatokat. A párolgási tulajdonságok javítása érdekében a repceolajhoz magasabb rendű alkoholokat kevertünk (5. ábra).

Vizsgálataink alapján sikerült javítani a nyers repceolaj égését, illetve az itt végzett munka adott ötletet a nyers repceolaj belső égésű motorban történő felhasználásakor fellépő gyulladási problémák orvoslására, amiből szintén több cikk, illetve nemzetközi konferenciákon (német, európai illetve nemzetközi tüzeléstechnikai napok) előadás született [17,18].

A 2. fejezetben bemutatott és sikeres NKFP 3/018/2001 projekt alapján fordult az érdeklődésünk elsősorban a megújuló tüzelőanyagok vizsgálatára, melyre épült a K-46860 OKTA pályázat. Ennek során négy megújuló gáz vizsgálatával foglalkoztunk: anaerob fagáz, producer gáz, szintézis gáz és 60 V/V% CH<sub>4</sub> tartalmú biogáz. Ezeknek a gázoknak modelleztük a tüzelési tulajdonságait (pl. lángterjedési sebességüket), a kialakuló lángképet és számos, azóta is használtban lévő kísérleti rendszert fejlesztettünk és alkalmaztunk. Kidolgoztunk a „Schlieren” berendezéshez egy digitális képfeldolgozási módszert, amivel a CFD vizsgálatokat tudtuk validálni, valamint elkészült egy lángspektroszkópi és egy lángionizációs mérőrendszer, melyekkel számos mérést végeztünk későbbi kutatásaink során is. Tanszéki résztvevők: Bereczky Ákos (projektvezető), Gróf Gyula, Kovács Viktória, Somogyi Bence és Petró Balázs.

A 2. fejezetben említett EU5-ös projekt folytatásaként több ötlet is felmerült megújuló tüzelőanyagok gázturbinás alkalmazása



5. ábra. Fajlagos átmérő változásának négyzete az idő függvényében tiszta repceolaj, valamint repceolaj + 1-butanol elegye esetében, 500 és 700 °C-on [18]



kapcsán. Az első szeszipari elő- és utópárlat hasznosítása tüzelőanyagként, melyen Bereczky Ákos, Gróf Gyula, Könczöl Sándor, Kun-Balog Attila, Lezsovits Ferenc és Sztankó Krisztián dolgoztak, a kutatási eredményekből két magyar szabadalom született. Mivel a Capstone C30 mikro-gázturbina szabályzórendszere a kimenő teljesítmény alapján adagolta a tüzelőanyagot, így a hozzátüzelés megvalósítása nem igényelte a gázturbina szoftveres módosítását. A folyadékküzmű mikro-gázturbina állapota a demonstrációt követő kültéri tárolás miatt megromlott, a rendszer költséges javítására később nem került sor. A következő ötlet a gázturbina légáramába porlasztott alkohol volt, mely csak kis hányadban hasznosult a tüztérben a nagy globális légfelesleg miatt, így ezt az eljárást elvetettük [19]. Mivel a gázturbina égője levegő segédközege porlasztást alkalmazott, felvetődött, hogy gőzzel, adott esetben az előpárlat gőzével lehetne a porlasztást végezni, ugyanis a vízgőz kedvező hatása az égésre már a XVIII. század végétől dokumentáltan ismert volt [20], egyúttal az alkoholtartalmú elegy semlegesítése is biztosított lenne. A 2010-es évek környékén a megújuló folyékony tüzelőanyagok térnyerése világszerte látványos volt, így felmerült, hogy nyers növényi olajat tüzeljünk a mikro-gázturbinában. A szakirodalomban már láttunk példát erre, ahol komoly lerakódásokat tapasztaltak az égőn [21]. A balesetek, illetve a gázturbina károsításának elkerülése végett így először inkább atmoszférikus viszonyok mellett, egyedi gázturbina égőt vizsgáltunk repceolaj tüzelés esetén, amit a 6. ábra mutat. Arra a következtetésre jutottunk, hogy a repceolaj alacsony illékonyasága miatt szükség van atmoszférikus tüzelés esetén a láng által biztosított hőszugárzásra, különben a láng rövid időn belül kialszik. Ezt a sugárzásos hőmennyiséget egy megfelelően kialakított, zárt tüztér is tudja biztosítani.

A gázturbinaégő számos további kutatás alapját képezte, végül az atmoszférikus tüzelés esetén gyűjtött tapasztalatokat a mikro-gázturbinában nem hasznosítottuk, azonban kutatásaink új irányt vettek az atmoszférikus, turbulens, perdületes, stacionárius tüzelés átfogó vizsgálatával. Vizes etanol tüzelés esetén bemutattuk, hogy a vegyészek által alapértelmezetten 96%-os koncentrációhoz képest a 86% koncentrációjú etanol gyártásához közel harmad annyi energia szükséges, tüzelési szempontból pedig a különbség a koncentráltabb tüzelőanyaghoz képest csekély [23]. Az  $\text{NO}_x$  kibocsátás az alkohol víztartalmának növelésével csökken, majd túlzottan híg elegyek esetén a CO és az elégetlen szénhidrogének koncentrációja indul növekedésnek, mely eredmény elméleti oldalról várható volt. Mivel a gázturbinaégő zárt tüztérre és növelt égőtérnyomásra van tervezve, ezért a szükséges üzemi tartományt különböző diffúzorok segítségével terjesztettük ki [24], mely a szénportüzelésben égőként ismeretes. A tanszéken a korábbi kutatásokból [25] rendelkezésre álló spektrométert, mint technológiát, az irodalomban elterjedten használják lamináris lángok légfelesleg-tényezőjének az online becslésére, hiszen a kemilumineszcens emisszió fénysebességgel terjed. Megvizsgáltuk, hogy a károsanyag-kibocsátás miképp korrelál a szennyezőanyagok koncentrációjával, ami során egyedül a CO-val találtunk számottevő kapcsolatot [26].

Új kutatási irányként jelent meg a lángakusztika, mely diagnosztikai célú alkalmazása 2022-től elérhető a Siemens ipari gázturbináihoz. A tanszéken a kapcsolódó kutatások 2016-ban indultak, melyből egy magyar szabadalom is született, amit később kiterjesztettünk az USA területére, sajnos a Siemens tőlünk teljesen függetlenül fejlesztette ki az eljárását. A láng dinamikus viselkedését a hőfelszabadulás és a nyomásingadozás együttesen kiválóan leírja, azonban az akusztikai jel hordozza az információ döntő több-



6. ábra. Repceolaj-tüzelés (balra), dízelolaj-tüzelés egyenes lánggal (középen) és dízelolaj-tüzelés V alakú lánggal (jobbra) [22]

ségét. E mellett a kemilumineszcens emisszió dinamikus mérése is számos alkalmazásban helyet kapott [27], néhány területen ez praktikusabb megoldás. A lángakusztikai spektrumot a hagyományos Fourier-transzformáció mellett Wavelet-transzformációval is értékeltük. Egy minta eredmény látható a 7. ábrán.

Beláttuk, hogy a folyadéktüzelés átfogó értékeléséhez a permetet kellő mélységben szükséges ismernünk, hiszen ez alapjaiban határozza meg a párolgást, a keverékképzést, így végső soron az égést, kihatva a kibocsátásra is. A kapcsolódó vizsgálatokat a Brno Műszaki Egyetemen végezte Urbán András 2015 [29] és 2017 [30] nyarán az ottani kutatókkal közösen, az egyik tartalék Capstone égőt használva. A mérések sikertelenek voltak a keverőcsővel, így azt a helyszínen eltávolították, ami már kiváló eredményeket mutatott. 2017-ben egy igen átfogó vizsgálatot sikerült megvalósítani, így az adatsort 2022-ben a brnoi kollégák felterjesztették az ERCOFTAC adatbázisba referencia adatsorként. A vizsgálatokat alapvetően Fázis Doppler Anemométerrel (PDA) végezték, közel 400 millió egyedi cseppet regisztrálva. E mellett gyorskamerás módszerrel, 160.000 képkocka/másodperc rögzítési sebességgel, felvételeket készítettek a fúvóka környezetéről. A kapcsoló kutatások még ma is aktívan folynak, hiszen a nagyméretű, átfogó adatbázis általános statisztikai elemzése, illetve a képfeldolgozás rengeteg új eredményre vezet.

A porlasztással kapcsolatos kutatások eddigi legjelentősebb eredményei a határviszkozitás fogalmának bevezetése [30] és a gázfázis sebességének torzítatlan becslése [31]. Az előbbi eredmény szerint a folyadékok viszkozitásának minden határon túli csökkentése nem vezet az anyagjellemzőkből becsülnél jobb permetminőségre, míg a határviszkozitástól nagyobb viszkozitású folyadékok esetén a viszkozitás csökkenésének fokozottan kedvező hatása van a permetminőségre.

A gázfázis sebességének algoritmikus meghatározása a PDA-val végzett mérések eddigi gyakorlatával szakít, ugyanis a permetben a gáz áramlási sebességét hagyományosan a néhány  $\mu\text{m}$  átmérőjű cseppekből határozták meg. Természetesen az ideális, zérus tehetetlenségű folyadékcsepp nem létezik, illetve túl kicsiny ahhoz, hogy az általában zöld lézertérnyel ezeket detektálhassuk. Továbbá a Laplace nyomás miatt a porlasztás során tetszőlegesen kicsiny cseppek sem keletkeznek, így a néhány  $\mu\text{m}$  átmérőjű cseppek száma véges, továbbá ezek nagyobb cseppekkel együtt keletkeznek sok esetben, így nem kellően reprezentatívak, mivel a

mozgásukat a nagyobb cseppek számottevően befolyásolják. Bár az elemzéseink során beláttuk, hogy a legtöbb esetben az általunk alkalmazott módszertannal a határ cseppméret az ökölszabályként alkalmazott néhány  $\mu\text{m}$  méretűre adódik, ez az eredmény főként lassabb permetek esetében már nem, nagyobb sebességek esetén pedig nem általánosan alkalmazható. Továbbá be kellett vezetnünk egy új definíciót a Stokes-számra, mivel a korábbiak alkalmatlanok voltak valamennyi porlasztótípus esetén a permetben érvényes gázsebesség meghatározására. Egy eredményt a 8. ábra szemléltet.

A folyékony tüzelőanyagok a porlasztóból kilépve párologni kezdenek. Ezért a párolgás pontos ismertetése a modern, homogén tüzelőanyag-levegő keverékkel üzemelő tüzelőberendezések esetén kritikus, a tüzelőanyagcseppeknek el kell párologniuk a reakciózóna előtt. Ebből a célból vezettük be a következő, időléptékek aránya alapján meghatározott párolgási számot [32]:

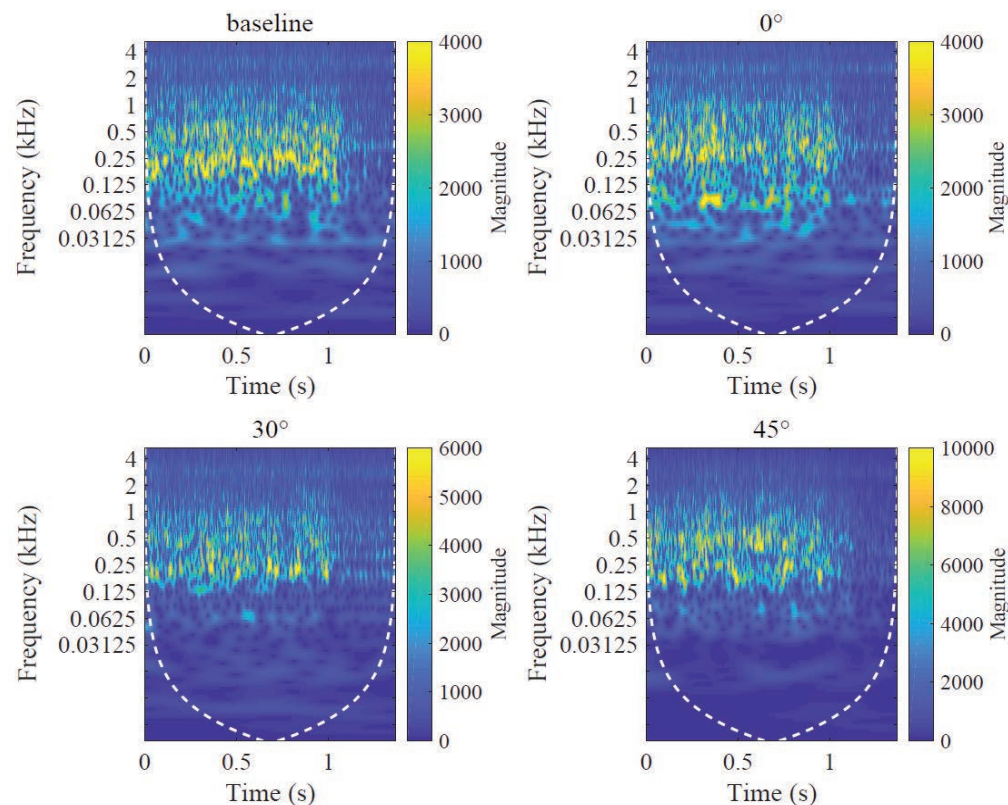
$$Ev = \frac{\tau_{\text{párolg}}}{\tau_{\text{tart}}}, \quad (1)$$

ahol  $\tau_{\text{párolg}}$  a csepp teljes elpárolgásához szükséges idő, míg  $\tau_{\text{tart}}$  a tartózkodási idő. A dimenziótlanság megmutatja, hogy a csepp adott tartózkodási idő alatt képes-e teljesen elpárolgani vagy sem. A valós tüzelőanyagok igen összetettek, továbbá a párolgás teljeskörű becsléséhez ritkán állnak rendelkezésre a szükséges anyagjellemzők, valamint mérési adatokat növelt környezeti nyomáson nehéz megfelelően kivitelezni. Ezen problémakört járta körbe Csemány Dávid doktori kutatásai során. Beláttuk, hogy normál alkánok esetén a környezeti viszonyok melletti párolgás alapján nagy nyomáson egy empirikus formula segítségével jól becsülhető a folyadékcsepp párolgása [33]. Az irodalomban rendelkezésre álló, csoportjárulék módszerrel, illetve megfelelő állapotok tételén alapuló anyagjellem-

ző becslő módszereket a tüzeléstechnikában gyakori paramétertartományon értékeltük és megmutattuk a feladatra legalkalmasabb eljárást [34]. A tanszéki laboratórium egy helyiségét berendeztük tüzelőanyagvizsgáló laboratóriumnak, ahol több megújuló tüzelőanyag hőmérsékletfüggő sűrűségét és viszkozitását mértük meg, illetve desztillációs kísérleteket végeztünk.

A BME Tüzeléstechnikai Kutatócsoport (crg.energia.bme.hu) alakulását 2017. 09. 01-jétől számítjuk, ugyanis ekkor kezdődött az az OTKA pályázat, melyből megépítettük azt az alacsony károsanyag kibocsátású égőt, mely az eddigi kutatási tevékenységünk talán legfőbb eredménye. Az égő egy szokványos perditőelemes, folyadék és gáztüzelésre egyaránt alkalmas modellnek indult, azonban a névlegesen 30 kW teljesítményre tervezett porlasztó közel félteljesítményen homályos, derengő, az egész égőteret kitöltő lángot produkált, ahogy ez a 9. ábrán látható. Tapasztalatból azt gondoltuk, hogy a füstgáz biztosan jelentős mértékben tartalmaz elégetlen tüzelőanyagot, azonban meglepetésünkre minden számottevő emisszió koncentrációja 10 ppm körül ingadozott, az elégetlen szénhidrogének koncentrációja sosem haladta meg az 5 ppm-et. A láng továbbá jó stabilitási mutatókkal, jelentősen alacsonyabb zajkibocsátással bír [35]. Ezt a jelenséget először 2019. novemberében tapasztaltuk, azonban közel egy év volt hozzá szükséges, hogy megértsük az újfajta láng viselkedését. Azóta számos további mérést végeztünk, melyek hozzájárultak a fő folyamatok azonosításához, ezeket alább tekintjük át.

Az irodalomban több mint 50 éve ismert, hogy térfogati tüzelés elérhető külső vagy belső füstgáz recirkulációval, ami jelentősen lecsökkenti a reakciózónában a reakciók sebességét, ezáltal homogén, lassú égést hozva létre. Mivel ilyen körülmények között a kemilumineszcens emisszió is jelentősen lecsökken, sok esetben teljesen megszűnik a látható tartományban, láng nélküli tüzelés-

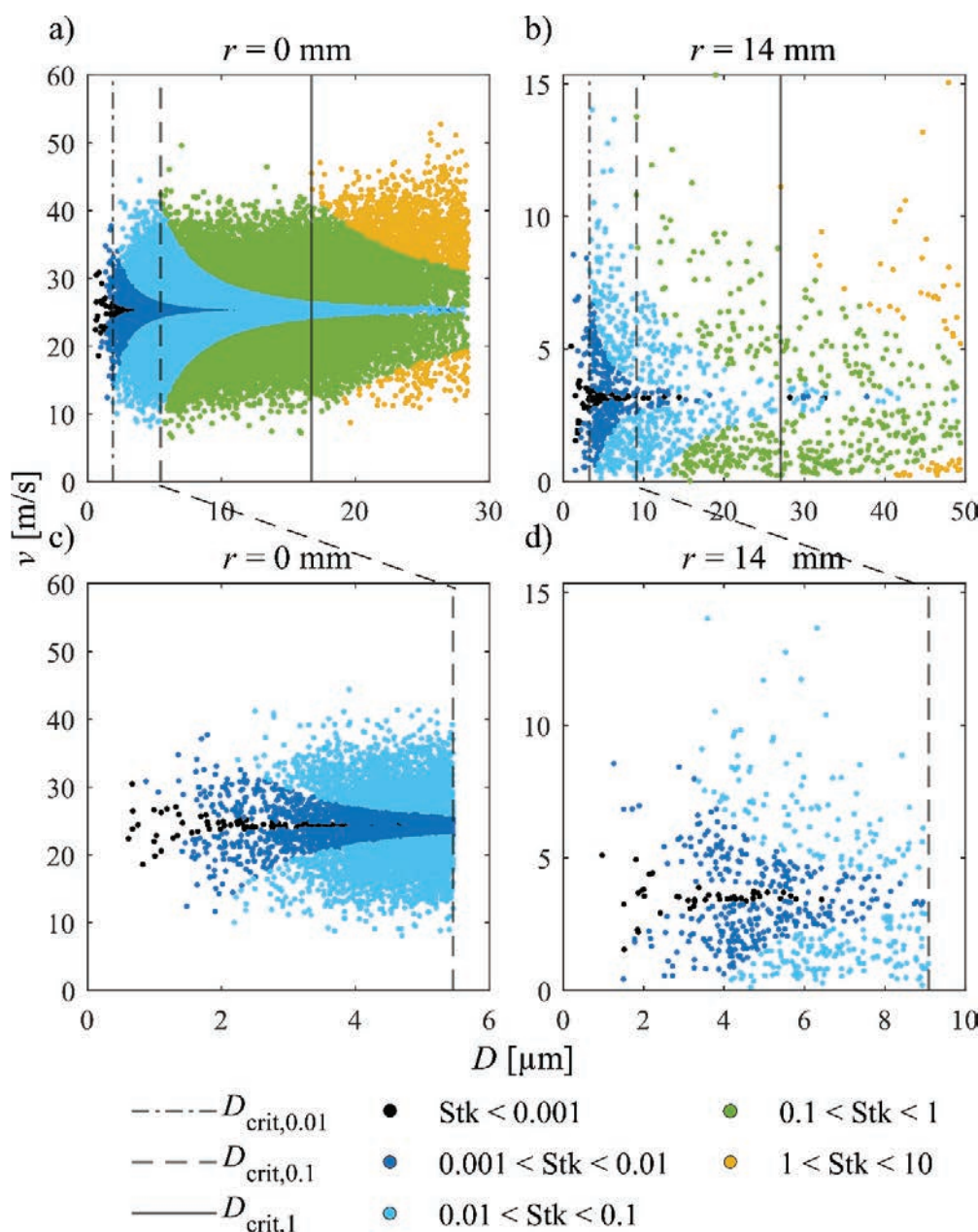


7. ábra. Különböző diffúzorok alkalmazása mellett mért akusztikai spektrum a lángkialvás során. A hangfájlt a Morse wavelet segítségével transzformáltuk [28].

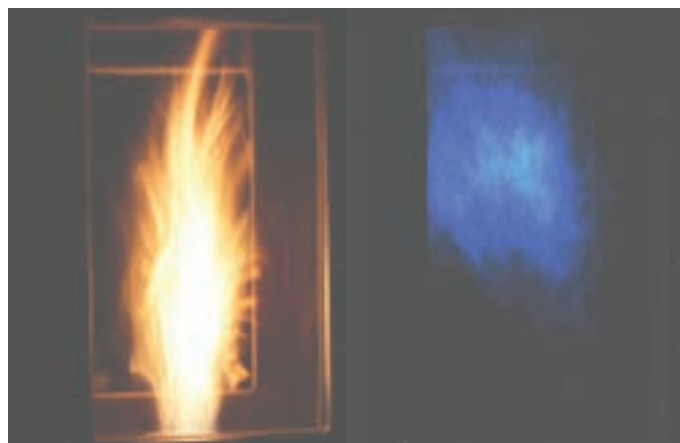
ként is hivatkoznak erre a koncepcióra az irodalomban. Azonban a térfogati tüzelés folyékony tüzelőanyagok esetén sosem lesz teljesen láthatatlan [36]. A térfogati égést esetünkben bizonyítottan számottevő külső vagy belső recirkuláció nélkül értük el [37]. Ehhez mi is a gyulladási időt növeltük, mint a recirkuláció segítségével megvalósított térfogati tüzeléses esetekben szokásos, azonban ezt a levegő segédközeget porlasztó hideg gázáramán keresztül valósítottuk meg, ahogy ez a 10. ábrán látható. Ezért az új koncepciót, mely számottevően különbözik más, alacsony kibocsátást megvalósító tüzelési koncepcióktól, Keverékhőmérséklet-szabályozott (KHSz) tüzelésnek neveztük el. Mivel gázturbina tüzterekben a recirkuláció nehezen valósítható meg [38], ezért a KHSz koncepció kifejezetten alkalmas lehet gázturbinákhoz.

A károsanyag kibocsátás kedvező alakulása nyilvánvalóan





8. ábra. Méret-sebesség eloszlás dízelolaj permet esetén, 60 mm-re a fűvókától.  
a) a tengelyben, b) a peremen. c) és d) az adatsorokat szűrtük Stokes-szám  $\leq 0,1$  mentén [31].



9. ábra. Hagyományos egyenes láng (balra) és a térfogati tüzelés egy fényes képe. A felvételeket azonos fényképező beállításokkal készítettük.

pozitív eredmény az ipar számára, azonban ez kevés az új koncepció általános bevezetéséhez. Szükséges ismerni a láng szerkezetét, illetve a körülményeket, melyek lehetővé teszik a térfogati láng kialakulását KHSz tüzelés segítségével. Ezért a Brno Műszaki Egyetem egyik kutatója, Milan Malý, 2021 nyarán a tanszékünkre látogatott, és 2,5 hónapon keresztül intenzíven dolgoztunk a laborban, hogy feltárjuk a láng és a permet szerkezetét Schlieren optikai eljárás [40], illetve PDA segítségével. Ez utóbbi eredmények átfogó értékelése jelenleg folyamatban van.

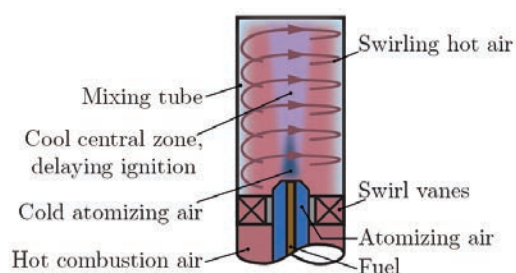
2022. áprilisában az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Energia-tudományi Kutatóközpontja kölcsönözte számunkra a részecsképek alapú sebességmérő (PIV) rendszerét, mely segítségével a középsíkban sikeresen értékeltük a térfogati égés sebességeloszlását, az eredmények publikációja folyamatban van. Egy jellemző sebességmezőt láthatunk a 11. ábrán.

Az utolsó nagyobb terület a lángok numerikus áramlástani modellezése. Mivel a KHSz tüzelés egy teljesen új koncepció, illetve a térfogati tüzelés általános modellezése sem megoldott [36], ezért kimagasló eredmény, hogy sikerült azonosítani azokat a modellparamétereket, melyek változtatása segítségével modellezhető a térfogati tüzelés [37]. A térfogati tüzelés általánosabb, reakciókinetikai oldalról is meg támogatott feltételein jelenleg az ELTE Reakciókinetikai

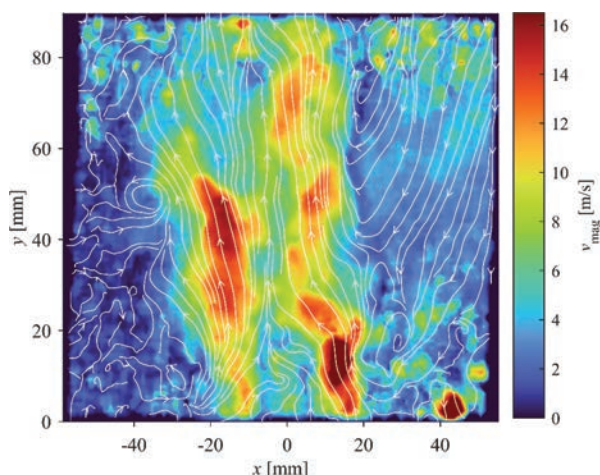
Laboratóriumával közösen dolgozunk együtt.

A jogalkotók a fejlett gazdaságokban magas prioritást adtak a karbonsemleges tüzelőanyagokkal kapcsolatos kutatásoknak. Így kutatócsoportunk is elkezdte az ammónia és hidrogén alapú tüzelési lehetőségek értékelését. A laboratóriumban kiépítettük az ammóniatüzelést lehetővé tévő rendszert, továbbá a hidrogénes rendszer építése folyamatban van. Felmerül, hogy ha ezek a tüzelőanyagok a kezdetben kisebb mennyiségben fognak előállni, úgy megéri-e ezeket bekeverni például a földgázhálózatba. Így numerikusan értékeltük ezt a lehetőséget [41].

A tüzeléstechnikai vizsgálatok környezetvédelmi vonatkozásait tekintve Horváth István Tamás ötlete nyomán biomassza konverzióval előállított vegyületeket vizsgálatunk mint potenciális grill gyújtó-folyadék, elemeztük őket környezetvédelmi szempontból, valamint vizsgáltuk égetésük során keletkező emissziót. Igazoltuk, hogy biomasszából, valamint papírhulladékból származó szénhidrát egysé-

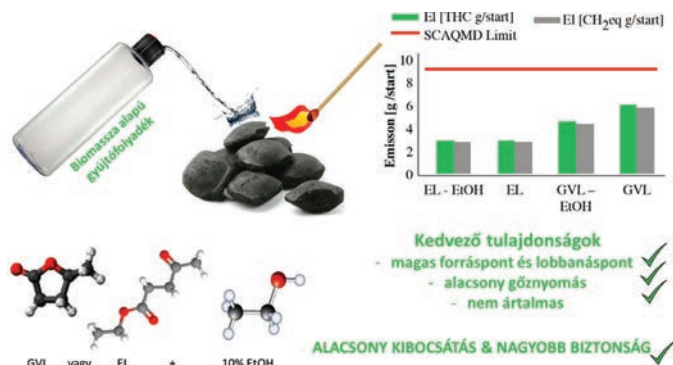


10. ábra. A térfogati tüzelés megvalósítása KHSz tüzelés segítségével [39]



11. ábra. Pillanatnyi sebességmező PIV technika segítségével. Az égőtér belső méretei: 150×150 mm keresztmetszet, 500 mm hosszúság.

gekből is előállítható gamma-valerolakton (GVL) gyújtóanyagként alkalmazható [42]. Áttekintettük a preferált biomassza konverzióval előállított vegyületeket, amelyeket az alábbi tulajdonságok szerint válogattunk: relatíve magas lobbanás- és forráspont, alacsony gőznyomás és toxicitás. A Jendrassik György hőtechnikai laboratóriumban a tanszéki munkaközösség (Bereczky Ákos, Cséfalvay Edit, Józsa Viktor, Kovács Krisztián, Kovács Viktória Barbara, Kun-Balog Attila, Laza Tamás és Lukács Kristóf) aktív közreműködésével egy gyújtóanyag emissziós vizsgáló kísérleti berendezés épült, amely az amerikai U.S. Code of Federal Regulations (section 59.208, title 40) tesztelési protokoll alapján működik. A környezetvédelmi elemzéseket számos kereskedelmi forgalomban kapható gyújtóanyagokra elvégeztük (Ronsonol, Zippo (1), Zippo (2), Dunsol, Landmann és Terracotta gyártmányúak) de tüzeléstechnikai kísérleteket csak a Magyarországon forgalmazott gyújtóanyagokkal végeztük (Landmann és Terracotta). Hasonlóképp a biomassza konverzióval előállítható biogyújtóanyagok esetében a környezeti elemzés egy tágabb csoportot fedett le (etil-levulinát (EL), GVL, etanol (EtOH) és n-butanol) míg az égetési kísérletek során az alábbi gyújtóanyagokkal folytattunk kísérletet: EL, GVL, és ezek 10 V%-ban etanollal kevert elegyei (EL-EtOH, illetve GVL-EtOH). Az égetési kísérletek során háttérként a faszén elektromos fűtőszállal hevítettük, így magából a faszénből származó elégetlen szénhidrogén (THC) és CO koncentrációt a füstgázelemzés során kapott koncentrációkból levontuk. Az emisszió számításához a USA EPA által javasolt összefüggést ( $EI [CH_2eq/start]$ ) valamint egy általunk módosított összefüggést használtunk ( $EI [THC g/start]$ ), lásd. 12. ábra. Górcső alá véve a biogyújtóanyagokat megállapítottuk,



12. ábra. Emisszió számítási módszerek összehasonlítása: gyújtóanyagok emissziója  $EI [THC g/start]$  és  $EI [CH_2eq g/start]$  a SCAQMD határértékével

hogy a vizsgált EL és GVL, valamint ezek etanolos keverékei bőven a South Coast Air Quality Management District (SCAQMD) által meghatározott határérték ( $0.02 \text{ lb VOC/start} = 9.072 \text{ g } CH_2/start$ ) vannak [43]. A biogyújtóanyagokkal végzett emissziós vizsgálatok, valamint komplex környezeti értékelés során nagyon kedvező eredményeket kaptunk, így kutatásunkkal hozzájárultunk a fosszilis tüzelőanyagok, speciálisan a fosszilis eredetű gyújtóanyagok biomassza eredetű társaikkal való kiváltásához.

## Összefoglalás

A tanszék elődjein folytatott oktatás, kutatás a tüzeléstechnika területén megalapozta az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken folyó sikeres munkát. A feladatok többsége a hazai ipari igényeknek való megfeleléshez fűződik, azonban az idő előrehaladtával, illetve a tüzelőrendszerek bonyolultságának fokozódásával a nemzetközi együttműködések felé vettük az irányt. A hazai égőfejlesztést, gyártást ma már csupán néhány cég üzi.

A tanszékünk talán legfontosabb tulajdonsága a szoros kötődés az iparhoz és az alkalmazásokhoz, így az elméleti eredmények gyakorlatba való átültetését magas színvonalon végezzük. Az energetika jelentős átalakulása várható a XXI. században, az új kihívásoknak örömmel vágunk neki, hogy elősegítsük a klímasemlegeség megvalósulását bolygónkon.

## Irodalomjegyzék

- [1] Gerse K. Szabadsugár lángok ütközésénél lejátszódó folyamatok vizsgálata. Energiagazdálkodás 1975;16:398–403.
- [2] Bassa G, Soproni G, Gerse K. Venturi pirométer magas hőmérsékletű gázok és lángok hőmérsékletének méréséhez. Energia és atomtechnika 1974;27:297–300.
- [3] Penninger A, Postásy R. The influence of pressure and velocity oscillation on heat release rate in combustion driven pulsating diffusion flame. Proceedings Twenty-First Int. Symp. Combust., Munich: The Combustion Institute; 1986, p. PS-114.
- [4] Penninger A, Kárpáti L. Eljárás és berendezés szénportüzelésű berendezésekben a lángstabilitás nagyságának meghatározására. 4868/86, 1986.
- [5] Penninger A, Kárpáti L. Eljárás és berendezés gáztüzelésű berendezések égési instabilitásának diagnosztizálására. 4867/86, 1986.
- [6] Fülöp Z, Penninger A, Czinkóczy B, Móricz I, Kóbor Á. Gas turbines connected before hot water boilers. Proceeding 5th Int. Symp. Expo. Gas Turbines Cogener. Repowering, Peak-Load Power Gener., North Conway, NH: American Society of Mechanical Engineers; 1991, p. 397–402.
- [7] Ginsztler J, Penninger A, Szeidl L, Várlaki P. Stochastic model-



- ling of stress processes in power plant boiler walls. *Int J Press Vessel Pip* 1996;69:119–24. [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(95\)00121-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(95)00121-2).
- [8] Penninger A, Kárpáti L. Microprocessor-Controlled Measuring System for Diagnosing Power Plant Equipment. *Newsletter - Technical University Budapest* 1992;10:31–9.
- [9] Penninger A. *Kalorikus gépek. 3. kiadás*, Budapest, Magyarország: Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék; 2017.
- [10] Penninger A. *A tüzeléstechnika alapjai: Bevezetés a hőfelszabadulás műszaki alkalmazásaiba*. Budapest, Magyarország: Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék; 2017.
- [11] Siwale L, Kristóf L, Adam T, Bereczky A, Mbarawa M, Penninger A, és mtsai. Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine. *Fuel* 2013;107:409–18. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.11.083>.
- [12] Szwaja S, Kovacs VB, Bereczky A, Penninger A. Sewage sludge producer gas enriched with methane as a fuel to a spark ignited engine. *Fuel Process Technol* 2013;110:160–6. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.12.008>.
- [13] Penninger A, Bereczky Á, Gróf Gy, Könczöl S, Lezsovits F, Sztankó K. Utilisation of Gasification-gas in Gas Turbine Generated from Biomass. *Proc. 7th Int. Conf. Heat Engines Environ. Prot.*, 2005, p. 183–8.
- [14] Penninger A, Meggyes A, Bereczky Á, Gróf Gy, Könczöl S, Lezsovits F, et al. Utilization of gas mixtures having high inert content generated from biomass in gas-engine and in gasturbine. *VDI Berichte* 2005;1888:267–72.
- [15] Ákos B. Emissziómérő mozgó laboratórium 2010. <http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=merokocsi&lang=hu> (accessed April 11, 2023).
- [16] Lezsovits F, Könczöl S, Sztankó K. Co emission reduction of a HRSG duct burner. *Therm Sci* 2010;14:845–54. <https://doi.org/10.2298/TSCI1003845L>.
- [17] Laza T, Bereczky Á. Basic fuel properties of rapeseed oil-higher alcohols blends. *Fuel* 2011;90:803–10. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.09.015>.
- [18] Laza T. Pilot test and theoretical analysis of evaporation of one and more component fuels. *Period Polytech Mech Eng* 2008;52:67–70. <https://doi.org/10.3311/pp.me.2008-2.05>.
- [19] Józsa V. Application of bioethanol in gas turbines. *Period Polytech Mech Eng* 2011;55:91–4. <https://doi.org/10.3311/pp.me.2011-2.05>.
- [20] Dryer FL. Water addition to practical combustion systems—Concepts and applications. *Symp Combust* 1977;16:279–95. [https://doi.org/10.1016/S0082-0784\(77\)80332-9](https://doi.org/10.1016/S0082-0784(77)80332-9).
- [21] Prussi M, Chiamonti D, Riccio G, Martelli F, Pari L. Straight vegetable oil use in Micro-Gas Turbines: System adaptation and testing. *Appl Energy* 2012;89:287–95. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.07.031>.
- [22] Józsa V, Kun-Balog A. Stability and emission analysis of crude rapeseed oil combustion. *Fuel Process Technol* 2017;156:204–10. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.11.004>.
- [23] Kun-Balog A, Sztankó K, Józsa V. Pollutant emission of gaseous and liquid aqueous bioethanol combustion in swirl burners. *Energy Convers Manag* 2017;149:896–903. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.064>.
- [24] Hidegh Gy, Józsa V. Diffúzor alkalmazása perdületes égő lánglefúvási stabilitásának növelésére. *Energiagazdálkodás* 2016;57:17–20.
- [25] Kovács V, Bereczky Á, Gróf Gy. Comparative Analysis of Renewable Gaseous Fuels by Flame Spectroscopy. *Proc. Eur. Combust. Meet.*, Crete, Greece: 2007, p. 1–4.
- [26] Hidegh Gy, Józsa V. Correlation analysis of chemiluminescent and pollutant emissions of a liquid-fueled turbulent swirl burner. *J Energy Inst* 2020;93:1390–8. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.01.001>.
- [27] Ballester J, García-Armingol T. Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames. *Prog Energy Combust Sci* 2010;36:375–411. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.005>.
- [28] Józsa V, Novotni G. Wavelet analysis of flame blowout of a liquid-fueled swirl burner with quarls. *Noise Control Eng J* 2019;67:394–403. <https://doi.org/10.3397/1/376734>.
- [29] Urbán A, Zaremba M, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Droplet dynamics and size characterization of high-velocity airblast atomization. *Int J Multiph Flow* 2017;95:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2017.02.001>.
- [30] Urbán A, Malý M, Józsa V, Jedelský J. Effect of liquid preheating on high-velocity airblast atomization: From water to crude rapeseed oil. *Exp Therm Fluid Sci* 2019;102:137–51. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.11.006>.
- [31] Rácz E, Malý M, Jedelský J, Józsa V. Gas-phase velocity estimation in practical sprays by Phase-Doppler technique. *Int J Multiph Flow* 2022;157. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2022.104260>.
- [32] Csemány D, Józsa V. Fuel Evaporation in an Atmospheric Premixed Burner: Sensitivity Analysis and Spray Vaporization. *Processes* 2017;5:80. <https://doi.org/10.3390/pr5040080>.
- [33] Csemány D, Józsa V. A Two-Parameter Corresponding States Method for Calculating the Steady-State Evaporation Rate of C2–C9 n-Alkane Droplets in Air for Elevated Pressures and Temperatures. *Flow, Turbul Combust* 2021. <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00238-7>.
- [34] Csemány D, Gujás I, Chong CT, Józsa V. Evaluation of material property estimating methods for n-alkanes, 1-alcohols, and methyl esters for droplet evaporation calculations. *Heat Mass Transf Und Stoffuebertragung* 2021;57:1965–79. <https://doi.org/10.1007/s00231-021-03059-0>.
- [35] Józsa V, Tóthpálné Hidegh Gy, Csemány D, Kardos RA, Chong CT. Dynamics and emission of nearly flameless combustion of waste cooking oil biodiesel in an ultra-low emission non-MILD swirl burner. *Fuel* 2022;319:123743. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123743>.
- [36] Wang F, Li P, Wang G, Mi J. Moderate and Intense Low-Oxygen Dilution (MILD) Combustion of Liquid Fuels: A Review. *Energy and Fuels* 2022;36:8026–53. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.2c01383>.
- [37] Füzesi D, Malý M, Jedelský J, Józsa V. Numerical modeling of distributed combustion without air dilution in a novel ultra-low emission turbulent swirl burner. *Phys Fluids* 2022;34. <https://doi.org/10.1063/5.0085058>.
- [38] Xing F, Kumar A, Huang Y, Chan S, Ruan C, Gu S, et al. Flameless combustion with liquid fuel: A review focusing on fundamentals and gas turbine application. *Appl Energy* 2017;193:28–51. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.010>.
- [39] Józsa V. Mixture temperature-controlled combustion: A revolutionary concept for ultra-low NOx emission. *Fuel* 2021;291:120200. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120200>.
- [40] Józsa V, Malý M, Füzesi D, Rácz E, Kardos RA, Jedelský J. Schlieren analysis of non-MILD distributed combustion in a mixture temperature-controlled burner. *Energy* 2023;273:127230. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127230>.
- [41] Füzesi D, Wang S, Józsa V, Chong CT. Ammonia-methane combustion in a swirl burner: Experimental analysis and numerical modeling with Flamelet Generated Manifold model. *Fuel* 2023;341:127403. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127403>.
- [42] Fábos V, Lui MY, Mui YF, Wong YY, Mika LT, Qi L, et al. Use of Gamma-Valerolactone as an Illuminating Liquid and Lighter Fluid. *ACS Sustain Chem Eng* 2015;3:1899–904. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00465>.
- [43] Cséfalvay E. Evaluation of Biobased Lighter Fluids. *ACS Sustain Chem Eng* 2018;6:8417–26. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00546>.

# Gőzerőművek vízüzeme – az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék szakértői szerepe és kutatási eredmények az elmúlt 20 évben

Ösz János

okl. gépészmérnök, osz@energia.bme.hu

Cséfalvy Edit

okl. környezetmérnök, csfalvy@energia.bme.hu

Az energetikai rendszerek egyik legfontosabb munkaközege a víz. Ez a cikk az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken az elmúlt két évtizedben vízüzemmél, vízkezeléssel kapcsolatos kutatásokról és ipari feladatok teljesítéséről számol be. Az elmúlt időszakban a tanszék egyik legjelentősebb feladata a Paksi Atomerőmű Üzemidő-hosszabbítás projekthez kapcsolódott ezért az ebben végzett feladatokat és eredményeket részleteiben is bemutatjuk.

\*

One of the most essential working fluids in energy systems is water. This article concerns the research and industrial projects related to water treatment at the Department of Energy Engineering in the past two decades. Recently, one of the most significant tasks of the department was related to the Paks Nuclear Power Plant Operation Life Extension project; therefore, we report in detail about the related tasks and results.

\*\*\*

Az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék kulcsszerepet játszott a Paksi Atomerőmű Üzemidő-hosszabbítás projektben, vezette a Vízüzemi-Korróziós Szakértői Testületet. A szakértői tevékenység ellátása mellett szakértői konzultációkat folytatott, annak érdekében, hogy az üzemidő-hosszabbítás megalapozása a legjobb tudományos ismeretek alapján valósuljon meg. Mind a primer-, mind a szekunder körre vonatkozóan megállapításokat tettek az üzemeltetésre vonatkozóan, amelynek következményeként a Paksi Atomerőmű üzemidő hosszabbítása sikeresen megvalósulhatott. Későbbiekben a Tanszék alaputatási pályázatban Erőművi pótvízvíz környezetbarát és energiahatékony előállítására címmel támogatást nyert elméleti és laboratóriumi kutatások megvalósítására. A kutatás során megállapításra került, hogy a vegyszeres derítés lebegőanyag eltávolítást tekintve teljes mértékben kiváltható mikroszűrővel. A kizárólag membrános technológián alapuló teljes pótvízkezelő technológia nanoszűrési és első fordított ozmózis lépésének koncentrációja jelent olyan hulladékvizet, amelynek sótartalmát vizsgálni szükséges, de ezek nátrium-egyenértéke messze elmarad a 27/2005 (XII.6.) KvVM rendeletben foglalt határértéktől. A javasolt technológia értékelése még folyamatban van.

## Paksi Atomerőmű Üzemidő-hosszabbítás szakértői munka

2004-2009 között az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék (EGR Tsz) koordinálta, működtette a Paksi Atomerőmű Üzemidő-hosszabbítás (ÜH) projekt Vízüzemi-Korróziós Szakértői Testületét (VSZT). A VSZT tagjai az alábbi személyek voltak [1]:

- Dr. Ösz János (elnök, BME EGR Tsz),
- Tajti Tivadar (titkár, LG Energia Kft.),
- Dr. Szabó Kálmán (ELTE Fizikai Kémia Tanszék),
- Dr. Nagy Gábor (KFKI AEKI),

- Dr. Dallos András (Veszprémi Egyetem (VE), Fizikai Kémia Tanszék),
  - Dr. Salamon Tamás (VE Fizikai Kémia Tanszék),
  - Dr. Varga Kálmán (VE Radiokémia Tanszék),
  - Dr. Bödök Károly (CORWELD Kft.),
  - Dr. Osztheimer Márton (VEIKI Rt.),
  - Beszédes Tamás (Országos Atomenergia Hivatal);
- valamint a Paksi Atomerőmű Rt. (PA) részéről: Patek Gábor, Tilky Péter, Dr. Schunk János, Doma Árpád, Dr. Pintér Tamás (Vegyeszeti Főosztály), Oszvald Ferenc (Anyagvizsgálati Osztály), Feil Béla (Üzemidő-hosszabbítás Projekt).

A VSZT szerződéses feladatai a következők voltak:

„A PA Rt. üzemidő-hosszabbítás előkészítésével kapcsolatos feladatok elvégzése a vízüzemi és korróziós szakterületen:

1. szakértői tevékenység ellátása,
2. az átadott dokumentumok, tervek szakértői véleményezése,
3. szakértői konzultációk folytatása,
4. más szakértők bevonása, azok tevékenységének koordinálása

annak érdekében, hogy az üzemidő-hosszabbítás megalapozása a legjobb tudományos ismeretek alapján történjen.

A Megbízott koordinációs tevékenysége keretében megszervezi, lefolytatja és dokumentálja az általa bevont más szakértők munkáját, gondoskodik arról, hogy a szakmai, szakértői és tudományos ismereteik érvényre jussanak a Megbízó részére történő teljesítések során (konzultációk és írásos szakértői vélemények).”

A VSZT fő szakmai javaslatai a vízüzemi-korróziós szakterületen az alábbiak voltak 2008-ban [2]. A szakmai javaslatokat – véglegesítés előtt – három neves külföldi szakemberrel (Ivan Smiesko, Keith Garbett, Francis Nordmann) véleményeztettük 2008-ban.

## A primerkör vízüzeme

A primerköri vízüzem a berendezések konstrukciójának, a primerkör szerkezeti anyagainak és a hűtővíz (vagy hőhordozó) kémiaiának „harmonikus” egysége. A primerköri vízüzem feladata a hűtővíz minimális elszennyeződésének, a berendezések minimális korróziójának, a primerkör elvárt korróziótermék transzportjának, s ezzel az aktív zóna megfelelő hűtésének, a fűtőelemek hermetikusságának, a primerköri berendezések tömörségének és a primerköri felületek minimális radioaktív kontaminációjának biztosítása.

A VVER-440 reaktor primerköre – a vízüzem szempontjából – fő- és mellékvízkörre osztható. A fővízkör a reaktortartályból és hat hurokból áll, minden hurokban egy fő keringtető szivattyúval, 2 db főelzáró tolózárral és egy gőzfejlesztővel. Az 1. és 3. blokkokon a 6. hurok melegágának ki nem zárható részéhez csatlakozik a térfogatkompenzátor, míg a 2. és 4. blokkon az 1. hurok melegágának ki nem zárható részéhez.

A mellékvízkör a kétágú, primerköri részarámú víztisztítóból (1. Víztisztító), valamint a pótvíz és bóros szabályozás (2. Víztisztító)



rendszeréből áll a teljesítményüzem végén a 2. Víztisztítóval is üzemelve (1. ábra). A PA-ben a fővízkörből folyamatos részáramú elvétellel-visszaadással mindkét ág működik, de víztisztítás – teljesítményüzemben – csak a TE01 ágon történik. A kevertágyas ioncserélőről lejövő víz egy része a pótvíz rendszerbe jut, ahol a pótvíz-gáztalanító termikusan gáztalanítja. A pótvíz rendszerből visszatérő víz és az adagolt vegyszeroldatok összekeverednek a kevertágyas ioncserélőről lejövő vízzel.

### Vegyszertranszport

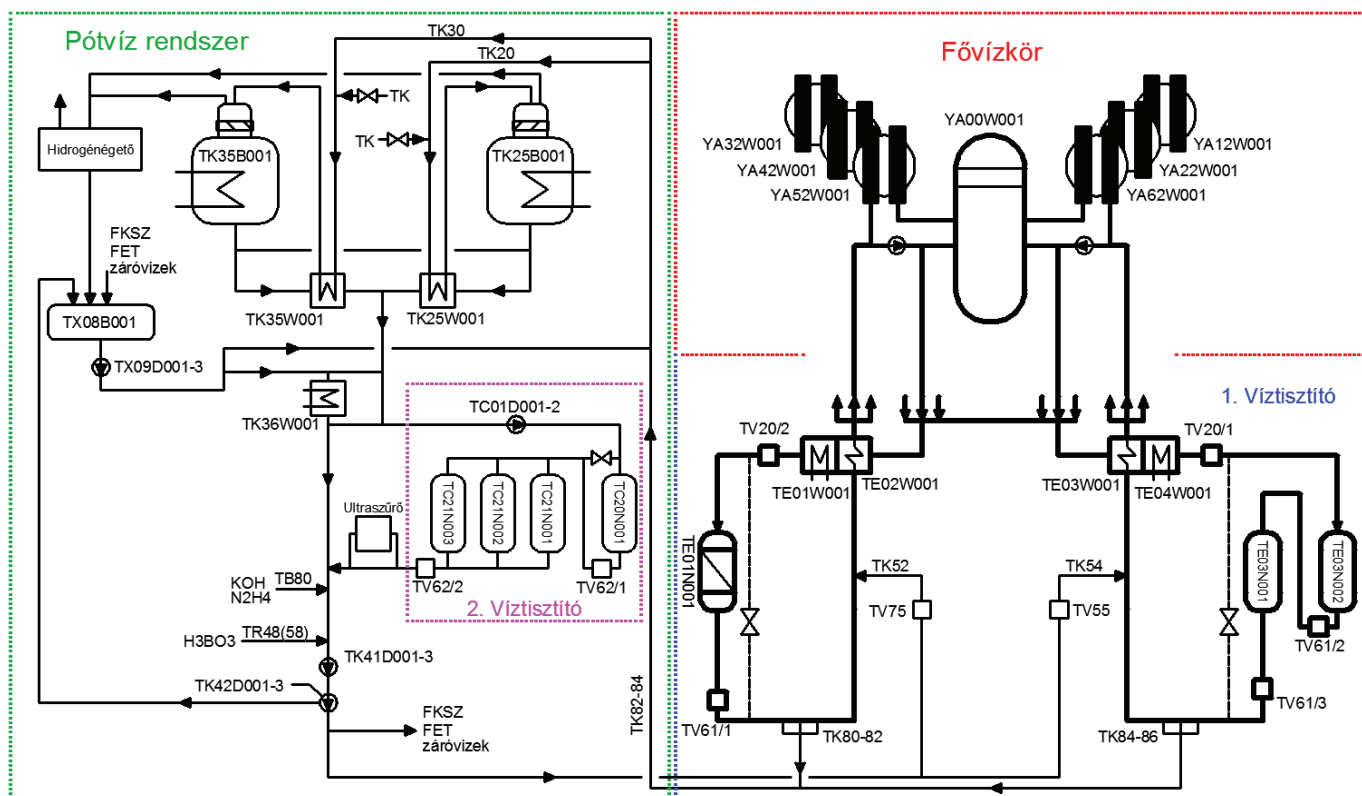
A PA-ben a VVER-440 reaktor primerköri hűtővízzel érintkező felületének 77%-a ausztenites acél (08H18N10T) és 23 %-a cirkónium-ötvözet (ZrNb1, ZrNb2,5). A fűtőelem-kazetták kb. harmada három kampány után kikerült az aktív zónából. A VVER-440 reaktor primerköri vízkémiaja az üzemi hőmérséklettartományában az ausztenites acélon képződött vegyes spinel magnetit ( $\text{Fe}_{2-x}\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-y}\text{Ni}_y\text{O}_4$ ) oldhatóságára és transzportjára lett optimalizálva a fővízkörben, hiszen a  $\text{ZrO}_2$  oldhatósága  $\text{pH}_{265}^\circ\text{C} \approx \text{pH}_{295}^\circ\text{C} \approx 4 - 9$  tartományban érzéketlen a pH-változására.

A VVER-440 reaktorok primerkörében a mellékvízkör üzeme jelentősen befolyásolja a vegyszertranszportot, ezért a VVER-440 reaktorok primerköri hűtővizének eltérő vegyszer-koncentrációit a mellékvízkör eltérései magyarázzák. A PA-ben a mellékvízkör névleges (60 t/h) és tényleges (35-45 t/h) hűtővíz-tömegáramai eltérnek egymástól. A hidraulikai számítások arra utalnak, hogy az eltérés az üzembe helyezés óta fennáll. A fűtőelem-pálcák külső felülete és a folyadékfázisú hűtővíz között a nagy konvektív hőátadási tényezőt a hűtővíz nagy (3,6 – 4 m/s) áramlási sebessége biztosítja. A VVER-440 reaktorokban az egyes kazetták vízárma – a zárt kazettafalak miatt – nem keveredhet egymással, ezért a kazetták vízárma elsősorban a tartórácsok eltömődésére érzékeny.

A primerköri hűtővíz szennyezőanyag koncentrációi a technológiailag elérhető legkisebb koncentrációk közelében voltak. A primerkör létesítése során igen szigorú tisztasági követelményeket támasztottak, ezért a PA üzembe helyezése – a tisztaság szempontjából – megfelelt az élenjáró nemzetközi gyakorlatnak. Az atomerőmű létesítésénél a pótvíz-készítő technológiát a hazai tervezők az akkori technológia legjobbjára választották. A termelt pótvíz minősége az elmúlt húsz évben folyamatosan az „abszolút” tiszta víz közelében volt. 2004 óta – a kevertágyas ioncserélő háromágúassá alakításával – a pótvíz minősége tovább javult, meg egyezik az akkor elérhető legjobbal, a nagy tisztaságú pótvizével. A PA vegyész szakemberei felismerték, hogy az adagolt vegyszerek is tartalmaznak szennyező anyagokat, ezért kizárólag atomerőművi felhasználásra minősített, nagy tisztaságú vegyszereket használnak.

**A PA-ben a fővízköri vegyes spinel magnetit transzportra optimalizált, ún. koordinált vízkémia – a vegyszeradagolásokkal együtt – bevált:**

- A borsav koncentráció szabályozása szakaszosan, vízcserével, a primerköri hűtővíz hígításával történik. A PA-ben a teljesítményüzem végén ( $0,5 \text{ g/dm}^3$ -nél kisebb borsav koncentrációnál) a 2. víztisztító is részt vesz a borát-ionok kivonásában.
- A hűtővízben azért van szükség hidrogénre, hogy visszaszorítsa a víz radiolitikus bomlását, és minimális értékre csökkentse a radiolitikus oxigén koncentrációját az aktív zónában. A PA-ben a hidrogén előállítására 1991-95-ig ammóniát, azóta hidrazint adagolnak. A pótvíz-rendszerből visszatérő vízbe adagolt hidrazin, a  $\text{N}_2\text{H}_4 - \text{NH}_3 - \text{H}_2$  átalakulás bevált a PA-ben.



1. ábra. A paksi VVER-440 nukleáris gőzfejlesztő berendezés kapcsolása a berendezések kódjával [3]

- A VVER atomerőművek primerköri hűtővizébe kálium-hidroxid adagolnak a fővízköri hűtővíz pH<sub>T</sub>-értékének teljesítményüzemi szabályozására. Az üzem során a kálium-ion koncentrációnak úgy kell csökkenni a hűtővízben, hogy a lúgosító kationok (adagolt kálium, a borból keletkező lítium, valamint a pótvízzel bekerülő nátrium együttes) moláris koncentrációja megfeleljen az előírt tartománynak. A PA-ben használt – ekvivalens K<sup>+</sup>-ion koncentráció nagyrészt az előírt tartományba esett. Az előírt tartományon kívüli K<sub>ekv</sub> értékek csak minimális mértékben változtatják meg a magnetit oldhatóságát, ezért a tartományon kívüli üzemelésnek gyakorlatilag nem volt hatása az ausztenites acél korróziós fogyására. Jelentősen javult a szabályozás minősége (az előírt tartományból való kiesések száma minimálissá vált) az on-line (FAM) káliumion-mérés megvalósulása óta.

### Korróziótermék transzport

Az inaktív és aktív korróziótermék transzport mértékét a hűtővíz áramlása és a vízkémia (a felület korróziója) alapvetően befolyásolja. A PA-ben a 08H18N10T anyagminőség és a koordinált vízkémia együtt a korróziótermékek – nemzetközi összehasonlításban is! – kis koncentrációját eredményezték. Megkerülhetetlen a gőzfejlesztők dekontaminálásának és a 2003. 04. 10-én bekövetkezett súlyos üzemzavarhoz vezető okok vízüzemi értékelése. A dekontaminálásra azért került sor, hogy az új tápvíz-elosztót a gőzfejlesztőkbe beépítő szakemberek személyi dózist csökkentsek. Az adatok egyértelműen alátámasztják, hogy azt a többlet diszperz korróziótermék mennyiséget, amely a kazetták eltömődését, a reaktortartály nagyobb nyomásesését okozta, minden esetben a dekontaminált gőzfejlesztők felületéről kikerült többlet korróziótermék adta, általában egy kampány (üzem közbeni leállítás) késéssel: (A 4. bloknál nem volt dekontaminált gőzfejlesztő, a reaktortartály nyomásesésének nem volt jelentős növekedése, miközben háromszor itt mérték az indulás alatt a diszperz korróziótermékek legnagyobb koncentrációját.) Amikor az eltömődött kazetták kikerültek az 1-3. blokk aktív zónájából, a reaktortartály nyomásesése visszaállt a várt tartományba. Számításaink szerint 5 g korróziótermék egyenletesen eltömve egy tartórácsot 0,1 barral növeli a kazetta nyomásesését, következésképpen csökkenti a zárt kazetta hűtővíz-áramát, illetve megnöveli a kazettából kilépő hűtővíz hőmérsékletét. A fűtőelem-kazettákból eltávolított magnetit kevés mennyisége bizonyítja, hogy nem a fűtőelem-pálcák lerakódása, hanem a kazetták eltömődése okozta a hűtővíz-áramok egyenlőtlenségét.

A fűtőelem-burkolat hermetikusságának biztosítása a vízüzem egyik legfontosabb feladata. A PA-ben 2007-ig az addig befejeződött 79 kampányban mindössze két olyan kampány volt, amelyben a mért összes jó d aktivitás koncentrációja a hűtővízben meghaladta a fűtőelemek hermetikusságának kritériumát (3,7 MBq/dm<sup>3</sup>), de ekkor sem érte el a blokkleállítás kritériumát (37 MBq/dm<sup>3</sup>).

A tervezett 20 éves üzemidő-hosszabbításhoz a primerköri vízüzem területén elvégzendő fontosabb feladatok a következők:

- Az átmeneti üzemállapotok (indulás, leállítás) műveleteinek kiégésítése – a PA adottságainak figyelembe vételével – a részben megvalósult korróziótermék szűréssel, és az átmeneti üzemállapotok műveleti, vízkémiai mérési-ellenőrzési rendjének kidolgozása.

- Szükség lehet a primerkörben felhalmozódott korróziótermékek eltávolítására. Az elmúlt húsz évben a primerkör holt áramlási zónáiban viszonylag nagy mennyiségű korróziótermék halmozódott fel, melyet – a következő húsz év korróziótermék transzportjának

megfelelő szinten tartása érdekében – néhány éven belül el kell távolítani. (Arról nincs információnk, hogy ez megtörtént-e.)

### A szekunder kör vízüzeme

A szekunderköri vízüzem a berendezések konstrukciójának, a szekunderkör szerkezeti anyagainak és a munkaközeg kémiájának „harmonikus” egysége. A gőzfejlesztő a gőzkörfolyamat legfontosabb berendezése, de a „harmóniát” az összes berendezésben érvényesíteni kell. A szekunderköri vízüzem feladata a gőzfejlesztők feszültségkorróziós kockázati tényezőinek minimalizálása. Az üzemidőhosszabbítás kritikus szekunderköri berendezései a gőzfejlesztők, melyek meghatározó öregedési, degradációs folyamata a hőátadó csövek feszültségkorróziós repedése. A gőzfejlesztők nem cserélhetők (adott konstrukció és szerkezeti anyag), így az egyetlen lehetőség a vízkémiai kockázati tényezők minimalizálása. A szekunderkör többi berendezése cserélhető, s az új berendezésekben a „harmónia” maradéktalanul érvényesíthető.

A VVER-440 reaktor szekunderköre a 6 db gőzfejlesztő köpenyteréhez kapcsolódó 2 db K-220-44 típusú gőzturbinából áll (3-3 db gőzfejlesztő tartozik egy-egy gőzturbinához, lásd 2. ábra). A PA-ben a szekunderkör vízüzemének értékelését a létesített vízüzem és a vízüzem-váltás utáni periódusra külön-külön kellett elvégezni.

A gőzfejlesztők konstrukciós hibával készültek (egyfokozatú zsalus cseppleválasztó, „zárt” (egy csőre 16 db 40 mm hosszú) geometriai rés a csőmegfogások környezetében, a gőzfejlesztők nem hatékony leiszapolása).

A hőátadó csövek 08H18N10T anyagminősége érzékeny a transzkrisztallin feszültségkorrózióra. Ezért az üzemidő-hosszabbításnál olyan szekunderköri vízkémiai feltételeket kell teremteni, hogy a gőzfejlesztő csöveken a feszültségkorrózió lehetősége minél kisebb valószínűséggel álljon fenn.

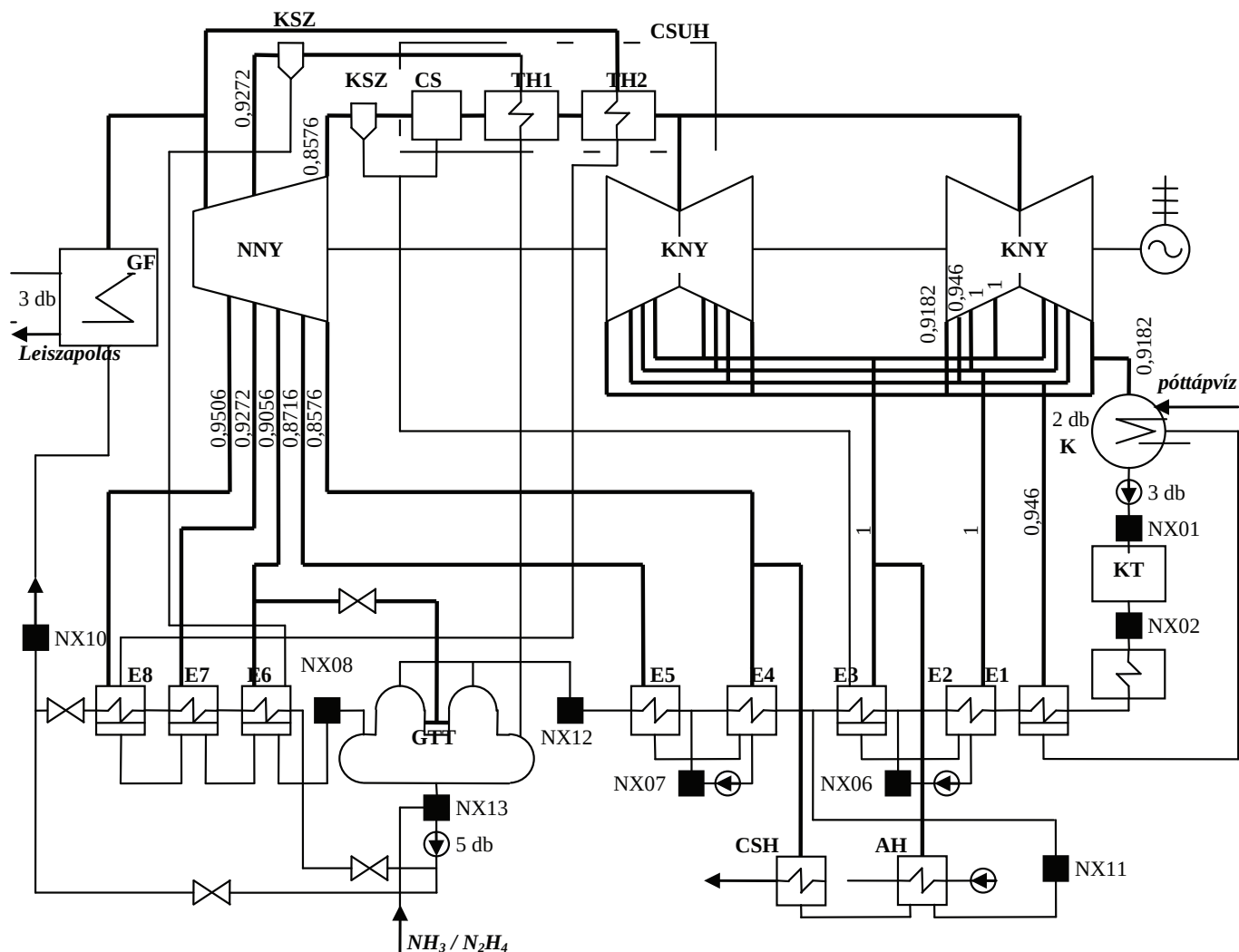
A PA-ben az 1-2. blokk szekunderköre 16 kampányban, a 3-4. blokké 11 kampányban a létesített vízüzemmél működött. Ez is hozzájárult a gőzfejlesztők különböző elhasználódásához, a gőzfejlesztők eltérő csődugózási statisztikájához.

### A létesített vízüzem jellemzői:

- rézcsöves, idővel hűtővíz-tömörtelen kondenzátor, a hűtővíz-bekerülés hatásának mérséklésére a kondenzátum-tisztító 2 db kevertágyas ioncserélőjével,
- réz-acél anyagminőség kombináció, nagy részarányú Szt20 ötvözetlen acél felülettel,
- a réz korróziótermék transzportot minimalizáló enyhén lúgos (pH25°C=7,5-8,5) tápvíz, a tápvízbe adagolt hidrazin termikus bomlásából keletkező ammónia lúgosító hatásával.

Miközben a munkaközeg mért szennyezőanyag koncentrációi – a nem mért diszperz vas korróziótermék koncentráció kivételével – meg sem közelítették a határértékeket, a hazai szakemberek felismerték, hogy a gőzfejlesztők feszültségkorróziós kockázata folyamatosan fennáll, és az inkubációs idő elteltével nagyobb számú feszültségkorróziós indikációra lehet számítani. A tápvíz rendszer előírtnál háromszor-hatszor nagyobb vas korróziótermék áramának oka a Szt20 ötvözetlen acél hőátadó csövek nagymértékű általános eróziós-korróziója, amelyet az oxigénmentes munkaközeg enyhén lúgos pH-ja, valamint a tápvíz ötvözetlen acélra javasoltnál nagyobb áramlási sebessége, és a gőz nagyobb nedvesség-tartalma támogat. Az 1987 – 1999 között végrehajtott berendezéselem cserékkel és a könyökszeptátorok beépítésével az eróziós-korrózió és az erózió legveszélyesebb lokális károsodási helyeit a PA szekunder-





2. ábra. A paksi VVER-440 gőzfejlesztők leiszapolása és a K-20-44 gőzturbina kapcsolása [3]

körében felszámolták. A gőzfejlesztők tápvíz-elosztó kollektora a csőkötegből a csőköteg fölé került 2004-től, ami megváltoztatta a kétfázisú víz köpenvtéri áramlását.

A VVER-440 gőzfejlesztők létesített vízüzeme nem vált be. Az üzemelő gőzfejlesztők feszültségkorróziós kockázata úgy minimalizálható, hogy a szennyező anyagok koncentrációja a gőzfejlesztő vízben – az As Low As Reasonably Achievable (ALARA) elvnek megfelelően – olyan kicsire csökkentendő, amennyire ésszerűen lehetséges. A szennyező anyagok forrása a szekunderkör tápvíz és gőz rendszerében van, ezért csökkentésük is itt történhet.

### Az ALARA elvnek megfelelően módosított vízüzem jellemzői

1997 – 2000 között az alábbi vízüzem módosításokat végezték el:

- homogén acél anyagminőség, egyre kisebb részarányú Szt20 ötvözetlen acél felülettel,
- ausztenites acél csöves, hűtővíz-tömör és  $<10^{-5}$ -nél kisebb levegőtömörségű kondenzátor,
- az oldott ionok koncentrációjának minimalizálása érdekében teljesítményüzemben nem üzemel a kondenzátum-tisztító 2 db kevertágyas ioncserélője (a hűtővíz-tömör kondenzá-

toroknál nincs rá szükség, sőt nagy tisztaságú pótvíznél az ioncserélő gyanta szennyezőforrás),

- a diszperz vagy korróziótermék transzportot minimalizáló, magas pH<sub>25</sub>-jű (9,6–9,8) tápvíz, a tápvízbe adagolt hidrazin termikus bomlásából keletkező ammónia lúgosító hatásával (2004 óta ammónia-hidrazin adagolás).

A gőzfejlesztők hőátadó felületének kémiai tisztítása (magnetit-el-távolítás és réztelenítés) és a gőzfejlesztők hidromechanikus tisztítása minden gőzfejlesztőben a vízüzem-váltás előtt megtörtént. A gőzfejlesztőkbe lépő tápvíz diszperz vas korróziótermék koncentrációja a vízüzem-váltás 3-6. kampányától minden blokknál a várt mértékben, közel nagyságrenddel mérséklődött. A gőzfejlesztők leiszapolásának hatékonysága a diszperz vas korróziótermékekre csak kismértékben javult. A gőzfejlesztő vízében a klorid-ion koncentrációja – ionkromatográfias módszerrel mérve – általában a várt  $10 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  alatt volt (időnként haladta csak meg a  $10 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  értéket). A réz korróziótermékek forrását meg kell szüntetni követelmény még nem teljesült, de ennek ellenére az oldott réz korróziótermékek koncentrációja a gőzfejlesztő vízben általában  $5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$  alatt volt.

2007-ig vizsgálva a gőzfejlesztők különbözőképpen használdtak el: 3,2% (23 GF) és 0,0% között. (A PA-ben a csöveket akkor dugózzák le, ha – örvényáramos technikával vizsgálva – az ekvivalens falvastagság csökkenése 50%-nál nagyobb.)

A szakértői munka során megállapításra került, hogy az üzemidő-hosszabbításhoz a gőzfejlesztő hőátadó csövek feszültségkorrozíós kockázatát tovább kell mérsékelni:

- nagy tisztaságú munkaközeg használata (nagy tisztaságú pótvíz és gőzfejlesztők tisztított leiszapolása),
- tiszta vegyszerek használata,
- zárt szekunderkör kialakítása (hűtővíz-tömör, jobb légtömorségű kondenzátor),
- nagy krómtartalmú (rozsdamentes) acél csöves nagynyomású tápvíz-előmelegítők (megvalósult),
- technológiailag indokolt veszteségek – (a mai napig nem sikerült teljesíteni a meglévő csőkapcsolási adottságok miatt).

Ezekkel az intézkedésekkel valószínűleg nem lesz szükség a gőzfejlesztők kémiai tisztítására a 20 évvel meghosszabbított üzemidő alatt.

### Vízüzemmel kapcsolatos kutatások

Tanszékünk 2022-ben OTKA pályázatot nyert „Erőművi pótápvíz környezetbarát és energiahatékony előállítás” címmel, amelynek keretében vizsgáljuk a vegyszeres derítés kiváltásának lehetőségét, a 25 foknál magasabb hőmérsékletű sótalanítás lehetőségét, valamint a lehetséges hőmérséklet illesztés megvalósítását a magasabb hőmérsékleten véghezvitt sótalanítás megvalósítására.

#### Duna víz előkezelésének vizsgálata

A Dunából kiemelt víz temperálását, szűrését és fertőtlenítését követően kezdődik a kolloid-diszperz szennyezőanyagok eltávolítása, amelynek során a szennyezőanyagok eltávolítását vegyszer adagolásával kezdik és koagulációt valósítanak meg. Általánosságban koagulációt követően flokkuláló szereket, rendszerint polielektrolitot adagolnak, amely a szennyezőanyagok aggregálódását követően nagyobb pelyheket képez, így derítéssel, vagy szűréssel távolítható el a kezelt vízből. A PA-ben jelenleg használt vízkezelő rendszerben (lásd 3. ábra) első lépésként vas-klorid ( $\text{FeCl}_3$ ) adagolást végeznek.

Több koagulálószer alkalmazását is vizsgálták a szakirodalomban, pl. poli-alumínium-klorid (PACI), a polimer vas-szulfát (PFS), amely alapján kijelenthető, hogy semleges és lúgos vízben a PACI hatékonyabbnak bizonyult a zavarosság csökkentésében, mint polimer vas-szulfát vagy a titán-xerogél koagulánsok [5-6]. Mindezek alapján Duna víz esetére összehasonlítottuk a jelenleg alkalmazott  $\text{FeCl}_3$  mind pedig a PACI víztisztítási hatékonyságát. A koagulációt követően a Duna vizet több lépésben mikroszűrővel szűrtük. Első lépésben egy 5-13  $\mu\text{m}$  részecske visszatartással jellemzett mikroszűrőt (VWR® 413, kvalitatív szűrőpapír) használtunk, következő lépésben pedig 0,45  $\mu\text{m}$  pórusátmérővel jellemzett hidrofili poliéter-szulfon mikroszűrőt (PALL, Supor®-450) alkalmaztunk. Mindkét mikroszűrési lépésben szakaszos szűrést

valósítottunk meg, de első esetben hagyományos ún. dead-end, míg a második lépésben keresztáramú ún. cross-flow szűrési módot alkalmaztunk. Meghatároztuk a vett minta pH-ját, klorid ion koncentrációját ( $C_{\text{Cl}}$ ,  $\text{AgNO}_3$ -csapadékos titrálási módszerrel), lebegőanyag tartalmat (Total Suspended Solid content, TSS, Pastel-UV spektrofotométerrel), és 25 °C-on mért fajlagos elektromos vezetőképességét (340I típusú WTW kombinált pH/vezetőképességmérő) mint jellemző paramétereket. Az oldott sótartalomra vonatkoztatva a KSH adatokat lekérve 2013-ban mértek hasonló TSS tartalmat (61,1  $\text{mg}/\text{dm}^3$ ), amellyel párban összes sótartalomként 261,9  $\text{mg}/\text{dm}^3$  érték tartozott. A későbbiekben a technológiai számításokhoz ezt az összessó tartalmat használtuk fel. A Duna víz minta mért paramétereit foglalja össze az 1. táblázat:

1. táblázat. Koagulációs vizsgálatokhoz vett Duna víz minta jellemzői

| $\text{pH}_{25^\circ\text{C}}$ | C Cl-<br>[ $\text{mg}/\text{dm}^3$ ] | TSS<br>[ $\text{mg}/\text{dm}^3$ ] | $K_{25^\circ\text{C}}$<br>[ $\mu\text{S}/\text{cm}$ ] | Víz mintavétel helye                         |
|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 7,81                           | $35,885 \pm 1,4$                     | $58 \pm 1,730$                     | 341                                                   | Műgyetern rkp. Budapest, (2022. Október 10.) |

A szemmel is látható részecskék nagy részét (vizuális megközelítés alapján) az első mikroszűrő kiszűrte, azonban a szemmel kevésbé látható lebegőanyagok koncentrációját finomabb pórusú mikroszűrő alkalmazásával tudtuk csökkenteni.

A hatékonyságot a kezelt vízminták összes lebegőanyag-tartalma alapján, valamint klorid ion koncentráció mérésével és visszatartás számításával határoztuk meg. A különböző koaguláló szerek hatékonyságának összehasonlítása után, környezetbarát eljárásként csak és kizárólag mechanikai szűrést megvalósító mikroszűrővel végzett tisztítást is alkalmaztunk, és a kapott eredményeket összevetettük a vegyszeres kezelést is alkalmazó mikroszűrésekkel. Az elvégzett kísérleteket foglalja össze a 4. ábra.

A PACI adagolásával majd az azt követő kétlépéses mikroszűrővel kapott tisztított vízben mértük a legalacsonyabb TSS értéket ( $18,0 \pm 1,8 \text{ mg}/\text{dm}^3$ ), amely csak egy kicsivel alacsonyabb, mint a kizárólag mikroszűrővel történő vízkezelés eredménye ( $19,6 \pm 2,5 \text{ mg}/\text{dm}^3$ ), viszont jelentősen alacsonyabb, mint a  $\text{FeCl}_3$  alkalmazását követő szűrések utáni TSS koncentráció ( $25,0 \pm 3,3 \text{ mg}/\text{dm}^3$ ).

A mikroszűrés jellemzésére a térfogati fluxust használtuk, amely az (1) képlettel számolható:

$$J_v = \frac{1}{A} \cdot \frac{dV}{dt}, \quad \left[ \frac{\text{dm}^3}{(\text{m}^2 \cdot \text{h})} \right] \quad (1)$$

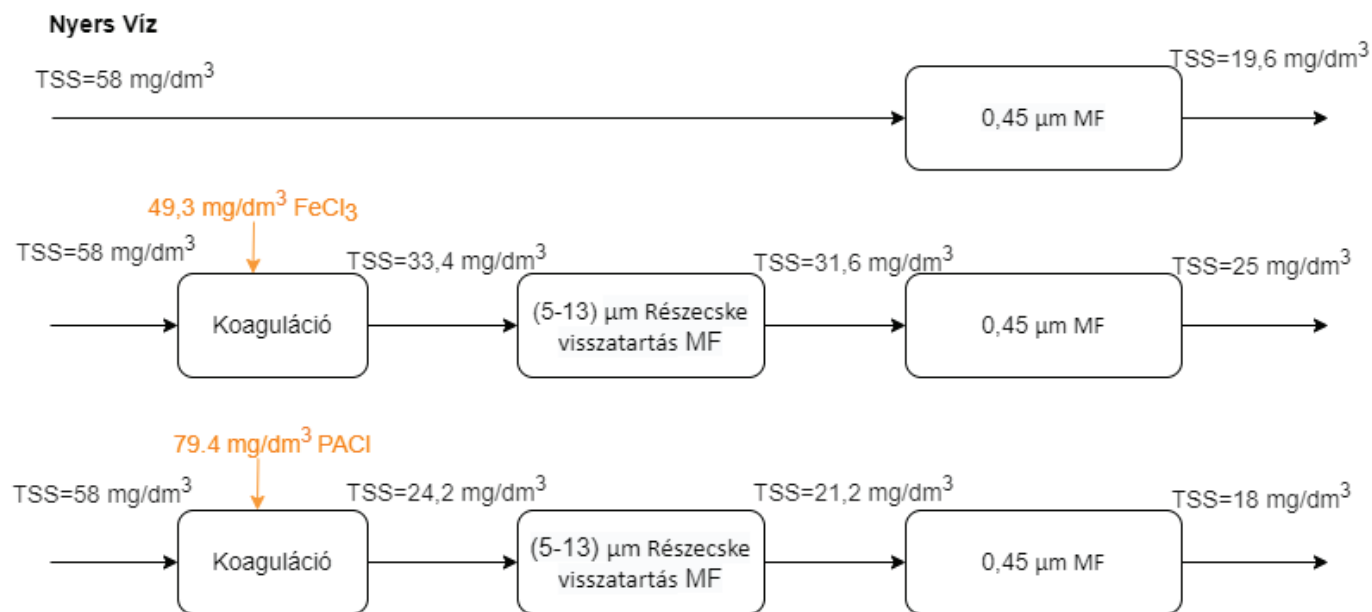
ahol  $dV/dt$  a membránon keresztülfolyó tisztított víz térfogatára a membrán  $A=28 \text{ cm}^2$ -es felületére vonatkoztatva.

Amint az 5. ábrán látható, a PACI adagolása után történő szűréskor nagyobb fluxust értünk el, mint  $\text{FeCl}_3$  alkalmazásával, amely arra enged következtetni, hogy a  $\text{FeCl}_3$  esetén nagyobb mértékű koaguláció történt, ami csökkenti a fluxust.



3. ábra. Jelenleg a PA alkalmazott pótvíz kezelő rendszer technológiai sémája [4]





4. ábra. Koagulációs és mikroszűrési kísérletek összehasonlítása [7]

Mindkét koagulálószer adagolást követő mikroszűrés után második szűrési lépésben 0,45 µm pórusátmérőjű mikroszűrővel keresztáramú szűrést alkalmaztunk. A nyers Duna víz mintákat közvetlenül is ezzel típusú membránszűrővel szűrtük, így ezek a mikroszűrési lépések közvetlenül összehasonlíthatóak (6. ábra).

Összehasonlítva a 0,45 µm-es pórusméretű MF membrán alkalmazásával kapott fluxusértékeket, megállapítható, hogy a FeCl<sub>3</sub> koagulálószer egyrészt nagyobb pelyheket eredményezett, amelyeket az 5-13 µm-es részecske-retenciós MF membrán távolított el, így növelve a második MF lépés fluxusát így 5%-kal nagyobb fluxus érhető el, mint a nyers Duna víz koaguláció nélküli mikroszűrésével, de ez az eltérés azonban nem szignifikáns. Csak és kizárólag mikroszűrést alkalmazva körülbelül 10%-kal nagyobb fluxus érhető el, mint a PACI adagolást követő mikroszűrés esetében.

Visszatartást a TSS értékek alapján számoltunk az alábbi képlettel:

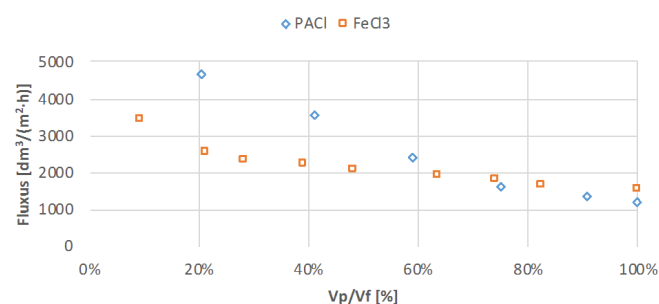
$$R = \left[ 1 - \frac{TSS_{permeate}}{TSS_{feed}} \right] \cdot 100 \% \quad (2)$$

A mért lebegőanyag-tartalmakat és az ezek alapján számolt visszatartás értékeket a 2. táblázatban foglaltuk össze. Visszatartás értékek alapján az alábbi sorrend állítható fel: a PACI-dal

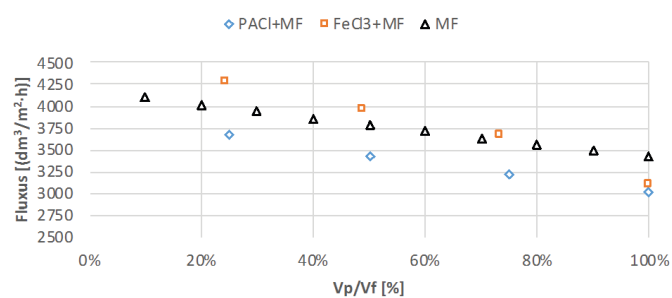
2. táblázat. Lebegőanyag-tartalom és azok alapján számolt visszatartás értékek [7]

| Minta                          | TSS [mg/dm <sup>3</sup> ] | R [%] |
|--------------------------------|---------------------------|-------|
| Desztillált víz                | < 10,000                  | –     |
| Nyers víz                      | 58,0 ± 1,7                | –     |
| MF permeát                     | 19,6 ± 2,5                | 66,21 |
| FeCl <sub>3</sub> + MF permeát | 25,0 ± 3,3                | 56,89 |
| PACI + MF permeát              | 18,0 ± 1,8                | 68,97 |

végzett koagulációt követő mikroszűrés során érték el a legmagasabb visszatartást (68,97%), ezt követte az önmagában végzett mikroszűrés (66,21%), végül és a FeCl<sub>3</sub>-dal végzett koagulációt követő mikroszűrés (56,89%). A klorkoncentrációt nézve, az, csak és kizárólag mikroszűrést tartalmazó tisztítási lépés után állandó maradt; miközben a koagulánsok hozzáadása szignifikáns emelkedést mutatott, ~6,4-szer, illetve 5,7-szer magasabb értékek kaptunk, mint a nyersvíz koncentrációja volt. Környezetvédelmi szempontból a mikroszűrés önmagában történő alkalmazása javasolt, mert állandó áramlást, alacsony összes lebegőanyag-tartalmat biztosít anélkül, hogy további klordion-terhelést okozna, amelyet a további sótalanítási lépésben el kell távolítani.



5. ábra. 5-13 µm részecske visszatartással jellemzett mikroszűrő alkalmazásakor mért fluxusok átlag értékei a tiszta víz kinyerési ráta (Vp/Vf) függvényében [7].



6. ábra. A 0,45 µm pórusátmérőjű mikroszűrés során mért fluxusok átlag értékei a tiszta víz kinyerési ráta (Vp/Vf) függvényében [7].

### Környezetbarát pótív készítő technológia értékelése

Kísérletek alapján megvizsgáltuk, hogy a derítőreaktor helyett egy kétlépcsős mikroszűrés alkalmazásával, majd ultraszűrő- és nanoszűrő membránok beépítésével, hogyan alakul egy ultratiszta víz póttápvíz előkészítő technológiája. A sótelenítő részleg továbbra is egy kétlépcsős fordított ozmózis lépésből állna, majd a membrános gáztalanítást követően kerülne sor az utófinomításra, amelyet elektrodeionizáló berendezéssel lehet elvégezni. A rendszer értékelését a nyersvíz hasznosítással és az elvezett koncentrátumok nátrium-egyenértékével jellemeztük. A technológiai számításokat laboratóriumi kísérletekre alapoztuk, amelyeket nyers vízként Duna vízre végeztünk el. A szakaszos üzemben megvalósított laboratóriumi mérések során az adott lépés átlagfluxusát, valamint a végső kitermeléshez tartozó koncentrációértékeket vettük alapul (3. táblázat).

A technológiai számításokat az RO I, RO II permeátumok és koncentrátumok, valamint az EDI koncentrátumának koncentrációja által alkotott 5 ismeretlenes egyenletrendszer és annak megoldása adta. A célfüggvény volt a  $6 \cdot 10^{-6}$  mmol/dm<sup>3</sup> TDS tartalmú nagytisztaságú pótív előállítása.

#### Első egyenlet:

RO I-re a felírt anyagmérleg (3):

$$\begin{aligned} C_{RO1be} \cdot \dot{V}_{RO1be} &= \dot{V}_{NFp} \cdot C_{NFp} + \dot{V}_{RO2k} \cdot C_{RO2k} + \dot{V}_{EDIk} \cdot C_{EDIk} = \\ &= \dot{V}_{RO1k} \cdot C_{RO1k} + \dot{V}_{RO1p} \cdot C_{RO1p} \end{aligned} \quad (3)$$

Az RO1 visszatartási egyenlete:

$$R = \frac{C_{RO1be} - C_{RO1p}}{C_{RO1be}} \quad (4)$$

Behelyettesítés és átrendezés után:

$$\begin{aligned} \frac{\dot{V}_{NFp} \cdot C_{NFp}}{\dot{V}_{RO1be}} \cdot (R - 1) = \\ (1 - R) \cdot \frac{\dot{V}_{RO2k} \cdot C_{RO2k}}{\dot{V}_{RO1be}} + (1 - R) \cdot \frac{\dot{V}_{EDIk} \cdot C_{EDIk}}{\dot{V}_{RO1be}} - C_{RO1p} \end{aligned} \quad (5)$$

#### Második egyenlet

Az anyagmérleg az RO I-re

$$\dot{V}_{NFp} \cdot C_{NFp} + \dot{V}_{RO2k} \cdot C_{RO2k} + \dot{V}_{EDIk} \cdot C_{EDIk} = \dot{V}_{RO1k} \cdot C_{RO1k} + \dot{V}_{RO1p} \cdot C_{RO1p} \quad (6)$$

Átrendezve:

$$\dot{V}_{NFp} \cdot C_{NFp} = \dot{V}_{RO1k} \cdot C_{RO1k} + \dot{V}_{RO1p} \cdot C_{RO1p} - (\dot{V}_{RO2k} \cdot C_{RO2k} + \dot{V}_{EDIk} \cdot C_{EDIk}) \quad (7)$$

#### Harmadik egyenlet

RO II-re felírt visszatartási egyenlete, feltételezve, hogy ugyanaz a membrán RO I és RO II, ugyanolyan visszatartásokkal:

$$R = \frac{C_{RO1p} - C_{RO2p}}{C_{RO1p}} \quad (8)$$

Átrendezve:

$$(1 - R) \cdot C_{RO1p} - C_{RO2p} = 0 \quad (9)$$

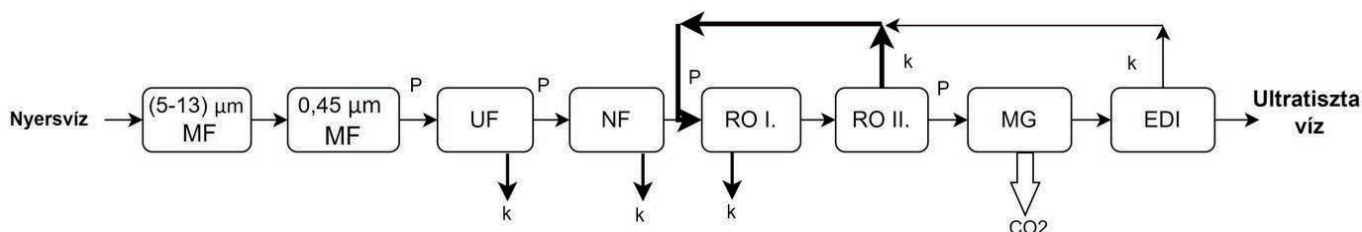
#### Negyedik egyenlet

Anyagmérleg RO II-re:

$$\dot{V}_{RO1p} \cdot C_{RO1p} = \dot{V}_{RO2k} \cdot C_{RO2k} + \dot{V}_{RO2p} \cdot C_{RO2p} \quad (10)$$

3. táblázat. A technológiai számítások alapját képező szakaszos üzemi laboratóriumi lépések jellemzői

| Lépés        | Fluxus<br>[dm <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> h)] | TSS <sub>p</sub><br>[mg/dm <sup>3</sup> ] | TDS<br>[mg/dm <sup>3</sup> ]              | R <sub>TDS</sub><br>[%] | V <sub>p</sub> /V <sub>f</sub><br>[%] |
|--------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| Nyersvíz     |                                                 | 58                                        | 261,9                                     |                         |                                       |
| (5-13) μm MF | 2500                                            | 31                                        | 261,9                                     |                         | 96                                    |
| 0,45 μm MF   | 3400                                            | 19,6                                      | 261,9                                     |                         | 96                                    |
| UF           | 250                                             | 1,2                                       | 261,9                                     |                         | 96                                    |
| NF           | 144                                             | 0                                         | 134,7 (=2,97 mmol/dm <sup>3</sup> )       | 48,7                    |                                       |
| RO I.        | 40                                              | 0                                         | 0,023 mmol/dm <sup>3</sup>                | 99                      | 75                                    |
| RO II.       | 103                                             | 0                                         | 0,00023 mmol/dm <sup>3</sup>              | 99                      | 75                                    |
| EDI          |                                                 |                                           | 6 · 10 <sup>-6</sup> mmol/dm <sup>3</sup> | 100                     | 95                                    |



7. ábra. Vegyszeres derítés kiváltására javasolt membrános technológia sémája



Átrendezve:

$$\dot{V}_{RO2k} \cdot C_{RO2k} + \dot{V}_{RO2p} \cdot C_{RO2p} - \dot{V}_{RO1p} \cdot C_{RO1p} = 0 \quad (11)$$

#### Ötödik egyenlet

EDI anyagmérlege:

$$\dot{V}_{RO2p} \cdot C_{RO2p} = \dot{V}_{EDIp} \cdot C_{EDIp} + \dot{V}_{EDIk} \cdot C_{EDIk} \quad (12)$$

EDI anyagmérlege átrendezve:

$$\dot{V}_{EDIp} \cdot C_{EDIp} = \dot{V}_{RO2p} \cdot C_{RO2p} - \dot{V}_{EDIk} \cdot C_{EDIk} \quad (13)$$

Az (5), (7), (9), (11) és (13)-as egyenletek mátrix módszerrel történő megoldása során meghatároztuk a keresett koncentrációkat. A membrános víztisztító technológia előnye, hogy nem igényel derítószerkezetet, illetve nagy méretű reaktort, azonban az egyes lépések különböző nyomáson történő megvalósításához tartályokra és nyomásfokozókra van szükség. További előny, hogy a rendszerből hulladékvízként távozó nanoszűrő (NF) koncentráuma, valamint az RO I koncentráuma messze elmarad a 27/2005. (XII.6.) KvVM rendeletben [8] meghatározott határértéktől, viszont sokkal nagyobb nyersvíz felhasználás szükséges, mint a klasszikus derítéses előkezelési, valamint az ioncserélő technológián alapuló sótalanítási lépés alkalmazásakor [9] (lásd 4. táblázat). A nyersvíz felhasználás ezáltal csak 53% hatékonyságú lesz, viszont a hulladékvíz kezelés nélkül közcsatornába vagy akár felszíni befogadóba engedhető.

4. táblázat. A vegyszeres derítés kiváltására javasolt membrános technológia értékelése Na<sup>+</sup> ekvivalens alapján

| Hulladékvíz                | Na <sup>+</sup> ekvivalens [mmol/dm <sup>3</sup> ] | Na <sup>+</sup> ekvivalens [mg/dm <sup>3</sup> ] |
|----------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Nyersvíz                   | 3,338                                              | 76,440                                           |
| NF koncentráum             | 2,970                                              | 68,010                                           |
| RO I koncentráum           | 9,333                                              | 213,74                                           |
| Kibocsátási határérték [8] | 87,336                                             | 2000                                             |

#### Összefoglalás

Az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék kulcsszerepet játszott a Paksi Atomerőmű Üzemidő-hosszabbítás projektben, mivel a Tanszéken dolgozó Dr. Ősz János vezette és koordinálta a Vízüzemi-Korróziós Szakértői Testületet. A szakértői tevékenység ellátása mellett a VSZT az átadott dokumentumok, tervek szakértői véleményezését is elvégezte, szakértői konzultációkat folytatott, valamint más szakértőket is bevont a projektbe és az ő tevékenységüket is koordinálta annak érdekében, hogy az üzemidő-hosszabbítás megalapozása a legjobb tudományos ismeretek alapján történjen. A Paksi Atomerőmű primer körének fővízköri vegyes spinel magnetit transzportra optimalizált, ún. koordinált vízkémia vegyszertranszportja bevált, az üzemidő meghosszabbítása sikeresen megvalósult. A korróziótermék transzport esetében javaslat született a korróziótermékek kivonására indulás és leállás alatt. A szekunder kör vízüzemét tekintve a szakértői testület rávilágított arra, hogy a gőzfejlesztők konstrukciós hibával készültek, ezért az üzemidő-hosszabbításnál olyan szekunderköri vízkémiai feltételeket kell teremteni, hogy a gőzfejlesztő csöveken a feszültségkorrózió lehe-

tősége minél kisebb valószínűséggel álljon fenn. A szakértői testület megállapította, hogy olyan szekunderköri vízkémiai feltételeket kell teremteni, hogy a gőzfejlesztő csöveken a feszültségkorrózió lehetősége minél kisebb valószínűséggel álljon fenn. A 2022-ben indult környezetbarát pótvízkészítéssel foglalkozó OTKA kutatási pályázat során igazoltuk, hogy a vegyszeres derítést kiváltó, önmagában végzett mikroszűrés 66,21%-ban tudja csökkenteni az összes lebegőanyag tartalmat, így a derítőszerkezet alkalmazása elkerülhető, valamint az általuk okozott többlet kloridion koncentrációval nem kell számolni. Készítettünk egy vegyszermentes pótvíz készítő technológia javaslatot és számítási sémát, amellyel rámutattunk arra, hogy a vegyszeres derítés kiváltása esetén a javasolt membránszűrési technológiai sorból csak és kizárólag a nanoszűrés és az RO I koncentráuma távozik hulladékvízként, és azok összes koncentrációjának nátrium egyenértéke messze elmarad a rendeletben meghatározott kibocsátási határértéktől. Az elméleti technológiai sor szakértői értékelése folyamatban van, így annak lehetséges megvalósítása a jövő kérdése.

#### Köszönetnyilvánítás

Cséfalvay Edit köszönetet mond az NKFIH-nak az OTKA 143215-ös számú FK-típusú pályázati támogatásért.

#### Irodalomjegyzék

- [1] Paksi Atomerőmű Rt. És a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (Gépészmérnöki Kar Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék) közti szerződés.
- [2] Ősz J.: Elkészült feladatok és szakmai összefoglalásuk. BME EGR Tanszék, 2008. január
- [3] Ősz J.: Hő és atomerőművek vízüzeme I-II. Akadémiai Kiadó on-line könyv, 2019, 1. ISBN: 978 963 454 334 3, 2. ISBN: 978 963 454 401 2
- [4] Dr. Pátzay György, Erőművi vizek kezelése- kölcsönhatásuk a környezettel, előadás, 2021.
- [5] Wang, Xiaomeng, Yonghai Gan, and Shujuan Zhang. 2019. "Improved Resistance to Organic Matter Load by Compositing a Cationic Flocculant into the Titanium Xerogel Coagulant." Separation and Purification Technology 211: 715–22.
- [6] Xu, Min, Yixin Luo, Xiaomeng Wang, and Lixiang Zhou. 2022. "Coagulation-Ultrafiltration Efficiency of Polymeric Al-, Fe-, and Ti- Coagulant with or without Polyacrylamide Composition." Separation and Purification Technology 280.
- [7] Reem Shaheen, Edit Cséfalvay, Investigation of Coagulation and Microfiltration for Danube water as the First Step of Make-up Water Production, Chemical Papers, accepted manuscript 2023.04.16.
- [8] 27/2005. (XII.6.) KvVM rendelet a használt és szennyvizek kibocsátásának ellenőrzésére vonatkozó részletes szabályokról
- [9] Wrábel Balázs, Erőművi pótápvíz készítés-környezetbarát eljárásokkal, Szakdolgozat, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2022. január.

# Belsőégésű motorokkal kapcsolatos kutatások a BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken

Lukács Kristóf

okl. gépészmérnök, lukacs@energia.bme.hu

Meggyes Attila

okl. gépészmérnök, PhD, meggyes@energia.bme.hu

Bereczky Ákos

okl. gépészmérnök, DSc, bereczky@energia.bme.hu

A cikkünkben röviden összefoglaljuk a BME, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékén az elmúlt 20 évben a belsőégésű motorok oktatása és kutatása terén elért eredményeket. Bemutatjuk a rendelkezésre álló infrastruktúrát, a lezárult és jelenleg folyó kutatásokat, végül foglalkozunk a terület jövőbeli lehetőségeivel is. A tanszéki szakterület a belsőégésű motorokat, mint hőerőgépek értelmezi és mint ilyen, az azokban lezajló égésfolyamatok felől közelíti meg, így nem csak, a közlekedésben jelenleg jelentős mértékben alkalmazott berendezéseket vizsgálja, hanem széleskörű felhasználásban üzemelő erőgépként tekint rájuk, például energia termelőeszközök.

\*

In this article, we summarise briefly the achievements of the Department of Energy Machines and Systems at the BME in the field of research and education of internal combustion engines over the last 20 years. We present the available infrastructure, the completed and ongoing research, and finally we address the future potential of the field. The field of the department understands internal combustion engines as thermal engines and as such approaches them from the point of view of the combustion processes that take place in them, thus not only considering them as equipment currently used to a large extent in transport, but also as power machines in a wide range of applications, such as energy production devices.

\*\*\*

A BME főtevékenysége szakágazati besorolása szerint a felsőfokú oktatás és képzéshez kapcsolódó képzési területeken, tudományterületeken alap-, alkalmazott és kísérleti kutatásokat és fejlesztéseket, tudományszervezést, technológiai innovációt, valamint az oktatást támogató egyéb kutatásokat végez [1]. Így számos kihívásnak megfelelően szerte ágazóan kell oktatni, fejleszteni és kutatni a szakterületet. Folyamatosan frissíteni kell a szakmai ismereteket, kezelni és reagálni kell az aktuális kihívásokra és megfelelő jövőképpel is rendelkezni kell. Ezért elsősorban az oktatási tevékenységet mutatjuk be, majd a terület infrastruktúráját és az ott elért fejlesztéseket részletezzük, majd a jövőbeli kihívásokról ejtünk szót.

## A Belsőégésű motorokkal kapcsolatos oktatás

A belsőégésű motorok oktatása jelenleg elsősorban a Járműmechanika specializáció számára „Belsőégésű motorok menedzsmentje” címmel és a Hőerőgépek és berendezések specializáció hallgatói számára folyt „Belsőégésű motorok” címmel mesterképzésen. Az előadásokat tanteremi gyakorlatok és laboratóriumi mérések egészítik ki. A kor követelményeinek megfelelően a Hőerőgépek és berendezések specializáció számára a tematikát részben átdolgozva és kiegészítve a tantárgy „Hajtások energiaátalakító rendszerei”

elnevezésre változott 2021-ben. A fenti két alap tárgyban megszerzett tudást kiegészítik a speciális területekkel foglalkozó „Belsőégésű motorok mérés-technikája” és a „Belsőégésű motorok környezet-technikája” tantárgyak a specializációk hallgatói számára. Valamint bővíthetik a tudásukat a hallgatók a főleg gyártással foglalkozó „A motortól a kész járműig”, valamint az elsősorban a fejlesztéssel foglalkozó „Belsőégésű motor konstrukciók” tantárgyakkal, amely szintén a kor követelményeinek megfelelően átdolgozásra került, így 2021-óta „Hajtások fejlesztése és gyártása a gyakorlatban” címmel kerül meghirdetésre és a Kar minden mesterképzési szakos hallgatója számára elérhető. Ez utóbbi két tantárgy oktatásában jelentős szerepet vállalnak ipari kollégák az AUDI Hungaria ZRt-től, AVL Hungary Kft. és a MOL NyRt-től.

Hallgatói javaslatra indítottuk el a „Belsőégésű motorok működésének alapjai” c. tantárgyat, amely minden Gépészmérnöki alapképzési szakos hallgató számára elérhető. Továbbá számos alap- és mesterképzéses tantárgy keretében kerülnek bemutatásra a tárgyak tematikáinak megfelelő kiméretben angol és magyar nyelven. Aktívan részt veszünk a Tanszék TDK munkájában. Hallgatóink közül számosan értek el előkelő helyezést a kari és az országos (OTDK) versenyeken. De nemcsak a hallgatóink, hanem az oktatóink is jól szerepeltek. Évtizedek óta részt veszünk az OTDK munkájában zsűri szekció tagként és elnökként is.

## Infrastruktúra fejlesztés és tudományos munka

Az infrastruktúra fejlesztés területén jelentős eredményeket sikerült elérni a Tanszéken. Az egyik ilyen fejlesztés a 2003-ban elkészült BAG-20-as gázmotor-generátor egység (1. kép). Ennek telepítésénél cél volt mind a kutatási, mind az oktatási igényeknek megfelelő kialakítás [2]. A gázmotor gázellátását a laboratóriumban rendelkezésre álló földgázvezetékkel oldottuk meg, viszont lehetőség van a korábbiakban kialakított gázlefejtő rendszerhez történő csatlakoztatásra is, így gázkeverékek vizsgálatára is van lehetőség. Ennek segítségével számos vizsgálatot végeztünk biogázokkal, gázosítási termékekkel, valamint oxy-fuel tüzeléssel kapcsolatban [3], melyekből számos jelentés és publikáció készült pl. [4], [5], [6] és [6], továbbá ezen motoron készítette Kovács Viktória kolleginánk [7] és Nagy Valéria a PhD disszertációját [8]. Továbbá kutatást végeztünk földgáz-hidrogén keverékekkel is [9], ennek publikálása folyamatban van.

A 2004-ben a Tanszéken átadott fékpadi-konténerrendszer az akkori AUDI Hungaria Motor Győrbe települése után pár évig, mint meleg motor fékpad dolgozott. Ez egy 300 kW-os fékgépet, mind benzin mind gázolaj tüzelőanyag ellátó, a hűtővíz és a kenőolaj temperálására szolgáló rendszereket tartalmazta. További fontos része volt az AVL Puma 5 mérésvezérlő és szabályozó rendszer. Így a fékpadi konténer kompatibilis a gyárnak megfelelő motor vizsgálatokra. Az elmúlt években számos fejlesztést hajtottunk végre



a rendszeren. A legjelentősebb a nyomatékképző gépek felújítása volt, amikor új, lényegesen kisebb tehetetlenségű Borghi & Saveri FE350-S örvényáramú fékgép egészült ki egy Sinamics 60 kW csúcsteljesítményű aszinkron géppel, így a mind hajtásra mind fékezésre alkalmas rendszer lényegesen jobb dinamikai tulajdonságokkal rendelkezik (1. ábra).

Szintén az elmúlt 20 év laborfejlesztés eredménye egy CFR típusú cetánszám mérőmotor [10], ennek segítségével dízelmotorok tüzelőanyagainak fontos jellemző paraméterét, a gyulladási időt lehet meghatározni, de lehetőséget teremt az égési folyamatok részletes vizsgálatára is. Ennek a mérőmotornak és a régebben üzembehelyezett VW-AUDI 1Z motornak a segítségével számos vizsgálatot sikerült elvégezni. Ilyen vizsgált kísérleti tüzelőanyagok voltak a magasabb szénatom-számú alkoholok – növényi olajok kettős és hármas elegyei (pl. [11], [12], [13]), továbbá a 1-butanol – gázolaj elegyek (pl. [14], [15]). Továbbá vizsgáltuk gázolaj – biodízel – metanol hármas elegyeit is (pl. [16]). Ezen mérőrendszerek segítségével készítette el Laza Tamás kollégánk a PhD disszertációját [17], valamint Bereczky Ákos az MTA doktoriját [18].

A NKFP3-00006/2005 pályázat segítségével [19] alakítottunk ki egy úgynevezett kettős tüzelőanyagú motort. Az ilyen dízelmotorokban az elsődleges tüzelőanyagot a szívócsőbe fecskendezik, és annak elpárolgása és az égéstérbe jutása után homogén keverék jön létre, amelyet egy másodlagos tüzelőanyag (pl. gázolaj) megfelelően időzített befecskendezése gyújt be. Az elsődleges tüzelőanyag lehet gáz halmazállapotú (pl. földgáz, biogáz, hidrogén, LPG stb.) vagy folyadék, mint például alkoholok (metanol, etanol stb.) vagy egyéb elegyek pl. nedves etanol, elő- és utópárlat (pl. rézelő, kozmaolaj stb.). Ezen a motoron is számos kutatást végeztünk és publikáltuk az eredményeket pl. [20], illetve most vizsgáljuk a földgáz-hidrogén tüzelőanyagokat egy PhD kutatás keretében.

Az oktatási és kutatási infrastruktúra fontos eleme a BASF típusú oktánszám mérőmotor [21]. Ez egy egyhengeres 332 cm<sup>3</sup> lökettérfogatú, négyütemű, vízhűtéses Otto-motor, melynél a kompresszióviszony 4-11 értékek között tetszőlegesen megválasztható. A motoron a légfeleslegtényező is szélestartományban állítható, így ideális oktatási célokra. Az elmúlt évben alakítottuk át a motort gázüzemre, így hidrogén és hidrogén-földgázkeverékek vizsgálatára is használhatóvá vált.

A Tanszéken többek között rendelkezünk egy HORIBA MEXA-8120 F emisszió mérőrendszerrel, amely, noha koros, de a rend-

szerei jól áttekinthetők és könnyen szervizelhetők [22]. Továbbá több és különböző elven működő részecske kibocsátás mérő rendszerrel is tudunk vizsgálatokat végezni.

Támogatás keretében számos motor és mérőberendezés, köztük egy AVL Tippelmann gyártmányú áramlás próbapad és számos bemutató és kutatási célokra használható motor érkezett az AUDI HUNGARIA Zrt-től az évek során.

## Ipari megbízások

A szakterület az elmúlt években számos ipari megbízást kapott, időrendi sorrendben a legfontosabbak:

- 2003 Versuchsbericht über die Messung der Gaszusammensetzung vom Brenngas (Holzgas) Grübl Automatisierungstechnik Stubenberg am See Austria megbízása,
- 2004-től számos megbízást végeztünk az akkori AUDI Hungaria Motor Kft. majd később AUDI HUNGARIA Zrt. számára, ezek közül sok tartós járatási vizsgálat volt, de számos speciális szakmai tapasztalatot igénylő vizsgálat is történt, például mechanikai veszteség meghatározása,
- 2004-től gázmotorok meghibásodásának és üzemeltetésének vizsgálata (szakértése) 24 esetben (pl. Kaposvár, Debrecen, Szeged, Nyíregyháza, Szombathely, Budapest, Tatabánya, Győr stb. telephelyeken),
- 2008 AGIP tüzelőanyag adalék Diesel-motoros összehasonlító vizsgálata, AGIP Hungaria Zrt. számára,
- 2008 1-2. blokki dízelgenerátorok teljesítménynövelése témában tanulmány készítése, Paksi Atomerőmű Zártkörűen Működő Részvénytársaság számára,
- 2010 A MÁV-TRAKCIÓ Zrt. M47 sorozatú remotorizált mozdonyának emissziós mérése, IMEX Filtertechnika Kft. számára.
- 2010-től a M41 sorozatú vonali dízelmozdony károsanyag kibocsátásának csökkentésére vonatkozó műszaki megoldás megalkotása, a GANZ Motor Kft. számára,
- 2010-től szakértés bírósági felkérésekre súlyos motor károsodások esetén 2010-2017 között 5 esetben (pl. Debrecen, Budapest, Kaposvár telephelyeken),
- 2014 Kohógáz alsó és felső robbanási (gyulladás) határának számíttással és méréssel történő meghatározása TÜKI Tüzeléstechnikai és Kutató Fejlesztő Zrt. megbízására,



1. ábra. Az AUDI fékpád felújítása előtt és után

- 2020 NKM Áramhálózati Kft.: „Kétkomponensű üzemanyaggal üzemeltetett gázmotorok felhasználásának lehetőségei” kutatása,
- 2022 Oxy-fuel ( $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-O}_2$ ) tüzelőanyag vizsgálata kísérleti gázmotorban, Coopinter Kft. számára.

Gázmotorok (Gázturbinák) üzemeltetése, meghibásodási lehetőségek és megelőző intézkedések címmel 2003-2011 között évenként szakmai tanfolyamot rendeztünk, elsősorban az energetikai gázmotorokat üzemeltető, karbantartó, tervező és biztosító szakemberek számára Dr. Meggyes Attila vezetésével. A konferencia előadásaira neves hazai és külföldi szakértőket hívtunk meg. De meghívtuk a gyártókat (Jenbacher, Wartsilä) kutatókat (Gasunie, BME) karbantartókat és az üzemeltetőket is.

Az ipari megbízások során, egyes speciális problémák vizsgálatánál támaszkodhattunk elsősorban a GPK más Tanszékeinek a segítségére, mint például a Anyagtudomány és Technológia Tanszék és a Műszaki Mechanikai Tanszék.

## Kutatások

A kutatásaink kiemelt célja a károsanyag kibocsátás és a környezetterhelés csökkentése. Ennek érdekében, amint azt a bevezetőben is említettük a belsőégésű motorokat, mint hőerőgépeket értelmezzük és mint ilyen, az azokban lezajló égésifolyamatok felől közelítjük meg. Így elkezdtünk foglalkozni az alternatív -nem hagyományos- tüzelőanyagokkal, mivel itt az égési folyamat jelentős változását lehet tapasztalni. Ezért is volt fontos kihívás az alacsony fűtőértékű gázok környezetbarát hasznosítása NKFP 3/018/2001 [3] pályázat. Ebben az alacsony és időben változó fűtőértékű gázok hasznosításához vizsgáltuk az égési folyamatot nagy inert tartalmú és eltérő összetételű gázok esetén és levegő oxigéntartalmának növelésével kerestük az optimalizálás lehetőségeit. Majd folytattuk a kutatásokat a K-46860 OKTA pályázat segítségével a 2. fejezetben bemutatott gázmotoron. Ma ezen a berendezésen a földgáz-hidrogén keverékek tulajdonságait vizsgáljuk mind mérési mind modellezési oldalról. Az oxigén tartalom égés befolyásolás hatásvizsgálatának újabb lépése volt a 2022-ben végzett kutatás, ahol  $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-O}_2$  keverékeket vizsgáltunk.

A folyadék tüzelőanyagok vizsgálatát első lépésben a „Megújuló energiaforrások tüzeléstechnikai vizsgálata” OTKA (PD-48678) pályázat támogatta. Ebben a pályázatban első körben nyers és észterezett repce olajjal végeztünk vizsgálatokat, majd egy sikeres Dél-Afrika- Magyar Tét (TÉT\_10-1-2011-0005) együttműködés hatására tudtuk a nyers és észterezett növényi olajok számát növelni (pl. krotanolaj, jatrophalaj és a kókuszolaj). Ezeknél a kutatásoknál merült fel a nyers növényi olajok (NNO-k) tulajdonságainak javítása magasabb szénatomszámú alkoholokkal. Ezekből a kutatásokból számos magas besorolású publikáció és több PhD munka is készült. A folyadék tüzelőanyagok területén számos további kutatást végeztünk, pl. HVO tüzelőanyagokkal [23]

Szintén fontos kutatási terület a kettős tüzelőanyagú dízelmotorok kutatása. A NKFP3-00006/2005 pályázat célkitűzésének megfelelően első lépésben magas víztartalmú etanol és elő és utópárlatok hasznosításával foglalkoztunk sikeresen, de később számos tüzelőanyag felhasználását vizsgáltuk, ilyen volt például a magas etanol tartalmú benzin és a metanol. Jelenleg a kor követelményeinek megfelelően földgáz és a földgáz-hidrogén keverékek felhasználását vizsgáljuk.

Természetesen nem csak méréseket végzünk, de számos kutatási eredmény született a modellezés területén is. Az egyetemi

szoftvereken kívül (pl. Ansys, Chemkin) két speciális elsősorban motoros célokra fejlesztett program csomag is áll a rendelkezésünkre, ezek az AVL Boost és a Fire. Valamint megemlítendő az a kutatások, melyek során a rendelkezésünkre álló szabadon programozható motorvezérlőkkel végzünk.

A fent említett kutatások és ipari megbízások során a résztvevők számos tapasztalatot szereztek.

## Jövőkép

A Ricardo Energy & Environment (REE) EU-ra vonatkozó tanulmánya [24] melyet három feltételrendszer alapján dolgozták ki az előrejelzéseiket az EU-ban újonnan értékesített és üzemelő gépjárművek hajtásláncaira. Az első feltételrendszer szerint (legkisebb elektromos hajtás részarány, LOxEV) a 2030-as és 2050-es években betartásra kerülnek az Európai Bizottság által 2020-ra előírt átlagos fajlagos  $\text{CO}_2$ -kibocsátás határértékek ( $\text{gCO}_2/\text{km}$ ). Az előrejelzés szerint ebben az esetben 2050-re az elektromos hajtás (BEV, PHEV és FCEV) részarány 70 %-ra növekszik.

A második modell (MIDxEV) az első és a harmadik közötti közepes elektromos hajtás részarányt feltételez. A harmadik feltételrendszer az extrapolációja az első forgatókönyvnek úgy, hogy 2050-re az összes új gépjármű eladás elérje a 100 % elektromos hajtás részarányt (HIXEV).

Az első feltételrendszer szerint az új személygépjárművek esetén 2030-ra a hagyományos dízel- és Ottó-motorok aránya közel 40%-ra csökken, ide számítva a mild hibrid (MHEV) hajtásláncokat is. A hibridek aránya közel 46%-ra nő, míg a BEV közel 10%-ot ér el. 2050-ben a teljesen elektromos meghajtások (BEV) aránya 35%, míg a PHEV és HEV aránya közel 60% lesz. A harmadik forgatókönyv szerint 2030-ra az új BEV aránya közel 15%-ot ér el, míg közel 8%-ot ér el a tüzelőanyag cella (FCEV), a sűrített földgáz (CNG) és az autógáz (LPG) együttesen. 2050-ben az új személygépjárművek közel 15%-a tüzelőanyag cellás, a teljesen elektromos hajtás (BEV) aránya 40%, míg a benzinmotoros tölthető hibrid (PHEV) részesedése 45%. A MIT Energy Initiative által megjelentetett tanulmány [25] szerint 2050-ben a villamos hajtás aránya (BEV+PHEV) a könnyű haszongépjármű állományban 33% lesz, de ez akár az 50%-ot is elérheti, ha a támogatások is elősegítik ezt. Visszatérve a dízelmotoros hajtásláncokra a REE jelentés [24] szerint a kistehergépjárművek esetén a harmadik feltételrendszer (HIXEV) szerint is kb. 60% marad a dízelmotoros hajtásláncok aránya, de ezek elsősorban a hálózatról tölthető hibridek (PHEV) lesznek. Meg kell említeni, hogy a folyamatosan változó helyzet jelentősen befolyásolja a belsőégésű motorokkal kapcsolatos kutatásokat, így például fontos lehet a jövőben a szintetikus tüzelőanyagok területe.

## Összefoglalás

A belsőégésű motorok területe régóta erős része a Tanszéknek és az elmúlt években sikerült jelentősen tovább fejleszteni a terület infrastruktúráját és ezen az alapon, valamint a megszerzett tapasztalatok és tudás továbbra is várhatóan egy fontos területe marad a Tanszéknek. Ezt megerősíti a számos PhD fokozat szerzés. Továbbá, hogy a fenti infrastruktúra segítségével az elmúlt években a belsőégésű motorok területén dolgozó munkatársak 14 db. D1, és számos további publikációt készítettek, a független WOS idézők száma több mint 1070. A tervek szerint a hidrogénnel kapcsolatos vizsgálatok a MENL Hidrogén Láb támogatásával számos további kutatást tesz lehetővé. Meg kell említeni az ipar részéről az AUDI HUNGARIA Zrt. és az AVL Hungary Kft. munkatársai segítséget,



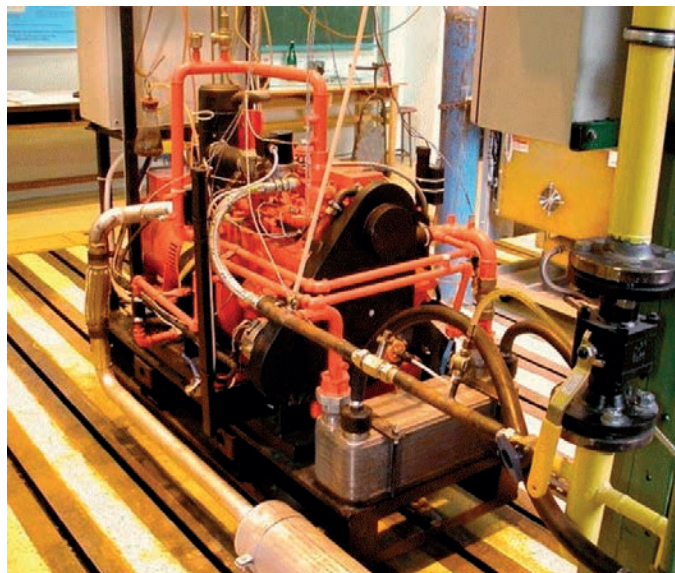
valamint a nem nevesített munkatársak és hallgatók munkáját és támogatását.

## Irodalomjegyzék

- [1] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem 2022. július 01. napjától hatályos Alapító okirata., [Online]. Available: <https://www.bme.hu/sites/default/files/Alap%C3%ADt%C3%B3B3.PDF>.
- [2] <http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=continentalgaseengine&lang=hu>, [Online].
- [3] Ősz János és munkatársai: „NKFP 3/018/2001 Az alacsony fűtőértékű gázok környezetbarát hasznosítása (2002-06)”.
- [4] V. Kovács, Á. Bereczky, Á. Török, S. Swaja: BIOGAS UTILIZATION IN A SERIAL HYBRID CNG ENGINE, (2011), Proceedings on International Scientific-Technical Conference BIOGAS AS VEHICLE FUEL, 19-20 October 2011., Rzeszow, Poland.
- [5] V. Kovács, A. Meggyes, Á. Bereczky: Theoretical investigation of woodgas combustion quality, In: Lehoczy, László; Kalmár, László (szerk.) microCAD 2005 International Scientific Conference, Miskolc, Magyarország.
- [6] S. Swaja, V. Kovács, Á. Bereczky, A. Penninger: Sewage sludge producer gas enriched with methane as a fuel to a spark ignited engine, FUEL PROCESSING TECHNOLOGY 110 pp. 160-166. , 7 p. (2013)
- [7] V. B. Kovács, „Alternatív gáznevelő tüzelőanyagok energetikai hasznosítása gázmotorokban,” [Online]. Available: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/1188>. [Hozzáférés dátuma: 09 04 2023].
- [8] V. Nagy, „A biogáz előállítás eljárás hatása a gázmotorok üzemére, különös tekintettel a károsanyag kibocsátásra,” [Online]. Available: <https://repozitorium.omikk.bme.hu/handle/10890/1399>. [Hozzáférés dátuma: 09 04 2023].
- [9] G. Dobi-Szakál, P. Szalontai, K. Lukács, A. Meggyes és Á. Bereczky, Hidrogén bekeverési kísérletek energiatermelés céljára gázmotorokban, Magyar Energetika, megjelenés folyamatban.
- [10] <http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=cetane&lang=en>, [Online].
- [11] T. Laza, R. Kecskés, Á. Bereczky, A. Penninger: Examination of burning processes of regenerative liquid fuel and alcohol mixtures in diesel engine, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering 50 (1), pp. 11-29, 2006.
- [12] T. Laza, Á. Bereczky: Influence of Higher Alcohols on the Combustion Pressure of Diesel Engine Operated with Rape Seed Oil, ACTA MECHANICA SLOVACA 13:(3) pp. 54-61., 2009.
- [13] T. Laza and Á. Bereczky: Basic fuel properties of rapeseed oil-higher alcohols blends, FUEL 90 : 2 pp. 803-810. , 8 p. (2011).
- [14] Á. Bereczky és A. Dobai: Butanol bekeverés égési folyamatának vizsgálata változtatható kompresszió viszonyú diesel motorban, OGET 2018.
- [15] L. Siwale, K. Lukács, Á. Torok, Á. Bereczky, M. Mbarawa, A. Penninger, A. Kolesnikov: Combustion and emission characteristics of n-butanol/diesel fuel blend in a turbo-charged compression ignition engine, FUEL, Volume 107, May 2013, Pages 409-418.
- [16] J. Žaglinskis, K. Lukács, Á. Bereczky: Comparison of properties of a compression ignition engine operating on diesel–biodiesel blend with methanol additive, FUEL 170: pp. 245-253. 2016.
- [17] T. Laza: „Folyékony bio-tüzelőanyagok felhasználása hőerőgépekben,” [Online]. Available: <https://doktori.hu/index.php?menuid=193&lang=HU&vid=5476>. [Hozzáférés dátuma: 09 04 2023].
- [18] Á. Bereczky: „Egyes alkoholok dízelmotoros felhasználásának

vizsgálata és értékelése,” [Online]. Available: <http://real-d.mtak.hu/1288/>. [Hozzáférés dátuma: 09 04 2023].

- [19] NKFP3 Bioenerg, „Biomasszára alapozott, komplex, kapcsolt hő- és villamos energia előállítási technológia”, NKFP3-00006/2005.
- [20] T. Wojciech, K. Lukács, S. Swaja, Á. Bereczky: Alcohol–diesel fuel combustion in the compression ignition engine, FUEL 154 pp. 196-206. , 11 p. (2015).
- [21] <http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=octane&lang=hu>, [Online].
- [22] <http://remotelab.energia.bme.hu/index.php?page=horiba&lang=hu>, [Online].
- [23] A. Rimkus, J. Žaglinskis, S. Stravinskas, R. Paulius, J. Matijošius és Á. Bereczky: Research on the Combustion, Energy and Emission Parameter of Various Concentration Blends of Hydrotreated Vegetable Oil Biofuel and Diesel Fuel in a Compression-Ignition Engine Energies 2019, 12(15), 2978.
- [24] N. Hill és J. Bates: Europe’s Clean Mobility Outlook: Scenarios for the EU light-duty vehicle fleet, associated energy needs and emissions, 2020-2050, 2018.
- [25] R. Field, H. W. Green, C. R. Armstrong, S. Paltsev, M. Ben-Akiva, B. Reimer és J. Heywood, „Insights into Future Mobility,” Massachusetts Institute of Technology Energy Initiative, Cambridge, 2019.



1. kép. A BAG-20-as gázmotor-generátor



2. kép. Kettős tüzelőanyagú dízelmotor

# Hőtechnikai és irreverzibilis termodinamikai kutatások és alkalmazásaik a BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékén

**Környey Tamás**

okl. gépészmérnök, [kornyey@energia.bme.hu](mailto:kornyey@energia.bme.hu)

**Ván Péter**

okl. fizikus, [van.peter@wigner.hu](mailto:van.peter@wigner.hu)

**Kovács Róbert**

okl. gépészeti modellező, [kovacsrobert@energia.bme.hu](mailto:kovacsrobert@energia.bme.hu)

**Kiss László**

okl. gépészmérnök, [Laszlo\\_Kiss@uqac.ca](mailto:Laszlo_Kiss@uqac.ca)

**Fülöp Tamás**

okl. fizikus, [fulop@energia.bme.hu](mailto:fulop@energia.bme.hu)

**Szücs Máttyás**

okl. gépészmérnök, [szucsmatyas@energia.bme.hu](mailto:szucsmatyas@energia.bme.hu)

**Jelen írás a BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, az elődtanszékektől örökölt hagyományokat folytató és új, hőtechnikai és irreverzibilis termodinamikai tevékenységeit foglalja össze.**

\*

**This article summarizes the traditional – inherited from the predecessor departments – and new activities of the Department of Energy Engineering of BME in the fields of thermal engineering and irreversible thermodynamics.**

\*\*\*

A tanszék hőtechnikai, termodinamikai és hőátviteli oktatási-kutatási tevékenységének gyökerei a második ipari forradalomig (1870–1914) nyúlnak vissza. Az új anyagok, az új energia- és erőforrások bevezeték a tömegtermelést szolgáló gépesítést, amelynek meghatározó szereplői a gőzgépek. Ebben a gazdasági környezetben, 1871-ben jön létre a Királyi József Műegyetem. Gépészmérnöki Szakosztályának első dékánja Bielek Miksa, az erőműgéptan és a gépszerkezettan tanára.

Híres elődünk Bánki Donát (1859–1922), a hidrogépek, kompresszorok és gőzturbinák professzora, aki a körfolyamatok elemzéséhez – Richard Molliert megelőzve – a világon először alkalmazta a hűtéstechnikában használatos  $\log p - h$  diagramot. A hőtechnika fontosságát jelzi, hogy 1898-ban megjelenik a tantervben a kalorikus gépek tantárgy, amelyet 30 esztendőn át Schimanek Emil oktatott. Később Komondy Zoltán lett az utóda, aki az addigi I. Gépszerkezettani Tanszékből 1946-ban létrehozta a Gőzgépek és Hűtőgépek Tanszékét.

Ebből vált ki a Heller László által 1951-ben alapított Energiagazdálkodási Tanszék, majd 1953-ban a Lévai András által létrehozott Hőerőművek Tanszék. A Hadmérnöki Kar 1957-ben történt felosztása után, a Repülőgéphajtóművek és Repülésüzemtan Tanszék egy része átkerül a Gépészmérnöki Karra, Gázturbinák Tanszék néven. Majd 1960-ban, a Gőzgépek és Hűtőgépek, valamint a Gázturbinák Tanszék egyesülésével, Brodszky Dezső vezetésével létrejön a Kalorikus Gépek Tanszék. Fő szakterületei a gőzgépek, a gőz- és gázturbinák, a tüzeléstechnika és kazánok, a motorok, valamint a hűtőgépek és a hőtechnikai mérések.

A hazai energetika II. világháború utáni történetének két kiemelkedő szakembere Heller László professzor és Lévai András professzor.

Mindkét tanszékvezetőnek komoly ipari háttere volt. Lévai András alapítója és igazgatója volt az Erőmű Tervező Irodának (ERŐTERV), így az általa vezetett tanszék részt vett a csepeli hőerőmű tervezésében. A Hőerőművek Tanszék a 60-as évek elejétől, a hő-

erőművek tantárgy mellett, a reaktortechnika és az atomerőművek témakört is fókuszába helyezte.

Heller László a világháború után felismerte az energiaszolgáltatás fontosságát, és így megalapította az Energiagazdálkodási Rt-t (EGART), amely később Hőterv majd Energiagazdálkodási Intézet (EGI) néven nemzetközi szinten is elismert, innovációs nagy műszaki szakértelemmel rendelkező intézetként tartották számon, valamint az ajkai hőerőművet tervezte.

Az Energiagazdálkodási, majd névváltozás után Hőenergetika Tanszék nem gazdasági, hanem hőtechnikai problémákkal foglalkozott (termodinamika, hőátvitel, gőztárolók, száraz és nedves hűtőtornyok). Érdekes, hogy a 60-as évek elején kezdtek elterjedni az elektronikus számológépek és ugyanekkor kezdték el felfuttatni Magyarországon a timföldgyártást. A timföldgyártás akkor a Bayer-technológiával történt, ahol a bauxitot tömény nátronlúgban, magas hőmérsékleten főzik. Ekkor a lúgban oldott nátrium-aluminát keletkezik, és elkülönül a többi anyagtól (vörösiszap). Az oldatot lehűtik, és hígítják, a vörösiszapot leüleptítik és leválasztják. A híg, lehűtött folyadékban a nátrium-aluminát nátronlúgra és nem oldott alumínium-hidroxidra bomlik. Ez utóbbit leválasztva és felhevítve kész a timföld (alumínium-oxid). A híg lúgos oldatot bepárolják. A keletkező tömény lúg és tiszta víz a következő adag bauxit feldolgozásához kell. A tanszék elkészítette a teljes folyamat matematikai modelljét és az ennek megfelelő számológépi programot. A technológia részét képező besűrítés/desztilláció volt a kiindulási alapja a tengervíz-sótalanító berendezés megvalósításának. Ebben a tanszék és az EGI végezte a fő munkát. A berendezés sokfokozatú fojtás során történő részleges elgőzölgtetés elvén (multi stage flash evaporation) alapult.

1968-ban került a Hőenergetika Tanszékre, majd annak jogutódjává szolgáló Hő-, és Rendszertechnikai Intézethez Kiss László. Az 1970-es években megalapította a Hőfizikai Laboratóriumot, amelyet egészen 1990-ig vezetett, ameddig nem lett a kanadai Université du Québec à Chicoutimi egyetem oktató-kutató munkatársa. Ebben a nagyságrendileg 20 éves időszakban munkatársaival több sikeres fejlesztést végzett, amelyekből számos (10) szabadalom és termék is született. Ezek közé tartoznak különféle hőárammérő műszerek, hőfizikai anyagjellemző mérőkészülékek, kompenzációs elven működő érintés nélküli hőmérsékletmérő készülék, napsugárzásintenzitás-mérő, valamint nagy látómezejű hordozható schlieren berendezés. Úttörő munkát végzett a felületi hőárammérők statikus és dinamikus hibáinak elméleti meghatározására. Tudományos tevékenységében nagy helyet foglalt el a hővezetés elmélete és gyakorlata. Foglalkozott a nemlineáris hővezetési problémákkal és kezdeményezte a Fourier-modelltől eltérő,



hiperbolikus differenciálegyenletekkel leírható jelenségek tanulmányozását. Mérési módszert alkotott két független hőfizikai anyagjellemző hőmérséklet függvényeinek egyetlen kísérlethől való meghatározására, az inverz probléma megoldásával. A hővezetés és a napenergia hasznosításának területén végzett munkássága erősen kihatott a későbbi Energetikai Gépek és Rendszerek kutatási programjára is, részben a Fourier-egyenlettel való eltérés kutatásában elért eredményei, részben pedig a napkollektorok és napenergiás rendszerek működésének szimulálására (melegvízellátó rendszerek, mezőgazdasági szénaszárítók, épülethűtés éjszakai radiátorokkal, tengervíz-sótalanítók) kidolgozott numerikus eljárásoknak köszönhetően. Szintén Kiss Lászlónak köszönhető a Hőtechnika, Hőfizikai mérések, Napkollektorok és napenergiás rendszerek számítása című tárgyak kidolgozása, és a matematikus-mérnök hallgatóknak szóló oktatásba való bevezetése.

A 70-es években futott fel a hazai földgázkitermelés, megalakult a Kőolaj- és Gázipari Tervező Vállalat, amelynek később az Olajterv (mostani nevén Olajterv Tervező Zrt.) jogutód néven futó cégnek a tanszék (Környey Tamás főszerepével) számológépi programot készített az amerikai NGPSA adatai alapján, amivel a földgáz cseppfolyós és légnemű fázisának mennyiségét, azok összetételét, sűrűségét, entalpiáját és entrópiáját lehet számítani, és amellyel a földgáz-előkészítési technológia modellezhető.

A Hőenergetika Tanszéknek szintén kiemelkedő szerepe volt a Heller-rendszerű hűtőtoronyban alkalmazott Forgó-féle apróbordás hőcserélő továbbfejlesztésében, valamint vizsgálták, hogyan lehet a hőcserélő berendezés csöveiben a víz megfagyását elkerülni.

Heller László és Lévai András nyugdíjba vonulása után a Hőerőművek, a Hőenergetika és a Villamosmérnöki Kari Géptan Tanszék közös irányítás alá került, majd a Géptan Tanszék átkerült a Gépészmérnöki Karra, és két részre bomlott. Az egyik részből és a Hőerőművek és Energetika Tanszékből, a Hő- és Rendszertechnikai Intézet, a másik részből a Rendszer és Irányítástechnika Tanszék alakult ki. Az átalakulás után a Hő- és Rendszertechnikai Intézet tématerülete bővült a hőáramhálózatok és a szálamisztartással, -érleléssel kapcsolatos területekkel.

A szálamisztartás termodinamikai modellezése kapcsán fontos kiemelni Imre László és Környey Tamás munkásságát, akik a szám-

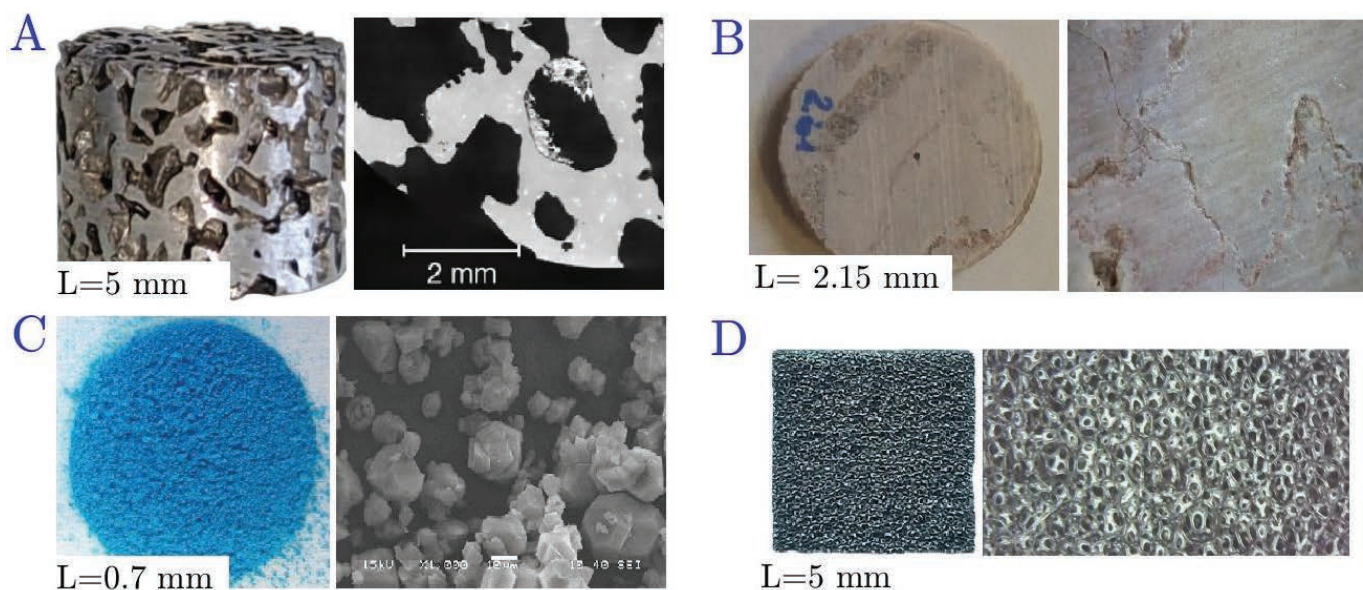
tan egyéb hőtechnikai ipari tevékenységük mellett az általuk kidolgozott és a 90-es évekig fejlesztett termodinamikai modellel megalapozták a későbbi, sikerrel zárult Pick-BME együttműködést is.

Ebben az időszakban a székesfehérvári KÖFÉM megbízásából számológépi modell készült az alumíniumhengerlés és a szalaghűtés modellezésére, a félfolyamatos alumíniumöntés vizsgálatára, és a Tanszék meghatározta azt az öntéstechnológiai paramétersorozatot, amellyel a MAN-Diesel motor dugattyúk alapanyaga jó minőségben előállítható volt.

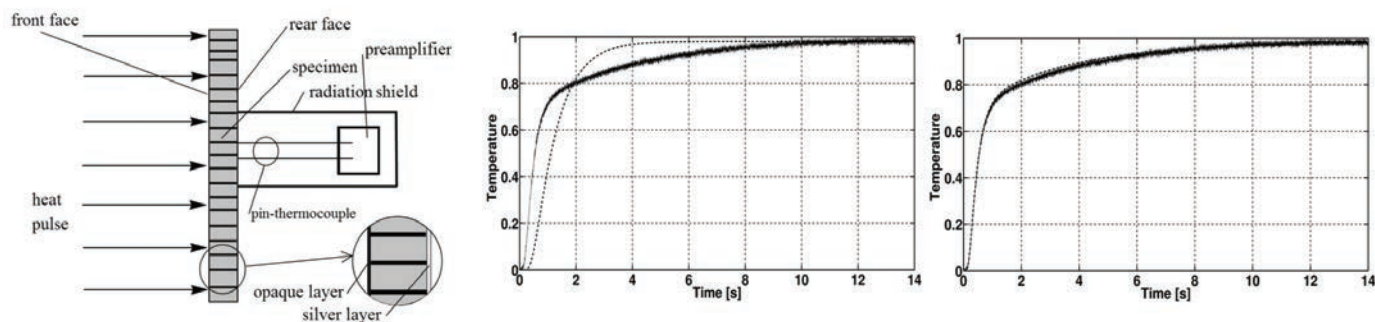
A Karlsruhe Egyetem és a BME között kiépült partnerség keretében a termodinamikai tanszékükkel (G. Ernst) való együttműködés keretében az általuk mért  $p$ - $v$ - $T$  adatok, izobár és izochor fajhő, valamint a Joule–Thomson-tényező mérési eredmények helyességét is vizsgálta a Tanszék (Környey Tamás döntő szerepével).

A hővezetési szakértelem a tanszékünknek hagyományosan az erősségei közé tartozik. Oktatjuk, műszaki és tudományos háttérrel fejlesztjük, hiszen a mérnöki tudás fontos részét képezi a hő terjedésének ez a módja, amelyet alapvetően a matematikai fizika egyik legrégebben ismert egyenletével, a Fourier-féle hővezetési egyenlettel írhatunk le. Többek között a hővezetési tényező mérésére is többféle készüléket fejlesztett a tanszék, elsősorban Kiss László, Faludi Árpád és Gróf Gyula munkássága kapcsán. Ezt a kutatást terjesztette ki, amikor az egykori Kémiai Fizika Tanszéken működő nemegyensúlyi termodinamikai iskolából 2008-ban Ván Péter is bekapcsolódott a tanszék munkájába, és az elméleti problémák vizsgálatára is kiterjedt a kutatás.

Az 1982-ben egyetemünkön, a többször Nobel-díjra jelölt Gyarmati István által kidolgozott termodinamikai hullámelmélet szerint szobahőmérsékleten, heterogén anyagokban is léteznie kell eltérésnek a Fourier-féle hővezetési törvényről. A 90-es évek biztatónak tűnő nemzetközi méréseit a hullámjelenségek kimutatására több mint egy évtizedig nem sikerült azonban megbízhatóan megismételni. A nemzetközi irodalom számtalan elméleti vizsgálata, kísérleti háttér nélkül, nem vezetett előre a jelenség megértésében. A tanszéken Gróf Gyula és Ván Péter által elindított kutatásokba hamarosan Fülöp Tamás és Czél Balázs is bekapcsolódott, és részletes elméleti és numerikus modellezés segítségével igyekeztünk megérteni a jelenség kimutatásának háttérét. Ekkor már nem a Cattaneo–



1. ábra. Tanszékünkön vizsgált, Fourier-törvényen túli hővezetésű heterogén minták (A. nagypórusú fémhab, B. szársomlyói mészkő, C. fémorganikus térháló, D. Allcomp szénhab).



2. ábra. A hővezetés flash mérési módszerének elve (balra), és egy tanszékünkön mért tipikus hőmérséklet-felfutás, mely a Fourier-egyenlettel (szaggatott vonal a középső ábrán) nem, a Guyer–Krumhansl-egyenlettel (szaggatott vonal a jobb oldali ábrán) viszont sikeresen értelmezhető.

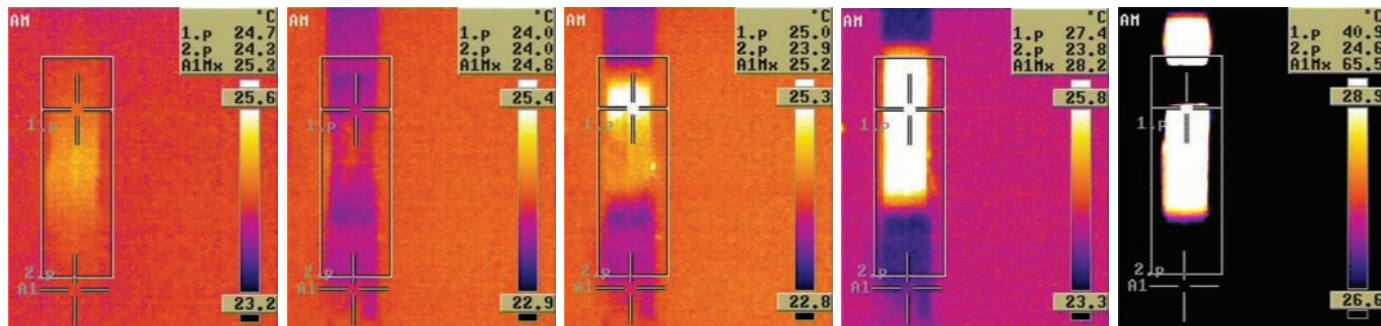
Vernotte-egyenlet által jósolt hullámjelenséget kerestük, hanem egy annál általánosabb elmélet, a nemegyensúlyi termodinamika keretében levezethető Guyer–Krumhansl-egyenlet megoldásait vizsgáltuk. Végül a Fourier-rezonancia felismerése és az ennek alapján tervezett kísérletek, illetve jól megválasztott anyagi struktúra vizsgálata vezetett eredményre, több évnyi kutatómunka után, 2016-ban. Mindeközben fiatal kollégák sora erősítette kutatási programot, közülük előbb Kovács Róbert, majd Szűcs Mátyás doktori fokozatot szerzett 2017-ben, illetve 2022-ben. Ennek eredményeképpen többféle természetes és mesterséges heterogén anyagban sikerült kimutatnunk a Fourier-egyenletnél általánosabb elmélettel leírható hővezetési jelenségeket, a kereskedelmi programok problematikus működéseit felismerve, hatékony új numerikus eljárások kidolgozásával. Mérési eredményeinket 2016-ban publikáltuk először.

A tanszékünk hővezetési kutatómunkáját a Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézetével közös konzorciális pályázatok támogatták. Előbb 2011-től 2015-ig „Hővezetés kísérleti és elméleti vizsgálata”, majd 2015-től 2019-ig „Hőtranszport extrém közegekben és rendszerekben” című kutatási tervünk nyert NKFIH-támogatást.

Legújabb alapkutatásaink már a heterogén anyagok tranziens hővezetési jelenségein alapuló technológiai lehetőségeket vizsgálják, elsősorban Kovács Róbert „Kapcsolt problémák a nemegyensúlyi termodinamikában” című fiatal kutatói pályázatának lehetőségeire alapozva. Ezzel egyidőben kapcsolódott be a kutatási munkákba Fehér Anna, aki 2018 óta végez igen értékes kísérleti munkát, igen sokrétű anyagokon, alkalmazásorientált irányban. 2020-tól kezdődően pedig többirányú együttműködést sikerült kialakítani a BME-n belül és azon kívül egyaránt. Ezek közül kiemelni a Gépészmérnöki Karon belül Orbulov Imre Lendület Kutatócso-

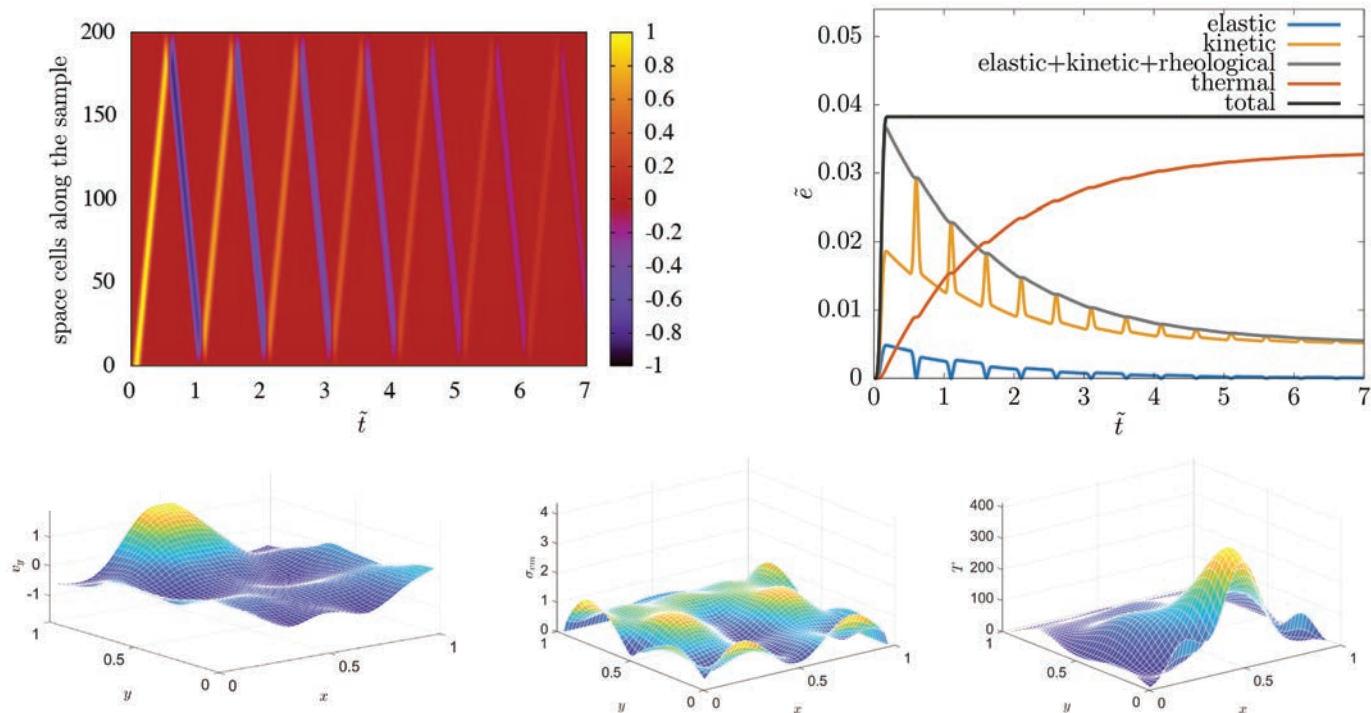
portját, akikkel közösen kompozit fémhabokat vizsgálunk, a Villamosmérnöki és Informatikai Karról Géczy Attilát, akivel biológiai lebomló NYÁK-ok termikus tulajdonságait határoztuk meg kísérleti úton, valamint a Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karról László Krisztinát, akivel fémorganikus térhálók hővezetési képességeinek javításán dolgozunk. Ezen felül pedig a genfi CERN nemzetközi részecskefizikai kutatóközpont ALICE csoportjával dolgozunk együtt, ennek témája egy következő generációs elemirészecske-detektor nagyporozitású szénhabból épített strukturális elemeinek termikus tervezése.

A hővezetési kutatásokkal párhuzamosan tanszékünk nemegyensúlyi termodinamikai alapkutatásai is bővültek. A (mára megszűnt) Bányászati Kutató Intézet volt igazgatója, Asszonyi Csaba és a pécsi illetőségű Kőmérő Kft. vezetője, Kovács László egyaránt megfigyelték a közetmechanikában fellépő termikus folyamatokat, és fontos jelentőséget tulajdonítottak nekik. Tanszékünk kollégái, Ván Péter és Fülöp Tamás gyümölcsöző együttműködést építettek ki velük, továbbá Vásárhelyi Balázs közetmechanikussal (BME Építőmérnöki Kar). Ezen együttműködések eredményeképpen a belső változós módszertan segítségével került levezetésre a termodinamikailag konzisztens Kluitenberg–Verhás-féle reológiai anyagmodell, mely az in situ közetfeszültség meghatározáshoz elengedhetetlen. Vizsgáltuk továbbá a belső változós módszertan és a geometriai alapokon nyugvó, a termodinamika és a mechanika egységes tárgyalása motiválta GENERIC (General Equation for the Non-Equilibrium Reversible–Irreversible Coupling) keretrendszer kompatibilitását. Ezen vizsgálatok nem pusztán a nemegyensúlyi termodinamika elméleteinek mélyebb megértéséhez vezettek. A GENERIC mögött rejlő geometriai struktúra biztosítja ugyanis a termodinamika első és második főtételének, azaz az összenergia



3. ábra. Hőtágulás-indukálta Joule–Thomson-jelenség, viszkoelasztikus és képlékeny disszipáció és tönkremenetel követése termokamerával, poliamid 6 műanyagmintán.





4. ábra. Felső sor: irreverzibilisen csillapított hullámterjedés rúdban: a numerikus szimuláció eredményén nem látható numerikus műtermék, és a számolt összenergia (fekete vonal) megmaradása is jól teljesül. Alsó sor: kétdimenziós hullámterjedés szimulációja.

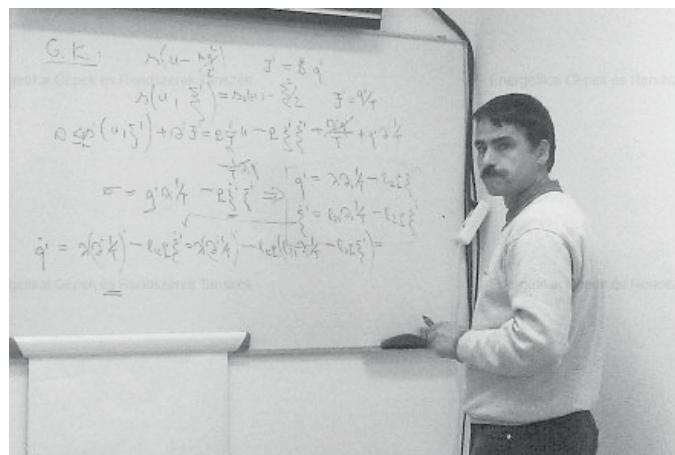
megmaradásának és az entrópia növekedésének teljesülését. Ezen tulajdonság nyújtotta lehetőséget kihasználva Fülöp Tamás, Kovács Róbert és Szücs Mátyás, Takács Donát doktorandusz és hallgatók bevonásával egy struktúra- (ezáltal összenergia-) őrző, véges-differencia-alapú numerikus módszert fejlesztett ki. Ellentétben a kereskedelmi szoftverekkel, a saját fejlesztésű módszer könnyen kézben tartható, futása gyors és erőforrás-takarékos, és a számítás stabilitását, a numerikus eredetű disszipációs hiba (az amplitúdók mesterséges csökkenése) és diszperziós hiba (extra mesterséges oszcillációk megjelenése a megoldásban) minimalizálását a megfelelő paraméterbeállítással könnyedén elérhetjük. A módszer folyamatos fejlesztése zajlik, egyre több irányban alkalmazzuk, így például szeizmikus hullámok terjedésének vagy akár szuperkritikus állapotú anyagok nemlineáris csatolt hővezetési-akusztikai folyamatainak vizsgálatához.

E numerikus módszer alkalmazása egyúttal a Ván Péter és Fülöp Tamás által meghonosított téridő-számleletnek, melynek áramló közegek és szilárd közegek esetén egyaránt többféle irreverzibilis termodinamikai következményét sikerült kimutatni.

Szilárd közegek termodinamikailag csillapított mechanikai folyamatokra Fülöp Tamás fejlesztett ki egy analitikus megoldási módszert, amelyet Szücs Mátyás alkalmazott számos különböző feladatra (pl. vastagfalú csőre ráadott terhelés tranziens hatása, furat ill. alagút létesítésének időbeli következményei).

Mindezek mellett a gyengén nemlokális kontinuumelméletekben végzett kutatásaink is ígéretes felismerésekre vezettek rugalmas anyagok vagy akár a klasszikus mezőelméletek, például a newtoni gravitáció esetén – a termodinamikai módszertan távolabbi eső területeken is gyümölcsözőnek bizonyul.

A cikk megírásában nyújtott segítségéért köszönetünket fejezzük ki Korényi Zoltánnak.



## OTKA megbeszélésen Ván Péter összegzi az eredményeket



**Termodinamikai konferencián Nancyban  
(Gróf Gyula, Verhás József, Ván Péter, Fülöp Tamás és  
Kovács Róbert)**

# Megújuló energia laboratórium és a kapcsolódó kutatások az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken

**Molnárné Dőry Zsófia**

okl. energetikai mérnök, dory@energia.bme.hu

**Mayer Martin János**

okl. gépészmérnök, mayer@energia.bme.hu

A megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos kutatások évtizedek óta részét képezik az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék és az előd tanszékek tevékenységének. Ebben a cikkben ezeknek a kutatásoknak a főbb mozzanatait és eredményeit, valamint a tanszéki Megújuló energia laboratórium történetét tekintjük át. A cikk második fejezete a Megújuló energia laboratórium felépítésével és az ott zajló kísérleti kutatómunkával foglalkozik. A harmadik fejezetben az elméleti kutatásokra helyezzük a hangsúlyt, melyek legnagyobb részben a napenergia hasznosításához kötődnek, a cikk végén pedig a jövőbeli tervekről adunk egy rövid kitekintést.

\*

Research on renewable energy sources has been part of the activities of the Department of Energy Engineering and its predecessor departments for decades. This article reviews the main progress and results of this research and the history of the Department's Renewable Energy Laboratory. The second section of the article describes the laboratory and the experimental research work carried out there. The third chapter focuses on theoretical research, most of which is related to solar energy, and the article concludes with a brief outlook on future.

\*\*\*

A fosszilis tüzelőanyag készletek végeessége már a XX. század utolsó évtizedeiben ráirányították a figyelmet a megújuló energiaforrások hasznosításának fontosságára. Az ezredforduló idejére már az is nyilvánvalóvá vált, hogy a fosszilis tüzelőanyagok égetésével a légkörbe jutó CO<sub>2</sub> által előidézett klímaváltozás egyre gyorsuló üteme komolyan veszélyezteti az emberi társadalom általunk ismert formában való fennmaradását. Ennek hatására a megújuló energiaforrások hasznosításának fő hatóerejévé a fosszilis készletek végeessége helyett a megújulókat által elérhető CO<sub>2</sub> kibocsátás csökkentés vált. A XX. század megújuló energetikával kapcsolatos kutatásai főként az újszerű és egyre hatékonyabb energiatermelési módok kifejlesztését célozták, a XXI. század elejétől a létező technológiák gazdaságosságának növelése és minél szélesebb körű elterjesztése került a középpontba, míg napjainkban a megújuló hálózati integrációjának biztosítása jelenti a legnagyobb kihívást.

Az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék 20 éves története egybeesett a megújuló energiaforrásokhoz kapcsolódó kutatások világszintű dinamikus növekedésével, melyhez kapcsolódva ezek az energiaforrások a tanszék oktatási és kutatási tevékenységében is fokozatosan egyre nagyobb szerepet kaptak. A cikk második fejezetében a megújuló laboratórium történetét és az ahhoz kapcsolódó kutatási eredményeket mutatjuk be, míg a harmadik fejezetben a megújuló energiaforrások hasznosításával kapcsolatos elméleti kutatásokról nyújtunk áttekintést.

## Megújuló energia laboratórium

A Megújuló energia labor az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéknek helyet adó D. épület tetején található, amely a BME kutatóegyetem projektjének keretében jött létre. A napkollektoros hőhasznosító rendszerrész, a meteorológiai adatgyűjtés és helyi, kis léptékű villamos rendszerünk lehetőséget adnak a napenergia és szélenergia használatának vizsgálatára. A Megújuló labor így oktatási, kutatási és ismeretterjesztési célokat is szolgál. Távlaboratórium megvalósításának céljából Schmerl Gábor, Szabados György, Dombi Szilárd, Farkas Viktor, Molnárné Dőry Zsófia, Könczöl Sándor, Kovács Krisztián, Szilágyi Artúr kollégákkal és Dr. Gróf Gyula vezetésével kiépítettük és az évek során bővítettük a mérőrendszer bemeneti és kimeneti paramétereit feldolgozó rendszert, hangsúlyt fektetve az online és távból történő elérhetőségre. A mért adatokat Labview programkörnyezet fogadja, illetve innen történhet kimeneti beavatkozó jel küldése az egyes rendszerrészekbe. Az adatok helyi táblázatokban és egy MySQL alapú szerver oldali adatbázisba kerülnek aktuális bemutatáshoz és archiváláshoz. Az adatok online megjelenítése és letöltési lehetősége a remotelab.energia.bme.hu/solar oldalon bő 15 éven keresztül szinte folyamatos volt, jelenleg felújítás miatt szünetel.

Megújuló energiaforrások közül elsősorban a különböző típusú napkollektorokat és napelemeket tudtuk a hallgatókkal egy-egy gyakorlati órán megismertetni. Napkollektoroknál – melyeknek kiépítését a Naplopó Kft. végezte – a termelőegységek típusait (vákuumcsöves és síkkollektorok) hasonlíthatjuk össze beépített mérőrendszerek és helyi hőfelhasználás (fancoil-hőcserélők és műterhelés) segítségével. A napkollektorok dőlésszöge változtatható, a hőtartály hőmérséklete, a hőfogyasztók működése szabályozható.

A napkollektoros vizsgálatokhoz kapcsolódott Mahmoud Ahmed Sharafeldin PhD hallgató kutatása, aki a nanofolyadékok napkollektorokban történő alkalmazásával elérhető hatékonyság növelés lehetőségeit vizsgálta. Döntően kísérleti munkájához a laborban található sík és vákuumcsöves napkollektorokat használta, melyekben a CeO<sub>2</sub> és WO<sub>3</sub> nanorészecskék hozzáadásával előállított nanofolyadékokat alkalmazott hőszállító közegként [2–5].

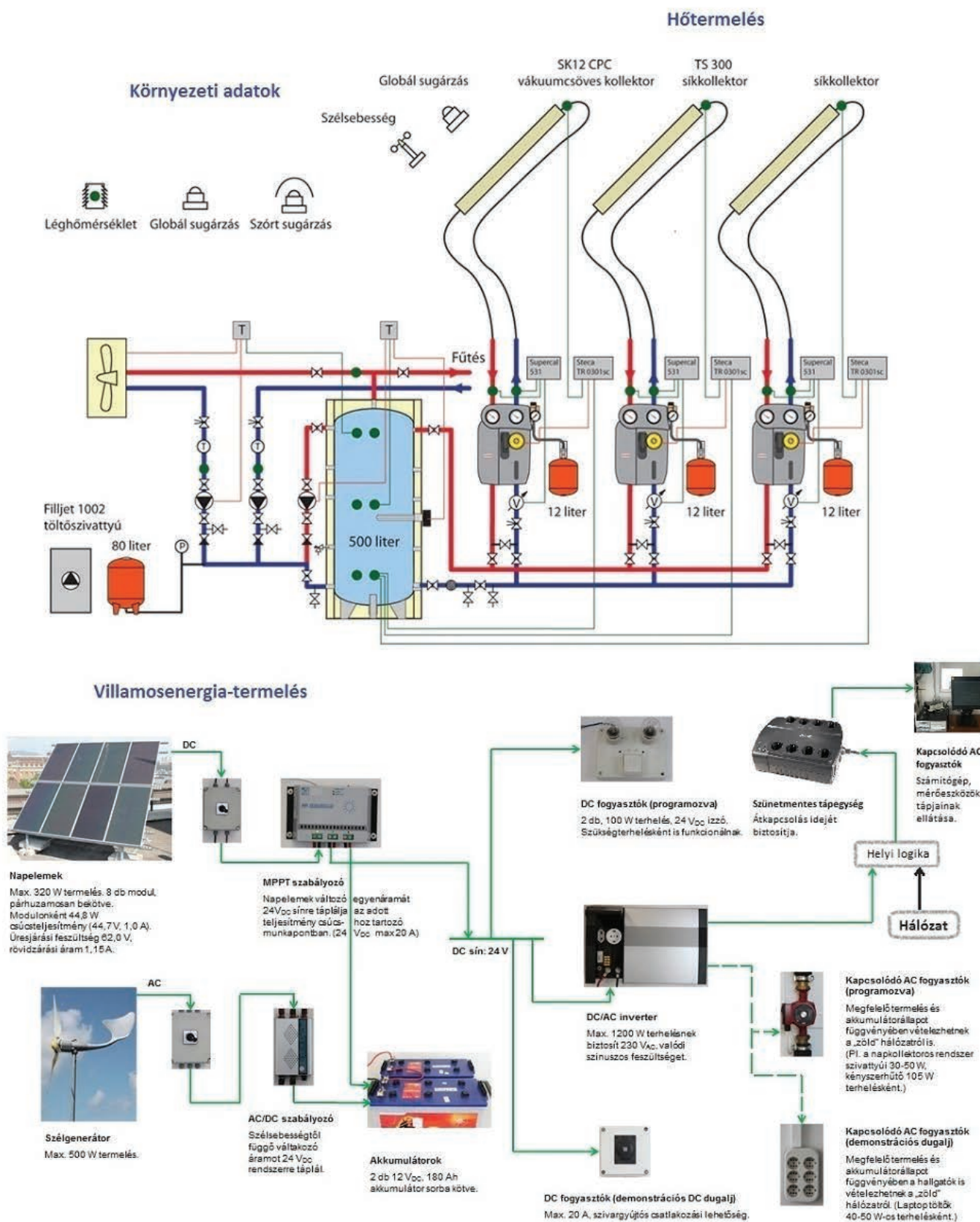
Demonstrációs és laboratóriumi helyi termelés céljából többféle típusú napelemek (320 W amorf napelem, később mono- és polikristályos 250-255 W maximális teljesítményekkel) és szélgenerátor (300 W) került telepítésre a tetőn. A termelőegységek 24 Vdc sínre táplálódnak, az akkumulátorok 4,3 kWh energia tárolására alkalmasak. A termelt „zöld” villamos energiával helyi fogyasztókat látunk el szabályozott módon 1200 W-os szigetüzemű inverterrel, többek között AC szünetmentes tápellátásként a mérőszámítógépet. Kapcsolható műterhelésként 100 W-os DC lámpákat telepítettünk, ezek egy háztartási méretű rendszer egyes időzíthető elemeit modellezik, mint például mosógép, hűtő, bojler, akkumulátoros gépek. Ezekkel a fogyasztó oldali távvezérlést, távve-



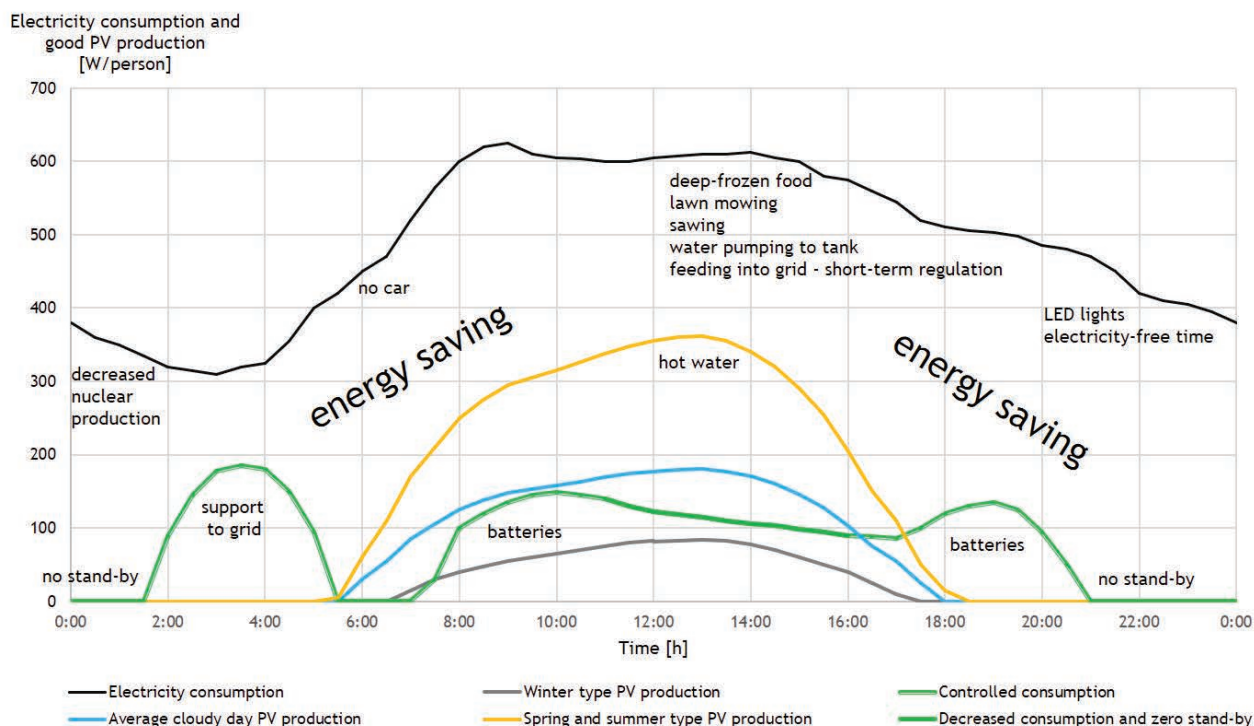
zérlelt, nap- és szélenergia alapú termeléshez való igazodást az országban az elsők között vizsgáltuk a laborban: napelemes, szél-turbinás rendszerünkben tesztfogyasztókat értünk el távból, majd előre programozott táblázatban megadott fogyasztási célértékeket követett az időkapcsoló (offline módon), illetve bejelentkezés után akár irányíthatuk is tesztfogyasztóinkat (online módon). Az online

webkamera képen vizuálisan ellenőrizhetővé tettük a távlaboratórium aktuális mérési körülményeit, pl. eső, napsütés, felhőzettség, felületek szennyezettsége vagy árnyékoltsága, kapcsolható lámpák státusza.

Laborunkban a megújuló energiaforrással termelt villamos energia témakörben Bereczky Ákos szervezésében több százan mér-



1. ábra. Egyvonalas kapcsolási rajz a megújuló laboratórium hő és villamos energia rendszeréről [1]



2. ábra. Napelemes termeléshez optimalizált háztartási fogyasztási célfüggvény [7]

ték végig a napelem-karakterisztika méréssorozatotunkat egyetemi tanulmányaik során. Napsütésben a tetőn található napelemekkel vagy esős, téli időjárás esetén mérőbőröndünk napelemeivel és mesterséges fényforrásával vizsgáltuk, milyen optimális munkapontot találunk a feszültség és áramértékek beállításával, melyhez változtatható ellenállást alkalmaztunk. A hallgatók a mérési pontokból kiszámolták a maximális teljesítményt és elérhető legnagyobb hatásfokot, amely adott napelemes kapcsolásból kinyerhető egy adott besugárzási intenzitás mellett, ha a körülményeknél az árnyékhathatást, soros vagy párhuzamos kapcsolást, a napelemek típusát, cella-hőmérsékletét, külső hőmérsékleti és szélviszonyokat is figyelembe vesszük.

A megújuló energia technológiák kutatási és demonstrációs külső helyszínéként a főtí Élehető Jövő Park is adatokat biztosított és szakmai látogatásainknak adott otthont. A Nemzetközi Gyermekmentő Szolgálat Lovasterápiás Központjának területén, az ELMŰ-ÉMÁSZ Társaságcsoporthoz és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem együttműködésében megújuló energiaforrásokra alapuló energiarendszer valósult meg. Helyi szabályozás, energiátárolók és különböző mértékben szabályozható fogyasztók biztosítják a megtermelt energia lokális felhasználását. Napelemes naperőmű (kezdeti 15,6 kW bővítve), szélerőmű (kezdeti 20 kW, bővítve 5 kW-os egységekkel), törpe vízerőmű Mogyoródi-patakon (200 W), bemutató épületünkön levegő-víz hőszivattyú (14 kW<sub>termikus</sub>), illetve korábban létesített napkollektorok villamos energiát és fűtési, hűtési célú hőt állítanak elő. A változó teljesítménnyel rendelkezésre álló villamos energiát vezérelhető töltésű, kisütésű akkumulátortelep (40 kWh, 20 kW) és időzíthető fogyasztók egyenlíthetnek ki. Például a környezetbarát elektromos járművek töltését biztosító fali töltő és töltőoszlop is a rendszer részét képezik, ahogy később a helyszíni elektromos kerékpárok is.

A labor és a park lehetőséget nyújtottak kutatási és oktatási célokra: a megújuló energiaforrás alapú energiatermelés megisme-

résére, bemutatására, okos hálózati funkciók fejlesztésére, újszerű megoldások és berendezések tesztelésére, validálására. Kutatási területként a Megújuló energia labor a több bemenetű, több kimenetű, időjárásfüggő megújuló energiaforrásokat tartalmazó, kisléptékű energiarendszerek matematikai vizsgálatának is helyet adott. Ilyen esetekben nemlineáris problémát megoldó matematikai modelleket kell figyelembe venni, az első elemzésekben fuzzy logikát alkalmazott Molnárné Dőry Zsófia doktorandusként [1].

A meteorológiai adatok alapján történő termeléselőrejelzés vizsgálta Pomázi Eszter innovatív és alapos szakdolgozatában, melyben a napenergiatermelést és időjárási adatokat feldolgozó főtí adatbázis, illetve annak neurális hálóra történő betanítása mutatott szép eredményeket. Energetikai vezérlési és szabályozási stratégiák kidolgozása, tarifarendszerek témakörében írta diplomamunkáját Nagy Edit, melyben a park SCADA rendszerével dolgozott, távvezérlési lehetőségek programozásában fejlesztett az ELMŰ együttműködésben.

A Megújuló energia labor villamos rendszerének fejlesztése során további szakdolgozatok és diplomamunkák is készültek, köztük fizikai prototípusok is. Szórt sugázmérő berendezés működését egy nappályát kitakaró automatikával fejlesztette Hegedűs Tamás [6]. Teljes napkövető szabályozást tervezett és egy forgatható napelemállványt mechatronikai fejlesztését végezte, programozott és kivitelezett Szalay Péter hallgatónk. Szabó Márton a napelemek teljesítményét leíró modellek pontosságát vizsgálta a laborban elhelyezett mérőrendszerével gyűjtött adatok alapján. Kardos Tamás a holnapunkon bővítette a változókat, frissítette oldalakat, miután a forgatható állvány mono- és polikristályos napelemeit üzembe helyezték. Fazekas Gergő szakdolgozatában a laborban kutatótt demand side management, vagyis optimális akkumulátorhasználat és fogyasztó oldali szabályozás témakörében szoftveres összekapcsolásán dolgozott, amelyet Matlab programozással oldott meg. Emellett Boros Dániel Labview környezetben fejlesztette a fogyaszt-



tó oldali szabályozás megvalósítását, adatkimeneteket integrált a helyi adatfeldolgozó programba. Mednyánszky Mira diplomamunkája ezután a Megújuló energia labor fogyasztó oldali szabályozásban a neurális háló, mint lágy számítási eljárás alkalmazásának lehetőségével foglalkozott a Matlab programon belül, miszerint egy kisméretű rendszerben betanítható a korábbi fogyasztási görbék lekövetése aktuális napelemes termelési viszonyok függvényében, amennyiben korábban szakmai döntések alapján megközelítettünk egy optimális működést és arról megfelelő adatsorunk gyűlt össze. A korábbi fuzzy típusú döntéshozás és a neurális háló együttes alkalmazása további kutatási irányokat mutat a jelenleg is igen aktuális, energiatakarékos szemléletű, egyszerű beavatkozási lehetőségekkel megvalósított energiamenedzsment szemlélet mellett. Ekkor az optimális fogyasztóoldali beavatkozást, a célfüggvények meghatározását is felskálázhatjuk háztartási méretekre, így a hálózatot nem terhelve lehet mértéktartó, nagyrészt helyi fogyasztásra dolgozó napelemes rendszereket telepíteni. [7]

A laboratórium szakmai bemutatók, nyílt napokra szervezett előadások helyszínéül is szolgált. Kutatók éjszakáján, közép- és általános iskolai látogatásokon, a Lányok Napja a Műegyetemen rendezvényeken is megtekinthették az érdeklődők a napelemeket, napkollektorokat, meteorológiai adatgyűjtő rendszereinket, szabályozható fogyasztóinkat, helyszíni mérőegységeinket és kis napelemes modelleket is. A bemutatók, előadások során a megújuló energiaforrások alapismereteivel, a napelemek lehetőségeivel, az energiatakarékosság fontosságával, a napsütéshez igazodó fogyasztással, a fenntartható energetikai technológiák műszaki kérdéseivel találkozhattak különböző korosztályú érdeklődők.

### Megújuló energetikai kutatások

A megújuló energiaforrásokkal kapcsolatos első kutatások még az előd tanszékhez, az Energetika Tanszékhez kötődnek, és egészen az 1980-as évekig nyúlnak vissza. Az első nemzetközi szinten is megjelenő eredmények Imre László professzor úr nevéhez kötődnek, aki korábbi élelmiszer szárítással kapcsolatos kutatási tapasztalatait 1980-tól a napenergiával történő szárítás témakörében kamatoztatta [8]. A kutatások során egy gyakorlat-orientált megközelítést alkalmazott, melynek részeként a napenergiás szárítást műszaki és gazdaságossági szempontok szerint is értékelte [9], és javaslatot tett a technológiai fejlődő országokban történő hasznosítására is [10]. Az 1990-es években a napkollektorokkal integrált szárító rendszerek számítógépes szimulációja került előtérbe [11]. Az elkészült modelleket kísérletileg is validálták, valamint később egy részletes érzékenységvizsgálattal is kibővítették [12]. A napenergiás szárítás témakörében végzett hazai kutatások nemzetközi elismertségét jól mutatja, hogy a *Drying Technology* folyóirat 1986-os *Solar Drying* című különszámának Imre László írta meg a szerkesztői előszavát [13]. Az 1995-ben megjelent *Handbook of Industrial Drying* könyv napenergiás szárítás fejezetét szintén Imre László készítette el [14].

Imre László professzor úr a tudományos közéletben is aktív szerepet vállalt. Az ő kezdeményezésére alakult meg 1983-ban a Nemzetközi Napenergia Társaság (International Solar Energy Society, ISES) Magyar Tagozata, melynek első elnöke is ő lett, titkárságának pedig az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék előd intézményei adtak helyet. 1990-ben a hazai szakemberek szélesebb körének bevonására megalapult a Magyar Napenergia Társaság is. A szervezetek egyik legjelentősebb eredménye, hogy 1993-ban Magyarországon szervezték meg az ISES Napenergia

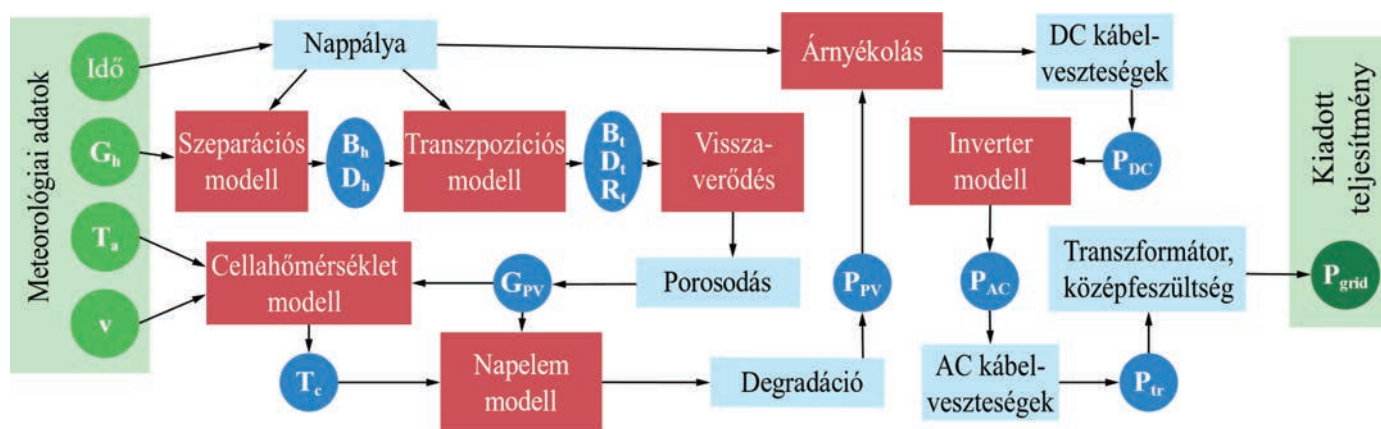
Világkongresszusát (Solar World Congress, SWC), melynek elnöke Imre László professzor volt, és nagy sikerrel zárult [15].

A 2000-es években a megújulókhöz kapcsolódó kutatások a megújuló energiaforrások hasznosításának átfogóbb vizsgálatával bővültek ki. A Magyar Napenergia Társaság tevékenységén keresztül előtérbe került az információátadás és a megújuló energiaforrások társadalmi elfogadottságának kérdésköre [16], majd pedig a hazai megújuló energia potenciálok felmérése is [17]. Ezt az időszakot azonban már főként a hazai szemléletformálás jellemezte, Imre László professzor úr számos cikke jelent meg főbb hazai folyóiratokban, úgymint a Magyar Energetika, Energiagazdálkodás és Elektrotechnika, a napenergián túl már szélenergiát és hidrogén energetikát is érintő témákban.

Ezzel párhuzamosan az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék több kollégája is végzett megújuló energiaforrásokhoz köthető kutatásokat. Ősz János a megújuló tüzelőanyagok hazai hasznosítási lehetőségeit [18] és a szélturbinákkal történő villamosenergia-termelést [19] vizsgálta. Groniewsky Axel és Gács Iván a megújuló energiaforrások támogatásának kérdéskörét elemezték [20]. Gács Iván később a naphőerőművi technológia bemutatásával foglalkozott [21]. Ehhez a témakörhöz kapcsolódott Buzea Klaudia is [22], aki részletesen foglalkozott a naphőerőművekben használt hőszállító közegekkel is [23]. Cséfalvay Edit az általa kidolgozott, nemzetközileg is elismert etanol ekvivalens módszerrel [24] elemezte az bioüzemanyagok használatának lehetőségeit a fejlett országokban [25]. Az eredmények rávilágítottak arra, hogy a korlátozott termőterület miatt a fosszilis energiafelhasználásnak aligha egyhatodát lehetne kiváltani bioüzemanyagokkal.

A napelemes energiatermeléssel kapcsolatos kutatások a Gróf Gyula által témavezetett Mayer Martin doktori kutatásai során kezdődtek el a tanszéken. Ezek első érdemi eredménye egy napelemparkok tervezési paramétereinek gazdaságossági szempontokat célzó optimalizálására szolgáló eljárás kidolgozása volt [26], mely a tanszéken korábban már több kutatásban sikeresen használt metaheurisztikus optimalizáló algoritmusokon alapult [27]. Ezzel párhuzamosan Szilágyi Artúr doktorandusz beazonosította a napelemparkok életciklus alapú környezeti hatásait legnagyobb mértékben befolyásoló anyagokat és tényezőket, és felépített egy egyszerűsített modellt a környezeti hatások kielégítő pontosságú becslésére [28]. A napelemparkok műszaki és gazdasági modellezését így egy környezeti modellel is bővíteni tudtuk, és egy több célfüggvényű, genetikai algoritmuson alapuló optimalizáló eljárás segítségével felderítettük a leggyorsabb megtérülés és legkisebb környezetterhelés közti optimális kompromisszumot [29]. Hasonló módszertant alkalmazva egy napelemet, napkollektort, szélturbinát valamint hő- és villamosenergia-tárolót is tartalmazó háztartási szintű hibrid megújuló energia rendszerre is végeztünk környezeti-gazdasági optimalizálást [30]. Ennek eredményei rámutattak arra, hogy a vizsgált feltételek mellett még az északibb területeken is a napelemek alkalmazása a leggazdaságosabb technológia az energiaellátás környezeti hatásainak csökkentésére.

2018-ban Mayer Martin szervezésében elindult egy együttműködés az Országos Meteorológiai Szolgálat és az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék közt, amely többszörösen megújítva, egyre bővülő adattartalommal máig fennáll. Az ebből származó időjárás előrejelzési adatok lehetőséget adtak a napelemparkok termelésének rövid távú, néhány órától másnapig terjedő időhorizontú előrejelzésével kapcsolatos kutatásokhoz, ami a gyakorlatban is jelentősen támogatja a napelemparkok hálózati integrá-



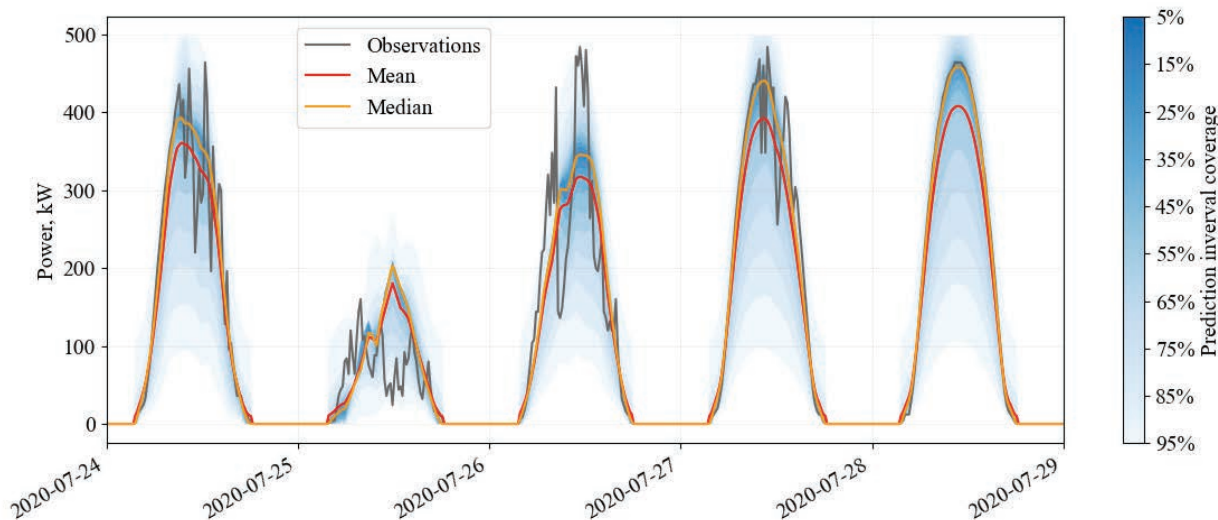
3. ábra. A kidolgozott fizikai napelempark modellsorok elvi vázlata [32]

cióját azok pontosabb menetrendezésén keresztül. Első lépésként a tervezési optimalizáláshoz is használt, fizikai működés leírásán alapuló napelempark modellsor segítségével készítettünk termelés előrejelzéseket [31]. A modellsor elnevezés arra utal, hogy a fizikai napelempark modellezés több egymás utáni lépésből áll a 3. ábra szerinti struktúrában. A számítás az egyes modellezési lépéseken belül nem egyértelmű, hanem a legtöbb modellezési lépésben több különböző modell is fellelhető a szakirodalomban. A vizsgálatok eredményei rámutattak arra, hogy a komponens modellek megválasztása jelentősen befolyásolja a napelemes energiatermelés előrejelzés hibáját, így a modellsorok optimalizálásával is javítható az előrejelzés pontossága [31].

A fizikai modellsoron alapuló napelemes energiatermelés előrejelzéssel szemben gyakori érv a szakirodalomban, hogy ezek a modellek a részletes napelempark tervezési adatok hiányában nem használhatók. A felvetés jogosságát megvizsgálva bemutattuk azt, hogy mindössze a napelemparkok névleges teljesítményének és a napelemek tájolásának és dőlésszögének ismerete is elegendő a jó pontosságú fizikai modellezéshez [33]. Varga Nóra hallgató bevonásával a napelemparkok árnyékolási veszteségeinek pontosabb megértése és leírása érdekében kidolgoztunk egy részletes árnyékolás szimulációt, ami párhuzamos tartószerkezeti sorok esetén a direkt és szórt sugárzás árnyékolását egyaránt figyelembe véve képes a napelemeket érő sugárzás helyfüggő meghatározására [34].

A napelemes energiatermelés előrejelzéssel kapcsolatos kutatások következő mérföldkövét a gépi tanulás használata jelentette a napelem teljesítmény időjárás függvényében történő modellezésére. Ennek részeként összehasonlítottunk 24 gépi tanulási modellt három különböző magyarázó változó készlet esetére, és ezek közül kiválasztottuk azt, amivel a legjobb termelés előrejelzési pontosság érhető el [35]. Következő lépésben a leghatékonyabb gépi tanulási módszer, a mesterséges neurális hálók és a fizikai modellsorok által készített előrejelzéseket hasonlítottuk össze, ami megmutatta, hogy egy kellően részletes és optimalizált fizikai modellsorral a gépi tanulás nem volt képes felvenni a versenyt. A legpontosabb előrejelzéseket végül a fizikai modellsorok és neurális hálók ötvöztetésével létrejött hibrid modellek adták [36].

Az előrejelzések készítésén túl azok verifikációs módszertanának fejlesztéséhez is sikerült hozzájárulnunk. Bemutattuk, hogy a leggyakrabban használt metrikák mint az átlagos abszolút hiba és a gyök átlagos négyzetes hiba értéke jelentősen függ az előrejelzés varianciájától, és egy bizonyos szint után az egyik típusú hiba csökkentését csak a másik növelésével lehet elérni [37]. A napelem modellsorok mélyebb elemzésével rájöttünk arra, hogy a napelemparkok előrejelzési hibáját jelentősen befolyásolják annak főbb tervezési paraméterei, különösen a dőlésszög és az inverter alulméretezése. Meredekebb szögben elhelyezett napelemek termelését csak nagyobb hibával lehet előrejelezni, ami pedig a jelentősebb kiegyenlítési költségek miatt a napelempark gazdaságossá-



4. ábra. Valószínűségi napelem teljesítmény előrejelzések [39]



gára is visszahat, így az optimális dőlésszög megválasztása során ezt a szempontot is érdemes lehet figyelembe venni [38].

A kutatások legújabb irányát a valószínűségi előrejelzések készítése jelenti, amelyek egy konkrét érték helyett egy valószínűségi eloszlást jelez előre. Ez lehetővé teszi az előrejelzésben rejlő bizonytalanság számszerűsítését, így jelentős többlet információt hordoz a determinisztikus előrejelzésekhez képest. Kidolgoztunk egy olyan új valószínűségi napelemes energiatermelés előrejelző eljárást, ami első lépésben több eltérő fizikai modellsor használatával meghatározza a várható termelés különböző értékeit, majd ezeket egy lineáris kvantilis regresszióval kalibrálva készít valószínűségi előrejelzést [40]. Ez a módszer determinisztikus időjárás előrejelzés alapján is képes valószínűségi termelés előrejelzést előállítani, de a pontossága tovább javítható akkor, ha az eljárást valószínűségi időjárás előrejelzésből kiindulva hajtjuk végre [39]. A valószínűségi szemléletet a rövid távú termelés előrejelzésen túl az országos szintű megújuló termelés modellezésére is kiterjesztettük. Ennek részeként egy olyan eljárást dolgoztunk ki, ami gépi tanulás és több évtized múltbeli időjárási adata alapján képes valószínűségi becslést adni az év különböző időszakában várható időjárásfüggő megújuló energiatermelésről [41].

A megújuló energia bázisú villamosenergia termelés teremt lehetőséget a szén-dioxid kibocsátás jelentős csökkentésére. Aqsa Rana PhD hallgatónk Gróf Gyula témavezetőjével a nap- és szélenergia bázisú villamosenergia termelés fejlődő országokban elérhető lehetőségeivel foglalkozik. Elemezte a dél-ázsiai térségben a megújuló energiaforrások jelenlegi helyzetét és a térség országainak lehetőségeit a szén-dioxid semleges villamosenergiatermelés megvalósítására. Pakisztán teljes villamosenergia rendszere ENERGY PLAN modelljének kidolgozásának segítségével megállapította, hogy az milyen mértékben és milyen költségekkel járó hosszútávú nap- és szélenergia kapacitások befogadására alkalmas különböző szcenáriók esetén [42]. A fejlődő országok számos távoli területén több tíz millió ember él villamosenergia nélkül. Az ilyen területekre a hálózat kiterjesztése a többnyire nem várható, de a megújuló forrásokra alapozott lokális hálózatoknak fontos szerepe van az itt lakók villamosenergiával való ellátásában. Az alapvető koncepciónk, hogy a megoldás a termelő-fogyasztókból (prosumer) és a csak fogyasztókból álló lokális hálózatok létrehozása együtt az új típusú elszámolási megoldások megvalósításával (peer to peer trade). A vizsgálatokhoz fogyasztói és termelői profilokat alkottunk és valós idejű szimulációs modelleket dolgoztunk ki TRNSYS rendszerben az új típusú elszámolási megoldások alkalmazásában rejlő lehetőségek feltárására.

## **Összefoglalás és jövőbeli tervek**

A megújuló energiaforrások az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken oktatási és kutatási tevékenységének egyaránt szerves részét képezik már annak megalakulása óta. Ebben a cikkben igyekeztünk egy részletes, bár a területi korlátok miatt így sem teljeskörű, áttekintést adni az elmúlt két évtized főbb fejlesztéseiről és eredményeiről mind a Megújuló energia laboratórium, mind pedig a témához kapcsolódó elméleti kutatások vonatkozásában.

A következő évek megújuló energetikához kapcsolódó tanszéki kutatásai várhatóan az elmúlt években kijelölt irányokat fogják követni, különös tekintettel a megújuló alapú energiatermelők optimalizálására és termelés előrejelzésére. Ezen túl az ipari trendekhez kapcsolódva az energiatárolás témaköre is egyre nagyobb súllyal jelenik majd meg a megújulókhöz kötődő kutatásokban, összhangban

a Megújuló energia laboratórium energiatárolást középpontba helyező fejlesztési terveihez. Mayer Martin 2022-ben elnyert „Napelem termelés előrejelző algoritmusok fejlesztése” című fiatal kutatói OTKA pályázatára alapozva a következő években egy megújuló energetikai kutatócsoport felállítását tervezzük, ami hozzájárulhat ahhoz, hogy az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék aktív, értékes és nemzetközileg elismert szereplője legyen a világszinten is egyre bővülő és fontosabbá váló megújuló energetikai kutatásoknak.

## **Irodalomjegyzék**

- [1] Molnárné-Dőry Z, Gróf G. Small scale, multi input, multi output renewable energy systems. 2013 4th Int. Youth Conf. Energy, IEEE; 2013, p. 1–6. doi:10.1109/IYCE.2013.6604203.
- [2] Sharafeldin MA, Gróf G. Evacuated tube solar collector performance using CeO<sub>2</sub>/water nanofluid. J Clean Prod 2018;185:347–56. doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.054.
- [3] Sharafeldin MA, Gróf G. Efficiency of evacuated tube solar collector using WO<sub>3</sub>/Water nanofluid. Renew Energy 2019;134:453–60. doi:10.1016/J.RENENE.2018.11.010.
- [4] Sharafeldin MA, Gróf G, Mahian O. Experimental study on the performance of a flat-plate collector using WO<sub>3</sub>/Water nanofluids. Energy 2017;141:2436–44. doi:10.1016/J.ENERGY.2017.11.068.
- [5] Sharafeldin MA, Gróf G. Experimental investigation of flat plate solar collector using CeO<sub>2</sub>-water nanofluid. Energy Convers Manag 2018;155:32–41. doi:10.1016/J.ENCONMAN.2017.10.070.
- [6] Hegedűs T, Molnárné-Dőry Z, Lőrinczi O. Automatic pyranometer shading for optimization of solar collector systems. 11th Int. Conf. Heat Engines Environ. Prot., 2013, p. 358:225-233.
- [7] Molnárné-Dőry Z, Dőry I. Designing and analysing renewable energy based hybrid energy system in remote laboratory and autonomous building. 13th Int. Conf. Heat Engines Environ. Prot., 2019, p. 206:73-81.
- [8] Imre L, Fábri L, Gémes L, Hecker G. Solar assisted drier for seeds. Dry Technol 1990;8:343–9. doi:10.1080/07373939008959887.
- [9] Imre L. Technical and economical evaluation of solar drying. Dry Technol 1986;4:503–12. doi:10.1080/07373938608916347.
- [10] Mahapatra AK, Imre L. Role of solar agricultural-drying in developing countries. Int J Ambient Energy 1990;11:205–10. doi:10.1080/01430750.1990.9675175.
- [11] Mahapatra AK, Imre L, Barcza J, Bitai A, Farkas I. Simulation of a directly irradiated solar dryer with integrated collector. Int J Ambient Energy 1994;15:195–204. doi:10.1080/01430750.1994.9675654.
- [12] Mahapatra AK, Imre L. Parameter sensitivity analysis of a directly irradiated solar dryer with integrated collector. Sol Energy 1997;59:227–31. doi:10.1016/S0038-092X(96)00161-2.
- [13] Imre L. Special issue on solar drying - Editorial. Dry Technol 1986;4:R5–6.
- [14] Imre L. Solar Drying. Handb. Ind. Dry., CRC Press; 1995, p. 373–451. doi:10.1201/9780429289774-12.
- [15] Farkas I, Pálffy M, Kaboldy E, Zöld A, Imre L, Bitai A, et al. Harmony with nature: ISES Solar World Congress, Budapest, 1993: proceedings. Hungarian Energy Society; 1993.
- [16] Imre L, Farkas I. Role of the Information Transfer in the Public Acceptance of the Renewable Energy Technologies. World Renew. Energy Congr. VI, Elsevier; 2000, p. 1481–6. doi:10.1016/B978-008043865-8/50307-X.

- [17] Imre L, Farkas I. Potentials of renewable energy resources in Hungary. *Proceeding ISES Sol. World Congr.* 2007, vol. 4, Springer, Berlin, Heidelberg; 2007, p. 2868–72. doi:10.1007/978-3-540-75997-3\_578/COVER.
- [18] Ősz J. A megújuló tüzelőanyagok hazai energetikai hasznosítása. *Magy Energ* 2005;37–42.
- [19] Domján S, Ősz J, Balogh A. Két magyar szélerőműpark villamosenergia-termelésének összehasonlítása. *Magy Energ* 2018;18–23.
- [20] Groniewsky A, Gács I. Megújuló energiaforrások támogatása. *Magy Energ* 2006;14:16–9.
- [21] Gács I. Naphőerőművek. *Magy Energ* 2012;19:8–12.
- [22] Gács I, Buzea K. Solar Thermal Power Plants. *Proc. 11th Int. Conf. Heat Engines Environ. Prot.*, 2013, p. 235–41.
- [23] Buzea K, Gróf G. Heat transfer fluids in concentrated solar power plants. *12th Int. Conf. Heat Engines Environ. Prot.*, Pécs, Hungary; 2015, p. 1–13.
- [24] Cséfalvay E, Akien GR, Qi L, Horváth IT. Definition and application of ethanol equivalent: Sustainability performance metrics for biomass conversion to carbon-based fuels and chemicals. *Catal Today* 2015;239:50–5. doi:10.1016/j.cattod.2014.02.006.
- [25] Cséfalvay E, Horváth IT. Sustainability Assessment of Renewable Energy in the United States, Canada, the European Union, China, and the Russian Federation. *ACS Sustain Chem Eng* 2018;6:8868–74. doi:10.1021/ACSSUSCHEMENG.8B01213/SUPPL\_FILE/SC8B01213\_SI\_001.PDF.
- [26] Mayer MJ, Gróf G. Techno-economic optimization of grid-connected, ground-mounted photovoltaic power plants by genetic algorithm based on a comprehensive mathematical model. *Sol Energy* 2020;202:210–26. doi:10.1016/j.solener.2020.03.109.
- [27] Balázs C, Gyula G, Axel G. Lágyszámítási módszerek alkalmazása az energetikában. *Energiagazdálkodás* 2011;52:2–5.
- [28] Szilágyi A, Gróf G. Estimating the environmental footprint of a grid-connected 20 MWp photovoltaic system. *Sol Energy* 2020;197:491–7. doi:10.1016/j.solener.2020.01.028.
- [29] Mayer MJ, Szilágyi A, Gróf G. Ecodesign of ground-mounted photovoltaic power plants: Economic and environmental multi-objective optimization. *J Clean Prod* 2021;278:123934. doi:10.1016/j.jclepro.2020.123934.
- [30] Mayer MJ, Szilágyi A, Gróf G. Environmental and economic multi-objective optimization of a household level hybrid renewable energy system by genetic algorithm. *Appl Energy* 2020;269:115058. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115058.
- [31] Mayer MJ, Gróf G. Extensive comparison of physical models for photovoltaic power forecasting. *Appl Energy* 2021;283:116239. doi:10.1016/j.apenergy.2020.116239.
- [32] Mayer MJ. Design optimization and power forecasting of photovoltaic power plants. *Budapest University of Technology and Economics*, 2020. doi:http://hdl.handle.net/10890/15112.
- [33] Mayer MJ. Influence of design data availability on the accuracy of physical photovoltaic power forecasts. *Sol Energy* 2021;227:532–40. doi:10.1016/j.solener.2021.09.044.
- [34] Varga N, Mayer MJ. Model-based analysis of shading losses in ground-mounted photovoltaic power plants. *Sol Energy* 2021;216:428–38. doi:10.1016/j.solener.2021.01.047.
- [35] Markovics D, Mayer MJ. Comparison of machine learning methods for photovoltaic power forecasting based on numerical weather prediction. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;161:112364. doi:10.1016/j.rser.2022.112364.
- [36] Mayer MJ. Benefits of physical and machine learning hybridization for photovoltaic power forecasting. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;168:112772. doi:10.1016/j.rser.2022.112772.
- [37] Mayer MJ, Yang D. Calibration of deterministic NWP forecasts and its impact on verification. *Int J Forecast* 2023;39:981–91. doi:10.1016/j.ijforecast.2022.03.008.
- [38] Mayer MJ. Impact of the tilt angle, inverter sizing factor and row spacing on the photovoltaic power forecast accuracy. *Appl Energy* 2022;323:119598. doi:10.1016/j.apenergy.2022.119598.
- [39] Mayer MJ, Yang D. Pairing ensemble numerical weather prediction with ensemble physical model chain for probabilistic photovoltaic power forecasting. *Renew Sustain Energy Rev* 2023;175:113171. doi:10.1016/j.rser.2023.113171.
- [40] Mayer MJ, Yang D. Probabilistic photovoltaic power forecasting using a calibrated ensemble of model chains. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;168:112821. doi:10.1016/j.rser.2022.112821.
- [41] Mayer MJ, Biró B, Szűcs B, Aszódi A. Probabilistic modeling of future electricity systems with high renewable energy penetration using machine learning. *Appl Energy* 2023;336:120801. doi:10.1016/j.apenergy.2023.120801.
- [42] Aqsa Rana, Gyula Gróf. Assessment of the Electricity System Transition towards High Share of Renewable Energy Sources in South Asian Countries, *Energies* (2022) 15 (3), doi:10.3390/en15031139





# Ipari projektek az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéken

**Sztankó Krisztián**

okl. gépészmérnök, sztanko@energia.bme.hu

**Lezsovits Ferenc**

okl. gépészmérnök, lezsovits@energia.bme.hu

**Groniewsky Axel**

okl. gépészmérnök, groniewsky@energia.bme.hu

**Az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék 2002-es alakulását követő időszak ipari relevanciájú munkáit mutatjuk be ebben az írásban. A szakértések és az ipari kutatási fejlesztési munkák mindegyike széles tématerületet foglal magába. Az eredmények ötvözik az elméleti felkészültséget, a kompetenciát és az ipari gyakorlat tapasztalatait.**

\*

In this article, we present the works of industrial relevance of the period following the establishment of the Department of Energy Engineering in 2002. The consultancies, industrial research, and development work cover various topics. The results combine theoretical preparedness and competence with experience in industrial practice.

\*\*\*

## A SOLANOVA projekt, 2003 – 2006

A nemzetközi és hazai együttműködés jó példája az EU és a hazai támogatással magyar, német és osztrák partnerekkel együttműködve megvalósított SOLANOVA projekt, egy panelépület felújítása energiatudatos, passzívház technikákkal.

A kutatási projekt célja volt, hogy egy demonstrációs épületen bebizonyítsuk, lehet olyan szuperhatékony energetikai felújítást végezni panelépületeken, amely, miközben jelentősen megnöveli a lakások fizikai, erkölcsi értékét, a benne lakók komfortérzetét és elégedettségét, ezzel párhuzamosan töredékére csökkenti a fenntartási költségeket. Célunk volt továbbá bebizonyítani az ilyen szintű felújítás versenyképességét és műszaki megvalósíthatóságát.

Hasonló energiahatékonysági szintű épületekre már számos példa volt, de ezek a családi ház- és kis társasház kategóriába estek. Németországi partnereink valósították meg Kasselen az első új építésű soklakásos passzív épületet. Felújítás kategóriában viszont a Solanova-épület volt az első soklakásos ilyen épület.

A felújításra egy dunajvárosi panelépületet választottunk ki, mely jól képviselte a magyarországi átlagot. A felújítás célja volt, hogy az épület éves fűtési energiafelhasználását 15 és 50 kWh/m<sup>2</sup> közé szorítsuk, ami az ultra-alacsony energiafogyasztású épületek jellemzője. Ezt az értéket vastag hőszigeteléssel, speciális hőszigetelő-, légtömör ablakok beépítésével, hővisszanyerős kiegyenlített szellőzés kialakításával, hatékony szabályozással értük el. A használati víz melegítését, valamint a fűtési energia egy részét napkollektorokkal oldottuk meg.

A demonstrációs épület felújítása egy átfogó kutatási program része volt. A kutatási projekt műszaki, gazdaságossági és szociológiai vizsgálatokból állt. Feladata volt az energetikailag, ökológiailag és gazdaságilag optimális műszaki megoldások megtalálása, ajánlások kidolgozása. Célja volt továbbá olyan ajánlások kidolgozása támogatási rendszerekre, melyek a speciális magyar tulajdonviszo-

nyokból eredő finanszírozási problémákat orvosolhatják. A kutatás részét képezték szociológiai vizsgálatok is, melyek a lakók megelégedettségét, elvárásait, preferenciáit tárták fel.

A projekt célkitűzéseit megvalósítottuk, eredményeiről a kutatási jelentések mellett magyar nyelven összefoglalót a 6. sz. publikációban tettünk közzé.



1. ábra. A mintaépület a felújítás előtt és után

A nemzetközi konzorcium tagjai voltak: a Kasseli Egyetem (Universität GhK Kassel), a BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszéke, és az Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszéke, a Dunaújvárosi Víz-Csatorna- és Hőszolgáltató Kft., Internorm Fenster AG (Ausztria), a Passivhaus Institut (Németország), Fiorentini Hungary Kft., Energiaközpont Kht., Innovatec (Németország) valamint Dunaújváros önkormányzatának Sziget Alapítványa.

Tanszéki résztvevők: Zsebik Albin, az egyik magyar témavezető, Balikó Sándor, Czinege Zoltán, Csata Zsolt, Falucskai Norbert, Gerda Zsolt, Oscar Menger és megbízási szerződés alapján további külső kollégák.

Publikációk: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7]

### ATEV zsírtüzelés 2002-2006

Az Állati-tetem Feldolgozó vállalat (ATEV) a kergemarha-kór okainak kiderülése után azzal szembesült, hogy a tetemek feldolgozása során keletkező állati zsírt nem használhatják fel a továbbiakban takarmánydúsításra, azt mint veszélyes hulladékot kell a továbbiakban kezelniük és meg kell semmisíteni. Kézenfekvő megoldásnak tűnt, hogy a folyamat fűtését ellátó gőz előállítására használják fel a keletkező hulladék zsírt. Ennek a feladatnak a megvalósításába vonták be a tanszékünket. A gőztermelő kazánokat eredendően fűtőolaj tüzeléssel fűtötték. Ezeket az égőket tettük alkalmassá a hulladék zsír eltüzelésére. Legelőször a Debrecen-Bánkon található telephelyükön folytattunk kísérleteket. Néhány tüzelőanyag ellátási technológiai probléma elhárítása után sikeres üzemeltetést produkáltunk, amely megkapta a működési engedélyt is. A továbbiakban a többi ATEV telephelyen is a kikísérletezett módszerrel megvalósították az átállítást és sikeresen hasznosították a hulladék zsírt.



2. ábra. Módosított égő és a láng képe a tüztérben

Tanszéki résztvevők: Könczöl Sándor és Lezsovits Ferenc  
Publikációk: [8], [9]

### SÁGA Foods 2006 – 2009

A SÁGA Foods Kft.-vel több éven keresztül volt szakértői szerződésünk, elég szerteágazó témákat illetően. A legelső a sárvári baromfifeldolgozó telephely energetikai átvilágítása és jobbitási javaslatok kidolgozása volt. Ezt követte a pulykanevelő ólak szellőzésének kísérleti vizsgálata, majd átalakítási javaslat készítése, amit a későbbiekben meg is valósítottak. Az átalakítás után sokkal egyenletesebb lett az ólak frisslevegő-elosztása és a pulykák jobban érezték magukat, ami miatt több tápanyagot vettek fel (többet ettek) és ezáltal növekedett a vágó súlyuk (jobban híztak). A legutolsó pedig egy a szennyezett sütőolaj forrasi viselkedését vizsgáló munka volt, egy sajnálatos halálos kimenetű üzemi baleset okainak tisztázása érdekében.

Tanszéki résztvevők: Könczöl Sándor, Kun Balog Attila, Sztankó Krisztián, Czél Balázs és Lezsovits Ferenc, Gróf Gyula

Publikációk: Szakértői jelentések születtek. Publikálásra a titoktartási kötelezettség miatt nem volt lehetőség.

### Zöldláng Biomassza gázosító vizsgálata 2009 – 2011

A Károly Róbert Egyetem fejlesztési pályázatát tervezett beadni egy Pilismaróti feltaláló által fejlesztett biomassza gázosítóra alapozva. A pályázat beadása előtt megbízták tanszékünket mint független szakértőt, hogy mérés alapján mondjunk véleményt a gázosító jelenlegi működéséről. A feltaláló üzemeltette a gázosítót különböző biomasszákkal, illetve biomassza és szennyvíziszap keverékével, amely üzemállapotokat a tanszékünk által fejlesztett mérőrendszer segítségével mértünk meg és értékeltünk ki. A vizsgálatban kulcs szerepe volt a tanszék mérőbuszájának is. A gázosítóról végül kiderült, hogy nem annyira jó, mint azt sokan állították, vagy várták. A mi mérőrendszerünk és a kidolgozott módszer a berendezés tömeg és energia mérlegének meghatározására viszont jól vizsgázott.

Tanszéki résztvevők: Bereczky Ákos, Gróf Gyula, Kovács Viktória, Könczöl Sándor, Laza Tamás, Bednarik József és Lezsovits Ferenc

Kapcsolódó publikációk: [10], [11], [12]



3. ábra. A vizsgált gázosító a vizsgálorendszerünkkel összeépítve

### BOILEFF 2007-2009 Raising the efficiency of boiler installations EU-s pályázat – Energiahatékonyság javítása a kazánok beépítésének optimalizálásával

A BOILEFF az Európai Unió által is támogatott pályázat volt, amelynek koordinátora az Austrian Energy Agency (Ausztria) volt, és további 4 EU-s partner, - Wuppertal Institut (Németország), University of Rovira i Virgili (Spanyolország), Regulatory Authority for Energy



(Görögország), részvételével zajlott. A projekt célja volt az új kazánok beépítési körülményeinek javítása, hogy azok elérjék a lehetőség szerinti legmagasabb minőséget és teljesítményhatékony-ságot. Amíg a kazánok a jelenlegi technológiai szintnek megfelelő maximumot tudják nyújtani, addig a beépítési körülmények javítása sok esetben további lehetőséget ad a hatékonyság további javítására. A célok elérésének két fő továbbképzésen alapuló stratégiája volt. Ezzel a módszerrel hozható ki a legtöbb a kazánból és a fűtési rendszerből. Elérhető eredmények: jó minőségű beépítés, magasabb komfort, kisebb tüzelőanyag fogyasztás, költségmegtakarítás, és a károsanyag emissziójának csökkenése.

Tanszéki résztvevő: Lezsovits Ferenc

Publikációk: [13], [14]

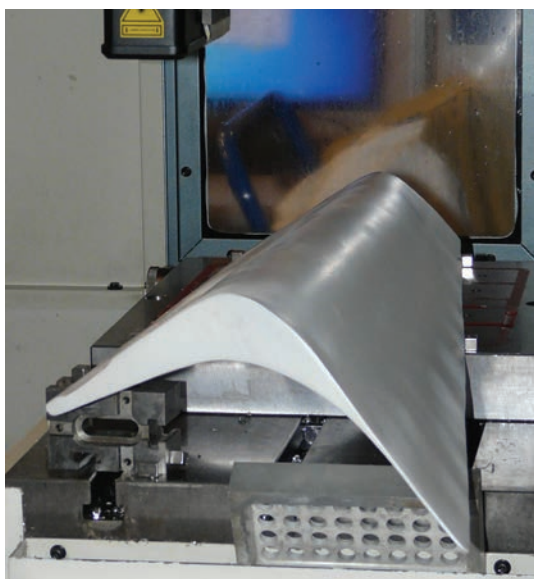
### Gőzturbinás szakértések 2012–2018

Az ISD Power Kft. a Dunaújvárosi Vasmű részeként a kohógáz felhasználásával előállított gőzből termel villamos áramot és szabályozott nyomásszinteken technológiai gőzt és melegvizet ad ki. A turbina parkjában megtalálhatók a kondenzációs és elvételes ellennyomású turbinák is. Több éven keresztül több különböző munka keretében, vizsgáltuk a 21 MW-os gép meghibásodásainak okait. A munka keretében teljes turbina forgórész modellezését és revers engineering-jét elvégeztük. Elkészítettük a forgórész végeselemes rezgéstechikai modelljét, több üzemállapotban is vizsgáltuk mérési és szimulációs úton is csatolt hőtechnikai és rezgéstani jelenségeket. Feltártuk a 20 MW-os elvételes ellennyomású turbina meghibásodásának okait és javítási technológiát dolgoztunk ki a biztonságos helyreállításra. Csonkhűtőt terveztünk a kondenzációs gép indítási melegedési problémáinak kezelésére.

Az atomerőművi gőzturbinák uolsó fokozataiban expandáló gőz jelentős víztartalmú, ami a lapátok erózióját okozza. A Paksi Atomerőmű gőzturbináinak utolsó fokozatában lejátszódó expanzíós folyamat pontosabb megismeréséhez szükség volt az utolsó fokozati turbinalapátok (álló és forgó) 3D modelljére. A turbinalapátokról poliészter mintát vettünk, majd a negatív minták alapján készült 1:1 méretarányú lapátok szkennelésével állítottuk elő azok 3D reprezentációját.

Tanszéki résztvevők: Czinkóczy Botond, Sztankó Krisztián, Józsa Viktor és Gróf Gyula

Publikációk: [15]



4. ábra. Gőzturbina lapát modell szkennelése

### TECLEENERGY 2014 – 2015

Tanszékünk részt vett a TECLENERGY LLP-Leonardo da Vinci, Innovációs Transzfer Pályázatban amely képzési modulokat fejleszt főként a török energia szektorban érdekelt számára – magában foglalva technológiai és jogi kérdéseket is – a következő résztvevőkkel: Renewable Energy from the Ministry of Energy (Törökország), Gazi University Law Department (Törökország) OSTİM – Organized Industrial Zone (Törökország), Centre of Renewable Energy Sources and Saving – CRES (Görögország) University of Oradea, Department of Energy Engineering (Románia), Szenzor Hungaria Kft. (Magyarország) A TECLENERGY pályázat célja volt, hogy segítse az energia hatékonysági és megújuló energia technológiák elterjesztését Törökországban. Ezek a témák nagyon népszerűek világszerte. Törökország szintén vonzza a befektetőket ezen a területen is, de a török piac és körülmények különböznek mind az Európaitól, mind más régiókéktől. Többek között emiatt Törökországban az ilyen irányú fejlesztések elmaradnak az Európai Unióban, valamint más fejlett régiókban tapasztalható fejlődésektől. Továbbá az energia szektorban rendszeresen jelennek meg új innovációs megoldások. Az érdekelteknek ismerniük kell az elérhető technológiákat és az alkalmazásuk előnyeit-hátrányait és feltételeit.

A TECLENERGY pályázat keretében létrehozott oktatási modulok ahhoz nyújtanak segítséget, hogy az érdekeltek megismerjék ezen új technológiák törökországi alkalmazásának műszaki, pénzügyi és jogi feltételeit. A projekt egy 2006-ban sikerrel zárult korábbi EU-s LLP projekten alapul, amely FIP-TREET név alatt futott. Első lépésként az utóbbi évtizedben létrejött fejlődés és a török piac specialitásainak felmérése történt, majd ezek alapján kerültek kiegészítésre a korábbi anyagok. Az oktatási anyagok első lépésben angol nyelven, majd törökre fordítva kerültek elkészítésre. A pályázat az elkészült anyagok felhasználásával szervezett oktatások szervezésével végződött.

Tanszéki résztvevők: Buzea Klaudia, Dénes Ferenc és Lezsovits Ferenc

Publikációk: [16]

### Gazdaságos teherelosztási modell készítése Pannon Hőerőműre 2015-2017

Pannon Hőerőmű Magyarország legnagyobb biomassza tüzelésű fűtőerőműveként kereste meg Tanszékünket optimális teherelosztási modell készítése céljából. Az erőműben a gőzt két nagy teljesítményű biomassza tüzelésű, egy energetikai feketeszénnel üzemelő, valamint két földgáz vagy fűtőolaj tüzelésű kazán szolgáltatta, amivel egy elvételes kondenzációs gőzturbinát, egy ellennyomású gőzturbinát, valamint egy kettős megcsapolásos kondenzációs gőzturbinát szolgáltattak ki. Mivel a rendszernek része volt egy nagynyomású és egy közepes nyomású gyűjtőcső, ezért az elvi lehetősége megvolt, hogy valamennyi kazán gőzt termeljen bármely turbinára és ezek a turbinák közvetlen vagy közvetett módon, de gözzel lássák el a négy fűtőkör egyikét. A kezdeti erőforrásallokációs feladat egy üzemviteli stratégiát támogató döntéselőlkészítő rendszerré nőtte ki magát. Így az általunk kifejlesztett rendszer nem csak klasszikus terheléelosztást végzett, de üzemviteli-stratégiai kérdésekben is tett javaslatot. Egyrészt az algoritmus nem csak az éppen üzemben lévő berendezések állapotát vizsgálta, de valamennyi berendezés kombinációját (üzemi konfigurációját) elemezte; másrészt az adott körülmények között lehetséges (elérhető) konfigurációkon belül meghatározta az adott feltételek mellett legnagyobb hasznot (P1 fedezetet) eredményező erőforrásallokációs helyzetet, azaz üzemi beállításokat.

Tanszéki résztvevők: Bihari Péter és Groniewsky Axel

A munka egy szoftver, valamint egy szakértői jelentés leadásával zárult. Titoktartási kötelezettség miatt publikáció nem született.



5. ábra. Pannon Hőerőmű látképe  
Forrás: <https://www.veolia.hu/>

### Oroszlányi erőmű átalakítása SRF tüzelésre 2015

Az azóta már leállított Oroszlányi Hőerőmű kazánjainak átalakítási, illetve átállási lehetőségeit vizsgáltuk háztartási hulladék előfeldolgozásával előállított SRF eltüzelésére. Tanszékünk a munkát ipari szakértői megbízás keretében végezte az Erőműberuházási Vállalat (ERBE) megbízásából.

Tanszéki résztvevők: Gróf Gyula, Könczöl Sándor, Kun Balog Attila és Lezsovits Ferenc

A munka szakértői jelentés leadásával zárult. Titoktartási kötelezettség miatt publikáció nem született.

### FGSZ 2015-2017

A FöldGáz Szolgáltató Zrt. (FGSZ) számos a földgáz vezetékes szállításhoz szükséges kompresszor állomást üzemeltet, amelyek jelentős energiafogyasztással rendelkeznek. Tanszékünk szakértőcsoportjának feladata volt egy kiválasztott mosonmagyaróvári telephelyen az energiafogyasztás és a megtakarítási lehetőségek felmérése és egy megvalósíthatósági tanulmány keretében megtervezést eredményező javaslatok kidolgozása.

Tanszéki résztvevők: Gróf Gyula, Könczöl Sándor, Sztankó Krisztián, Groniewsky Axel és Lezsovits Ferenc

Publikációk: Szakértői jelentések születtek. Publikálásra a titoktartási kötelezettség miatt nem volt lehetőség.

### Polgári gumihulladék égető mű helyreállítás szakértése 2018

A Polgári gumihulladék égető műben sajnálatos tüzeset után vita alakult ki a tulajdonos-üzemeltető és a biztosító társaság között. Tanszékünk szakértői csoportjának feladata volt a reprodukciós költségek elfogadható szintjének független kalkulációja a baleset bekövetkezésének időpontjában érvényes árszinten. Jelentésünket mindkét fél elfogadta, és peren kívüli egyezség formájában ez alapján rendezték a vitás helyzetet.

Tanszéki résztvevők: Korényi Zoltán, Laza Tamás és Lezsovits Ferenc

Publikációk: Szakértői jelentések születtek. Publikálásra a titoktartási kötelezettség miatt nem volt lehetőség.

### Modell alapú szalámiérlelési program kidolgozása, tesztelése a PICK Szeged Zrt.-nél (2018-2021)

A Pick Szeged Zrt. felkérésére a Tanszék kutatói a vállalat szakembereivel közösen egy minőséget és energiahatékonyságot javító szalámiérlelő technológiát dolgoztak ki. Az új műszaki megoldás keretein belül a szalámimestern egy algoritmus segíti az érlelés folyamatának megtervezésében és nyomon követésében. A modell segítségével létrehozott program egy felújított, automatizált kamrában kerül végrehajtásra.

A tanszék kutatói elkészítették a szalámi termodinamikai modelljét, amely alapját képezte a modell alapú érlelési program tervező algoritmusának. A szalámimodell egy megadott hőmérséklet és páratartalom adatsorral számolva átlagosan 1%-os pontossággal becsüli a kamrában érlelt termékek tömegfogyását a 90 napos időintervallumra lehetővé téve a modell alapú folyamatvezérlést.

Az első érlelési ciklusban, amely 2021. október 14-én indult, a BME kutatói által kidolgozott eljárással az értékcsökkent termékek számának jelentős mértékű csökkenése mellett az energiafelhasználás 19%-kal mérséklődött, ami megfelelő modellbeállítások és finomhangolások mellett tovább csökkenthető.

Tanszéki résztvevők: Imre Attila, Groniewsky Axel, Sztankó Krisztián, Fülöp Tamás, Környei Tamás, Kovács Róbert, Gyenis Ákos, Könczöl Sándor, Kun Balog Attila és Csemány Dávid

Publikációk: [17], [18]

### Füstgenerátor kutatás-fejlesztése a PICK Szeged Zrt.-nél (2018-2021).

A tanszék kutatói vizsgálták a szalámi hagyományos füstölési eljárását. Új vizsgálati módszer kidolgozásával segítették a füst komponenseinek szalámira gyakorolt hatásainak elemzését. Többféle füstölési eljárási módot is megvizsgálva létrehoztunk egy egységes elemzési és értékelési módszert, ami segít a további eljárások kifejlesztésében.

Tanszéki résztvevők: Cséfalvay Edit, Sztankó Krisztián, Laza Tamás, Könczöl Sándor, Kun Balog Attila és Gyenis Ákos

Publikációk: Szakértői jelentések születtek. Publikálásra a titoktartási kötelezettség miatt nem volt lehetőség.

### Bivalens kompresszoros hőszivattyús rendszer hideg és meleg tárolásának kidolgozása a PICK Szeged Zrt.-nél (2018-2021)

A pályázat keretében PICK Szeged Szalámigyár és Húsüzem zártkörűen működő Részvénytársaság megbízta a tanszéket a „A bivalens kompresszoros hőszivattyús rendszer hideg- és meleg tárolással” című téma átfogó vizsgálatával. A vizsgálatok célja olyan hőtárolós rendszer kidolgozása volt, amely optimális üzemviteli stratégia mellett, differenciált fajlagos villamosenergia-árakra alapozva, adott igények, korlátozó és kényszerfeltételek esetén lehet képes – az energiafogyasztói igények időbeni eltolásával – a termelés során felhasznált fajlagos villamosenergia-ár csökkentésére, alacsonyabb üzemeltetési költségek elérésére.

Tanszéki résztvevők: Imre Attila, Sztankó Krisztián, Groniewsky Axel, Könczöl Sándor, Kun Balog Attila és Gyenis Ákos

Publikációk: Szakértői jelentések és tesztüzemi berendezés született. Publikálásra a titoktartási kötelezettség miatt nem volt lehetőség.

### TLC (2019-2020)

A TLC Kft. a német Sennebogen cégcsoport oszlopos tagjaként darukat és egyéb anyagmozgató rendszereket gyárt Magyarorszá-



gon. A termelés bővítésére a jelenlegi Balatonfüredi telephelyen már nem volt lehetőség, ezért Liténen egy új gyártelep létrehozásának megvalósításába kezdtek zöldmezős beruházásként. Szerették volna, ha a telephely energia ellátása a 21. századi korszerűségnek megfelelően energiahatékony, környezetkímélő módon, a lehető legnagyobb mértékben megújuló energiaforrások felhasználására támaszkodva valósul meg. Emiatt kérték fel tanszékünket egy megvalósíthatósági tanulmány elkészítésére.

Tanszéki résztvevők: Imre Attila, Mayer Martin és Lezsovits Ferenc

Publikációk: Szakértői jelentések születtek. Publikálásra a titoktartási kötelezettség miatt nem volt lehetőség.

## FŐTÁV (2020)

Magyarországon és ezen belül Budapesten is tucat számban üzemelnek még az 1970-1980-as években telepített orosz gyártmányú PTVM-50 típusú vízcsöves forróvíz kazánok. Sok helyen a kapcsolt energiatermelés mellett már csak tartalék funkciót látnak el, vagy csúcsigények kiszolgálására használják őket. Ezzel együtt az ellátásbiztonság fenntartásában fontos szerepük van továbbra is. A szigorodó környezetvédelmi emissziós előírások betartása csak felújítások útján valósítható meg. Ebben az időszakban az NOx emissziós normák szigorodása miatt kellett beavatkozni, amelyre többféle alternatíva is lehetségesnek látszott, tüzelőberendezés cserék különböző formáitól a teljes kazánok cseréjével bezárólag. Tanszékünk szakértői csoportjának feladata volt a különböző alternatívák műszaki, üzemeltetési, környezetvédelmi és pénzügyi szempontok szerinti összehasonlítása, prioritási sorrend kialakítása és mint döntés előkészítési tanulmányt a FŐTÁV menedzsmentje elé terjesztése.

Tanszéki résztvevők: Kun Balog Attila, Szűcs Botond és Lezsovits Ferenc

Publikációk: Szakértői jelentések születtek. Publikálásra a titoktartási kötelezettség miatt nem volt lehetőség.

## Nanofolyadékok alkalmazásának kutatása (2017–2023)

A kutatási terület nagyon népszerű manapság, amely a nano méretűre aprított különböző anyagok folyadékokba bekeverésének hatásaival foglalkozik, különös tekintettel a folyadékok megváltozott hőtani tulajdonságaira és az elérhető hőátadási tényezőkre különböző esetekben.

Mohammed Saad Kamel doktorandusz a nanoanyagok vízbe ( $H_2O$ ) keverésével vizsgálta a nanofolyadék forrását és hőátadási tényező alakulását. Otabeh Ibrahim Al Oran PhD hallgató pedig különböző nanoanyagokat kevert termoolajokba és koncentrátoros napkollektorban vizsgálta ezek viselkedését és a kollektor üzemére, valamint hatékonyságára gyakorolt hatásait.

Cséfalvy Edit kidolgozott egy nanorészecske koncentrátor, egyben tisztavíz visszanyerő rendszert, amellyel a már alkalmazásban nem lévő nanofolyadékok mennyisége csökkenthető és tárolásuk könnyebben megoldható.

Tanszéki résztvevők: Mohammed Saad Kamel, Otabeh Ibrahim Al Oran, Gróf Gyula és Lezsovits Ferenc

Publikációk: [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]

## Összefoglalás

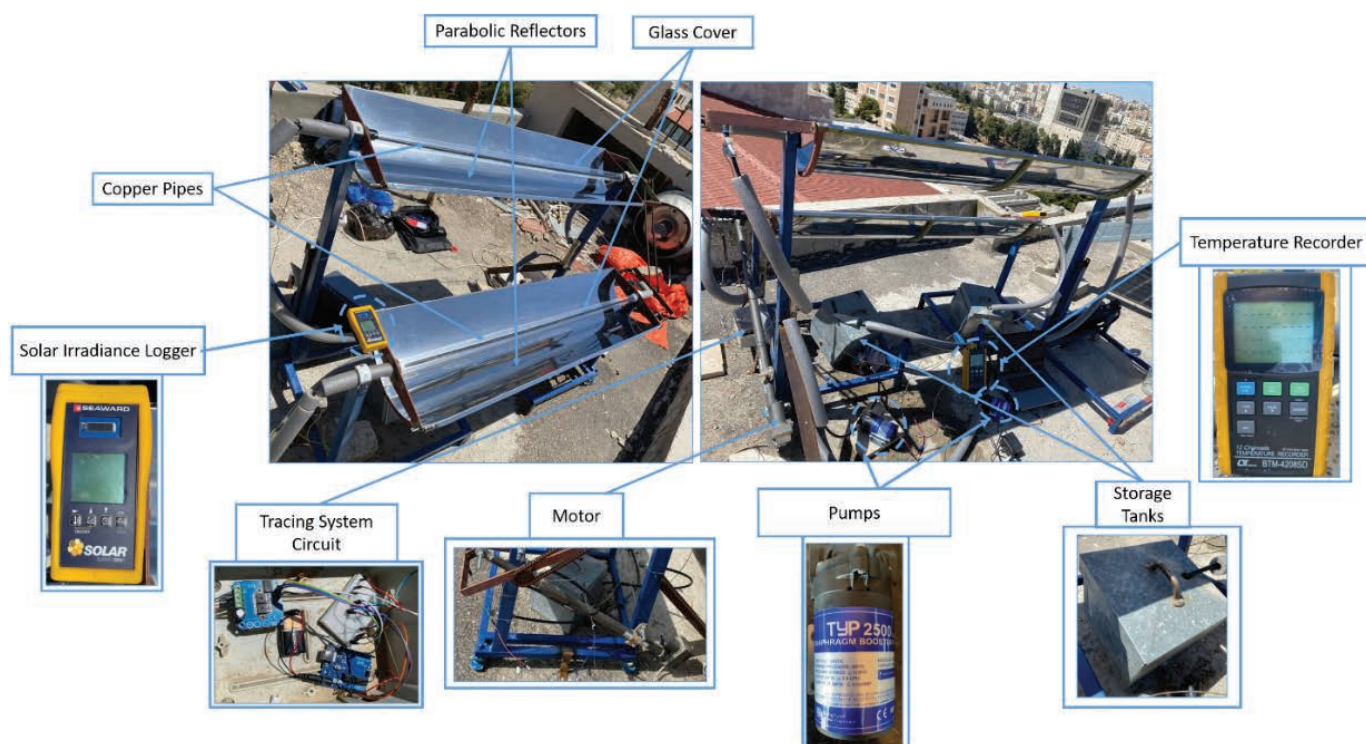
A tanszéken felhalmozódó elméleti tudás iparban történő megjelenése mindig fontos szerepet töltött be a tanszék életében. A sikeresen elvégzett munkák több szinten is erősítették a különböző cégekkel fennálló kapcsolatainkat és további munkákat eredményeztek. Ezen ipari eredmények oktatásba áttükrözött tudása növelte hallgatóinknál az elmélet és gyakorlat közti kapcsolat megértését, ezzel emelve az oktatás színvonalát.

## Irodalomjegyzék

- [1] Klímaváltás – Energiatudatosság – Energhatékonyaság konferencia (Visegrád, 2005. június 8-10.) SOLANOVA kötetében nyomtatásban lettek közzétéve a projekt egyes szakterü-



6. ábra. A PTVM-50 kazán eredeti oldalégős kialakítása és a legelönyösebb fenékégős kialakításra történő átalakítás fotója



7. ábra. A koncentrátoros kollektoros mérőrendszer fotója

letei elemzéseinek eredményeit ismertető, a tanszéki és a projekten dolgozó kollégák által tartott előadások, többek között a következők:

- a) R. Pluger: A dinamikus szimuláció és szerkezeti elemek fontossága
  - b) Csoknyai T.: SOLANOVA szoftver bemutató: PHPP és más szimulációs eszközök
  - c) Csoknyai I.: Fokozott hőszigetelésű épületek fűtési kérdései
  - d) Osztrólsky M.: Épületszerkezeti részletek – a zöldtető a hőkomfort növelésének eszköze
  - e) Száday E., Goda R.A légáramlás szimulációs eredményeinek bemutatása
  - f) J. Otte: Központi, vagy egyedi szellőzés? Légfűtés, vagy hagyományos?
  - g) Zsebik A., O.Menger: Hőfoklépcső és hőleadó felület optimalizálása alacsony energiaigényű épületben
  - h) O. Menger: A HMV termelésre szolgáló szolár rendszerek elemzésének eredménye
  - i) Kaboldy E. Varga P.: A napenergia hasznosítása épületek felújításában
  - j) Zsebik A., Czinege Z.: A napenergia hasznosítása fűtésre és hűtésre
  - k) Sztrancsik Cs. A SOLANOVA monitoring rendszer
  - l) J. Sievers: A felújítások életciklus elemzése
  - m) A. Hermelink: Ne feledkezzünk meg a lakókról – a felmérések meglepő eredményei
  - n) A. Hermelink: Apró változtatások – nagy hatások: a beruházási költségek, az energiafogyasztás, túlfűtés és az ökológiai károk lényeges csökkentése
- [2] Zsebik A. – Menger, O. – Csoknyai I.: Optimisation of temperature difference and radiator surface for low energy buildings. Proceedings of the Third Conference on Mechanical Engineering, ISBN 963 214 7480, BME Budapest 2004. május 27 – 28, Volum 1. pp. 251-255. old
- [3] Zsebik A. – Pikóné P. I.: Soklakásos panelépület és a kapcsolódó hőszolgáltató rendszer napenergiával segített klímatudatos felújítása - SOLANOVA projekt – 02. A 17. Távhő Konferencia dolgozata, Siófok-Balatonszéplak, 2004. május 5 - 7.
- [4] Zsebik A.: A SOLANOVA project - Soklakásos panelépület és a kapcsolódó hőszolgáltató rendszer napenergiával segített klímatudatos felújítása. "Vykurovanie 2005" konferencia
- [5] Zsebik A.: Efficient modernisation of a panel building (we decreased the energy consumption to one forth). 2007 World Energy Engineering Congress dolgozata, Atlanta, 2007. augusztus 15-17.
- [6] Zsebik A., Csata Zs.: Negyedére csökkentettük az energiafelhasználást – a SOLANOVA project. Energiagazdálkodás, ISSN 0021-0757, 51. évfolyam, 2010. 1.szám, 17-27. old.
- [7] Zsebik A.: A halogatásnak ára van, Energiagazdálkodás, ISSN 0021-0757, 63. évf. 2022. 5-6. szám, 20-31.o.
- [8] Lezsovits, F.; Könczöl, S.; Sagát, L.: Animal-Fat Firing Investigation And Realization In Industrial Steam Generators, In: 16th European Biomass Conference and Exhibition : From Research to Industry and Markets Valencia, Spanyolország (2008) Paper: OB1\_2 , 8 p.
- [9] Lezsovits, Ferenc; Könczöl, Sándor: Animal-fat investigation and combustion test JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY 107 : 1 pp. 271-278. , 8 p. (2012)
- [10] Lezsovits, Ferenc; Könczöl, Sándor: Investigation and Evaluation of a Biomass Gasifier In: The role of renewables in energy generation: 10th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection Budapest, Magyarország: Budapest University of Technology and Economics, Department of Energy Engineering (2011) 239 p. pp. 143-148., 6 p.
- [11] Varhegyi, G; Sebestyén, Z ; Czegeny, Z ; Lezsovits, F ; Konczol, S: Combustion Kinetics of Biomass Materials in the Kinetic



- Regime ENERGY AND FUELS 26 : 2 pp. 1323-1335. , 13 p. (2012)
- [12] Sebestyen, Z; Lezsovits, F; Jakab, Emma; Varhegyi, G Correlation between heating values and thermogravimetric data of sewage sludge, herbaceous crops and wood samples JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY 110 : 3 pp. 1501-1509. , 9 p. (2012)
- [13] Lezsovits, Ferenc; Günter, Simader; Claus, Barthel; Nuria, Quince; Marianna, Stamatiadou Raising the Efficiency of Boiler InstallationsIn: Budapest University of Technology and Economics, Department of Energy Engineering 9th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection Budapest, Magyarország : Budapest University of Technology and Economics, Department of Energy Engineering (2009) 254 p. pp. 113-118., 6 p.
- [14] R Simader, Guenter; Trnka Austrian, Georg; Barthel, Claus; Wohlauf, Gerhard; Lezsovits, Ferenc; Coronas, Alberto; Carles Bruno, Joan; Puig-Arnavat, Maria; Quince, Núria Raising the efficiency of boiler installations (BOILeff) In: ECEEE 2009 Summer Study: Act! Innovate! Deliver! (2009) pp. 751-756., 6 p.
- [15] Sztankó, Krisztián; Józsa, Viktor: Steam turbine as an electrical discharge machine Proceedings of the 12th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection Budapest, Magyarország : Budapest University of Technology and Economics, Department of Energy Engineering, (2015) pp. 21-26. , 6 p.
- [16] Lezsovits, F; Dénes, F; Giakoumelos, E; Malamatenios, Ch Chapter 02: Renewabla Energy Training Module In: Yelcin, Canatan E; Giakoumelos, E (szerk.) TECLENERGY : Educational Modules' Development for Technical and Legal Issues in Energy Sector Technologies Ankara, Törökország : Energy Law Research Institute (2015) 282 p. pp. 91-202. , 112 p.
- [17][https://hvg.hu/tudomany/20220917\\_Fejlesztett\\_egy\\_algoritmust\\_a\\_Muegyetem\\_segit\\_megerlelni\\_a\\_szalamikat](https://hvg.hu/tudomany/20220917_Fejlesztett_egy_algoritmust_a_Muegyetem_segit_megerlelni_a_szalamikat)
- [18] <https://www.agrarszektor.hu/fenntarthatosag/20220918/elkepeszto-ki-nem-talalnad-hogyan-keszitettek-szalamit-a-magyar-kutatok-40614>
- [19] Al-Oran, O. ; A'saf, A. ; Lezsovits, F. : Experimental and modeling investigation on the effect of inserting ceria-based distilled water nanofluid on the thermal performance of parabolic trough collectors at the weather conditions of Amman: A case study ENERGY REPORTS 8 pp. 4155-4169. , 15 p. (2022) DOI WoS Scopus
- [20] Al-Oran, O.; Lezsovits, F.: Experimental Study of Thermal Conductivity and Viscosity of Water-Based MWCNT-Y2O3 Hybrid Nanofluid with Surfactant JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS 31 : 1 pp. 98-110. , 13 p. (2022)
- [21] Al-Oran, Otabeh; Lezsovits, Ferenc: Thermal Performance of Inserting Hybrid Nanofluid in Parabolic Trough Collector POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCES 16 : 3 pp. 88-93. , 6 p. (2021)
- [22] Al-Oran, Otabeh ; Lezsovits, Ferenc: A Hybrid Nanofluid of Alumina and Tungsten Oxide for Performance Enhancement of a Parabolic Trough Collector under the Weather Conditions of BudapestAPPLIED SCIENCES-BASEL 11 : 11 Paper: 4946, 21 p. (2021)
- [23] Kamel, Mohammed Saad; Lezsovits, Ferenc; Abdollahi, Ali; Izadi, Mohsen: Amelioration of pool boiling thermal performance in case of using a new hybrid nanofluidCASE STUDIES IN THERMAL ENGINEERING 24 Paper: 100872 , 17 p. (2021)
- [24] Kamel, Mohammed Saad; Al-Oran, Otabeh; Lezsovits, Ferenc: Thermal Conductivity of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CeO<sub>2</sub> Nanoparticles and Their Hybrid Based Water Nanofluids: An Experimental Study PERIODICA POLYTECHNICA-CHEMICAL ENGINEERING 65 : 1 pp. 50-60. , 11 p. (2021)
- [25] Al-Oran, Otabeh ; Lezsovits, Ferenc: Enhance thermal efficiency of parabolic trough collector using Tungsten oxide/Syltherm 800 nanofluid POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCES 15 : 2 pp. 187-198., 12 p. (2020)
- [26] Al-Oran, Otabeh; Lezsovits, Ferenc; Aljawabrah, Ayham: Exergy and energy amelioration for parabolic trough collector using mono and hybrid nanofluids JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY 140 : 3 pp. 1579-1596. , 18 p. (2020)
- [27] Kamel, Mohammed Saad; Lezsovits, Ferenc: Experimental Study on Pool Boiling Heat Transfer Performance of Magnesium Oxide Nanoparticles Based Water Nanofluid, POLLACK PERIODICA: AN INTERNATIONAL JOURNAL FOR ENGINEERING AND INFORMATION SCIENCES 15: 3 pp. 101-112., 12 p. (2020)
- [28] Kamel, Mohammed Saad; Lezsovits, Ferenc: Predicting of Pool Boiling Heat Transfer From a Horizontal Heated Tube Using Two Fluids Multiphase Model JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH IN FLUID MECHANICS AND THERMAL SCIENCES 71: 2 pp. 38-55., 18 p. (2020)
- [29] Kamel, Mohammed Saad; Lezsovits, Ferenc: Experimental Investigation on Pool Boiling Heat Transfer Performance Using Tungsten Oxide WO<sub>3</sub> Nanomaterial-Based Water Nanofluids MATERIALS 13 : 8 Paper: 1922, 17 p. (2020)
- [30] Kamel, Mohammed Saad; Lezsovits, Ferenc: Enhancement of pool boiling heat transfer performance using dilute cerium oxide/water nanofluid: An experimental investigation INTERNATIONAL COMMUNICATIONS IN HEAT AND MASS TRANSFER 114 Paper: 104587, 13 p. (2020)



8. ábra. A tanszéki mérőátó és a beépített mérőrendszer

# Két smaragdfa története

**Zsebik Albin**

okl. gépészmérnök, zsebik@energia.bme.hu

**Az Energetikai Gépek és Rendszerek tanszék Jendrassik György Laboratóriuma melletti kertben kettő Smaragdfa növekedik immár tíz éve. Ebben a cikkben a két fa történetéről számol be a szerző.**

\*

**In the garden next to the Laboratory of György Jendrassik of the Department of Energy Engineering, two Emerald Trees have been growing for ten years. In this article the author gives an account of the history of the two trees.**

\*\*\*

A Paulownia tomentosa / Nagylevelű császárfa 10-20 méteres, széles koronájú fa, hatalmas szív alakú levelekkel. Erős, könnyű faanyagáért és szép viráguk miatt Kínában már 3000 éve ültetik, valamint kérgéből, leveleiből, és virágából gyógyszer is készül. Liláskék illatos virágai a lombfakadás előtt áprilisban kúpos bugákban nyílnak. Termése egy száraz, barna kapszula négy rekesszel, amelyben több ezer apró mag található.

8-10 éves kora körül kezd virágozni. Virágzáskor feltűnően szép, kedvelt szoliter fa. A kínai hagyományban a szülők ültettek

egy császárfát, amikor lányuk megszületett. Amikor a lány elérte a házasulandó kort, akkor kivágták a fát és abból hozomány gyanánt különféle háztartási eszközöket faragtak. Ez a hagyomány is jelzi a fa igen gyors növekedési ütemét<sup>1</sup>.

A 2013. évi Klímaváltozás – Energiatudatosság – Energiahatékonyság – KLENEN '13 konferencia Biomassza termelés, beszerzés és hasznosítás szekciójának első előadását Dr. Steier József tartotta. Előadásának címe „Smaragdfa® – A zöld jövő?” volt. Előadásában beszámolt arról, miként adaptálták a hazai viszonyokra a kínai császárfa két alfaját és hozták létre Magyarországon a Smaragdfát, majd ismertette jellemzőit. Többek között az évi 2-3 méteres növekedést, a telepítést követő 6-8. év utáni vágásérettiséget, hogy ekkor törzse bútorfaként, ágai tüzelőként hasznosíthatók. Gyökerei feldolgozzák a talajban levő szennyezőanyagot, lombzata elnyeli a levegőben levő széndioxidot.

## A fák fejlődése

A konferencia idején sokat foglalkoztunk a különböző fajták ener-

<sup>1</sup> <https://www.proffaiskola.hu/noveny katalogus/diszfak/paulownia-tomentosa-nagylevel%C5%B1-cs%C3%A1sz%C3%A1rfa->



**Dr. Steier József**  
agrárszakmérnök, klímakutató



**Dr. Gróf Gyula**  
tanszékvezető



**Pintácsi Dániel**  
a Szakkollégium elnöke

a fák ültetésénél, 2013. 05.24.



getikai hasznosításával, az energiaültetvényekkel. Az előadás alapján a smaragdfa nem csak dísnövényként, energetikai hasznosításnak is kedvezőnek mutatkozott. Ekkor javasoltam, hogy figyeljük meg a fa növekedését, elemezzük, miként dolgozzák fel gyökerei a szennyanyagot, s ha felszívják, hová kerül. Az Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék és az Energetikai Szakkollégium is érdeklődött a téma iránt, s kezdeményeztük a BME udvarára néhány smaragdfa ültetését.

Két fa ültetésére kaptunk engedélyt, és 2013. május 24-én elültettük őket. A fejlődésüket az alábbi fényképeken mutatjuk be.

2023. május 8-án a fák törzsének kerülete, K és az átmérője, D:  $K_1 = 89$  cm,  $D_1 \approx 28$  cm;

$K_2 = 167$  cm,  $D_2 \approx 53$  cm. A fényképeken is látható, hogy az egyik fa fejlődésben lemaradt. Vajon mi lehet az oka? Eltérő talajviszonyok, akadályba ütköztek a gyökerei, vagy valami más? Vajon rövidebb lesz az élettartama is? Követjük tovább a fejlődésüket!



Dr. Zsebik Albin egy évvel az ültetés után, visszametszés előtt



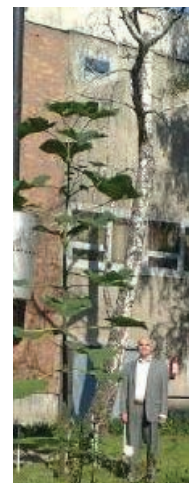
Visszametszve 2014. március 23.



2014.05.14.



2014.06.19.



2014.10.06.



Az egyik fa növésben lemaradt, 2017.07.26.



2020.08.03.





Dr. Cséfalvay Edit, tanszékvezető helyettes a fák törzsének kerületét méri, 2023.05.08.



A virágzó fákról és a tölcséres virágokról készült fényképek 2023.04.22.

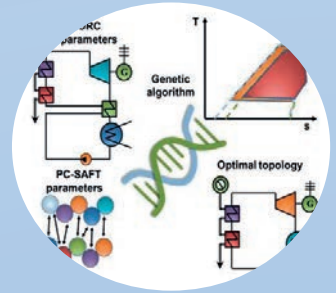








**BELSŐÉGÉSŰ MOTOROK**



**ENERGIA ÁTALAKÍTÁS ÉS TÁROLÁS**



**ÉLETCIKLUS ELEMZÉS**

**FLUIDIZÁCIÓS KONVERZIÓ**



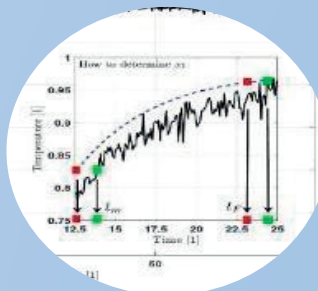
**IPARI MÉRÉSTECHNIKA ÉS  
ESETTANULMÁNYOK**

**KAZÁNOK ÉS  
TÜZELŐBERENDEZÉSEK**



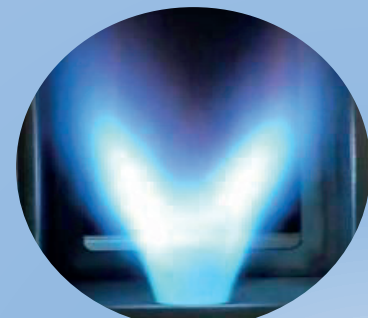
**KÖRNYEZETI FENNTARTHATÓSÁG**

**MEGÚKULÓ ENERGIAFORRÁSOK**



**TERMODINAMIKAI MODELLEZÉS**

**TÜZELÉSTECHNIKA**



[www.energia.bme.hu](http://www.energia.bme.hu)



**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Gépészmérnöki Kar**

