

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA



MISKOLCI EGYETEM GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZET
ÁRAMLÁS- ÉS HŐTECHNIKAI GÉPEK INTÉZETI TANSZÉK ALAPÍTÁSÁNAK 70 ÉVES,
VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK ALAPÍTÁSÁNAK 60 ÉVES

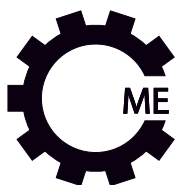
JUBILEUMA

2022. DECEMBER 2.

2022/5.

nka
Nemzeti Kulturális Alap

88 oldal
LXXIII. évfolyam



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR **ME-GÉIK**

A Gépészmérnöki és Informatikai Kar országosan elismert, vezető szerepet tölt be a műszaki- és informatikai képzési területen.

A kar kiemelt célja, hogy gyakorlatorientált képzést és versenyképes tudást biztosítson hallgatóinak. Mind a műszaki, mind az informatikai képzéseket magas szakmai színvonal jellemzi.

A kar majd minden alap- és mesterképzési szakján lehetőség van duális képzésben történő részvételre is, melynek nagy előnye, hogy a hallgatók párhuzamosan részesülnek egyetemi oktatásban és tesznek szert komoly szakmai gyakorlatra.

TÖBB MINT 2500 HALLGATÓ | **TÖBB MINT 100 DUÁLIS PARTNER** | **65 LABORATÓRIUM** | **38 SPECIALIZÁCIÓ** | **7 SZAKIRÁNYÚ TOVÁBBKÉPZÉSI SZAK** | **12 ALAPSZAK** | **11 INTÉZET** | **6 MESTERSZAK** | **2 DOKTORI ISKOLA**



GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám
elnök

Vesza József
főszerkesztő

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

A Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék alapításának 70 éves, a Vegyipari Gépek Intézeti Tanszék alapításának 60 éves évfordulójára



Az atomenergia békés célú felhasználása hasonló időtávban indult, mint a nevezetes egyetemi évfordulók.

Az 50-es évek első tervei alapján a 60-as években kifejlesztett 2. generációs atomerőművek a 70-es években épültek meg, és a 30 éves üzemeltartamukat a 80-as években kezdték meg – így a paksi atomerőmű négy blokkja is. A 90-es évek a teljesítmény növelésről és a nukleáris biztonság javításáról szólt. Az új évezred első évtizedében megalapoztuk az atomerőmű blokkjai üzemének 20 évvel történő meghosszabbítását, 2014-ben a Parlament döntött új paksi blokkok megépítéséről, majd a jelen évtizedben megkezdődött a paksi blokkok élettartama további 20 évvel történő meghosszabbításának megalapozása.

Az atomerőmű életciklusának bármelyik eleme komoly szakmai elemzések, vizsgálatok sorozatát igényli. Mindennek az alapja a technológia berendezési alapanyagainak alapos ismerete és a gyártási technológia tökéletesítése. Napjaink működő paksi atomerőműve reaktorainak maradék élettartam megállapítása lehetetlen lenne a tartályokban besugárzott próbatestek nyúzó vizsgálatai nélkül. Mint az köztudott, a paksi tartályokat orosz előírások és gyártástechnológia alapján csehek, cseh mérnöki pontossággal állították elő. A paksi telephelyen a tartályok és más berendezések a magyar mérnökök felügyelete alá kerülnek.

A magyar mérnöki gárda pedig nem nélkülözhetette a Miskolcon képzett gépészek és kohászok műszaki, vegyészeti és kohászati ismereteit. A miskolci egyetemen szerzett tudás Pakson hasznos tapasztalatokká érlelődött, amelyek ma már nélkülözhetetlenek a jövő megalapozásában. Az egyetem az atomerőmű nélkülözhetetlen partnere a szakember utánpótlásban, az alapanyagok tulajdonságainak ismeretében és ezen a területen is szakmai tanácsadásban, a jövő nukleáris fejlesztéseinek alapkutatásokkal és technológiai fejlesztésekkel való támogatásában, és általában hazai energetika és ezen belül is az atomenergetika szolgálatában.

Az út a napjainkban nem ér véget, az atomreaktorok alkalmazása már nem csak az áramtermelésben, hanem a tengeri szállításban, a hidrogén gazdaság megalapozásában, a hőtermelésben és az úrkutatáshoz használatos mikroreaktorok fejlesztésében és gyártásában folytatódik. Ezekhez a kihívásokhoz szakképzett mérnökökre, kísérleti laboratóriumokra, mint tudományos kutatási bázisokra – azaz az atomenergetika megbízható partnereire van szükség. Ilyen megbízható partner Paksnak a Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszéke és a Vegyipari Gépek Intézeti Tanszéke.

Mint az energetikában immár közel 35 éve dolgozó, és az energetikát két kormányzati ciklusban is irányító szakember és szakpolitikus kívánok a Tanszékek minden tisztelt tagjának további eredményes munkát, és az Önök által kiképzett szakembereknek pedig sikeres életpályát és kiemelkedő szakmai eredményeket a hazai energetikában és főként az atomenergia iparban!

Budapest, 2022. november 21.

Kovács Pál elnökhelyettes
Magyar Energetikai és Közműszabályozási Hivatal

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: +36-1/202-0656, fax: +36-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu> • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Bárdos Krisztina ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Zrt. • Postacím: 1900 Budapest

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, www.posta.hu WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), e-mailen a hirlapelofizetes@posta.hu címen, telefonon +36-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldön terjeszti a Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14. T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

<i>1. Szabó Szilárd, Schifter Ferenc, Bencs Péter:</i> AZ ÁRAMLÁS- ÉS HŐTECHNIKAI GÉPEK TANSZÉK TÖRTÉNETE	7	<i>11. Mikáczó Viktória, Siménfalvi Zoltán:</i> LEFŰVATOTT ROBBANÁSOK MAXIMÁLIS REDUKÁLT NYOMÁSÁNAK VIZSGÁLATA AZ EN 14994 ÉS NFPA 68 SZABVÁNYOK TÜKRÉBEN	52
<i>2. Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán:</i> 60 ÉVES A VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK	14	<i>12. Petrik Máté:</i> BORDÁSCSÖVES HŐCSERÉLŐ SZERKEZETEK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA	56
<i>3. Fábry György, Verdes Sándor, Mikáczó Viktória:</i> AZ ALAPÍTÓ PROFESSZOR – DR. FÁBRY GYÖRGY	21	<i>13. Szaszák Norbert:</i> NAPENERGIÁT HASZNOSÍTÓ, KÖZVETETT PÁROLOGTATÁSOS ELVEN ÜZEMELŐ LÉGKONDITIONÁLÓ BERENDEZÉS – ELVEK ÉS EGY LEHETSÉGES MEGVALÓSÍTÁS	60
<i>4. Szendi Gerda, Bencs Péter:</i> TERMÉSZETES HÁZAK	24	<i>14. Szepesi L. Gábor:</i> SZELEP HIRTELEN ZÁRÁS OKOZTA NYOMÁSLENGÉS VIZSGÁLATA	64
<i>5. Bolló Betti, Szabó Szilárd, Vanyorek László:</i> NANORÉSZECSKÉKET ELŐÁLLÍTÓ ELEKTROMOS REAKTOR NUMERIKUS MODELLEZÉSE	28	<i>15. Dr. Bolló Betti, Tollár Sándor:</i> SZÉLERŐMŰLAPÁTOK JEGESEDESE OKOZTA PROBLÉMÁK, A JEGESEDEÉS MODELLEZÉSE	68
<i>6. Faragó Dávid, Bencs Péter:</i> AKTÍV TURBULENCIAGENERÁTOR UTÁNI ÁRAMLÁS VIZSGÁLATA	32	<i>16. Tollár Sándor:</i> SZIMULÁCIÓS MODELL KIALAKÍTÁSA SZABAD ÁRAMLÁSBA HELYEZETT SZÁRNYPROFILOK VIZSGÁLATÁHOZ	72
<i>7. Fodor Béla:</i> FORGÓ BERENDEZÉSEK NUMERIKUS HÁLÓZÁSÁNAK SZEMPONTJAI ÉS MÓDSZEREI	36	<i>17. Spisák Bernadett, Szávai Szabolcs:</i> REAKTORTARTÁLY TERMIKUS SOKKBÓL SZÁRMAZÓ FESZÜLTSEGEINEK VÉGESELEM MÓDSZERREL TÖRTÉNŐ ELEMZÉSE	76
<i>8. Kállai Viktória, Szamosi Zoltán:</i> SZÉN-DIOXID VÍZBEN TÖRTÉNŐ ABSZORPCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA	40	<i>18. Patócs Ádám, Hegyes Zsolt:</i> A MI ÖRÖKSÉGÜNK: A VEGYIPARI GÉPÉSZ TANÁCS TEVÉKENYSÉGE A MISKOLCI EGYETEMEN	80
<i>9. Krámer Gyula, Dr. Siménfalvi Zoltán, Dr. Szepesi L. Gábor:</i> ÚJ TÍPUSÚ HŐVEL MŰKÖDŐ SZIVATTYÚ ABSZORPCIÓS HŰTŐK ELEKTROMOS OLDATSZIVATTYÚJÁNAK KIVÁLTÁSÁRA	44	<i>19. Tugyi Levente, Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán, Dr. Szepesi L. Gábor:</i> ÉGÉS- ÉS ROBBANÁSVESZÉLYES ANYAGOK VÁRHATÓ SZIVÁRGÁSAINAK ROBBANÁSVÉDELMI SZEMPONTÚ MEGKÖZELÍTÉSE NORMÁL ÜZEMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT ATOMERŐMŰVEKNÉL	81
<i>10. Dr. Mannheim Viktória:</i> ENERGIA- ÉS ÉLETCIKLUS-ÉRTÉKELÉSI MODELLEK INTEGRÁLÁSA GYÁRTÁSI FOLYAMATOK KÖRNYEZETI TERHELÉSEINEK OPTIMALIZÁLÁSÁRA	48		

Igentisztelt Miniszter Asszony, úgyis mint az Egyetemet irányító kuratórium elnöke!
Igentisztelt Rektor Asszony! (Magnifica Domina Rectrix!)
Tisztelt Dékán Úr! Professor hölgyek és urak!
Tisztelt Hölgyeim és Uraim!

A mai nap a visszatekintés, de a jövőbe nézés napja is. Ma a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karán a Vegyipari Gépek Intézeti Tanszék 60, az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék 70 évvel ezelőtti alapítása alkalmából ünnepi lélekkel és hálatelt szívvel emlékezünk a fiatalságunkat meghatározó nagynevű oktatóinkra, mindarra, amit tőlük kapva előnyünkre vált és végig kísért szakmai, tudományos pályánkon.

A mai ünnepi ülésre szóló meghívásnak sajnos mindnyájan már nem tudtunk eleget tenni. Vannak, akiket betegségük, egyéni nehézségük gátolt ebben, de sajnos olyanok is sokan vannak, akik már végleg távoztak közülünk. Ezen a mai ünnepi eseményen lélekben velük is találkozunk, rájuk is emlékezünk.

Az alapító professzorok többsége is már az égi egyetemen oktat, de Fábry György professzor úr, a hazai műszaki felsőoktatás talán legnagyobb intézményalapítója még köztünk jár.

Ő volt az, aki 60 évvel ezelőtt megálmodta azt a koncepciót, mely a Tanszék és az Ipar szoros együttműködésére épülő innovációs kényszer hatására az elmélet és a gyakorlat optimális arányát biztosítva képes volt megalapozott tudással újtárra indítani a jövő mérnökgenerációját.

Ennek szellemében oktattak és neveltek itt az Egyetemen több mint fél évszáda Sályi István, Terplán Zénó, Czibere Tibor, Lévai Imre, Pető Szilveszter professzor urak, a Vegyipari Gépek Tanszéken pedig Fejes Gábor, Keresztes János, Somló György, majd a már itt végzett generációból diplomát szerettek, Ortutay Miklós, Joó Gyula, Bozóki Géza - hogy csak a számomra legfontosabbakat említsem meg – akiktől nemcsak szakmai igényességet, hanem emberséget és kultúrát is tanulhattunk.

Az Alma Mater példát mutatva jellemünket megedzette, szellemünket feltöltötte, távoli horizontokat mutatott, ugyanakkor kapaszkodót és gyökereket is adott. Így készített fel az életre, s ezzel nagymértékben hozzájárult mindazokhoz, amit elérhettünk.

A Tanszék első oktatói által lefektetett alapok időtállóan bizonyultak, melyek a szocialista nehézipar széthullását követően, a megváltozott gazdasági és politikai környezetben is biztosították a műszaki felsőoktatás jövőjét Miskolcon.

A folyamatos megújulási kényszer és az iparral való szoros együttműködés az elkövetkezendő évtizedek sikerének is a záloga.

A világ fejlődését nézve elmondható, hogy egyre kevesebb olyan tudományterület van, mely nem igényli a műszaki értelmiség szakmai támogatását. Az orvostudományi kutatások, a gyógyszerkísérletek modellezése vagy éppen az emberi psziché vizsgálata egyaránt elképzelhetetlen a műszaki felsőoktatásban megszerezhető tudás nélkül, miként az előttünk álló időszak energia politikájának új alapokra helyezése sem nélkülözheti a mérnöki ismereteket.

A műszaki értelmiségre a jövő kihívásainak leküzdésében tehát rendkívüli szükség lesz, ugyanakkor az interdiszciplinaritásban gyökerező szemléletnek meghatározóvá kell válnia a felsőoktatásban ahhoz, hogy az utánunk következő generáció valóban sikeressé válhasson.

Miskolcon, az Egyetemen, a Karon és az Intézetben ehhez minden adott, így a fiatalságon múlik, hogy a siker érdekében mindezzel akar és tud-e élni.

*Prof. Dr. Latorcai János
az Országgyűlés alelnöke*

Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Kar
Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék alapításának 70 éves,
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék alapításának 60 éves
jubileumi rendezvénye

PROGRAM

A rendezvény időpontja:
2022. december 2. péntek 10:00 óra

A rendezvény helyszíne
Népkerti Vigadó Hajós Alfréd terme
3515 Miskolc Görgey u. 23.

- 9:00-10:00 Résztvevők fogadása, regisztráció, frissítő (kávé, tea, pogácsa)
- 10:00-10:25 Köszöntők
Dr. Varga Judit Universitas Miskolcinensis Alapítvány kuratóriumi elnök
Prof. Dr. Horváth Zita rektor, Miskolci Egyetem
Prof. Dr. Latorcai János az Országgyűlés alelnöke
Kovács Pál energetikai elnökhelyettes, Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal
Prof. Dr. Czibere Tibor akadémikus, professzor emeritus
- 10:25-10:45 70 éves az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék
Dr. Bencs Péter intézeti tanszékvezető, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék
- 10:45-11:05 60 éves a Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék
Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán dékán, intézeti tanszékvezető, Vegyipari Gépek Intézeti Tanszék
- 11:05-11:15 Kéz a kézben a régióval
Marton Zsombor vezérigazgató, MOL Petrolkémia
- 11:15-11:25 Együttműködés a Robert Bosch Energy and Body Systems Kft-vel
Gondos Gyula osztályvezető, Robert Bosch Energy and Body System Kft.
- 11:25-11:35 Partnerség fejlődésben és innovációban - a BorsodChem és a ME-GÉIK együttműködése
Kohajda Csaba, Chief Operation Officer, BorsodChem Zrt.
- 11:35-11:45 Együttműködés a Tiszalöki Vízerőművel
Bereczkei Sándor ügyvezető igazgató, MVM Vízerőmű Kft.
- 11:45-11:55 Az atomipar mai helyzete és lehetőségei – Mire (is) jó egy vegyipari gépész diploma?
Németh Gábor vezérigazgatói tanácsadó, Paksi Atomerőmű Zrt.
- 11:55-12:05 Együttműködés a robbanás-biztonságtan területén – Szakmérnök képzés és a DustLab projekt
Dr. Kun Gábor tanúsítás vezető, ExNB Tanúsító Intézet Kft.
- 12:05 -12:15 Ipari beruházás felsőfokon – új képzések a Miskolci Egyetemen
Hornyák Loránd projektvezető, Miskolci Egyetem – Tudományos és Innovációs Park
- 12:15-12:25 Iskolapadból az iparba – Duális képzés a MOL Petrolkémianál
Kocsis Tamás általános üzemirányító
- 12:35-12:45 A mi örökségünk – A Vegyipari Gépész Tanács mindennapjai
Patócs Ádám elnök, Hegyes Zsolt pénztáros
- 12:45-12:55 Könyvbemutató – Innovatív vegyipari gépészeti tervezés és technológiák
Prof. Dr. Jármay Károly egyetemi tanár, a könyv főszerkesztője
- 12:55-14:00 Svédasztalos ebéd – kötetlen beszélgetés
Népkerti Vigadó
- 14.15-15.00 **Laborlátogatás** – Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet
Miskolci Egyetem – C/2. épület 2. hajó északi oldal – Parkolás a C/1. és C/2. épületek közötti zárt parkolóban

AZ ÁRAMLÁS- ÉS HŐTECHNIKAI GÉPEK TANSZÉK TÖRTÉNETE

HISTORY OF DEPARTMENT OF FLUID AND HEAT ENGINEERING

Szabó Szilárd*, Schifter Ferenc**, Bencs Péter***

ABSTRACT

In this paper written on the occasion of the 70th anniversary of the Department of Fluid and Heat Engineering is presented that was founded in 1952. Since its foundation it plays very important role in both education and research activities. It covers disciplines that are integral parts of mechanical engineering education system at technical universities all over the world. The principle that modern education cannot exist without research is followed by the department since its foundation. The teaching staff (former and current) belonging to the Department of Fluid and Heat Engineering was committed to this principle.

1. BEVEZETÉS

A tanszék az alapítása óta eltelt évtizedek alatt mind szervezeti, mind a kijelölt célok tekintve jelentős változásokon ment keresztül. E változások érintették az infrastruktúrát, a személyi állományt, valamint az oktatási és kutatási tevékenységet. A következőkben ezeket foglaljuk össze [1,2,3,4].







2. A TANSZÉK TÖRTÉNETE

A Tanszék az Oktatásiügyi Minisztérium az 1951. évi 26. számú törvényerejű rendelettel hozta létre a Nehézipari Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Karán **Gépizüemtani Tanszék** megnevezéssel. A Tanszék neve oktatási és kutatási profiljának kialakulása után 1965. március 15-étől az 52341/1965. MM. sz. rendelet alapján **Áramlás és Hőtechnikai Gépek Tanszékére** változott. 2015-ben a Karon bevezetésre került az intézeti rendszer. Ennek keretében a Tanszék a Vegyipari Gépek Tanszékkal közösen egy intézetben, az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézetben folytatja tevékenységét intézeti tanszékként (**Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék**).

A Tanszék első vezetője Lancsarics Alajos (1903-1963) volt. Lancsarics Alajos professzor 1962-ben

súlyosan megbetegedett és ezért ideiglenes jelleggel Dr. Vida György vette át a Tanszék irányítását. Lancsarics professzor halála után 1963-ban azt a Dr. Czibere Tibort hívták meg a Tanszék élére, aki korábban az Egyetem oktatója volt, abban az időben pedig a Ganz-Mávag Központi Vízgéptervező Irodájában kutatómérnöki beosztásban dolgozott. Dr. Czibere Tibor ezt követően negyedszázadon át vezette a Tanszékét.

Amikor Czibere professzor 1988-ban oktatási miniszter lett, Dr. Nyíri András lépett a helyére. Ő szintén a Ganz-Mávagból érkezett, ahol a Vízgép és Kompresszor Tervezési Főosztály vezetője volt. A Tanszék sem volt ismeretlen számára, mert már évek óta félállású docensként részt vett annak munkájában. 1996-ban betöltötte 65. életévét és emiatt megbízatása lejárt.

		
Lancsarics Alajos	Dr. Vida György	Dr. Czibere Tibor
1952-1962	1962-1963	1963-1988
		
Dr. Nyíri András	Dr. Szabó Szilárd	Dr. Bencs Péter
1988-1996	1996-2016	2016-

1. ábra A Tanszék vezetői 1952-2022

Utóda Dr. Szabó Szilárd professzor lett, aki 1975 óta a Tanszék oktatója volt, s aki 20 év tanszékvezetői tevékenység után 2016-ban átadta a Tanszék vezetését

* professor emeritus, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

** nyugalmazott főiskolai docens, intézetigazgató, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

*** egyetemi docens, intézetigazgató, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

tanítványának, Dr. Bencs Péternek, a jelenlegi tanszékvezetőnek. A tanszékvezetők fényképeit a mutatja az 1. ábra.

A Tanszék alapításakor Lancsarics professzoron kívül 4 tanársegéd, 1 szakmunkás és 1 gépiprózó alkotta a személyzetet (2. ábra). A Tanszék oktató gárdája az első években gyakran változott (3. ábra), de az 1970-es évek végére kialakult egy olyan csapat, amely azután hosszabb ideig meghatározója volt a Tanszék tevékenységének.



2. ábra. A Tanszék alapító személyzete egy fővel bővülve 1953-ban az épülő E/5 kollégium előtt.

Balról: Lancsarics Alajos tanszékvezető, Vida György tanársegéd, Pintér Kálmán tanársegéd, Résch Pál tanársegéd, Leicht Ernő tanársegéd, Cserny József tanársegéd, Nemes Julia gépiprózó



3. ábra. A Tanszék dolgozóinak csoportja 1957-ben. Elöl balról: Vida György adjunktus, Lancsarics Alajos professzor, Gedeon Árpád tanársegéd; álló balról: Ábrahám Kálmán technikus, Nánási Tibor tanársegéd, Hajós Mihály tanársegéd, Babics László szakmunkás

A Tanszéknek 1952 és 2019 között 109 munkatársa volt. A munkatársak beosztás szerinti csoportosítását

foglalja össze az 1. táblázat. Az összes munkatárs felsorolását tartalmazza a 4. ábra. Látható, hogy a Tanszék létszáma 1977 és 2012 között volt a legmagasabb. Ennek oka, hogy Dr. Czibere Tibor tanszékvezetőként - tudatosan - az alkalmazott mechanikai ágazaton végzett hallgatók közül 1972 és 1976 között többeket felvett a Tanszék munkatársai közé. Az így kialakult törzsgárda (lásd 5. ábra) egészen a 2010-es évek elejéig nyújtott kiváló teljesítményt a bonyolultabb körülmények között is. Ekkor azonban a nyugdíjkorhatárt elérve, tanévenként többen kényszerűen kiléptek a Tanszék kötelékéből. Azóta létszámában csökkent, de fiatalabb életkorú személyzet látja el az oktatási- kutatási feladatokat. A 6. ábra a jelenlegi tanszéki csoportképet mutatja.

1. táblázat. A Tanszék munkatársainak beosztás szerinti összetétele 1952-2022

tanszék életkora	dátum	oktató-kutató	prof. emeritus	tanszéki mérnök	doktorandusz	segéd-személyzet	összes okt. kut.	létszám
0	1952	5	0	0	0	2	5	7
1	1953	7	0	0	0	6	7	13
10	1962	7	0	0	0	6	7	13
20	1972	11	0	0	0	4	11	15
25	1977	14	0	0	0	10	14	24
45	1997	11	0	1	2	4	14	18
50	2002	10	2	1	7	4	20	24
55	2007	9	2	1	2	4	14	18
60	2012	14	2	1	0	4	17	21
65	2017	7	1	1	1	3	10	13
70	2022	5	3	3	2	2	13	15

Ábrahám Kálmán Ambrus Barna Babits László Baranyi László Barta János Baumel Károly Báthori Györgyné Bencs Péter Benke Mátás Blanky József Blanky Józsefné Bobok Elemér Bolló Betti Boros Gábor Boros István Czibere Tibor Cserny József Csorba Barnabás Dankó Istvánné Deák Sarolta Denk László Dombi Károly Dorogi Dániel Erdélyiné Nagy Ildikó Faragó Dávid Farkas András Farkas László Farkasovszky István Fáy Árpád Fáy Csaba Fekete Lászlóné Fetterné Takács Mónika Fodor Béla Gál Orsolya Gedeon Árpád Gédl Ferenc Glambusz János Grób János Gyulai György Hajós Gyula Hajós Mihály Handk Andrea Hauser János Herbst Károly Hortobágyi Károly Jakab Zoltán Janiga Gábor Jánosik Ferencné Juhász András Kalmár László Karaffa Ferenc Kassai Gyula Kelemen József Keszler József Kiss Flóriánné Kolczá József Kollonai Nikolett Kovács Helga Kovács István Kovácsné Ernő Kozaróczy Miklós Konózy László Laboda Gyula Lakatos Károly Lancsarics Alajos Leicht Ernő Liptai Zoltán Lukács Tamás Matherner Levente Mátrai Zsolt Nagy Józsefné Nagy László Nagy László Nagy Tibor Nánási Tibor Nemes Júlia Nyíry András Ortutay Miklós Pancsovay Rezső Pintér Kálmán Posta Barna Ramada Zoltán Résch Pál Strázsa Tiborné Schiffer Ferenc, Szabó Ádám Szabó Benő Szabó Szilárd Szászák Norbert Székely Ferenc Szűcs Zoltán Takács Csabáné Takács Dániel Takács József Tausch Rezsőné Tieber József Tollár Sándor Tolvaj Béla Tóth Lajosné Tóth Róbert Turcsányi Lajosné Újvárosi Sándor Vékony János Vékony Klára Vida György Vincze László Visnyei László Voith Katalin Zádori Lajos Bozay Péter

4. ábra: A tanszék dolgozói 1952-2022



5. ábra: A Tanszék dolgozói a negyedszázados évforduló évében, 1977-ben

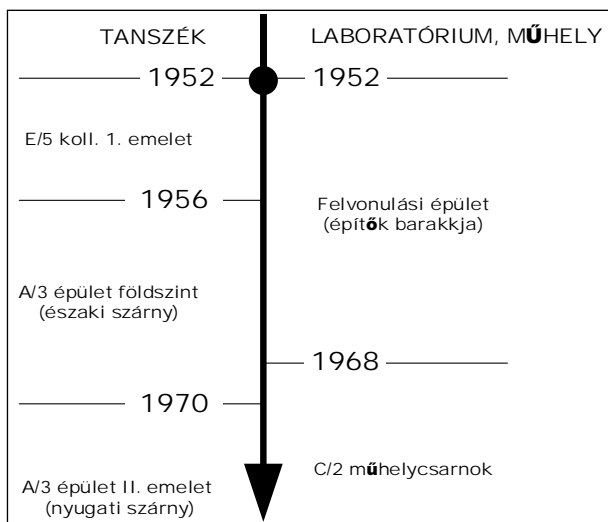


6. ábra. A tanszék dolgozói 2019-ben

Elöl balról: Dr. Voith Katalin tudományos munkatárs, Dr. Bolló Betti egyetemi docens, Dr. Bencs Péter tanszékvezető egyetemi docens, Dr. Baranyi László professor,

hátról balról: Bozsay Péter tanszéki mérnök, Farkas László műszaki szolgáltató, Ramada Zoltán műszaki szolgáltató, Farkas Adrás tanszéki mérnök, Dr. Szabó Szilárd professor, Faragó Dávid doktorandusz, Dr. Szaszák Norbert egyetemi adjunktus, Dorogi Dániel doktorandusz, Fodor Béla tanszéki mérnök hiányzik a képről: Prof. Dr. Czibere Tibor professor emeritus, Tollár Sándor mesteroktató

A Tanszék első évei az egész Egyetemre jellemző lázas igyekezettel teltek el, amelyben a lelkesedés úrrá tudott lenni a hiányosságokon és nehézségeken. Ideiglenes volt a Tanszék elhelyezése az E/5 diákszálló I. emeletén, ideiglenes volt a laboratórium az A/1 épület közelében lévő felvonulási épületekben, sokszor változott a személyzet, de mindezek ellenére sikerült megteremteni a későbbi továbblépés alapjait.

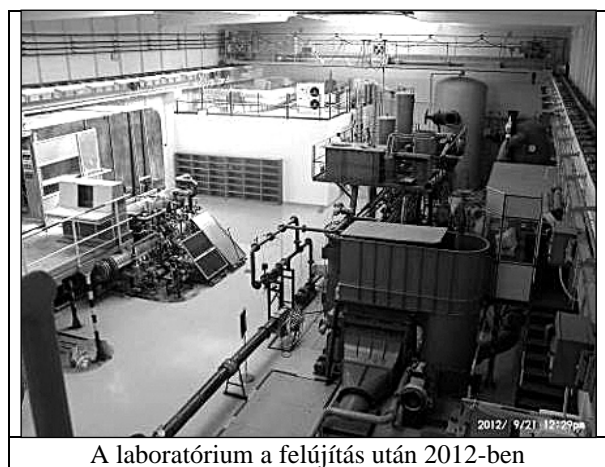


7. ábra. A tanszék helyváltásainak története

Közel két évtized elmúltával jelentősen javultak a munkafeltételek is, ezt 1968. október 29-én a

laboratórium avatása, majd 1970-ben a Tanszék jelenlegi helyének elfoglalása jelezte (7. ábra).

A tanszéki laboratórium 2007-ben, a Tanszék irodái pedig 2010-ben jelentős felújításon estek át. A változások érzékeltetésére álljon itt két összehasonlító fényképsor. A 8. ábra a tanszéki laboratórium fejlődését érzékelteti.



A laboratórium a felújítás után 2012-ben

8. ábra. A tanszéki laboratórium fejlődése

A Tanszék kezdetben az Egyetemet építő rabok barakkjaiból átalakított felvonulási épületek egyikében kapott helyet laboratóriumának kialakítására. Minőségi változást hozott az 1969-ben induló nagy laboratórium, amely több jelentős fejlesztés mellett a mai napig szolgálja az oktatást- kutatást.

A Gépüzemtan Tanszék nevéhez híven foglalkozott gépjárművek üzemeltetésével is. A kezdeti időszakban volt a tanszéknek tehergépkocsija, traktorja, több motorkerékpárja és Skoda személyautója is. A hallgatók tanulhattak motort, kombájnt, sőt gőzmozdonyt vezetni. A Tanszék fiatal tanársegédei gyakran az oldalkocsis motorkerékpáron vitték Lancsarics professzort Budapestre gépbeszerzésre. A járművek a személyi változások és az oktatási profil átalakulása során selejtezésre kerültek, pedig egy Hofherr HSCS G35 izzófejes traktor, egy lánctalpas Sztalinyec 80, vagy egy nyitott Skoda Colonial ma már nagy értéket képviselne.

Az 1970-es évek közepétől a laboratóriumban fokozatosan visszaszorult a motorvizsgálat és előtérbe kerültek az áramlás- és hőtechnikai berendezések. Ezt két nagyértékű és nagyméretű berendezés kialakítása is

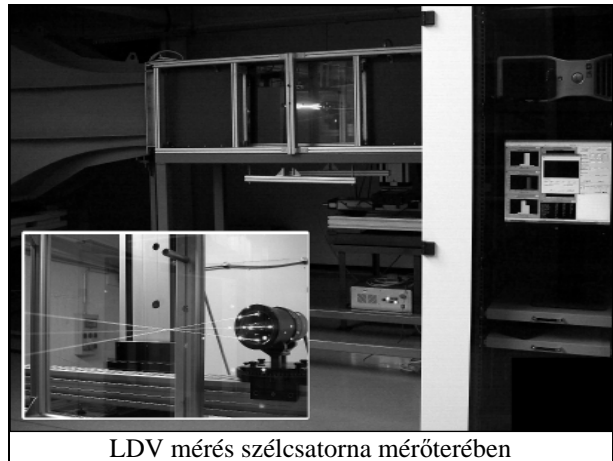
jelezte. Elkészült egy áramlásmérők kalibrálására szolgáló, vízzel működő nagypontosságú mérőkör. Ez évtizedekig szolgálta a turbinás áramlásmérők fejlesztését többek között az egykori Vegyészter megrendelésére. Ez a Vegyészter gyártotta egyébként miskolci iparművészek tervei alapján a miskolci úgynevezett Centrum-szökőkutat, amit áramlástanai szempontból a Tanszék alakított ki. Az előzetes kísérletek után a tanszéki dolgozók készre szerelték a teljes rendszert és azt tökéletes működő állapotban adtuk át a városnak. A másik nagyberendezés egy hűtőházi hőcserélők vizsgálatára épített hőszigetelt szélcsatorna volt. Ez az akkori Diósgyőri Gépgyár léghűtő fejlesztését segítette. A gyár a légcatorna létesítéséhez anyagi és gépészeti segítséget nyújtott. A tervezést, összeállítást, műszerezést és üzembe helyezést az a tanszéki csoport vállalta, amelyik fel tudta használni a korábban létesített nyitott szélcsatornával szerzett tapasztalatokat. E szélcsatorna (ami Magyarországon még most is egyedülálló) átépítés és korszerűsítés után mind a mai napig üzemel. A 8. ábra alsó képének bal oldalán a szélcsatorna, jobb oldalán a térfogatáram kalibráló kör átváltója látható.

A laboratórium a 2007-es épületkorszerűsítést követően eszközparkjában is jelentősen fejlődött. Megépült a Lancsarics motorvizsgáló laboratórium, majd egy hűtőbútorok tesztelésére szolgáló nagyméretű klímakamra. Az oktatási szemléltető eszközök terén jelentős javulást jelentettek a G.U.N.T cégtől beszerzett eszközök (9. ábra). A kutatási infrastruktúra is jelentős korszerűsödésen esett át. Modern, új mérőeszközök (LDA, CTA, PIV, termovízió) jelentik a kutatási infrastruktúra új irányvonalát. Az alapkutatói vizsgálatokhoz két újabb, kisebb méretű légcatorna épült (10. ábra).



Áramlástanai alapjelenségek demonstrációs eszközei

9. ábra. G.U.N.T. oktatási demonstrációs berendezések



LDV mérés szélcsatorna mérőterében

10. ábra. Áramlás- és hőtechnikai mérések az egyik új szélcsatornában

3. OKTATÁSI TEVÉKENYSÉG

A Tanszék alapításakor az Egyetemen még csak a három műszaki karon folyt az oktatás. A Tanszék oktatási munkája mindhárom karra kiterjedt és kezdetben a géprajz oktatása mellett hőerőgépek és bányaszivattyúk tartoztak hozzánk. A következő években a géprajz oktatását más tanszékek vették át és fő profilként az áramlás- és hőtechnika szakterületre eső alap- és szaktárgyak honosodtak meg. A közben megindult esti, majd levelező oktatás tovább növelte a feladatokat. A változást jelezte a Tanszék nevének Gépüzemtan Tanszékről Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszékére való változtatása.

Czibere Tibor tanszékvezetői tevékenységének megindulásával az alaptárgyak színvonalának jelentős növekedése kezdődött. Az újonnan létrehozott Alkalmazott Mechanikai Ágazat keretein belül a Tanszék szakmai tudására alapozva megvalósult a Folyékony Kontinuumok Mechanikája speciális irány. Az ezen oktatási formában tanuló hallgatók magas színvonalú elméleti képzést kaptak. Nem véletlen, hogy mint már említettük, a Tanszék oktató gárdájának jelentős fejlesztése az 1970-es években ezen ágazaton végzett hallgatókra épült.

A nyolcvanas évek második felétől az országban bekövetkezett változások a Tanszék oktató munkájában is éreztették hatásukat. A TEMPUS programok keretében kitárult a világ az oktatók előtt és számos külföldi egyetemen nyílt lehetőség tanulmányozni, és aztán a hazai viszonyok között alkalmazni a nyugat-európai tapasztalatokat. Ezzel párhuzamosan jelentős változások következtek be az oktatás területén. Bevezetésre került a moduláris oktatási rendszer. Ezt a változást Dr. Czibere Tibor kezdeményezte főleg a német és amerikai egyetemi módszerek tanulmányozása alapján. A megvalósítást Dr. Páczelt István dékán nagyrészt tanszékünkre bízta, ez a szervezést, egyeztetést és a szemléltető anyag

elkészítését is jelentette. A rendszer ma is működik. Megindult az önköltséges angol nyelvű oktatás, majd a főiskolai szintű képzés is helyet kapott az egyetem falai között. 1988-tól a kialakított magas elméleti színvonalú oktatás állandó továbbfejlesztése folyik. A tanszék tevékenységét befolyásoló fő tényezők:

- **A számítástechnika robbanásszerű fejlődésével** teljesen új területek (numerikus termo- és hidrodinamika) épültek be az oktatásba.
- **Áttérés a moduláris jellegű oktatásra.**
- **Új szakok megjelenése** (pl. informatikai, műszaki menedzser, mechatronikai mérnöki, energetikai mérnök)
- Átalakult a hagyományos mérnökképzés a kétlépcsős, **BSc. -MSc. képzésre.**
- **Gazdái lettünk az új Energetikai Mérnök Alap-és Mesterszaknak.**
- **PhD képzésbe való bekapcsolódás.**
- **Idegen nyelvű képzések megjelenése stb.**

A fenti felsorolásból kiemelendő az Energetikai Mérnök képzés, amely 2005-től BSc., majd 2009-től MSc. szinten a Tanszék kidolgozásában valósult meg, ellátjuk a szakvezető tanszéki teendőket is. Az Egyetem történetében mérföldkönek tekinthető, hogy a szak szervezésben mindhárom műszaki kar együttműködött, így kitűnő oktatógárda készült fel a feladatra, élén négy akadémikussal. E szak napjainkig jelentős erőfeszítéseket igényel a Tanszék részéről, de számos új lehetőség forrásai is volt. A 11. ábra a 2015.01.20-i államvizsga résztvevőinek csoportképe az államvizsga után a Tiszavíz Kft.-től kapott vízturbina járókerék előtt. Ez a 4,8 m átmérőjű Kaplan-turbina járókerék sok-sok évi üzemelés után a felújítás során vált szabaddá a Tiszalöki Vízerőműben. Az, hogy az egyetemi park különleges „műtárgya” lett, elsősorban a 2012-ben tragikus balesetben elhunyt Dr. Lakatos Károly kollégánknak, a vízenergia-hasznosítás kiváló szakértőjének köszönhető. Egy-egy ilyen csoportkép tisztelgés az Ő emléke előtt is.



A résztvevők csoportképe

11. ábra. Az energetikus hallgatók csoportképe

4. KUTATÁSI TEVÉKENYSÉG

A Tanszék 1951-ben történt alapításától kezdve fontos feladatnak tekintette a kutatási tevékenységet. Az oktatás és kutatás összekapcsolásának igénye kezdettől fogva jellemezték a Tanszék tevékenységét. Így az alapítás nehézségein túljutva a tanszéki kutatómunka Lancsarics Alajos professzor vezetésével már az ötvenes években megindult. Kezdetben a kutatók az akkori oktatási profiloknak megfelelően elsősorban dugattyús gépekkel foglalkoztak. Az első jelentős, országos érdeklődésre számot tartó eredmény a dugattyúk hőmérsékletének mérésére alkalmas olvadószegecses eljárás kidolgozása [5] volt. Ez a méréssorozat úgy tekinthető, mint a tanszéki kutatási tevékenység erős indítása. A munka a Tanszék és a Járműfejlesztési Intézet (JÁFI) együttműködésének egyik eleme volt. Maga az olvadószegecses mérés a hőtani ismeretek mellett logisztikai és munka-szervezési készséget is igényelt, hiszen egy-egy üzemállapot teljes körű vizsgálatához a motort (például egy hathengeres autóbuzsmotort) sok-sok alkalommal szét kellett szedni, majd az új szegecskészlet rögzítése után indításra kész állapotba kellett hozni a fékpadon.

A járműmotorokkal kapcsolatos kutatómunka első hulláma a hatvanas évek végén zárult a ma már legendás Pannonia T5 és P20 motorkerékpár-típusok főszereplésével. Az általános üzemi jellemzők mellett a különleges cél a motor hűtőbordáinak optimalizálása volt a méretek és az állásszög tekintetében.

Ehhez a tanszék szakemberei egy nyitott rendszerű, ipari méretű szélcsatornát terveztek két szabályozható fordulatszámú ventilátorral. A szerelvényeket miskolci üzemek (pl. Cementipari Gépjavító Vállalat, Lyukói Bányaiüzem) készítették elő. A helyszíni szerelés, műszerezés és üzembe helyezés a tanszéki műhely feladata volt. A szélcsatorna 1,5×1,5 m keresztmetszetű mérőszakaszán mintegy 80 km/h szélsősebesség volt elérhető. Az üzemelő motoron a szokásos diagnosztika mellett számos ponton mértünk hőmérsékletet. Speciális mechanizmusokat alakítottunk ki a motor (főleg a bordák) körüli áramlás vizsgálatára alkalmas gömbszondák mozgatásához. Természetesen a motoros személye sem hiányzott, a műhely dolgozói kedvelték ezeket az érdekes feladatokat. Ez volt az első szélcsatorna a Tanszéken (nagyon valószínű, hogy Miskolcon is).

A Tanszék egész tevékenységében és így természetesen a kutatómunkában is minőségi változás történt 1963-ban. Dr. Czibere Tibor került a Tanszék élére, akinek irányításával szervezett keretek közé került a kutatás, kialakultak a fő tanszéki kutatási irányok, amelyek még napjainkban sem veszítették el jelentőségüket. Jelentősen bővültek a nemzetközi és ipari kapcsolatok, amelyek fontos húzóerőt jelentettek. Az ezekben az években indult kutatások egyike, amely az

áramlástechnikai gépekben lezajló áramlási viszonyok vizsgálatával foglalkozott, nemcsak hazai, hanem jelentős nemzetközi elismerést is hozott a Tanszéknek. A gépek lapátozásának a hidrodinamikai szingularitások módszerén alapuló számítási eljárása jelentősen hozzájárult ahhoz, hogy a tudományos világ magyar iskola elnevezéssel fejezze ki elismerését az áramlástechnikai gépek területén elért eredményekért [6,7,8,9].

A hetvenes évektől a laboratóriumi lehetőségek bővülése és a sokoldalú tanszéki műhely lehetővé tették olyan áramlástechnikai kutatási módszerek alkalmazását, amelyek nyugaton már évtizedek óta meghonosodtak. Elsősorban a modellméréseket emeljük ki, ahol a tanszéki közösség tervei alapján a tanszéki műhely dolgozói készítették el a modelleket a társtanszékek segítségével. Az első lépés a Szabolcs-Szatmár Megyei Gabonaforgalmi és Malomipari Vállalattal együttműködve a fémsilók szellőzési rendszerének fejlesztése volt. Az elméleti kutatások (áramlás szemcsés, ill. porózus közegben) eredményeit egyrészt egy siló 1:5 arányú modelljén, másrészt egy Baktalórántházán mérésre előkészített üzemi fémsilón ellenőriztük a megfelelő modelltörvények alkalmazásával.

A következő modellezés tárgya a Kabai Cukorgyár gyártási folyamatának meghatározó eleme, a Brieghel-Müller típusú előderítő volt. A Dr. Czibere Tibor által irányított elméleti áramlástan vizsgálatok után következtek a mérések, előbb a laboratóriumban egy bonyolult modell fékpadi méréseivel, majd az előderítőn a gyárban.

A modellezés ezután már folyamatossá vált a laboratóriumban. Különösen jelentősek a Mátrai Erőmű, illetve az Inotai Alumíniumkohó füstgázrendszerének modellezései és a felújított szélcsatornában vizsgált épület- illetve üzemcsarnok modellek.

Természetesen más irányú kutatások is folytak a Tanszéken. Ezek közül még a hőtechnikai gépekben és berendezésekben kialakuló hőcsere-folyamatokkal foglalkozó tevékenység emelhető ki.

A kutatási tevékenység eredményeképpen a PhD fokozat bevezetése óta a Tanszék szakmai vezetésével kilencen szereztek doktori fokozatot és ketten habilitáltak.

Az elmúlt időszakban a hétköznapi politikai érdeklődés középpontjába került a klímavédelem (klímakatasztrófa!), globális felmelegedés, széndioxid kibocsátás stb. kérdése. Megállapítható, hogy ezek a témák már a nyolcvanas évektől a tanszéki oktatás és kutatás súlypontjában voltak. Az Energetikai Mérnök Alap-és Mesterszak másról sem szól, mint arról, hogy hogyan lehetne a környezet-szennyezést csökkenteni, miközben a hazai villamos energiafogyasztás csúcsteljesítménye hétezer megawatt fölé nőtt. A Tanszék vállalta a profiljától kissé távol álló

Szennyvízkezelés és Hulladékfeldolgozás oktatását, megszerveztük az épületenergetikai auditorok képzését. Kutatási témáink szinte mindegyike tartalmaz környezetvédelmi elemeket (füstgáztisztítás, pontosabb motordiagnosztika, LEGYENER, Schumacher-gyertyák, energiatakarékos háztartási gépek fejlesztése, zajcsökkentés, abszorpciós hőszivattyúk energetikája, stb.).

5. IPARI KAPCSOLATOK

A Tanszék – alapításától fogva – élénk ipari kapcsolatokkal rendelkezik. Az első 4 évtizedben főleg a hazai ipari nagyvállalatok számára végezték a Tanszék tervezési, kutatási, fejlesztési tevékenységeit. E munkák során nagy szerep jutott a tanszéki laboratóriumnak, de számos esetben helyszíni mérések is a feladatok közé tartoztak. Ilyen vállalatok voltak például a Ganz-Mávg, a Diósgyőri Gépgyár, a MOL, a Vegyész.

A rendszerváltozás az ipari kapcsolatokban is változást hozott. Megjelentek a kis- és közepes vállalatok, amelyek nem tudtak fenntartani saját fejlesztő részleget. E cégektől a Tanszék sok kisebb-nagyobb tervezési, fejlesztési munkát kapott. A változás másik jellemzője az volt, hogy a nemzetközi nagy cégek birtokába került nagyvállalatok sokszor készen kapták a külföldi fejlesztési eredményeket, illetve az új feladatokat szívesebben végeztették el az anyacég fejlesztő központjaiban. A harmadik változás viszont pozitív. Kormányzati segítséggel olyan néhány éves projekteket támogattak, amelyek az ipar és a felsőoktatás közös kutatás-fejlesztési tevékenységét segítették, rendszeressé, szervezetté tették. Ilyenek voltak például a 2001-ben alakult Mechatronikai és Anyagtudományi Kooperációs Kutatási Központ, vagy a 2005-ben létrejött Mechatronikai és Logisztikai Regionális Egyetemi Tudásközpont. E szervezetek keretei között a Tanszék szoros kutatás-fejlesztési kapcsolatban állt az alábbi cégekkel: MAL Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Rt., Electrolux Lehel Kft. Porszívógyára és Hűtőgépgyára, Tiszai Vegyi Kombinát, Zollner Elektronika Kft., Dometic Zrt., Robert Bosch Power Tool Kft.

A 2008-tól az Új Széchenyi terv támogatásával GINOP pályázat keretében működtetett UNI-FLEXYS Egyetemi Innovációs Kutató és Fejlesztő Közhasznú Nonprofit Kft. segítette az ipari szereplőkkel a kapcsolattartást, például a következőkkel: Tiszavíz Vízerőmű Kft., SZATEV Zrt., Beregvíz Kft., Audi Hungária Kft., Electrolux Lehel Kft. Az elmúlt években a Tanszék nemzeti GINOP pályázatok keretében végzett kutatómunkát az alábbi cégek számára: Robert Bosch Energy and Body Systems Gépjármű elektromossági Alkatrész Gyártó és Forgalmazó Kft., Starters E-Components Generators Automotive Hungary Kft.

Természetesen e szervezett kereteken kívül is eseti megkeresésre számos szakmai feladat megoldásában segítette a Tanszék az ipari szereplőket. A sokrétű tevékenysége jellemzésére legyenek példaként felsorolva a legkülönbözőbb vállalatok, akiket az köt össze, hogy áramlástani, hőtani és energetikai problémákkal keresték meg a Tanszék: Nitrogénművek Zrt., Mátrai Erőmű Rt., MOL Magyar Olaj- és Gázipari Rt., RAABVILL Kft., Ventifilt Légtechnikai Rt., Miskolci Sütőipari Kft., Dispomedicor Zrt., Dunaferr Dunai Vasmű Rt., Columbian Tiszai Koromgyártó Kft., Paksi Atomerőmű Zrt.

A felsorolásban esetleg több olyan intézet és cég is található, amely időközben profilt váltott, vagy a való világból a gazdaságtörténet lapjaira költözött. Az ezekhez kapcsolódó kutatási eredmények természetesen nem veszték kárba, hiszen a módszerek és eszközök tovább hasznosíthatók, az eredmények pedig a tananyagba beépítve (erre mindig törekedtünk) az újabb nemzedéket segítik a továbblépésben.

6. NEMZETKÖZI KAPCSOLATOK

A Tanszék fennállásától kezdve igyekezett a kor lehetőségeinek keretén belül kiépíteni és fenntartani nemzetközi kapcsolatait. Az első évtizedekben a volt szocialista országok társegyetemeivel alakultak ki hasznos kapcsolatok. A magdeburgi Otto von Guericke Egyetem, a Kassai Egyetem, a Zsdánovi Egyetem, a Freibergi Egyetem stb. jelentették a kapcsolatok bázisát. A rendszerváltás után kinyíltak a kapuk, a tanszék munkatársai látogatták a világ különböző részein rendezett konferenciákat és szereztek személyes kapcsolatokat, amelyek közül néhány később intézményi kapcsolattá is vált. Ezek közül néhány fontosabb: Universitát Magdeburg (Németország), Dalian University of Technology (Kína), Cranfield University (U.K.), University of Western Macedonia, Kozani (Görög-ország), Nagaoka University of Technology (Japán), Indian Institute of Technology, Roorkee (India), Ecole Polytechnique Montréal, QC, (Kanada), Harbin Institute of Technology, Shenzhen (Kína), Universitát Siegen (Németország), Technická Univerzita v Kosiciah (Szlovákia), University College London (U.K.), Universitát Karlsruhe (Németország), Universitát Aschaffenburg (Németország), University of West Bohemia (Csehország), KTH Royal Institute of Technology (Svédország), Karls-ruher Institut für Technologie (Németország), University of Pretoria (Dél-afrikai Köztársaság), Turboinstitut Ljubljana (Szlovénia), Ben Gurion University (Izrael), TU Claustahl (Németország).

A kétezres évek elején több tanszéki doktoranduszunk használta ki azt, hogy tanulmányai során kapcsolatokat építhetett ki tekintélyes európai egyetemeken. Ma már megbecsült oktatói-kutatói az adott intézménynek.

Tanszékünk ezt oktatási rendszerünk elismerésének tekinti, de itthon hiányoznak.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A Miskolci Egyetem Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék az 1952-ben alapított Gépészmérnöki Kar 73 éves fennállásából 70 éve egyik meghatározó tanszéke a Karnak. Olyan szakterületeket művel, amelyek a gépészeti tárgyú műszaki egyetemek mindegyikében művelt diszciplínák. Az áramlás- és hőtechnika, valamint az energetika ugyanis a cégek, intézmények profiljától függetlenül mindenhol jelen van, ezért a felsőoktatás szintjén művelésük mindenképpen indokolt. A hét évtizedet áttekintve bemutattuk a tanszék történetét, oktatási-kutatási tevékenységét és ipari, valamint nemzetközi kapcsolatait.

8. IRODALOM

- [1] *A Tanszék története*, GÉP, 2012/9, pp. 3-4. ISSN 0016-8572
- [2] Czibere, T., Vida, Gy., Karaffa, F.: *25 éves az NME Áramlás-és Hőtechnikai Gépek Tanszéke A Nehézipari Műszaki egyetem Közleményei*, III. sorozat, Gépészet, 23. kötet-4. füzet, Miskolc, 1977
- [3] *Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke, Jubileumi Évkönyv, 1949-2009*, Miskolc, 2009, pp.42-45.
- [4] Karaffa, F. Schifter, F.: *Bemutakozik az Áramlás- és hőtechnikai Gépek Tanszéke*, GÉP, 2003/1, pp. 5-13, ISSN 0016-8572
- [5] Lancsarics, A.: *Jármű dieselmotorok dugattyúfelületein fellépő hőmérséklet mérése*, A Nehézipari Műszaki egyetem Közleményei, I. kötet Miskolc, 1957 pp. 259-269.
- [6] Czibere, T.: *Berechnungsverfahren zum Entwurfe gerader Flügelgitter mit stark gewöblen Profilschaufeln*, Acta Technica XXVIII, Budapest 1960, pp. 43-71, 241-280.
- [7] Czibere, T.: *Méretezési eljárás erősen ívelt profilos lapátokból álló egyenes szárnyrác tervezéséhez*, Kandidátusi értekezés, 1963
- [8] Czibere, T.: *A hidrodinamikai rácselmélet két főfeladatának potenciálméleti megoldása*, Akadémiai doktori értekezés, 1967
- [9] Szabó, S., & Schifter, F. (2019). *Az Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszék története 1952-2019. Multidiszciplináris Tudományok*, 9(4), 195–211.
<https://doi.org/10.35925/j.multi.2019.4.16>

60 ÉVES A VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK

THE 60th ANNIVERSARY OF THE DEPARTMENT OF CHEMICAL MACHINERY

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán¹

ABSTRACT

This article describes the life of Department of Chemical Machinery from its foundation to nowadays, through its education and research activities.

ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen közlemény az alapítástól napjainkig mutatja be a Vegyipari Gépezeti Intézeti Tanszék életét annak oktatási, kutatási tevékenységén keresztül.

ELŐSZÓ

Húsz éve, 2002-ben, pályakezdő adjunktusként, tíz éve egyetemi docensként, tanszékvezetőként vettem részt a tanszék jubileumi rendezvényén. Húsz évvel ezelőtt, hallgatva az előadásokat csodálkoztam rá a tanszék – általam addig csak hiányosan ismert – történelmének mozzanataira, amelyek az addigiaknál is nagyobb tiszteletet ébresztettek elődeim iránt és büszkeséggel töltött el, hogy ehhez a közösséghez tartozhatom. Tíz éve – öt év tanszékvezetés után – már éreztem némi felelősséget a történetekért, azonban ma, 2022-ben, ha kudarcról kell beszámolnom, az teljes egészében az én „illetékességem”, ha viszont sikerekről, az a közösségünk eredménye.

Örömmel számolhatok be arról, hogy a vegyipari gépészeti szakterület – immár intézeti formában – él, fejlődik, sőt a Gépészmérnöki és Informatikai Kar egyik legeredményesebb szervezete, amely sikeresen felvette a rohanó világ modellváltó felsőoktatásba is begyűrűző ritmusát.

A következőkben a múlt bemutatása mellett az utóbbi évtized eseményeibe szeretném bevezetni a kedves olvasót.

A KEZDETEK

Az észak-magyarországi régióban az 1950-es években végbement rohamos vegyipari fejlődés szükségszerűen hozta létre a Nehézipari Műszaki Egyetem Gépészmérnöki (2006-tól Gépészmérnöki és Informatikai) Karán a vegyipari gépészmérnök képzést,

a Vegyipari Gépek Tanszékét. Az Oktatási Miniszter rendelete alapján az Egyetem, a Kar, a Borsodi Vegyi Kombinát, a Tiszai Vegyi Kombinát, az Észak-Magyarországi Vegyiművek és a Magyar Kémikusok Egyesülete megyei vezetőségének kezdeményezésére 1962. augusztus 1-én alakult meg a Vegyipari Gépek Tanszéke. A tanszékalapítással egyidejűleg – az idén 95. születésnapját ünneplő – Dr. Fábry Györgyöt bízták meg a tanszékvezetői feladatok ellátásával.



*Dr. Fábry György a tanszék 50-éves
jubileumán 2012-ben*

Az oktatáshoz szükséges személyi és tárgyi feltételek fokozatosan alakultak ki. A megbízott tanszékvezető mellé 1962. október 1-én nevezték ki tanársegédnek Dr. Lorencz Sándort, aki két évtizeden keresztül tanszékvezető helyettesként szívvel-lélekkel dolgozott az oktatási tanterv kialakításán, a tanszéki infrastruktúra megeremtéséért.

1963. augusztus 1-jével Dr. Fábry Györgyöt az Élelmiszeripari Felsőfokú Technikum igazgatójának nevezték ki, ezért kérésére a tanszékvezetői tisztség alól felmentették és Fejes Gábort egyetemi docenssé, tanszékvezetővé nevezték ki. Fejes Gábor 1983-ig vezette a tanszékot, akit Dr. Ortutay Miklós követett 2007-ig. A tanszékalapítók vezetői megbízásuk lejártá után is részt vettek a tanszék életében, oktattak, kutattak,

¹ dékán, egyetemi tanár, intézeti tanszékvezető, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Vegyipari Gépezeti Intézeti Tanszék

segítették és támogatták a fiatalabb oktatók szakmai munkáját.

A képzés 1962 szeptemberében a III. évfolyamon a Fizikai kémia és Vegyipari gépek és műveletek tantárgyak oktatásával kezdődött. Egyes tantárgyak kialakítását és/vagy oktatását neves külső, ipari szakemberek végezték. (Vegyipari eljárások: Dr. Somló György, Tartályok és készülékek: Keresztes János, Biztonságtan: Dr. Szabó Mihály, Biotechnológia: Dr. Takács István, Vegyipari műveletek: Dr. Grega József és Halmai István, Hűtés és cseppfolyósítás: Dr. Horváth Márton, Szilikátkémia: Dr. Vissy László)



Fejes Gábor tanszékvezető egy „vegygépész” szakestélyen - 1975

Az első vegyipari gépészmérnöki diplomát 39 fő 1965-ben vette át, köztük Dr. Joó Gyula és Dr. Ortutay Miklós.

A vegyipari gépész szakon kialakult tanterv az egyetem történetében újszerű volt, mivel az első olyan szak volt, amelynél a képzésben – túllépve a kari kereteken – az akkor három karból álló egyetem minden kara részt vett.

A felmerült igényekkel összhangban 1965-ben indult meg a két lépcsős vegyipari gépészmérnök képzés. Az első lépcső befejezésével üzemmérnöki diplomát lehetett szerezni. A második lépcső mind az első lépcsőt sikeresen befejező, mind más hasonló jellegű képzésben részesült üzemmérnökök számára teremtette meg a gépészmérnöki diploma megszerzésének lehetőségét.

1966/67-es tanévben indult meg az oktatás a vegyipari gépészeti szakon belül a szilikátipari ágazaton 14 fővel. Az oktatási struktúra kialakításában meghatározó segítséget jelentett Dr. Antal Boza József és Dr. Vissy László közreműködése. A szilikátipari gépészeti ágazat irányítását az 1973/74 tanévben a Szállítóberendezések Tanszék vette át.

A tanszék számára nagy segítséget és támogatást jelentett, hogy a képzésben elismert kutatók, vállalati vezetők is részt vettek (Balázs Lajos, Dr. Bátor Béla, Dr. Grega József, Dr. Horváth Mátyás, Dr. Németh Jenő, Dr. Petró István, Dr. Somló György, Dr. Stickl László, Dr. Szabó Mihály, Szénási Tibor, Dr. Takács István, Dr. Varga László). A Gépészmérnöki Kar kiemelkedő szakmai és oktatói munkájuk elismeréséért Dr. Somló György, Dr. Takács István és Dr. Vissy László részére tiszteletbeli egyetemi tanári címet adományozott.



Vegyipari gépészek tablója – 1968

OKTATÁSI STRUKTÚRA

Megalakulásunk óta folyamatosan törekszünk arra, hogy

- tantárgyainak programját, az oktatási struktúrát korszerűsítsük, és az ipari igényeknek megfelelően fejlesszük,
- növeljük a diploma tudástartalmát,
- a külső kapcsolataink hozzájáruljanak az oktatási színvonal növeléséhez, az oktatás és kutatás tárgyi feltételeinek javításához.

A végzett vegyipari gépészmérnökök is hozzájárulnak ahhoz, hogy a tanszék kapcsolatai a szakmai területen dolgozó vállalatokkal, intézményekkel szorosak maradjanak, és érdemben segítsék a tanszéki oktató munkát.

Az elmúlt időszakban a Gépészmérnöki és Informatikai Karon több, a kari és a tanszéki oktatási keretek szempontjából is meghatározó döntés született.

1972-ben került elfogadásra a **kari szakosítási rend**, amely figyelembe véve a folyamatosan alakuló oktatási kereteket, négy szakirány – gépgyártástechnológiai, termelési rendszer, géptervező, vegyipari gépészeti szak – közötti választás lehetőségét biztosította a hallgatónak. A vegyipari gépész szakos hallgatók három ágazati irányon – vegyipari műveleti, hűtéstechnikai, rendszerszervezői – tanulhattak.

1979-ben indítottuk a Vegyipari rendszerbiztonsági szakmérnök-képzést. A képzés kereteinek

kimunkálásában, az oktatásban Dr. Bátor Béla (ÁEEFB), Dr. Stickl László igazgató (TVK), Dr. Szabó Mihály főosztályvezető (TVK) jelentős szerepet vállalva segítette munkánkat.

A következő mérföldkő a Kar 1985-ben elfogadott úgynevezett **moduláris tanterve**. A tanterv az első három évben minden gépészmérnök hallgató számára azonos volt. A hallgatók harmadéves korukban választhattak szakismereti blokkot és kiegészítő szakismereti blokkot. A tanszék a **Vegyipari szakismereti** blokk és a **Vegyipari készüléktervezői**, valamint a **Vegyipari művelettervezői** kiegészítő szakismereti blokk gondozását vállalta. További feladatunk a nem vegyipari gépész blokkot választó hallgatók által felvehető Folyamatok gépészete és Folyamatos technológiák kiegészítő blokkjában szaktárgyak oktatása volt. A moduláris rendszerben tanszékünk speciális szaktárgyakat oktatott a Műszaki menedzser és Műszaki informatikai szakokon, a Műszaki Anyagtudományi és Műszaki Földtudományi (korábban Kohómérnöki és Bányamérnöki) Karokon.

1989-től a Kar integrálta a kazincbarcikai főiskolai képzést, feladatunk a **gyárszerelő főiskolai szakirány** gondozása volt.

A régió vegyipari vállalatainak kezdeményezésére 2004-ben elindult a Műszaki Anyagtudományi Kar kreditrendszerű képzésén belül a **Vegyipari technológiai szakirány**, amely tantervének kialakításában jelentős szerepet vállalt a tanszék.



Vegyipari gépész hallgatóink a Paksi Atomerőműben

A magyar felsőoktatást gyökereiben átalakító **lineáris rendszerű képzést** (BSc-MSc-PhD) 2006-tól vezettük be úgy, hogy párhuzamosan zajlott a kreditrendszerű moduláris képzés is.

2006-tól indult a 7 féléves BSc képzés, ahol Gépészmérnöki alapszakon mindenki által hallgatott

szakmai alapozó tantárgyat jegyeztük (Vegyipari technológiák és gépeik). A tanszék két szakirány gondozója volt (**Vegyipari és energetikai gépész, Létesítményszerelő és üzemeltető**), ahol 15 szakmai tárgyat oktattunk.

Műszaki menedzser alapszakon ugyancsak szakmai alapozó tárgyakat jegyeztünk és a **Rendszertechnikai szakirányt** gondoztuk négy tantárgy oktatásával.

A Műszaki Anyagtudományi Kar BSc rendszerű képzésében az Anyagmérnöki alapszakon a **Vegyipari technológiai szakirány** oktatásában vettünk részt, a kreditrendszerhez képest jelentősen csökkentett óraszámmal. További tantárgyakat oktattunk Energetikai mérnök és Villamosmérnök alapszakokon.

A Kar 2007-ben akkreditálta a 4 féléves **Gépészmérnöki mesterszakát** (MSc), ahol a tanszék a **Technológiai berendezések gépészete és a Vegyipari és energetikai gépész szakirányok** gondozását vállalta. A képzés során 15 szakmai tárgyat oktattunk, közülük többet mindkét szakirányon. További szakirányokon két tantárgy oktatásával vettünk részt a képzésben.

2011-ben a Kar átdolgozta MSc tantervét és közel felére csökkentette a szakirányok számát. A Gépészmérnöki mesterszakon a tanszék visszavezette a **Vegyipari gépészeti szakirány** elnevezést, ahol 12 tantárgy oktatását végeztük. További szakirányok számára két választható tárgyat ajánlottunk. A Műszaki Anyagtudományi Kar MSc rendszerű képzésében az Anyagmérnöki mesterszakon a **Vegyipari technológiai szakirány** oktatásában vettünk részt három tantárggyal.

2016-ban Dr. Jármái Károly professzor szakfelelős vezetésével elindítottuk a **Járműmérnök alapszakot**, amelynek oktatásában több intézeti kolléga is közreműködik.

2022-re mind a BSc, mind az MSc szakok tantervei a karon átdolgozásra kerültek. A tantervek kialakítását egy **audit eljárás** előzte meg, amely során képzéseink 3 **versenytárs** egyetemmel történő összehasonlítását végeztük el és 3 **vállalati partner** tantárgyi tematika mélységű szakmai észrevételeit vettük figyelembe. A BSc tantervekben 2500 órában korlátoztuk a kontaktórák és 50-ben a tantárgyak számát, növeltük a specializációk óraszámát. Az MSc tanterveinkben az előző elveken túl az első két félévre koncentráltuk a tantárgyakat, ezzel lehetőséget biztosítva hallgatóinknak akár duális, akár gyakornoki formában vállalati környezetben önálló mérnöki feladatok megoldására. Az Anyag- és Vegyészmérnöki (korábban Műszaki Anyagtudományi) karon BSc és MSc rendszerben is elindult a **vegyészmérnök** képzés, amelyben több tantárggyal veszünk részt.

Az utóbbi években a sajátbevétel szerzés új lehetőségeit, a **szakirányú továbbképzéseket és a túszerű képzéseket** erősítettük a vállalati környezet

kezdeményezésére és közreműködésével. Jelenleg Abroncsgyártó technológiai (Apollo Tyres), Atomerőművi üzemeltetési (Paks II. Atomerőmű), Robbanásvédelmi (Veproil, ExNB), Technológiai rendszerbiztonsági (Paks II Atomerőmű, több vegyipari vállalat), és Ipari beruházási szakmérnök képzést alapítottunk és indítottunk nagy sikerrel.

A robbanásvédelmi szakmérnök jelenleg a legnépszerűbb képzésünk, első meghirdetésekor közel 70, második alkalommal közel 40 hallgatót vettünk fel. A siker titkát abban látjuk, hogy a **Veproil Kft.** személyében megtaláltuk azt a képzési partnerünket, akivel a robbanás elleni védelem teljes spektrumát képesek vagyunk lefedni, képzési programunkban pedig nagy hangsúlyt fektetünk az elméleti és a gyakorlati ismeretek egyensúlyára, továbbá mind az egyetem, mind a vállalati partnerünk a szakterület elismert szereplőjeként hitelesen jelenik meg a képzésben.

A Paks II. Atomerőmű támogatásával túszerű képzések tananyagait fejlesztettük ki a következő tantárgyak vonatkozásában: Rezgésdiagnosztika, forgógépek karbantartása, Hő- és anyagátadási műveletek, Nyomástartó berendezések és csővezetékek szilárdsága, Technológiai rendszerek modellezése. 2022-ben ezen képzési területen a K+F bevételekkel azonos nagyságrendű bevételt realizáltunk.

A tanszék a **Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola** keretében oktatja a Diffúziós műveletek, Mechanikus szétválasztási műveletek és Nyomástartó edények tervezése című tantárgyakat.

Elkötelezettek vagyunk az idegen nyelvű képzés művelésében és fejlesztésében, ennek keretében idegen nyelvű tárgyakat oktatunk, amelyeket a Stipedium Hungaricum (SH) és ERASMUS programban résztvevő hallgatóknak is meghirdetünk.

A tanszék történetében több, mint 2400 hallgató védte meg szakdolgozatát, diplomatervét. A meghirdetett specializációink BSc és MSc képzésben minden évben nagy érdeklődésre tartanak számot, a BSc specializációkat többször a legnagyobb létszámmal tudtuk elindítani. Köszönhetően az MSc keresztféléves képzésnek és a szakirányú továbbképzéseknek is évente jellemzően 50-60 diplomát adunk ki téli időszakban két, nyáron egy záróvizsgát szervezve.

Hallgatóink közül évente 4-6 hallgató TDK dolgozatot készít, közülük többen országos helyezést is elértek (OTDK).

A **duális képzési forma** nagyon népszerű a hallgatóink és a vállalati partnereink körében. Kari szinten már több, mint 100 duális szerződést kötöttünk, közülük példaértékű a **MOL Petrolkémia duális programja** a gépészmérnöki MSc vegyipari gépészeti specializációján.

A vegyipari gépészeti szak hallgatói 1970-ben alapították meg az azóta folyamatosan tevékenykedő **Vegyipari Gépész Tanácsot**, amely sajátos eszközeivel törekszik a szakmaszeretet elmélyítésére, a választott hivatás megismertetésére, a diákhagyományok ápolására, ipari kapcsolatok létrehozására, építésére.



Hallgatóink egy Vegyipari Gépész Szakmai Napon

TANSZÉKI INFRASTRUKTÚRA

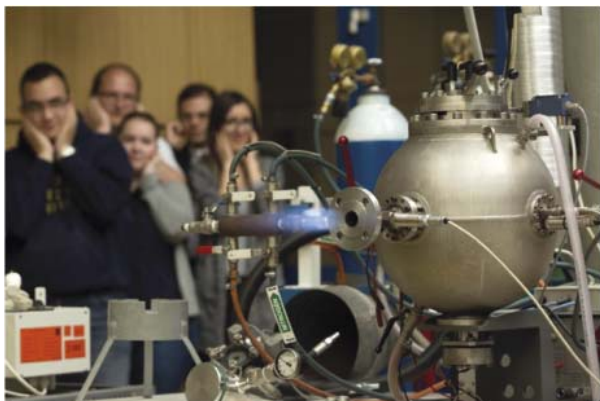
A tanszék oktatási és kutatási feladataihoz elengedhetetlen infrastrukturális háttérét a műhelycsarnokban lévő laboratórium és az oktatási épületben található helyiségek alkotják, amelyek az elmúlt időszakban szinte kivétel nélkül megújultak és fejlődtek. A korábbi évtizedekben kialakított műhelycsarnokban a klasszikus megmunkáló gépeken túl laboratóriumi berendezések találhatók meg:

- vegyipari alpműveletek: szűrés, keverés, bepárlás, fluidizáció, desztilláció, abszorpció, hőátadás, folyamatvezérlés, Certuss gőzfejlesztő, gőz-demonstrációs labor,
- biztonságtechnika és szilárdsági vizsgálatok: biztonsági szelep működés vizsgálat, feszültségmérés nyúlásmérő bélyegekkel, síklemez alakváltozást vizsgáló labor,
- mérési kompetenciák: mérő és adatgyűjtő rendszerek, távadók és érzékelők (nyomás, hőmérséklet, elmozdulás, erő, hőmérséklet, gyorsulás), nagy pontosságú kalibráló manométer sorozat, hőkamera, rezgés analízátor, UH falvastagság mérő és repedés vizsgáló, rázógép és szita sorozat, precíziós mérlegek,
- tervező és szimulációs szoftverek: PV Elite, Visual Vessel Design, ANSYS, Solidedge, Caepipe, FLACS/DESC, SC/TETRA, GABI, CHEMCAD, Unisim Design, HYSYS, AMETANK).

A tanszéki infrastruktúra megújulása fejlesztési projekteken keresztül, K+F tevékenységek saját bevételéből, vállalati támogatások segítségével és költségvetési forrásból valósult meg.

Fejlesztéseink közül kiemelkedik a **DustLab** kompetencia központ, amelyet porok, gázok, gőzök és hibrid keverékek robbanási tulajdonságainak meghatározására hoztunk létre.

A DustLab-ot az **ExNB Kft**-vel közösen üzemeltetjük, partnerünk az üzletszerzéssel, szaktanácsadással és a labor üzemelési feltételeinek biztosításával, az egyetem a laboratóriumi eszközpark kialakításával és működtetésével, a vizsgálatok elvégzésével és szakértői tanácsadással foglalkozik. 2022-ben a laboratórium az intézet vállalkozási és szolgáltatási sajátbevételének 25%-át biztosította.



A DustLab főberendezése: 20 literes robbantókamra

SZEMÉLYI HÁTTER

A tanszéken 2002-ben Dr. Ortutay Miklós tanszékvezető (1983-2007) vezetésével tizenöt munkatárs dolgozott, közülük két fő rendelkezett tudományos fokozattal. Néhány év alatt a tizenkét fős oktatói létszámból tíz fő vonult nyugdíjba (Dr. Bene Ferenc, Bokros István, Dr. Bozóki Géza, Gonda Ferencné, Dr. Győri Ilona, Dr. Joó Gyula, Keresztes János †, Dr. Léderer Péter, Dr. Ortutay Miklós, Völgyes Lajos †). 2012-ben az ötfős oktatói csapat átlagéletkora negyven év alatt volt (a Kar legfiatalabb oktatógárdája), közülük három fő tudományos fokozattal rendelkező egyetemi docens volt. 2022-ben 12 fős oktatói-kutatói gárdának 84%-a tudományosan minősített (2 fő egyetemi tanár, 1 fő habilitált docens, 1 fő docens, 2 fő adjunktus, 4 fő tanársegéd/tudományos segédmunkatárs, 2 fő tudományos főmunkatárs), az átlagéletkor 41 év.

A létszámnövekedés „saját nevelésű” kollégákkal valósult meg, amelynek **alapját a doktori képzés biztosította**, amelyben kari szinten is kiemelkedő, jelentős eredményeket értünk el. Az elmúlt 10 évben 13 fő doktoranduszt vezetünk (10 fő magyar és 3 fő külföldi), 5 fő szerzett abszolutóriumot, 6 fő szerzett PhD fokozatot, jelenleg 3 fő aktív doktorandusz végez kutatómunkát.

Különösen fontosnak tartjuk, hogy képzéseinkbe rendszeresen bekapcsolódjanak **ipari szakemberek**. Ezt

a támogatást folyamatosan megkapjuk a MOL Petrolkémia Zrt-től, a Veproil Kft-től, valamint egy-egy részterületen kiemelném Kósa Zsolt (Hartford Steam Boiler International), Herkó László (Chetra Budapest Kft.), Demjén Lajos (Műszaki Biztonsági Hatóság) és Liktör Dénes (BorsodChem) tevékenységét.



Az 50 éves Jubileumi Szakestély kupája

KUTATÁS-FEJLESZTÉSI TEVÉKENYSÉG

A tanszéken folyó kutatások összhangban vannak az oktatási portfólióval. A kutatási területek élesen nem válnak szét, az esetek jelentős részében a kutatási irányvonalak részeredményeinek összegzését igénylik. A tanszék profiljából adódóan a kutatások alapvetően alkalmazott kutatások. A K+F munkák és a pályázati feladataink gyakran szolgálnak kutatásaink, szakdolgozatok, diplomatervek, TDK dolgozatok és PhD témák alapjául, ezért eredményeink általában közvetlen módon felhasználásra kerülnek.

A tanszéken folyó munka négy kiemelt területe a műveleti, a tervezési, a biztonságtechnikai és a környezetvédelmi kutatásokra irányul. Ezeket kedvezően befolyásolja, hogy a konkrét feladatokat igen gyakran vállalatok kezdeményezik és finanszírozzák.

A kutatások főbb részterületei:

- Energiahatékonyság növelése a vegyiparban;
- Vegyipari műveletek vizsgálata analitikai és szimulációs módszerekkel;
- Por- és gázrobbanási jelenségek vizsgálata, robbanás elleni védelem tervezése, rendszerbiztonságtechnika, veszélyanalízis, túlnyomás elleni védelem;
- Nyomástartó edények, csővezetékek, tárolótartályok tervezése, vizsgálata analitikai, szabványi és szimulációs eszközökkel;
- Kompresszor vezetékben kialakuló akusztikus lengések vizsgálata;

- Környezetvédelem, LCA-bázisú technológia és termék fejlesztés, potenciális környezeti hatások számszerűsítése, prioritási sorrend felállítása.

Vegyipari gépészeti területen foglalkozunk technológiai folyamatokhoz kapcsolódó vegyipari műveletek elméleti és szimulációs számításával, folyamatok modellezésével, nyomástartó rendszerek és berendezések szilárdsági tervezésével, folyamatok numerikus áramlástan szimulációjával, vegyipari műveletek műveletanalitikai, szimulációs számításával, technológiai rendszerek folyamatszimulációval történő elemzésével, nyomástartó berendezések szilárdsági feszültséganalízisével, szabványos szilárdsági méretezések elvégzésével, tárolótartályok tervezésével, 2D/3D statikus, valamint dinamikus CFD (Computational Fluid Dynamics) analízisek készítésével.

DUSTLAB – Robbanás-biztonságtechnikai vizsgálatok területén foglalkozunk porok, gázok és gőzök és hibrid keverékek robbanástechnikai paramétereinek meghatározásával, európai és amerikai szabványok szerinti vizsgálatok elvégzésével, amelyek: Go/No go teszt, robbanási jellemzők (Pmax, KSt, Kg), Alsó robbanási határkoncentráció – LEL Lower Explosion Limit, porréteg legkisebb gyulladási hőmérséklet – LIT Layer Ignition Temperature, minimális gyújtási energia – MIE - Minimum Ignition Energy, porfelhő gyulladási hőmérsékletének – MIT - Minimum Ignition Temperature, oxigén határkoncentráció – LOC Limiting Oxygen Concentration meghatározás.



Robbanóképesség vizsgálata

A **Process Safety - rendszerbiztonságtechnika** az előző évtizedekben az egyik fő kutatási területünk volt, amely az elmúlt 2-3 évben újra reneszánszát éli. Ortutay Miklós és Joó Gyula nyugalmozott kollégáink

közreműködésével több üzem vizsgálatát végeztük el a BorsodChem Zrt. részére (WNA2, MNB, Anilin, OSBL, HCl konverzió). Ezen kutatások eredményei közvetlenül beépültek az oktatásba a *Technológiai rendszerbiztonsági szakmérnök* képzés keretein belül. Kompetenciáink: technológiai folyamatok rendszerbiztonságtechnikai elemzése, túlnyomás és vákuum elleni védelem eszközeinek kiválasztása, biztonsági szelepek szimulációs és laboratóriumi vizsgálata, robbanásveszélyes technológiák robbanás elleni védelmének tervezése, technológiai rendszerek veszélyelemzése, veszélyességelemzése, elemzéshez kapcsolódó műveleti elméleti és szimulációs számítások elvégzése, folyamatok modellezése, rendszerek túlnyomáshatárolásának tervezése, tűzbekkerülés elemzése, lefűtató rendszerek vizsgálata, technológiai rendszerek túlnyomás és vákuum elleni védelmének vizsgálata.

A MOL Petrolkémia Zrt. területén működő biztonsági szerelvényvizsgáló laboratórium volt a bázisa a hazai és nemzetközi vonatkozásban elfogadott – hatóságok számára is végzett – **biztonsági szelepműnősítő vizsgálatoknak** (típus-, egyedi vizsgálat). A kutatások során neves európai szerelvénygyártó cégekkel (ARI, ELFAB, GUR, HERL, LESER, SAPAG) alakítottunk ki kapcsolatot.

A **por- és gázrobbanásokkal** kapcsolatos kutatómunka a robbanási veszély, a porrobbanási jellemzők meghatározására, a robbanás elleni védelemre és a robbanásveszélyes töltetű berendezések, ill. készülékek (silók, porszűrők, tároló tartályok) biztonságtechnikai vizsgálatára irányul.

A tanszék kutató-fejlesztő tevékenységét reprezentáló néhány jellegzetes, külső megbízás alapján végzett tanszéki munka az elmúlt tíz évből:

- Porleválasztó berendezés lefűvamos robbanás elleni védelmének tervezése, Industry-Tech Kft. 2021.
- Kompakt vízűtősű folyadékűtő MSZ EN 13445 szabvány szerinti szilárdsági ellenőrzése, gÉPítÉsz Kft. 2021.
- Innovatív vízóra boks fejlesztéséhez szimulációs vizsgálatok elvégzése. HD-ROTATECH Kft. 2021.
- Keverő tartály belső csőspirál rendszer áramlástan és szilárdsági vizsgálata, Gyémánt-Net Kft. 2021.
- Hő hatására duzzadó vízbázisú és oldószeres tűzvédő festék kifejlesztésére irányuló feladatok végrehajtása. Ablonczy Vegyitermék Technikai Kft. 2020.
- HPM/WNA2/MNB/OSBL/HCl konverzió technológiák - Nyomástartó berendezés, rendszer nyomáshatárolás biztonsági felülvizsgálatainak elvégzése BorsodChem Zrt. 2020.
- AKG saját gyártmányú öntött karimás DN150 PN40 tolózárának szilárdsági vizsgálata az

- MSZ27003 szabványnak megfelelően, az atomerőművi előírásokhoz illeszkedően ABOS2 (FBOS2) osztályba sorolás feltételek kielégítésére TS = 300 °C PS = 40 bar alábbi részfeladatok szerint. AKG Kft. 2020.
- MOL Petrolkémia Olefin-1 üzemében működő pirolízis kemencék kvencshűtőinek szilárdsági ellenőrzése, stresszanalízis elvégzése véges elemes számítással, szakvélemény elkészítése a repedések gyökérokáról, valamint javaslat kidolgozása a megbízhatóság javítására Mol Petrolkémia Zrt. 2020.
 - Olefin 1 üzemi LTE keretében történő T3101 kolonna statikai ellenőrzése Mol Petrolkémia Zrt. 2020.
 - MVM PA Zrt. Általi nukleáris minősítése megszerzése érdekében az ABOS 2, 3 biztonsági osztályokba tartozó gépészeti rendszerek és rendszerelemek átalakításával, javításával és karbantartásával összefüggően csővezetéki szerelvények gyártása és a kapcsolódó hajtások illesztése és szerelése területén. AKG Alföldi Kohászati és Gépipari Zrt. 2019.
 - Gőzturbina csapágyház olajfolyás vizsgálata Dunamenti Zrt. 2017.
 - Oxidációs kemencék robbanás elleni védelmének kialakításában érintett szerkezeti elemek szilárdsági ellenőrzése Zoltek Zrt. 2015.
 - Portermekek robbanástechikai vizsgálata különböző partnereknek: 3BH, Arconic, Aromabázis, Béflex, Borsodchem, Bunge, Coloplast, Dow Agrosiences, Dunacell, Duna-Dráva Cement, Electrolux, Energocell, ExNB, General Electric, Glashütter, Holimex, Hungrana Kft., IGA, IKEA, IMEX, Jankovics hidraulika, Kall Ingredients, Karrier, KONIFO, LaFarge, Lebelier, Meditervill, Modine Imex, Monsanto, MVM OVIT, Ongropack, Pannonoil, Parat-Ungarn, PGB Engineering, Remy Automotive, Sapa, Schneider Electric, Schunk Carbon, Velux, Ventifilt, Veproil, Vitacell, Vitafort, Zolták stb.

- Piacorientált kutatás-fejlesztési tevékenység támogatása. Kis-közepes teljesítményű, szorpciós rendszerű, megfordítható üzemű hőszivattyú prototípusának kifejlesztése, különös tekintettel a megújuló, ill. hulladékhő energiaforrásként való hasznosítására BSX Kft. 2013.
- Generátorok olajrendszerének komplex vizsgálatára fejlesztési javaslat kidolgozása Paksi Atomerőmű Zrt. 2010.

A tanszék legutóbbi projektje az **Innovatív vegyipari gépészeti tervezés és technológiák** című kétkötetes (1498 oldal) tankönyv elkészítése, amely reményeink szerint a mind a képzeiseinket hallgatók, mind a vállalati szakemberek részére hasznos olvasmányt nyújt.

A tankönyv főbb fejezetei: Áramlástan alapismeretek, Áramlás- és hőtechnikai gépek, Csővezetéki fojtószerelvények, Vegyipari műveletek számítása és berendezései, Nyomástartó rendszerek tervezése, Vegyipari rendszertechnika, Vegyipari biztonságtechnika, Acélszerkezetek.



Az intézet munkatársai által készített kétkötetes tankönyv (bemutató a tanszék jubileumi rendezvényén 2022)



Az 50 éves jubileumi rendezvény résztvevői 2012-ben

AZ ALAPÍTÓ PROFESSZOR – DR. FÁBRY GYÖRGY

THE FOUNDER PROFESSOR – DR. GYÖRGY FÁBRY

*Fábrly György**, *Verdes Sándor***, *Mikáczó Viktória****

ABSTRACT

The Department of Chemical Machinery, University of Miskolc, celebrates its 60th anniversary this year. These years gave continuous development, hundreds of engineer degrees, productive professional relationships, and deep friendships for all who have been part of this bond for a longer or shorter period. The person, without we could not be here today: Dr. György Fábrly, the founder of the Department. We warmly congratulate him on his 95th birthday in this year and remember his colourful and meaningful career and professional successes in the following pages.

BEVEZETÉS

A Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék idén ünnepli fennállásának 60. évfordulóját. Abban a szerencsés helyzetben vagyunk, hogy sorozatban a harmadik „kerek” évfordulón jelenhet meg cikk ebből az alkalomból a Gép folyóiratban. Ez a 60 év folyamatos fejlődést, több száz vegyipari gépészmérnöki diplomát, gyümölcsöző szakmai kapcsolatokat és mély barátságokat, szerelmeket tartogatott mindazok számára, akik hosszabb-rövidebb ideig részesei lehettek ennek a köteléknek. Aki nélkül pedig nem lehetnénk ma itt: Dr. Fábrly György, a Tanszék alapítója. Gratuláljunk neki jó szívvel az idén ünnevelt 95. születésnapja alkalmából, és a következő oldalakon emlékezzünk meg az egyetemünkhöz és a tanszékhez is kapcsolódó, rendkívül színes és tartalmas életútjáról és szakmai sikereiről!

A VEGYIPARI GÉPEK TANSZÉK ALAPÍTÁSA

Dr. Fábrly György a Budapesti Műszaki Egyetemen 1951-ben szerzett gépészmérnöki oklevelet, 2021. októberében rubinoklevelet vehetett át. A két évszám közötti idővonalra számos olyan siker tehető fel, amely nagyban hozzájárult a magyar és nemzetközi tudományos és műszaki élet fejlődéséhez.

Az ifjú Fábrly György egyetemi tanulmányait követően a budapesti Műegyetemen a Vegyipari Gépek és Mezőgazdasági Iparok Tanszékén tanársegéd majd adjunktus lett, ez után tervező szakértőként vett részt az Általános Géptervező Iroda munkájában, és a Vegytervnel is munkát vállalt.

* ny. egyetemi tanár, Miskolci Egyetem

** ny. egyetemi docens, Pannon Egyetem

*** tanársegéd, Miskolci Egyetem

1960-ban az akkori Oktatási Minisztériumban félállású alkalmazottként részt vett a felsőfokú technikumok kialakításában, így iskolateremtő adottságai hamar megmutatkoztak. A borsodi iparvidék fejlődése ekkoriban erősen vegyipari irányba mozdult, így szükségessé vált egy olyan képzés beindítása, amely a Műegyetem mellett a vegyipari gépészmérnök-utánpótlást biztosítja a térségben. A képzés helyszínéül felmerült a Veszprémi Vegyipari Egyetem (jelenleg Pannon Egyetem), hiszen az ottani vegyész-mérnöki képzést remekül kiegészítette volna ez a rokon terület. Végül az Oktatási Minisztériumban összehívott értekezlet végső döntése – többek között a már jelen lévő gépészmérnöki képzés miatt – a Miskolci Egyetemnek (akkor Nehézipari Műszaki Egyetemnek) kedvezett.



Dr. Fábrly György és az 1965-ben végzős évfolyam egy csoportja

Az Egyetem akkori rektora, Zambó János professzor úr egyértelműen támogatta a döntést, így megkezdődhetett a Vegyipari Gépek Tanszékének létrehozása. Kezdetben egyetlen szobából állt a tanszék rendelkezésére, amelyben rendkívül szoros határidővel készült el a vegyipari gépész képzés tanterve. A tárgyak oktatásában nemcsak a Kar, de az akkori Bányamérnöki és Kohómérnöki Kar oktatói is részt vettek, szakterületeinek megfelelően, így erősítve a képzés szakmai háttérét. Fábrly professzor kezdetől fogva olyan oktatógárdát alakított ki a képzésben, akik a

vegyipar élvonalából, gyakorlatban szerzett tudásanyaggal felvételre érkeztek a katedrára.

Az oktatás 1962. szeptemberében indult be a Vegyipari gépek I. és a Fizikai kémia tárgyak oktatásával. A tanszék oktatói gárdája hamarosan bővülni kezdett, először Lorencz Sándor vegyészmérnökkel, valamint Keresztes János gépészmérnök és Somló György vegyészmérnök meghívott előadókkal.

AZ ALAPÍTÁS UTÁNI ÉVEK

Munkásság a Vegyipari Gépek Tanszékén

és azon túl

Fábry György a tanszék mindössze az 1962/63-as tanévben vezette, ugyanis megbízott féléllású tanszékvezetői pozíciója mellett az Oktatási Minisztériumban teljes munkaidős állást töltött be. 1963-ban a budapesti székhelyű Felsőfokú Élelmiszeripari Technikum igazgatójává nevezték ki. A vezetői stafétát Fejes Gábor gépészmérnöknek adta át, ő maga pedig 15 éven keresztül járt vissza Miskolcra oktatni.

Eközben nyilvánvalóvá vált az igény, hogy a hallgatóságnak – megfelelő magyar nyelvű szakirodalom hiányában – sürgősen szüksége van írott jegyzetekre is. Így Fejes Gábor, Keresztes János és Lorencz Sándor közreműködésével, valamint önállóan is számos jegyzetet írt. A tanszék gárdája már az 1960-as évek végétől zászlajára tűzte egy átfogó tankönyv írását is, amely 1972-ben meg is jelent *Vegyipari gépek és műveletek* címmel, szerzői Fejes Gábor és Tarján Gusztáv voltak. A Vegyipari gépek és műveletek II. című folytatás 1975-ben érkezett Fejes Gábor és Fábry György tollából. A harmadik kötet önállóan Fábry György munkája, és 1989-ben került kiadásra. A három kötet nemcsak az akkori tudományos színvonalnak felelt meg, hanem jelenleg is a terület szakirodalmának jelentős művei.



Signum Aureum Facultatis kitüntetés átadása 2002-ben

A Kertészeti és Szőlészeti Egyetemen az ő javaslatára hozták létre az Élelmiszeripari Kart, ahol 1971. április 1-től egyetemi tanárként munkálkodott. 1973-ban a

Gödöllői Agrártudományi Egyetem Mezőgazdasági Gépészmérnöki Karán szintén egyetemi tanári kinevezést kapott, ahol – az országban elsőként – bevezette az élelmiszergépezés oktatását.

1977-1987 között a Nehézipari Műszaki Egyetem Vegyipari Gépek Tanszékének főállású egyetemi tanára volt, majd nyugdíjasként ipari tanácsadói munkát végzett. 1991-es köztársasági elnöki reaktivációját követően a Kertészeti Egyetem Élelmiszeripari Műveletek és Gépek Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára lett.

Egyéb munkássága, kitüntetései

Fábry György számos tankönyvet, szótárt, emlékkönyvet (*Vivant professores*, a Könyves Csillagok könyvsorozat 10. kötete) írt. Munkásságában megtalálható a Révai Új Lexikon szerkesztése, annak számos szócikke és rajza, továbbá a Magyarország a XX. században című kötetsorozat IV. kötete (Tudomány) szerkesztése és részben írása. Nem szakmai témájú művei például a Humor és szigor, az In memoriam Fábry Györgyné, vagy az Aranyszájú Juli.

Máig forgatott művei közé tartoznak az 1987-ben megjelent *Vegyipari gépészek kézikönyve* és a Fonyó Zsolttal közösen írt *Vegyipari műveletani alapismeretek* című könyv. Találmányaira 13 magyar, és 60 külföldi szabadalmat kapott. Munkássága elismeréseképpen megkapta a Kiváló Feltaláló kitüntetés arany fokozatát. Rajzai, festményei hazai és külföldi magángyűjteményekben is fellelhetők Svájtól Kanadáig. Érdeklődés, hogy az újpesti evangélikus gyülekezet számára oltárképet is festett.

2001-ben arany, 2011-ben gyémánt, 2021-ben pedig rubindiplomát vehetett át. Büszkeséggel gondol vissza az 1966-ban megkapott miskolci arany gépészgűrűre is.

Neki ítelték az Újhelyi-díjat, az Eötvös József-díjat, az Eötvös Loránd-díjat és a Magyar Köztársasági Érdemrend középkeresztjét. 2002-ben a Miskolci Egyetem Signum Aureum Facultatis kitüntetés adományozott számára. 2014-ben a Nemzetgazdasági Minisztérium az 1848-49-es Forradalom és Szabadságharc évfordulója alkalmából Magyar Gazdaságért Díjban részesítette.

2020-ban a „Bonis Bona – A nemzet tehetségeiért” életműdíjában részesült a tehetséggondozásban végzett kiemelkedő munkájáért.

A SZILIKÁTIPARI KÉPZÉS MISKOLCON

Ám nem csak a vegyipari gépész képzés tartozott a Tanszék színes palettájába. A '60-as években az előbbi sikeres indítása után a szilikátipari gépész képzés beindítása is napirendre került, amelyre Verdes Sándor,

1972-ben végzett szilikátipari gépész, nyugalmazott egyetemi docens a következőkben emlékezik vissza (felhasználva nemrég elhunyt tanszéki kollégánk, Völgyes Lajos nyugdíjas egyetemi adjunktus Fábry professzornak készített összeállítását).

A szilikátipari ágazati képzés szintén Fábry professzor irányításával és szervezésével indult el 1966-ban, és 1968-ban 10 fő adott be diplomatervet. Akkoriban a gépész évfolyam tíznél is több tanulókból állt, amelyből három csoport vegyipari gépész volt. A második év végén alakították ki az új szakirány csoportját úgy, hogy az egyik „vegyiparos” tanulókból lettek a „szilikátos” hallgatók.



*Dr. Fábry György a Tanszék 40 éves jubileumán
2002-ben*

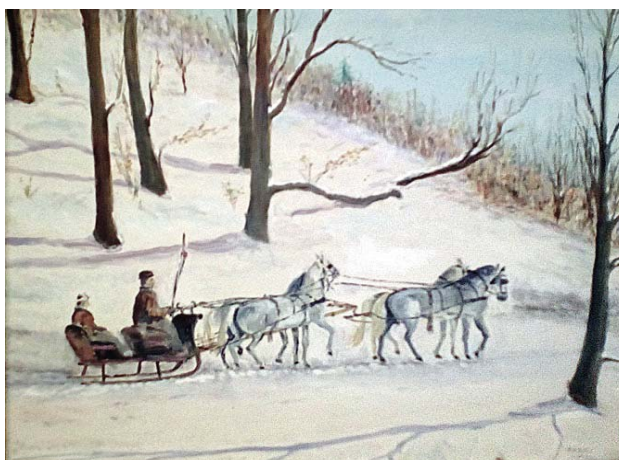
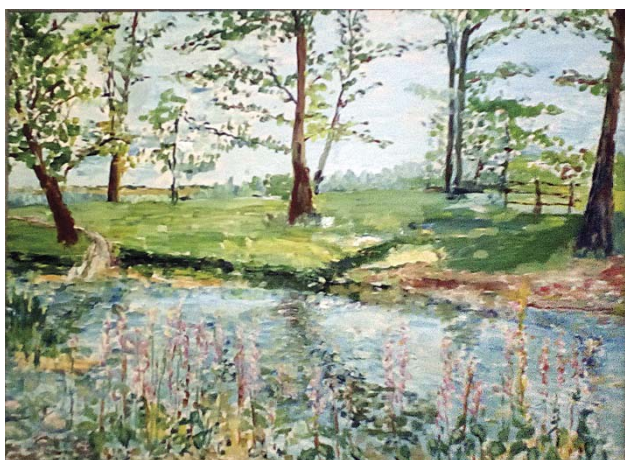
A harmadik évben még a tárgyak többsége együtt haladt a vegyipari gépészekkel. A negyedik és az ötödik év tárgyai már jobban kötődtek a szakirányos képzéshez, amelyek között például szilikátipari gépek, szilikátkémia és technológia, ömlesztett anyagok mozgatása, rakodás és tárolás is szerepelt. „A tárgyak, a

tananyag összeállítása és főleg az első oktatók kiválasztása Fábry professzor érdeme volt, amiben kiterjedt szakmai kapcsolatai nagy előnyökkel szolgáltak. Több tárgy oktatója az iparban dolgozó szakemberek közül került ki, például üveges témában Visy László (SZIKKTI), Hudák István (sajószentpéteri üvegyár vezetője), Kárpáti Sándor (TÜKI)” – emlékezik vissza Verdes Sándor. Mivel az anyatanszéken nem volt minősített oktató a szakirányú képzés vezetéséhez, a képzés 1974-ben átkerült a Szállítóberendezések Tanszékre. A szakirány gondozását Cselényi József tanársegéd után Szaladnya Sándor egyetemi tanári vette át, majd az ő 1997-es nyugdíjazását követően Gömze László egyetemi docens foglalkozott a szakcsoport irányításával.

1999-ben a szilikátipari technológiák tudományterület átkerült az akkori Kohómérnöki Karon megalakuló Nemfémes Anyagok Tanszékre, amelynek vezetésével Gömze László egyetemi docent bízta meg. A Szállítóberendezések Tanszéken a szilikátgépészeti szakcsoport vezetését Németh János egyetemi docens látta el.

„Talán nem késő jelezni, hogy olyan képzésről (és ’megszűnéséről’) van szó, amelyiknek a jelentőségét, fontosságát nem sikerült eddig felismerni, megmutatni. Kívánom, hogy találjanak egy szót, egy mondatot az írásban, az írás kapcsán, ami elősegíti a változást.” – zárja a gondolatait Verdes Sándor.

A Tanszék jelenlegi kollektívája és hallgatói nagy örömeire szolgál, hogy ismét egy kerek alapítási jubileumot ünnepelhetünk együtt, és hogy jelen írásban sikerült a történelem egy szeletét megőrizni az utókor számára. Kívánjuk, hogy a történet kulcsszereplői hosszú, munkás és boldog éveknél nézzenek elébe erőben, egészségben! Az elhunytaknak boldog nyugalmat, emléküket örökre megőrizzük, tesszük ezt ezzel az írással is!



Dr. Fábry György saját festményei „Nyár” és „Tél” címmel (fotó: családi közlés)

TERMÉSZETES HÁZAK

NATURAL HOUSES

Szendi Gerda*, Bencs Péter**

ABSTRACT

As the cost of buildings continues to rise and the damage to the environment becomes more widespread, the construction of low-energy houses is increasingly in the spotlight. As with all new technologies, the question arises as to how they might differ from conventional building methods, or whether it is worth building a passive house at all. In this research we try to answer these questions.

1. BEVEZETÉS

Az utóbbi években az üvegházhatású gázok miatt a levegő szén-dioxid koncentrációja megnőtt, amely a hőmérséklet növekedését eredményezte világszerte. Európában javarészt az épületek felelősek az üvegházhatású gázok kibocsátásáért, hiszen az elsődleges energiaforrások 40%-át az építmények emésztik fel [1]. Ezen energiák 85%-át használják fel fűtésre, világításra, vízmelegítésre. Ennek az energiának nagy részét meg tudnánk takarítani az épületek korszerűsítésével, illetve hatékonyabb fűtési és hűtési rendszerek alkalmazásával. Az épületek számára a megújulóenergia-rendszerek létesítése jelent megoldást, mint például az áramtermelés megvalósítása napelemek segítségével és mint a melegvíz biztosítása napkollektorokkal. Az Európai Unió döntése alapján 2020-ig az épületek energiafogyasztását és az üvegházhatású gázok kibocsátását 20-20% csökkenteni kell. Ennek megoldására dolgozták ki a passzív házak koncepcióját [1].

Passzív házakról már az 1800-as évekre visszamenőleg is találunk adatokat. Természetesen ekkor még nem tudták, hogy azok az épületek, amelyeket létrehoztak az alacsony energiaigényű, passzív házak őseinek mondhatók. Most ezek közül sorolunk fel néhányat. Dél-Kínában például az éshajlatot és a földrajzi elhelyezkedést egy hagyományos ház építéskor. Ebben a régióban ugyanis nincs szükség sem aktív hűtésre, sem fűtésre. Passzív házak tehát mindig is épültek ott, csak nem minősíthetők annak. Egy másik érdekes példája a korai passzív házaknak, az Izlandon épült gyepházak. A középkorban tomboló tűzifa válság miatt, az Izlandon élő embereknek szükségük volt más tüzelőanyagra. Mivel

náluk szénkitermelésre nem volt lehetőség, ezért olyan szigetelőanyagot kerestek, melyekkel házaikat sokáig melegen tarthatták. Ekkor vált elterjedté a tőzeg-gyep építkezés. Az ilyen módon készült házak tulajdonképpen passzív házak voltak, ablakok és megfelelő szellőztetés nélkül.



1. ábra Gyepházak [2]

Az első valóban működőképes és teljes értékű passzív ház azonban nem egy ház, hanem egy hajó volt [2]. Fram névre keresztelt hajóval Fritjof Nansen, norvég sarkkutató, oceanográfus a jég hátán szerette volna elérni az Északi-sarkot. A hajóról a következőket tudjuk meg Nansen Éjen és jégen át című könyvéből: „... A falak kátránypapírral voltak borítva, melyre parafa réteg került, arra rá pedig fenyő faburkolat, melyre ismét egy vastag kátránypapír réteg, amelyre egy légmentes burkolat, végül ismételen faburkolat került. A mennyezet összességében 40 cm vastag. Az ablakokat, melyeken keresztül a hideg különösen könnyen áthatolhatott, tripla ablakkal és más módszerekkel védték. Itt bent meleg és kellemes idő van. Nincs tűz a kályhában akkor sem, ha a hőmérő 5 vagy akár 30 fokkal a 0 alatt is van. A szellőzés kiváló, a ventilátoron keresztül kerül bevezetésre a friss téli levegő. Azon gondolkozunk, hogy azt a kályhát úgy ahogy van el kellene innen vitetni, mert csak útban van. „[3] (Nansen Fritjof: Éjen és jégen át, 1897).

Mára már a passzív házak fogalma konkretizálódott, sőt utóbbi években egyre több szó esik róluk és előnyeikről, de sokan máig úgy gondolják, hogy az ezzel a technológiával épült házak magas tervezési, kivitelezési költséget és bonyolult minősítési folyamatot vonzanak maguk után.

* hallgató, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi docens, intézetigazgató, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

2. MIT JELENT A PASSZÍV HÁZ VILÁGSZERTE?

A passzív házak tulajdonképpen olyan épületek, amelyek kellemes beltéri hőmérsékletet biztosítanak télen és nyáron egyaránt úgy, hogy minimális a fűtéshez vagy hűtéshez szükséges energia igényük. Tulajdonképpen egy épületszabvány, amely valóban energiahatékony, kényelmes, gazdaságos és környezetbarát egyszerre. A passzív ház nem márkanév, hanem egy mindenki számára nyitott építési koncepció és amely a gyakorlatban bizonyított.

A passzív házak koncepciója azért vált számos országban közkedvelté (például: Németország, Svájc, Ausztria és Közép-Európa) az építészek és kutatók körében, mert ezek a házak kiváló hőkomfort érzetet nyújtanak, alacsony energiafogyasztás mellett.

A Passzív házak a világ vezető koncepciói között vannak design és energiahatékony szempontjából is. 2015 végére, mintegy 25000 passzív házat regisztráltak Európa szerte. Többségüket német ajkú országokban és Skandináviában jegyezték be. Ezek az információk kétségbe vonják azt a tényt, miszerint a passzív házak koncepciója sikeresen alkalmazható melegebb éghajlatokon is [4]. Ezen kétely miatt kiválasztottuk három teljesen különböző földrajzi jellemzőkkel rendelkező országot és összevetettük ezen passzív házak építésére vonatkozó követelményrendszerét. Választásunk Németországra, Dél-Koreára és Brazíliára esett. Klíma szempontjából Németország a mérsékelt éghajlati övben fekszik. Dél-Korea a szubtrópusi monszun területen helyezkedik el. Brazíliára pedig az egyenlítői vagy trópusi éghajlat jellemző. A változatos klímán kívül azért is választottam ezeket az országokat, mert három teljesen eltérő kontinensen találhatóak. Így megvizsgálható, hogy az adott kontinenseken milyen mértékben tér el a passzív házak építési és minősítési rendszere.

Első sorban passzív házakról Németországban, pontosabban Darmstadt-ban foglalták meg, a következőket: Olyan épület, amelyben a hőkomfort (ISO 7730) kizárólag a megfelelő levegőminőséghez szükséges friss levegő térfogatáramának újra melegítésével vagy hűtésével garantálható (DIN 1946) a keringő levegő további használata nélkül.

Hazánkban elsőként a Szekér László tervezte családi ház kapta meg a hivatalos passzív ház minősítést a darmstadti Passivhaus Intituttól. Magyarországon ez volt az első német minősítésnek megfelelő passzív ház, melyet Szadán építettek 2009-ben.

A passzív házakat tehát világszerre német minősítési rendszer feltételei szerint építik, de nem mindegyikük kapja meg végül a minősítést. A rendszer alapja, hogy az emberek számára kellemesnek vélt hőmérsékletet mindössze a levegő frissen tartásához megmozgatott légtömeg után fűtésével, vagy hűtésével kell fenntartani,

az épület fűtési energiaigénye pedig nem haladhatja meg a 15 kWh/m²/év mennyiséget. A teljes energiafogyasztás nem haladja meg a 120 kWh/m² egy évben. A passzív házakban a légtömörségnek el kell érnie a legalább 0,6 l/h értéket. A fél méter vastag falak, valamint a háromrétegű ablakok, a hőcserélő szellőzőrendszer, sőt, az emberi test által kibocsátott hő hasznosításának köszönhetően ez jókora megtakarítást jelent a hagyományos téglaszerkezetű épületek 300-400 kWh/m²/év mértékű energiafelhasználásához képest. A maximális hőterhelésnek kisebbnek kell lennie 10 W/m²-nél, azért, hogy a friss levegő szállíthassa a hőt [5].



2. ábra Szadai passzív ház [5]

Ezen német alapelvek érvényesülnek Dél-Koreában is. Pontosabban az itt épült passzív házak felépítésüket tekintve maradtak ugyanazok, de az építési technikák alkalmazkodtak a koreai éghajlathoz [6]. Koreában 2009-ben kezdtek passzív házakat építeni, azóta a több mint 164 ház felelt meg a Passive House Institute Korea (PHIKO) minősítésének. A PHIKO nagy erőfeszítéseket tett, hogy bevezethessék a passzív házakat a koreai építőiparba. Ahhoz, hogy a német passzív ház modell működőképes legyen Dél-Koreában is, figyelembe kell vennünk azt, hogy Németország (Darmstadt) és Dél-Korea (Szöul) éghajlata miben különbözik. Darmstadtban az évi átlagos hőmérséklet 9,5 °C, még Szöulban 11,5 °C. Koreában alapvetően nyáron melegebb és télen hidegebb van, mint Németországban. Sőt, Koreában sokkal több a csapadék mennyisége nyáron, ami magas páratartalmat és forróságot eredményez. Koreában egész évben megfelelő a napsugárzás ahhoz, hogy a nap energiáját kihasználják. A koreai passzív házak (KPH) alapvetően nagy ablakokkal rendelkeznek a délre néző oldalukon, azért, hogy elnyelhessék azokat a napsugarakat, melyeket a tél során a ház fűtésére használnak fel. A háromrétegű üveg ablakok a szigeteléssel együtt arra szolgálnak, hogy melegen tartsák az épületet a naplemente után is. Külső árnyékolók, sötétítők beépítése pedig meggátolja a túlmelegedést nyáron. A koreai passzív ház prototípus három méretben készül, 100-tól 135 m²-ig, négyzetméter árai pedig 1500-tól 1800 dollárig terjednek. A koreai passzív ház célja, hogy azok megfizethetőek legyenek a családi házak piacán. Egy KPH a beltéri levegő minősége

fenntartása végett illékony szerves vegyületű anyagból készül. Ezek általában minden olyan szerves vegyület magába foglalnak, amelynek gőznyomása 293,15 K-en legalább 0,01 kPa, vagy ennek megfelelő illékonyssággal rendelkezik a felhasználás egyedi körülményei között. A KPH prototípusnál a légmentességre törekedtek, hogy megakadályozzák a nem szabályozható levegő áramlását. A prototípus légcseréje 50 Pa-on 0,6-tól akár 1,5 is lehet óránként, a német passzív házzal szemben, mely standard légcseréje 0,6 óránként. Sőt, ameddig a KPH megköveteli a külső árnyékolást, ahhoz, hogy korlátozzák a nyár folyamán a napfény bejutását az ablakokon keresztül, addig a német passzív házaknál csak opcionális az árnyékolás megvalósítása. A koreai passzív ház prototípusa túlmelegszik télen, az ondol, azaz hagyományos padlófűtési rendszer miatt. Még a hagyományos módon épült házak energiaszükséglete 164 kWh/m², addig prototípusát 23 kWh/m²-re korlátozták le. Azonban a passzív ház hűtési igénye 35 kWh/m², amely egy kicsivel magasabb, mint a hagyományos házé (28 kWh/m²). A teljes energiaszükséglete a passzív ház prototípusának 182 kWh/m², amely összehasonlítva a hagyományos házéval (336 kWh/m²), elég alacsony.

A National Program of Energy Efficiency in Buildings (PROCEL Edifica) 2010-ben létrehozta a Brazil Címkézési Rendszert, amely kereskedelmi, közösségi, szolgáltató épületek (RTQ-C) energiafogyasztásának mértékét határozza meg új és már meglévő épületekben. Létrehoztak továbbá ilyen rendszert a lakóházakra (RTQ-R) is. Az RTQ-R címke arra szolgál, hogy meghatározzák a lakóegységek, társasházak és azok részeinek energiahatékonysági szintjeit. A címkék meghatározzák a termo-fizikai igényeket, úgy, mint az *U*-érték, hőkapacitás, napsugárzás hasznosítása, szellőzés. Ezek az értékek a brazil bioklimatikus zónákon és a NBR 15575 teljesítményszabványon alapszanak. Az RTQ-R címkék nem csak Brazíliában szolgálnak az épületek hőteljesítményének javítására, hanem már világszerte is ez a cél. A passzív házakat eredetileg közép-európai éghajlatra tervezték, de számos kutatás irányult arra, hogy bevezessék ezeket a házakat melegebb éghajlaton is. A passzív házaknak előírás, hogy az elsődleges energiafogyasztása ne haladja meg a 120 kWh/m² egy évben. Az RTQ-R címke nem fogalmaz meg ilyen, vagy ehhez hasonló követelményt, de erőteljesen ellenzi az áram használatát a vízmelegítéshez. Ösztönzi azonban a nap energiájának kihasználását. Mindezt úgy, hogy a vízmelegítési rendszer 70%-át napból származó energiák felhasználásával igyekszik megvalósítani. Brazília eltérő éghajlati viszonyai, a forró nyarak, a magas páratartalom rendkívül nagy kihívásokat jelentenek az épületek alacsony energiafogyasztásúvá tételéhez, ugyanis a passzív házakra vonatkozó hűtési és fűtési standardok nem alkalmazhatók ezen körülmények közt költséghatékonyan. A passzív házak szigetelése nagyban függ az épület földrajzi elhelyezkedésétől. Az

európai passzív házak nem átlátszó elemeinek *U*-értéke maximum 15 W/m² lehet, az ablakaié pedig maximum 0,8 W/m². Ezeknek biztosítaniuk kell azt, hogy a napsugárzás ne hatolhasson be a hűtési szezonban, illetve azt is, hogy a sugárzás bejuthasson az épületbe a fűtési szezonban. A brazil éghajlaton két főbb típusú üvegezést ajánlatos. Az egyik Brazília északi részén használatos, ez az úgynevezett kétrétegű üvegezés nap elleni védelemmel ellátva. A másik, a tripla rétegű üvegezés ugyancsak nap elleni védelemmel ellátva, Brazília déli részén alkalmazzák [7]. Hogy egyszerűbb legyen a RTQ-R rendszer megértése, az alábbi táblázatban összefoglaltuk, a legfontosabb eltéréseket a passzív házakkal szemben.

1. táblázat Passzív házak és RTQ-R összehasonlítása [7]

	Passzív ház	RTQ-R
Alapelv	Beltéri komfort minimális energia-befektetéssel	Energia megtakarítás
Elsődleges energia-fogyasztás	Kevesebb, mint 120 kWh/m ²	Nincs kritérium
Fűtési és hűtési energiaigény	Kevesebb, mint 15 kWh/m ²	Nincs kritérium
Szellőzés	Mechanikusan megvalósított	Természetes szellőztetés

3. KÖRNYEZETRE VALÓ HATÁS

Az utóbbi időben minden eddigénél nagyobb figyelem szegeződött a globális felmelegedés negatív hatásaira, hiszen az emberiség ezen a téren a 24. órába lépett, így minden erőnkkel arra kell törekednünk, hogy megállítsuk a Föld pusztításához vezető folyamatokat. Ehhez globális összefogásra van szükség, aminek részeként nemcsak mindennapi teendőinken és életmódunkon kell változtatnunk, hanem például építkezési szokásainkon is. Napról napra erősödik az a társadalmi igény, hogy megóvjuk természetes közegünket a káros környezeti hatásoktól. A drasztikus éghajlatváltozásra reagálva az építészetben is közkedveltek a környezetkímélő, zöld megoldások. Ezen okokból kifolyólag az energiahatékony házak száma folyamatosan növekedik. Az előző pontban szereplő besorolás alapján megállapítható, hogy a hagyományos házak után a legkedvezőbb energiafogyasztással a passzív házak bírnak. Azonban fontos megemlíteni, hogy a korábban már említett fenntartható építészet megvalósítása számos tényezőtől tevődik össze. A megújuló energiaforrások használatára való törekvés mellett a kivitelezők már az építkezés során megpróbálják minimalizálni például a felhasznált víz mennyiségét, valamint a környezetre károsan ható szennyező anyagok kibocsátásának

mértékét. A fenntarthatóság lényege tehát, hogy az energia- és környezettudatosság szempontjai egyszerre jelenjenek meg az építkezés során. A mai építőipar szinte csak az energiatudatosságra koncentrál. Ez azt jelenti, hogy a futószalagon készülnek az extra hőszigeteléssel ellátott, gyakorlatilag műanyagba burkolt, légmentesen lezárt és rosszul szellőző lakóházak. Nemcsak az emberek kényelmét és komfortérzetét kell figyelembe venni építésükkor, hanem a környezet terhelését is, a fenntartható földi élet reményében. Ennyi műanyaggal és környezetkárosító elem használatával azonban ez nagyon nehéz lesz [8]. Ekkor kerülnek szóba a zöld vagy öko házak.



3. ábra Ökoházak [8]

Az ökoház építése és üzemeltetése a lehető legkisebb kárt okozza a természetben. Előállításuk olcsóbb, mintha égetett agyagtégglából és betonból készülne. Ez azért van, mert az ökoház acél könnyűszerkezete harmincszor kevesebbet nyom az említett anyagok súlyánál. Tehát már az ökoház vázszerkezetének fajlagos előállítási költsége eleve jóval alacsonyabb. Az elemeket könnyebb szállítani, és vegyszeres felületkezelésre sincs szükség, ráadásul minden felhasznált elem újrahasznosítható. A legkisebb energiaigényű építőanyaggal, a fával ellentétben az acélprofilok nem gyúlékonyak, és mivel méretre gyártják őket, nem keletkezik hulladék vagy építési törmelék az építkezés során. Ma már rengeteg statisztika bizonyítja, hogy egy folyamatosan használt ökoház felfűtése harmadannyiba kerül, mint egy hagyományos épületé [8].

Az ökoház tehát nemcsak energiatakarékossága miatt jövőbe mutató, hanem azért is, mert az építőanyagokat ugyancsak környezettudatos eljárásokkal állítják elő. A megfelelő hőmérsékletek biztosításáról napkollektor, hőszivattyú, valamint a szélenergia gondoskodik, valamint víz- és energiatakarékos szennyvíztisztító vagy esővízgyűjtő megoldások egész sorát alkalmazzák.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az épületek energiaigényének csökkentése, a széndioxid kibocsátás redukálása, és a globális felmelegedés megakadályozása érdekében meg kell találnunk az arany középutat. Azt már tudjuk, hogy a hagyományos házakhoz képest a passzív házakba éri meg

inkább befektetni. Illetve azt is megállapítottam, hogy az energiaigénye a zöld vagy ökoházaknak a legalacsonyabb. A hagyományos és passzív házak építéskor alkalmazott nagy tömegű építőanyag mozgatásához, rakodásához, beépítéséhez nagy energiafogyasztású speciális gépek szükségesek, melyek koránt sem mondhatóak környezetbarátoknak. A könnyű acélszerkezetes ökoteknológia esetében mindezekre nincs szükség. Azonban nem az építkezés során keletkezik a környezeti károk jelentős része. Az épületek használatuk során folyamatos hatást gyakorolnak a környezetükre. Magyarországi viszonyok között a legnagyobb szennyezés a fűtésből ered, éppen ezért véleményünk és a korábbi pontokban meghatározott adatok szerint a jövőben célszerű lenne a zöld házak építését részesíteni előnyben, ugyanis ezek nevezhetők a leginkább természethez közeli házaknak, tehát természetes házaknak.

6. IRODALOM

- [1] Mihai, M., Tanasiev, V., Dinca, C., Badea, A., & Vidu, R. (2017, June). Passive house analysis in terms of energy performance. *Energy and Buildings*, 144, 74–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.025>
- [2] Anmerkungen zur Geschichte [Passipedia DE]. (n.d.). Retrieved October 12, 2022, from https://passipedia.de/grundlagen/anmerkungen_zur_geschichte
- [3] Nansen, F. O. N. S. (2022, October 12). Fram over polhavet: den norske polarfærd 1893-1896 1897 [Leather Bound]. Generic.
- [4] Fokaides, P. A., Christoforou, E., Ilic, M., & Papadopoulos, A. (2016, December). Performance of a Passive House under subtropical climatic conditions. *Energy and Buildings*, 133, 14–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.09.060>
- [5] Szadai passzív családi ház. (n.d.). <https://www.epiteszforum.hu>. Retrieved October 12, 2022, from <https://epiteszforum.hu/szadai-passziv-csaladi-haz>
- [6] Lee, J., McCuskey Shepley, M., & Choi, J. (2020, July). Exploring the localization process of low energy residential buildings: A case study of Korean passive houses. *Journal of Building Engineering*, 30, 101290. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101290>
- [7] Tubelo, R., Rodrigues, L., & Gillott, M. (2014, May 23). A Comparative Study of the Brazilian Energy Labelling System and the Passivhaus Standard for Housing. *Buildings*, 4(2), 207–221. <https://doi.org/10.3390/buildings4020207>
- [8] Passzív-, aktív- és ökoház: miben különböznek? *Lakáskultúra Magazin*. Retrieved October 12, 2022, from <https://www.lakaskultura.hu/felujitas/passziv-aktiv-es-okohaz-miben-kulonboznek/>

NANORÉSZECSKÉKET ELŐÁLLÍTÓ ELEKTROMOS REAKTOR NUMERIKUS MODELLEZÉSE

NUMERICAL MODELING OF AN ELECTRIC REACTOR PRODUCING NANOPARTICLES

Bolló Betti*, Szabó Szilárd**, Vanyorek László***

ABSTRACT

The Institute of Chemistry wanted to produce carbon nanotube coated zeolite beads catalyst support in a newly designed rectangular electric oven but failed during the experiments. Asked as a question why carbon nanotube production was not succeeded. It was suggested that the temperature distribution in the reactor was not right. Therefore, the task is the thermal analysis of a reactor producing a carbon nanotube with numerical simulation. After analysing the results obtained by the CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation, we made suggestions on how to repair more even temperature field in the reactor.

1. BEVEZETÉS

A Miskolci Egyetem Kémiai Intézetének egyik fő kutatási területe szén nanocső alapú katalizátorok fejlesztése és előállítása [1, 2], amihez rendelkezésre állt egy csőkemence. A szén nanocsővek előállítására a katalitikus kémiai gőzfázisú leválasztás módszerét, a CCVD eljárást alkalmazzák. Az eljárás során nagy hőmérsékletre (750 °C) fűtött csőreaktorban, egy katalizátorréteg (pl. nikkeltartalmú zeolit) felületére, szerves vegyületek gőzét áramoltatják (pl. butil-amint), amely termikus bomlást szenved és szén nanocsővek keletkeznek a katalizált reakció során. Méretnövelés érdekében módosítani kívánták a korábbi, sikeresen alkalmazott reaktorkonstrukciót, és a csőreaktor helyett, egy acélból készült, téglatest geometriájú reaktort terveztek alkalmazni. A korábbi kísérleti elrendezés mellett hatékonynak bizonyult eljárás, az új reaktorkonstrukció alkalmazásakor nem hozta meg a várt eredményeket. A felmerült probléma tisztázása és megoldása érdekében rendelkezésükre bocsátották az említett, négyzetes kialakítású, elektromosan fűtött reaktort. A reaktorban szén nanocsővekkel borított zeolit gyöngyöket, az úgynevezett „hordozó a hordozón” („support on support”) típusú nanokompozitot [1, 2] akartak előállítani, de a kísérletek erre vonatkozóan eredménytelennek bizonyultak. Mivel a nanoszerkezetű szénformák előállításának szűk hőmérséklet határai vannak [3], a kemence felfűtése és

kellő hőmérsékleten tartása kritikus. A kemencében két helyen van hőmérséklet mérés, amely alapján megpróbálták a folyamatot szabályozni, sikertelenül. Felmerült a kérdés, hogy a hőmérők értékmutatása és a nanocsővek keletkezési helyén kialakuló valódi hőmérséklete között milyen kapcsolat áll fenn. Ennek kiderítésére célszerű numerikus szimulációt alkalmazni. A megfelelően felépített CFD (Computational Fluid Dynamics) szimuláció alkalmas a kialakuló áramlási és hőtani folyamatok finomstruktúrájának meghatározására. Korábbi tanulmányinkban már vizsgáltunk numerikus szimuláció segítségével tüzeléstechnikai berendezéseket, ahol meghatároztuk a változó fűtés hatására a kemencetérben, valamint az acéltuskóban a felmelegedés hatására kialakuló hőmérsékletmezőt [4]. Egy pirolízis kemence konvekciós zónájában észlelt korróziós és eróziós károsodások vizsgálatához is készítettünk CFD szimulációkat, ahol a szimuláció segítségével meghatároztuk azokat a részeket, ahol a leghamarabb alakulhat ki korrózió [5]. Ezenkívül háztartási hűtőbútorban is végeztünk numerikus számításokat, ahol a hűtőszekrényben lezajló hőtáviteli- és áramlási folyamatok megismerése volt a fő cél [6].

A numerikus modellezésben szerzett tapasztalataink alapján célul tűztük ki az alkalmazott szén nanocső előállítási módszer ellenőrzését CFD technikával. Mindezt úgy, hogy meghatározzuk a reaktorban kialakuló hőmérséklet- és sebességeloszlást, és az eredmények alapján javaslatokat adjunk, hogyan oldható meg a reaktorban a nanorészecskék előállítása.

2. SZÁMÍTÁSI MÓDSZER

Az elektromos kemencébe került beépítésre a nanocső előállítására szolgáló légtömör reaktor, amely egy rozsdamentes acélból készült téglatest kialakítású tér (390mm×160mm×96mm). A katalizátort egy porcelán tégelybe helyezve rakják be a reaktor aljába rakott samott téglára (1. ábra). A samott téglák alkalmazásának célja, hogy a reaktorkamra alján egyenletesebb hőmérséklet-eloszlás alakuljon ki, illetve a katalizátor ne melegedjen fel túlságosan az acél falazattól. A

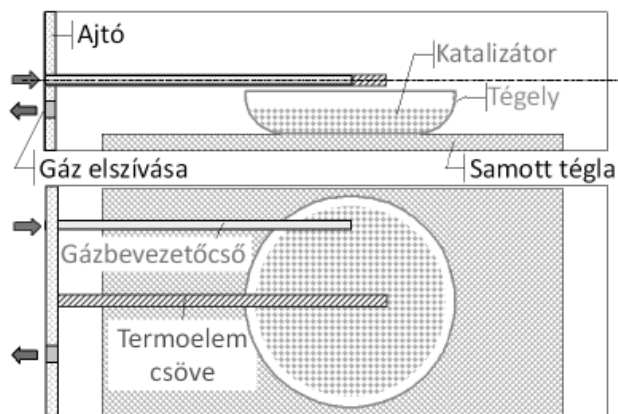
* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Kémiai Intézet

kémiai reakcióhoz szükséges gáz bevezetése a reaktor ajtaján egy csövön keresztül történik, ami benyúlik egészen a zeolitot tartalmazó tégely közepéig. Az ajtó közepén egy termoelem is benyúlik, egészen a katalizátort tartalmazó csésze fölé. A gáz elszívása szintén a kamraajtón keresztül történik, ami aszimmetrikusan van elhelyezve, a bevezetett gázcsőnek a másik oldalán, a kamra alsó harmadában.

A geometria elkészítése és hálózása az Ansys Fluent programcsomaggal történt, ami a véges térfogatok módszerét alkalmazza. A geometria megrajzolása után következett a hálózás, ahol arra törekedtünk, hogy hexaéder cellákkal hálózunk be a teret, hogy minél kevesebb legyen az elemszám, ezáltal csökkentve a számítás idejét is. A reaktor és az ajtó vastagságát hexaéder cellák alkotják, míg a reaktor belsejét csak tetraéder elemmel tudtuk behálózni, mivel ott helyezkedik el a nitrogén bevezető 6 mm átmérőjű cső, illetve a hőmérséklet mérésére alkalmazott 8 mm átmérőjű termoelem, ezenkívül egy porcelánedény is, melyben a katalizátor helyezkedik el. A 2. ábrán a tégelynél félbevágott hálókialakítás látható. A modellezés során a kémiai reakció szimulálását nem vállaltuk, mivel csak a reaktorban lévő hőmérséklet- és sebességeloszlás meghatározása volt a cél, ezért az edényben lévő katalizátort összefüggő anyagként adtuk meg. Először egy durva hálót készítettünk, amely ~5 millió cellából állt, de az ezen elvégezett teszt szimulációk azt mutatták, hogy hálósűrítésre van szükség a kritikus részeken, ezért végül ~7 millió elemből alakítottuk ki a hálózást.

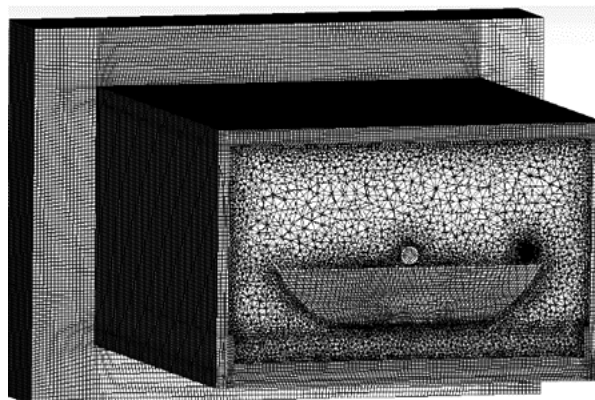


1. ábra Geometriai kialakítás

2.1. Kezdeti- és peremfeltételek

A reaktorba légköri nyomáson lép be a 300ml/perc mennyiségű és 25°C hőmérsékletű nitrogén gáz. Mivel a hőmérséklet- és a sebességeloszlást vizsgáljuk, ezért nem foglalkozunk a lejátszódó bonyolult kémiai reakciókkal és folyamatokkal, így a gázbevezető csövön a nitrogénnek megfelelő mennyiségű és hőmérsékletű levegőt juttatunk a reaktor terébe. A reaktor ajtaján lévő kilépníyláson át légköri nyomású térbe való

kiáramlással számolunk. A kemence fűtését kétféleképpen modellezhetjük. Egyik esetben a felületi hőáramot kell megadni. Ez elvileg a kemence villamos fűtőteltjesítményéből és a villamos fűtőszálak elhelyezéséből becsülhető. A másik módszer szerint a kemencefal hőmérsékletét adjuk meg és tartjuk állandó értéken. Megállapodtunk, hogy villamos adatok, valamint a kemence belső szerkezetének ismerete híján ez utóbbi szimulációs technikát alkalmazzuk.



2. ábra Hálókialakítás a tégely körül

Kezdeti peremfeltételként a kemencefalon a főntebbiek szerint konstans hőmérsékletet írtunk elő. Több esetet vizsgáltunk meg, ahol a fal hőmérsékletét 600, 650, 700, 750 és 800°C-ra állítottuk be. A bemeneten 25°C-os levegőt írtunk elő, amelynek sebességét a csőátmérőből és a megadott 300 ml/perc térfogatáramból számoltuk ki: $v_{be}=0,707$ m/s.

A reaktor, illetve a benne lévő anyagok tulajdonságai (sűrűség, fajhő, hővezetési tényező) függenek a hőmérséklettől, így ezen anyagok hőmérséklet függvényeit az 1. táblázatban adtuk meg [7].

1. Táblázat A felhasznált anyagok tulajdonságai

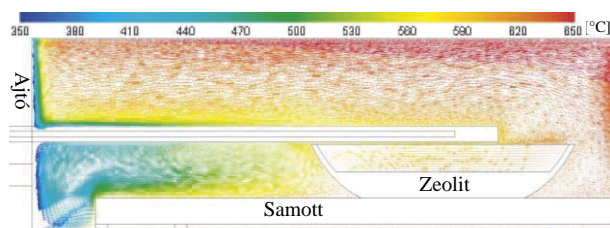
Rozsdamentes acél	
$\rho(T) = 8068,8 - 0,36225 \cdot T - 9,0578 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$	
$c_p(T) = 402,56 + 0,25632 \cdot T - 4,4795 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$	
$\lambda(T) = 5,7415 + 2,8987 \cdot 10^{-2} \cdot T - 8,5189 \cdot 10^{-6} \cdot T^2$	
Samott	
$\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$	
$c_p(T) = 1414,5 + 0,49482 \cdot T$	
$\lambda(T) = 1,239 + 3,626 \cdot 10^{-4} \cdot T + 3,571 \cdot 10^{-8} \cdot T^2$	
Porcelán	
$\rho = 2350 \text{ kg/m}^3$	
$c_p(T) = 233,47 + 2,8233 \cdot T - 8,5893 \cdot 10^{-4} \cdot T^2$	
$\lambda(T) = 0,2016 + 2,425 \cdot 10^{-3} \cdot T - 7,366 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$	

3. EREDMÉNYEK

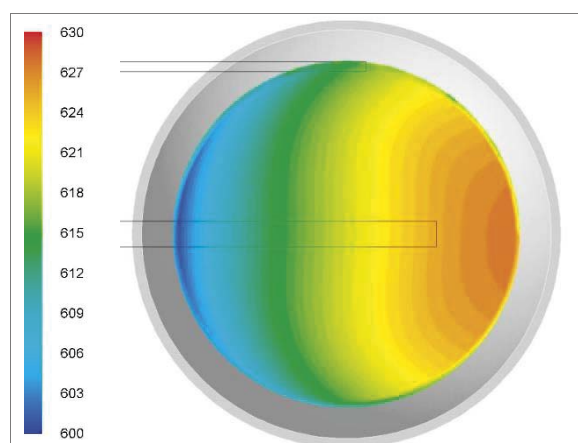
A reaktorban különböző fűtési hőmérsékleten vizsgáltuk meg a reaktorban létrejövő hőmérséklet- és sebességmezőt. Az eredményeket 650°C kemencehőmérsékletnél mutatjuk be. A 3. ábrán

láthatóak a sebességvektorok a hőmérséklet szerint skálázva a reaktor középsíkjában. A kemence fűtetlen fémborítású, samott bélésű ajtaja jelentős hűtő hatást fejt ki a reaktor belsejére, így a reaktortérben egyenetlen hőmérséklet-eloszlás alakul ki. A termoelem feletti részben közel a kemencefal fűtési értékét éri el a hőmérséklet, míg a reaktor ajtajánál jóval hidegebb a levegő.

A hűtő hatás következtében az ajtó belső falán kialakuló relatíve hidegebb levegő egy lefelé irányuló áramlást indukál. A reaktor alját elért levegő vízszintes irányba fordul, de szembe találja magát a reaktor aljára behelyezett samott lappal. Ezt kikerülve felfelé indul, majd a lap tetejét elérve újra vízszintesbe fordul és így éri el a katalizátort tartalmazó tégelyt. A levegő ~100°C-kal hűvösebb, mint a kemence falhőmérséklete, aminek hatására a tégelyben lévő zeolitban egyenetlen hőmérséklet alakul ki, mintegy 27°C különbséggel (4. ábra). Ez a nano termék képződésére kedvezőtlen hatással van. A samott téglát azért került a reaktorkamrába, hogy egyenetlesebb hőmérséklet-eloszlás alakuljon ki a tér alján, valamint a katalizátor ne melegedjen fel túlságosan az acél falazattól. Célszerűbb lenne a samott téglát helyett egy állványra helyezni a tégelyt, így alatta a hidegebb levegő egyenesen lehűti az egész tégelyt és nagy valószínűséggel nem jön létre a zeolitban ekkora hőmérsékletkülönbség.



3. ábra A reaktor középsíkjában a sebességvektorok a hőmérséklet szerint skálázva [°C]

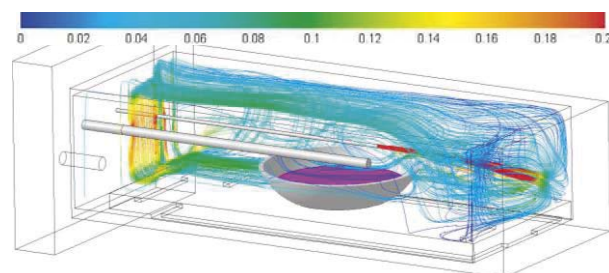


4. ábra A zeolit felszínén kialakuló hőmérsékletmező

Az 5. ábra a gázbevezető csőből érkező gáz áramvonalait mutatja a reaktortérben. Az ábrán jól

látszik, hogy a gázbevezető cső vége a tégely felett van, de nem középen, hanem a szélén. Az itt érkező gáz jól körül határolt éles sugárban döntő részében elhalad a tégely fölött. Ebből adódóan nem fog bekövetkezni a megfelelő kémiai reakció. Az ábrán jól megfigyelhető, hogy a csőből érkező levegő a falnak ütközik és még az ütközés után is nagyon kis része halad el a csésze felett. Ezenkívül az is látható, hogy az áramlás aszimmetrikus, a gázbevezetés nem a megfelelő helyen van.

A különböző kemence hőmérsékletekhez tartozó eloszlások hasonló tendenciákat mutatnak. A kemence különböző felfűtési hőmérsékletekhez tartozó számítási értékeket az 1. táblázat tartalmazza. A táblázatban összefoglaltuk a termoelem hőmérsékletét (T_M), a csészében elhelyezett zeolit minimális (T_{zmin}), maximális (T_{zmax}) és átlaghőmérsékletét ($T_{z\text{átlag}}$), illetve a zeolit hőmérsékletkülönbségét ($T_{zmax} - T_{zmin}$). Azt tapasztaltuk, hogy a hőmérséklet növekedésével a kettő közötti különbség ($T_{zmax} - T_{zmin}$) növekszik, 600 °C-nál 24,5 °C az eltérés, míg 800 °C-nál már 34,7 °C. A nagy hőmérsékletkülönbségek miatt a reakció nem megfelelően fog lejátszódni a reaktorban, és nem az elvárt nanoszerkezetek jönnek létre.



5. ábra Áramvonalak a sebesség szerint skálázva [m/s]

1. Táblázat Különböző hőmérsékletre felfűtött kemencében kialakuló hőmérsékletértékek [°C]

T	T_M	T_{zmin}	T_{zmax}	$T_{z\text{átlag}}$	$T_{zmax} - T_{zmin}$
600	541.0	553.7	578.3	570.1	24.5
650	587.0	600.6	627.7	618.8	27.1
700	601.9	628.5	659.5	649.2	31.0
750	679.3	695.2	727.5	716.8	32.3
800	726.6	742.9	777.7	766.2	34.7

Ezenkívül a zeolit átlaghőmérséklete és a termoelem által mutatott érték különbségét, illetve a kemencefal beállított (T) és a termoelem hőmérséklete közti különbséget is megvizsgáltuk. Azt tapasztaltuk, hogy a kemence és a termoelem között ($T - T_M$) 60-70 °C hőmérsékletkülönbség van, vagyis a reaktortérben jóval alacsonyabb lesz a hőmérséklet, mint a falhőmérséklet. A zeolit átlaghőmérséklete és a termoelem által mutatott hőmérséklet között ($T_{z\text{átlag}} - T_M$) is jelentős különbséget találtunk, 30-40 °C közötti eltérést. Mindezen értékek rávilágítanak arra, hogy a mért értékek és a folyamat

szempontjából releváns hőmérsékletek közti különbséget a folyamat beállításakor figyelembe kell venni. Az értékek azt is mutatják, hogy a hőmérsékletkülönbségek a T kemence falhőmérséklettel jó közelítéssel lineárisan nőnek.

4. JAVASLATOK

A numerikus eredmények alapján a javaslatunk a következők:

- A reaktortér ajtaját célszerű jobban leszigetelni, hogy ne hűtse le annyira a belső teret, így a tégelyhez érkező levegő kevésbé hűti le a zeolitot. Mivel az ajtó mérete kicsi (160mm×96mm), a szigetelőanyag költsége nem jelent nagy költségbefektetést.
- A katalizátort tartalmazó edény alátámasztását és a kemencefaltól való elszigetelését nem egy, a kemence alját majdnem befedő samott lappal kell megoldani, hanem csak kisméretű helyi alátámasztást kell alkalmazni. Ekkor az ajtón leáramló hideg levegő a reaktor alján marad és az edény alá érve felmelegszik, de a falnál kisebb hőmérsékletű marad, meggátolva a tégelyben a katalizátor túlmelegedését.
- A gázbevezető csövet lényegesen rövidíteni kell, hogy a beérkező gáz sugar a tégely fölött már szétterülhessen és a zeolittal reakcióba léphessen.
- Célszerű lenne a termoelemet és a gázbevezetést megcserélni, így a beérkező gáz a tégely felett szimmetrikusan terülhetne szét, nem pedig féloldalasan.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A feladat egy szén nanocsöveket előállító reaktor hőtani analízise volt numerikus szimuláció segítségével. A megfelelően felépített CFD szimuláció alkalmas a kialakuló áramlástani és hőtani folyamatok finomstruktúrájának meghatározására. A vizsgálatok rámutattak arra, hogy igen jelentős szerepe van a fűtéssel nem rendelkező, s így a többi falnál hidegebb kemenceajtónak. A hidegebb és a melegebb zónák egy belső áramlást indukálnak. Erre szuperponálódik rá a kemencébe befűvott gáz hűtő és áramlást létrehozó hatása is. A különböző esetekben kapott hőmérséklet és sebességeloszlások alapján javaslatokat fogalmaztunk meg a reaktortér egyenletesebb hőmérséklet-eloszlására, azért, hogy minél nagyobb bizonyossággal alakuljon ki szén nanocső a kémiai folyamatok következtében.

A javaslatunk helyességének ellenőrzésére további szimulációkat terveztünk. Elsősorban megvizsgáljuk, hogy az ajtólap hőszigetelésének változtatásával javítható-e és milyen mértékben a reaktortér egyenletes hőmérséklet-eloszlása. Ezt a numerikus szimulációt úgy tervezzük, hogy teljesen üres lesz a reaktortér, azaz a

samottlapot és a tégelyt eltávolítjuk. Következő lépésként a samottlap nélkül, de a tégely megtartásával végeznénk szimulációkat.

A fent említett szimulációkból nyert eredmények értékelése, elemzése után újabb célkitűzések határozhatók meg, például a katalizátor helyének megváltoztatása, a gázbevezetőcső és a termoelem helyének megváltoztatása.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

This research was supported by the European Union and the Hungarian State, co-financed by the European Regional Development Fund in the framework of the GINOP-2.3.4-15-2016-00004 project, aimed to promote the cooperation between the higher education and the industry.

7. IRODALOM

- [1] PREKOB Á., HAJDU V., FISER B., KRISTÁLY F., VISKOLCZ B., VANYOREK L.: Carbon nanotube-zeolite composite catalyst - characterization and application. *Journal of Dispersion Science and Technology*, Vol.42 (2020), pp. 701-706.
- [2] VANYOREK L., PREKOB Á., BARÁTH M., NÉMETH Z., FISER B., VISKOLCZ B.: Development of nitrogen-doped bamboo-like carbon nanotubes coated zeolite beads as "support on support" catalyst for the catalytic hydrogenation of olefins. *Reaction Kinetics Mechanisms and Catalysis*, Vol.127 (2019), pp. 705-714.
- [3] VANYOREK L., MURANSZKY G., SIKORA E., PÉNZELI X., PREKOB Á., KISS A., FISER B., VISKOLCZ B.: Synthesis optimization and characterization of nitrogen-doped bamboo-shaped carbon nanotubes, *J. Nanosci. Nanotechnol.* Vol.19 (2019) pp. 429-435.
- [4] GYULAI L., ZÁMBORSZKY B., SZABÓ SZ.: Investigation of flow and heat transfer processes in furnaces by using numerical simulation. *Proc. 18th MicroCAD, International Scientific Conference, Section D, Miskolc, Hungary*, (2004), pp. 37-42.
- [5] MERTINGER V., BENKE M., SZABÓ SZ.; BÁNHIDI O., BOLLÓ B., KOVÁCS Á.: Examination of a failure detected in the convection zone of a cracking furnace. *Engineering Failure Analysis*, Vol.18 (2011), pp. 1675-1682.
- [6] BOLLÓ B., NAGY J., SZABÓ SZ.: Tömítetlenségek hatása fagyasztószekrényekben kialakuló áramlási és hőmérsékletviszonyokra. *XII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc, Magyarország* (2015), pp. 216-222.
- [7] VDI, VDI-Wärmeatlas, 7th ed., Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1994.

AKTÍV TURBULENCIAGENERÁTOR UTÁNI ÁRAM- LÁS VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF FLOW DOWNSTREAM OF AN ACTIVE TURBULENCE GENERATOR

Faragó Dávid*, Bencs Péter**

ABSTRACT

Velocity field measurements downstream of an active turbulence generator have been carried out using LDA (Laser Doppler Anemometry) measurement method. The objective of this article is to compare the results of the same turbulence generator operated in passive, jet, and active mode. The basis of comparison are velocity fields and turbulence kinetic energy distributions.

1. BEVEZETÉS

Turbulens áramlás generálásának céljával laboratóriumi szélcsatornában különböző típusú turbulencia generátorok (rendszerint rácsok) alkalmazhatók. A rács típusú turbulenciagenerátorok egyik csoportosítása alapján azokat aktív, passzív, vagy úgynevezett félaktív kategóriákba sorolhatjuk. Aktívnek nevezzük azokat a rácsokat, amelyek valamilyen külső energiabevitel (pl. villamosenergia, komprimált levegő) által mozgásba hozott elemeket tartalmaznak, passzívnak azokat, melyek nem tartalmaznak mozgó elemeket, félaktívnek pedig azokat, melyek ugyan tartalmaznak mozgó elemeket, de azokat külső energiabevitel nélkül, maga az áramlás hozza mozgásba.

Ezeket a rácsokat általában a szélcsatorna mérési szakasza előtt helyezik el olyan távolságban, hogy a mérési szakaszban a kívánt áramlási paraméterek alakuljanak ki. Vizsgálatok során előfordulhatnak olyan esetek is, amikor a szélcsatornában alapállapotban is turbulens az áramlás, ilyen esetekben a turbulenciát generáló rácsokat a turbulens kinetikus energia növelése érdekében alkalmazzzák [1-5].

A vizsgált turbulenciagenerátor egy rács, melynek rácspontjaiban rugalmas szilikonszövek kerülnek rögzítésre. Korábbi tapasztalatok alapján tudjuk, hogy szükségtelen minden metszéspontban szilikonszöveket elhelyezni, helyette saktábla mintával minden második rácsponthoz van csupán szilikonszöveg, a további rácsponthoz pedig lezárásra kerülnek, hogy rajtuk ne szökjön a másodlagos levegőáram. A rácsállandó 25 mm, így a szilikonszövek egymástól átlósan 35 mm távolságra helyezkednek el.

*doktorandusz, **egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézet Tanszéke

email: *david.farago@uni-miskolc.hu, **peter.bencs@uni-miskolc.hu

A rács legfeljebb 8 bar-os segédlevegővel látható el, melyet egy reduktor és változó keresztmetszetű térfogatárammérő segítségével szabályozunk a megfelelő térfogatáramra.

2. LDA RENDSZER

2.1. Az LDA rendszer működési elve

Az LDA, vagy lézer doppler anemometria egy a doppler jelenségen alapuló nagy pontosságú mérési eljárás. A mérés alapelve az azonos fázisban találkozó lézerefény interferenciáján alapul. A két azonos fázisban lévő lézerefény találkozásának tartományában egy olyan mérőtér fogat jön létre, ahol az interferencia következtében kialakulnak sötét, illetve világos zónák. A zónák pontos elhelyezkedése és vastagsága meghatározható a lézerefény hullámhosszának, és a két lézersugár által bezárt szögnek az ismeretében.

Amikor egy részecske áthalad ezen a mérőtér fogaton, akkor a világos interferenciaterületen felvillan, míg a sötét interferenciaterületen eltűnik. A villanásokat egy, az LDA rendszerébe beépített fotodetektor fogja fel, alakítja át villamos jellé, majd továbbítja a jelfeldolgozóba. A felvillanások között eltelt időből következik a továbbított villamos jel frekvenciája, amiből pedig számítható az áthaladó részecske sebessége. A két lézersugár fázisazonossága ebben az esetben úgy biztosított, hogy ugyanazt a lézersugarat osztják ketté egy Bragg-cella segítségével, majd az optika segítségével a kettő sugarat irányítjuk egy pontra.

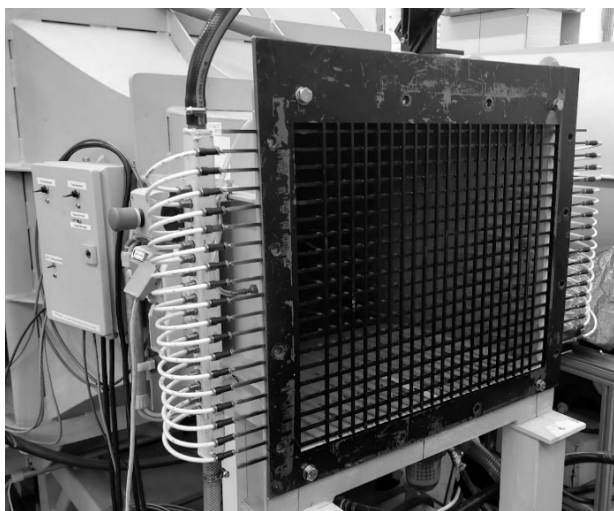
A lézer doppler anemometria ennek megfelelően egy beavatkozásmentes mérési módszer, nem szükséges mérőberendezést juttatni az áramlásba a sebességének mérésére. Viszont szükség van megfelelő mennyiségű és méretű nyomjelző részecskére, aminek a paraméterei az áramló közeg tulajdonságaitól és az áramlás jellegétől függenek. Egy adott hullámhosszú lézer segítségével egy sebességkomponens mérhető, azonban 2, ill. 3 különböző színű lézer egyidejű alkalmazásával mérhető kettő, vagy mindhárom sebességkomponens.

2.2. Vizsgált mérési esetek

A vizsgált turbulenciagenerátor mögött kialakuló áramlás jellemzőit egy nyitott, Göttingen típusú szélcsatornában vizsgáltuk három üzemállapotban: **passzív, jet,**

illetve **aktív** üzemmódban. Passzív üzemmódban a másodlagos térfogatáram zérus. A jet és aktív üzemmódok paramétereit előzetes vizsgálatok alapján kerültek megállapításra. Jet üzemállapotban a lehető legnagyobb térfogatáramot választjuk, aminél még konzisztensen nem jönnek rezgésbe a szilikonsövek, aktív üzemállapotban pedig a legkisebb térfogatáramot választjuk, aminél már minden fő áramlási sebességnél rezgésbe jön az összes szilikonsző.

A vizsgált sebességek a három üzemállapotban [1; 2; 3; 4; 5] m/s. A sebességprofilok összehasonlítása egy függőleges síkon, valamint a középvonal mentén történik. A méréseket LDA mérési eljárás segítségével végezzük el 2D-ben, amelynek eredményeként x és z irányú sebességkomponenseket kapunk.



1. ábra. A turbulenciagenerátor a szélcsatornán.

2.3. Tömegáram-arányok, Reynolds-számok meghatározása

Az eredmények kiértékeléséhez szükséges a fő áramlás és a másodlagos áramlás tömegáram-arányának, valamint az áramlásokra jellemző Reynolds-számnak az ismerete. Ezek meghatározásához az egyes esetekben az alábbi mennyiségek mérésére volt szükség:

- fő áramlás sebessége: [1; 2; 3; 4; 5] m/s
- környezeti hőmérséklet
- környezeti nyomás
- környezeti levegő relatív páratartalma
- másodlagos levegő térfogatárama
 - Passzív: $Q_{Std} = 0 \text{ Nm}^3/\text{h}$
 - Jet: $Q_{Std} = 80 \text{ Nm}^3/\text{h}$
 - Aktív: $Q_{Std} = 120 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- másodlagos légáram hőmérséklete
- reduktor előtti nyomás
- reduktor utáni nyomás

A térfogatárammérő esetén (2. ábra, bal oldal) a kalibrációs értékek ismeretében erőegyensúlyi egyenletekből levezethető az alábbi korrekció-formula, amellyel

megkapjuk a normál-térfogatáramot az üzemi paraméterek függvényében:

$$Q_{Std} = \sqrt{\frac{p_{ref}}{p}} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_{ref}}} \cdot Q_{ref} \quad (1)$$

ahol Q_{Std} a normálállapotra vett térfogatáram, p az üzemi abszolút nyomás, T az üzemi abszolút hőmérséklet, Q_{ref} a kalibrált normálállapotra vett térfogatáram (leolvasott érték), p_{ref} a kalibrált abszolút nyomás (ismert érték) a T_{ref} : kalibrált abszolút hőmérséklet (ismert érték).

A standardállapotra vonatkozó nyomás és hőmérséklet ismeretében pedig az előzőleg kapott normál-térfogatáramból meghatározható az aktuális térfogatáram:

$$Q = \frac{T}{T_{Std}} \cdot \frac{p_{Std}}{p} \cdot Q_{Std} \quad (2)$$

ahol Q : aktuális térfogatáram, p_{Std} : standard nyomás, T_{Std} : standard abszolút hőmérséklet. A sűrűség számítása a Teten-formula alapján az alábbi képlettel számítható:

$$\rho_{humid\ air} = \frac{1}{T} \left[\frac{p - \varphi \cdot 0.061078 \cdot 10^t + 237.3}{R_d} + \frac{\varphi \cdot 0.061078 \cdot 10^t + 237.3}{R_v} \right] \quad (3)$$

ahol $\rho_{humid\ air}$ a nedves levegő sűrűsége, p az üzemi abszolút nyomás, T az üzemi abszolút hőmérséklet, t az üzemi hőmérséklet Celsiusfokban, φ a nedves levegő relatív páratartalma, R_d száraz levegő specifikus gázállandója, R_v a vízgőz specifikus gázállandója.



2. ábra. Rotaméter (balra), valamint a reduktor, az analóg nyomásmérő (1), a K-típusú hőelem rendszerbe vezetése (2), megcsapolás nyomásméréshez a reduktor után (3), illetve előtt (4)

Az egyes esetekre vonatkozó Reynolds számok meghatározásához meg kell még határozni a dinamikai viszkozitást, a kinematikai viszkozitást, valamint a

jellemző hosszmeretet. A dinamikai viszkozitás meghatározása Chapman–Enskog formula segítségével:

$$\mu = \frac{b \cdot T^{\frac{3}{2}}}{T+S} \quad (4)$$

ahol T : üzemi abszolút hőmérséklet, b a közegre jellemző állandó (levegőre $b = 0,000001458$), S a közegre jellemző állandó (levegőre $S = 110,4$). A dinamikai viszkozitás és a sűrűség ismeretében számítható a kinematikai viszkozitás:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

A jellemző hosszmeret téglalap keresztmetszetű csatornában az alábbi képlet segítségével számítható:

$$L = \frac{4A}{K} \quad (6)$$

ahol A a szélcsatorna mérőterének keresztmetszete, K a szélcsatorna mérőterének kerülete. A fentiek birtokában pedig számíthatóvá válik a Reynolds-szám:

$$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} \quad (7)$$

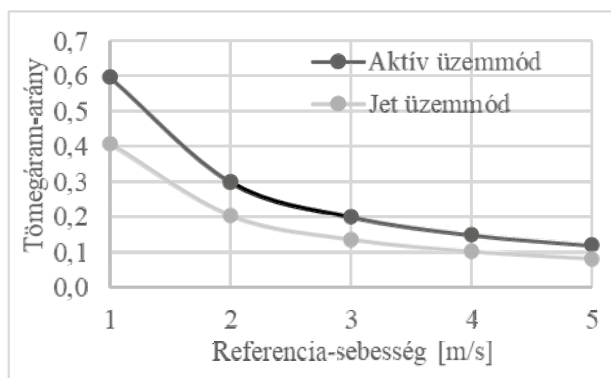
ahol u áramlási sebesség.

Az egyes esetekre vonatkozó tömegáram-arányok és Reynolds-számok az 1. táblázatban láthatók:

1. táblázat. Tömegáram-arányok és Reynolds-számok a vizsgált esetekben.

Referenciasebesség	5 m/s	4 m/s	3 m/s	2 m/s	1 m/s
Vizsgált eset: aktív					
Tömegáram-arány	0,1199	0,1494	0,1998	0,2987	0,5964
Reynolds-szám	1,73E+05	1,38E+05	1,03E+05	6,85E+04	3,42E+04
Vizsgált eset: jet					
Tömegáram-arány	0,0817	0,1021	0,1359	0,2035	0,4071
Reynolds-szám	1,73E+05	1,38E+05	1,04E+05	6,91E+04	3,45E+04
Vizsgált eset: passzív					
Reynolds-szám	1,73E+05	1,38E+05	1,04E+05	6,92E+04	3,46E+04

A 3. ábrán az aktív és a jet üzemmódok közötti tömegáram-arányok összehasonlításának vizualizálása látható. A tömegáram-arány a másodlagosan, a turbulenciagenerátoron keresztül bevezetett levegő tömegáramának és a szélcsatorna által szállított tömegáramnak a hányadosa.



3. ábra. Tömegáram-arányok összehasonlítása aktív és jet üzemmódban

2.4. Mérési pontok, peremfeltételek

Az LDA-val történő mérések során egy függőleges síkban 60 pontban, valamint a szélcsatorna középvonalában 23 pontban mérjük a sebességeket.

A síkban történő mérés esetén átlagos értékek kinyerése a cél. Mivel LDA mérések esetén a mintavételi

frekvenciát nem lehet előre beállítani, ezért a statisztikai elfogultság (bias) elkerülése végett Controlled Dead Time módban végeztük az adatkinyerést. A Dead Time helyes megválasztásával elkerülhető a statisztikai elfogultság, így ugyanis egy érzékelt impulzus után a beállított ideig nem rögzít újat a szoftver, így elméletileg egyazon örvény által kiváltott impulzusok közül csak egy kerül rögzítésre. A mintavételek számát a BSA szoftvernek ajánlása nyomán, valamint saját tapasztalatok alapján 2000-re választottuk.

A középvonalban történő mérés esetén Burst Mode adatnyerési opciót választottunk, ami azt jelenti, hogy a szoftver minden egyes impulzust regisztrál. Természetesen ez alacsony mintavételezési szám esetén erős torzításokat mutathat a kapott eredmény, ennek megfelelően a mintavételek számát is jelentősen megnöveltük. A vonalmenti mérések esetén a mintavételezési szám 100 000.

Az LDA méréshez szükséges nyomjelző részecskéket két aeroszol generátor segítségével biztosítottuk. Passzív mérés esetén valójában elegendő volt egy is, az aktív esetekben azonban a nyitott szélcsatornát igen hamar, és igen nagy mennyiségben hagyták el a nyomjelzők, a konzisztencia jegyében így passzív esetben is mindkét aeroszol generátort alkalmaztuk.

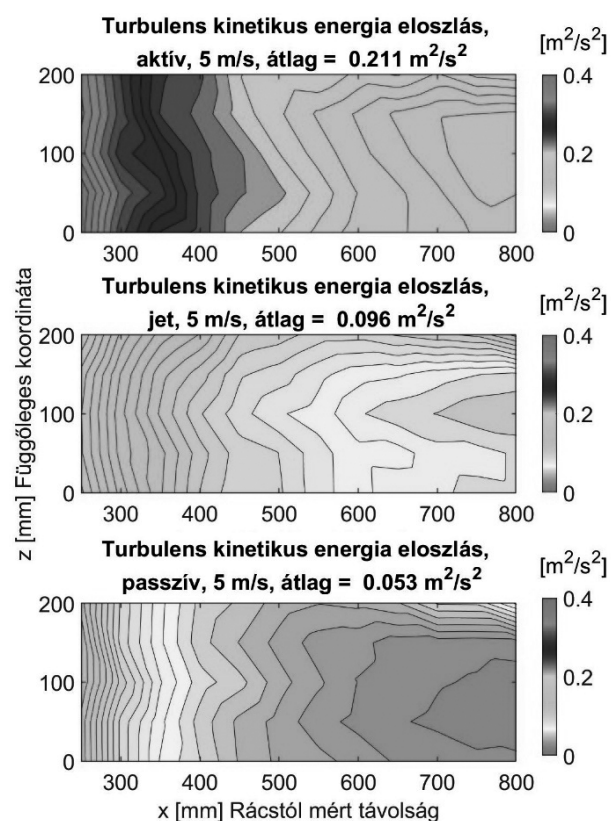
A kétdimenziós sebességmérés ebben az esetben az áramlás irányával párhuzamos főirányú (u), és a rá

merőleges függőleges irányú (w) sebességkomponens mérését tette lehetővé.

2.4. A mérések menete

Mivel a szélcsatorna beépített sebességmérője ezzel a típusú turbulenciagenerátorral nem kompatibilis, ezért a referenciasebességet a középvonalban, a traverzrendszer rácstól legtávolabbi pontján (a rácstól mérve 950 mm-re) mértük. A referenciasebesség beállítása után megtörtént a vizsgált sík és középvonal mérése az egyes esetekben.

A 4. ábrán a vizsgált síkban kialakuló áramlásra jellemző turbulens kinetikus energiák alakulása látható 5 m/s referenciasebesség esetén aktív, jet, ill. passzív üzemmódban. A turbulenciagenerátor aktiválásakor (jet) jelentősen megnő a mögötte lévő áramlásra jellemző turbulens kinetikus energia, a turbulenciagenerátor jet üzemmódból aktívba váltása után (a szilikoncsövek intenzív rezgésbe kezdenek) a turbulens kinetikus energia további jelentős emelkedésen megy keresztül.



4. ábra. Turbulens kinetikus energia eloszlása aktív, jet, illetve passzív esetben, 5 m/s referenciasebesség esetén.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Aktív esetben viszonylag gyakran fordult elő, hogy egy-egy szomszédos szilikoncső egymásba akadt, és hosszabb-rövidebb ideig ebben az állapotban maradtak. A turbulenciagenerátor fejlesztése során ezt valamilyen módon figyelembe kell venni, vagy rövidebb szilikoncsövek alkalmazására van szükség, vagy annyiival nagyobb távolságra kell őket egymástól elhelyezni, hogy ne akadhasanak össze.

LDA mérések esetén a nyitott szélcsatornában különösen nagy kihívást okozott az alacsony sebességek mérése aktív, illetve a jet üzemmódban. Ebben az esetben a fő térfogatáramhoz képest a másodlagos térfogatáram olyan nagy volt, hogy a szélcsatornában lévő részecskék egy jelentős része – a szélcsatornába történő ismételt belépés helyett – a környezeti levegőbe távozott. Passzív üzemmódban ez a probléma nem merült fel, a távozó részecskék mennyisége nem haladta meg azt a mennyiséget, amit a két aeroszol-generátorral pótolni tudtunk.

Tapasztalataink alapján a szilikoncsövek **jet** üzemmódban javarészt lefelé fújják a levegőt, **aktív** üzemmódban a kapott eredmények alapján ez a tendencia sokkal kevésbé áll fenn. Az LDA síkbeli mérések azt mutatják, hogy a függőleges sebességkomponensek átlaga túlnyomórészt a teljes tartományon negatív, az áramlás irányú sebességkomponens pedig jellemzően a tartományok közepén alacsonyabb, a mérési tartomány teteje és alja felé haladva nő.

A turbulens kinetikus energia megnövelésére rendkívül jól alkalmazható a rács. A rács aktiválását követően jelentősen megnő a turbulens kinetikus energia (jet üzemmód), majd az aktív üzemiállapotba érve (a szilikoncsövek intenzíven rezegnek) ugrásszerűen megnő a turbulens kinetikus energia a teljes vizsgált tartományon.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

The author is grateful to the Hungarian-German Intergovernmental S&T cooperation programs TKA-DAAD 160552 for the financial support of this research.

A szerzők köszönetüket fejezik ki a Magyar-Német együttműködési program TKA-DAAD 160552 projektjének a kutatás támogatásért.

5. IRODALOM

- [1] Genevieve Comte-Bellot and Stanley Corrsin. The use of a contraction to improve the isotropy of grid-generated turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 25(04):657–682, 1966.
- [2] Genevieve Comte-Bellot and Stanley Corrsin. Simple eulerian time correlation of fullband narrow-band velocity signals in grid-generated, isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 48(02):273–337, 1971.
- [3] Hideharu Makita and Shinji Miyamoto. Generation of high intensity turbulence and control of its structure in a low speed windtunnel. In *Proceedings of 2nd Asian congress on fluid mechanics*, pages 101–106, 1983.
- [4] Makita Hideharu. Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel. *Fluid Dynamics Research*, 8(1-4):53, 1991.
- [5] John Laufer. Investigation of turbulent flow in a two dimensional channel. National Advisory Committee for Aeronautics, 1951.

FORGÓ BERENDEZÉSEK NUMERIKUS HÁLÓZÁSÁNAK SZEMPONTJAI ÉS MÓDSZEREI

ASPECTS AND METHODS OF NUMERICAL MESHING OF ROTATING EQUIPMENT

Fodor Béla*

ABSZTRAKT

A cikk átfogó képet ad a numerikus hálóról. Többek között segítséget ad a numerikus szimuláció elvégzéséhez szükséges legfontosabb lépés a numerikus hálózás szempontjainak megértéséhez és alkalmazásához. Rámutat olyan tényekre, melyek az úgynevezett „jó” vagy „rossz” háló megítélésére alkalmasak. Továbbá kitér a forgó gépek hálózásával kapcsolatos szempontokra.

ABSTRACT

The article gives a comprehensive view of the numerical mesh. Among other things, it provides help with the most important step required to perform the numerical simulation for understanding and applying the aspects of numerical meshing. It points to facts that are suitable for evaluating the so-called "good" or "bad" mesh. Furthermore, it covers aspects related to the meshing of rotating machines.

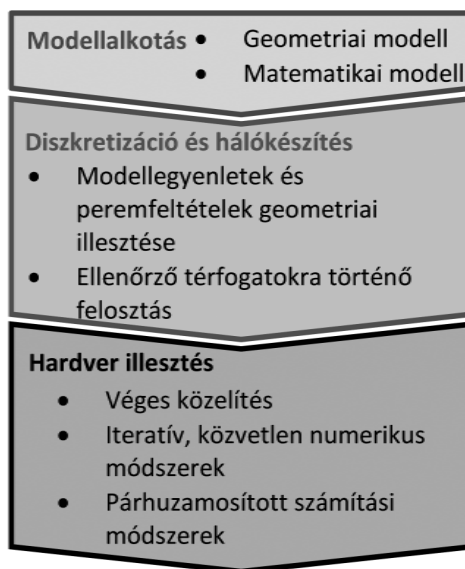
1. BEVEZETÉS

A tervezési, fejlesztési és kutatási feladatok számára a jelen kor egyik leghatékonyabb módszere a szimuláció alapú megközelítés. A numerikus számítási módszerek hagyományos matematikai alapokon nyugszanak, azonban a számítógép kapacitás növekedésének köszönhetően ezek a módszerek egyre könnyebben alkalmazhatók a mindennapi mérnöki gyakorlatban. Alkalmazásuk széles körben elterjedt, a kezdő mérnököktől az „expert” felhasználókig. Használatuk többnyire kereskedelmi alapú szoftvereken keresztül történik, mely sokak számára zárt működési mechanizmust rejt, sokan nevezik emiatt ún. „black box”-nak a háttérben rejlő számításokat és módszereket. Távhitek is kialakulhatnak sokakban és mondhatják azt, hogy „nem tudjuk hogyan működik”, „nem ismerjük a számítási mechanizmust”, „nem is jó az eredmény”, stb..

Azonban ez nem ennyire zárt és nem ennyire „varázslat”. A mérnöki tanulmányok alatt és a gyakorlatban matematikai számítási módszereket és numerikus alapokat mindenki tanult, azonban annak gyakorlati alkalmazását kevésbé ismerik. Ennek a megismerése elengedhetetlen annak érdekében, hogy a szimulációs munkafolyamatot hatékonyan lefolytathassuk, és az eredmények olyan

minőségi szintet képviseljenek, mely a mérésekkel azonos, vagy akár jobb eredményeket produkáljanak.

Általánosságban elmondható, hogy vannak olyan esetek, amikor a szimuláció eredménye a valósághoz közelebb áll, mint amelyet korábban csak méréssel, vagy empirikus összefüggésekkel határoztunk meg. A számítási pontosság sok esetben visszavezethető a számítási „felbontás” növeléséhez. Ez azonban nem szükséges feltétele annak, hogy pontos eredményeket kapjunk.



1. ábra. Szimulációs folyamat illesztés

A numerikus megoldási folyamat eléggé hierarchikus felépítésű. Először a matematikai modell összeállítását kell elvégezni, majd a megfelelő diszkrétizációs módszert kell kiválasztanunk, ezt követi a koordináta rendszer meghatározása és a numerikus háló elkészítése, mely szorosan illeszkedik a diszkrétizációs módszerhez. Az így, többnyire háromdimenziós térben meghatározott rendszer alkalmas a megoldási folyamat megkezdésére, mely jelentős mennyiségű számítás elvégzését igényli. Az így elkészült modellt illeszteni kell a hardverhez, melyen a számításokat elvégezzük. Ezért numerikus közelítésekkel iteratív egyenletrendszer megoldó és közelítő módszereket alkalmazunk, mint pl. Gauss elimináció, vagy LU faktorizáció stb.. A legfontosabb lépéseket az 1.

* tanszéki mérnök, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

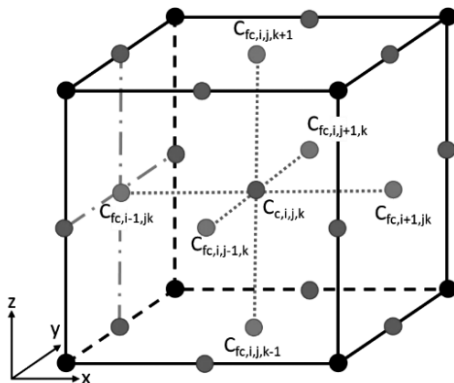
ábra szemlélteti, aminek részleteihez és megértéséhez számos irodalom áll rendelkezésre. [1]

Az irodalmak többsége, sok esetben a numerikus hálót az ún. ellenőrző térfogatok jelentőségét kevésbé emeli ki. Fontos megjegyezni, hogy a diszkretizációs módszerek közül az áramlási szimulációk esetén a véges térfogatok módszerét használjuk, azonban a véges elemek vagy véges differenciák módszerét is jelentős mértékben használjuk a szimulációs feladatok esetén. A rácshoz (hálózathoz) kötött technikák mellett a jelenleg fejlődőben lévő ún. rácsnélküli technikák alkalmazása is egyre elterjedtebb, azonban ezek a módszerek elsősorban nem a számszerű adatok meghatározására alkalmasak, hanem pl. nagyon hatékonyan vizsgálható változások okozta hatások vizsgálatára, ahol pl. egy geometriai változásból adódó áramlási jelleg, vagy trend változik meg.

Ennek ismeretében körvonalazható, az az általános tény, hogy a háló készítés a szimulációs feladatok elvégzéséhez szükséges idő döntő többségét teszi ki.

2. NUMERIKUS HÁLÓ

A numerikus háló a valóságos többnyire háromdimenziós geometriai tér felosztását jelenti ún. ellenőrző térfogatokra, ahol a hálóelemek egyszerű könnyen kezelhető geometriai alaptérfogatok, mint a tetraéder, hasáb, gúla, poliéder. Az ellenőrző térfogatok oldallapok határolják, melyeket élek kötnek össze. Geometriai szempontból az élek végpontjaiban definiáljuk a csomópontokat, azonban fontos pontkoordináták még az oldal-, felületi- (c_{fc}) és cellaközéppontok (c_c). (2. ábra)



2. ábra. Ellenőrző térfogatok és számítási csomópontjaik

Elmondható, hogy egy „jó” háló minimalizálja a számítások mennyiségét és feltételezhetően javítja az eredmények pontosságát. Akik a numerikus háló kialakításával foglalkoznak elég nehezen fogalmazzák meg azt, hogy mit nevezünk jó hálónak és mit rossznak. A többség inkább azt tudja definiálni, hogy mi a rossz háló mintsem azt, hogy rámutasson arra, hogy mi a jó. Saját tapasztalataim alapján is elfogadhatjuk azt az állítást, hogy „az számít, hogy a CFD-megoldás mennyire pontosan tükrözi a valóságot.”[2]

A háló kialakításának szempontjait több módon csoportosíthatjuk ezek leginkább a felhasználói, kutatói, vagy megoldóspecifikus nézőpontok. Természetesen ezek is többnyire szubjektív nézőpontok, azonban rámutatnak arra miért és milyen intuitív szempontok alapján kell olyan döntéseket meghozni, vagy mérőszámokat alkalmazni, ami a valós fizikai folyamatoktól, vagy egyszerűen a valóságos geometriai tér jellemzőitől független, vagy nem összeegyeztethető módon eltér. Például dimenziótlan hálómínőségi paraméterek közötti műveletek, vagy egy számított változó értéke és egy geometriai jellemző kettősből megkonstruált mérőszám, ami a fizikai folyamat alakulására mutat rá.

Tehát látható, hogy a számítási folyamat, amit a számítógéppel, – tehát a hardverrel – végzünk, ami egy iteratív megoldási folyamat nem azonos azzal a folyamattal, ami a fizikai (valóságos) térben zajlik. Ennek nagy jelentősége van a tranziens vizsgálatok megértésében.

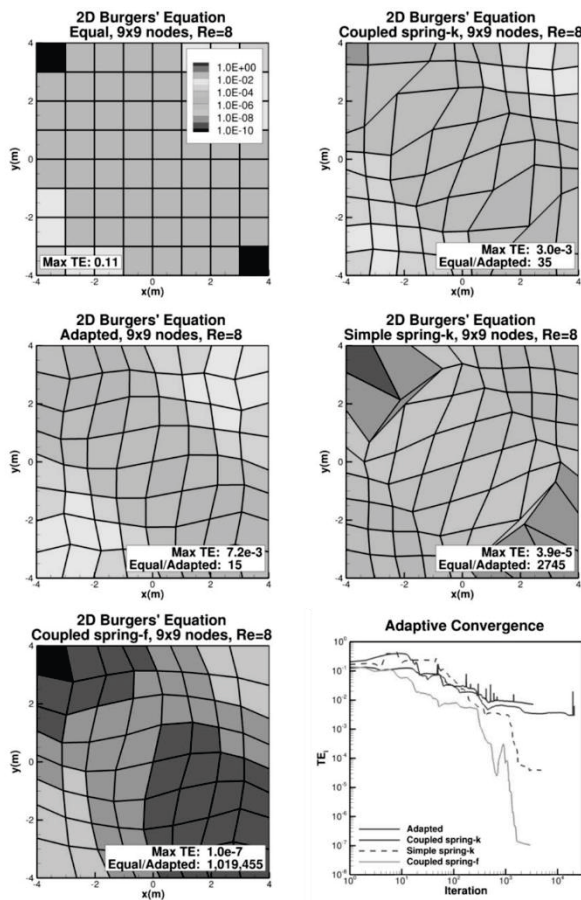
Összegezhetjük tehát, hogy a szimulációs munkafolyamatra vonatkozó hálómínőség értelmezése nem lehet sokak érzéséből adódóan „esztétikusnak” definiálni, amit a jó geometriai mutatókkal jellemeznek és ami sok esetben az uniform, strukturált, vagy blokkstrukturált hálót jelenti. A legalapvetőbb mutatók az ortogonalitás, ferdeség, vagy oldalarány, de cellatípusonként változó további számos mutatókat alkalmazhatunk. [3]

Az ellenőrző térfogatok eddig részletezett felépítése csak kezdeti megfontolások, mivel a valós fizikai folyamatok és az azokat leíró egyenletek is nagy mértékben befolyásolják az eredményeket. Az áramlási térben emiatt figyelembe kell venni pl. a fal környezetében alkalmazott egyenleteket és azok felbontását, nyírórétegek, vagy a hirtelen nagy gradiensek helyét és befolyását a teljes térre, de nem szabad elfelejtkeznünk a szűk hézagokon történő átáramlások figyelembevételéről sem. Ezek a szempontok globális, vagy lokális torzulásokat eredményeznek. Mely többnyire a cél, tehát a valóságos jellemzők torzulásához vezet.

A 3. ábra rámutat arra a tényre, hogy a folyamatunkat leíró egyenleteinket – gondoljunk csak a mozgásegyenlet legegyszerűbb formális alakjára – véges közelítéssel kell számítástechnikai oldalról megoldani, ami csonkolási hibát (TE) eredményez. Az ábrán látható, hogy milyen mértékben csökken a TE értéke a különböző, de közel azonos elemszámú láthatóan különböző hálómínőségi paraméterekkel rendelkező háló esetén. [4] Az ábrát tekintve a megoldott egyenletnek nincs különösebb jelentősége, azonban az iterációs folyamat jellege jól látható. Az uniform egyenközű háló esetén $TE=0,11$ a hálón történt módosítások eredményeként ez a hiba néhány lépést követően $TE=1e-3$ nagyságrend alá lehetett csökkenteni.

Itt kell megemlíteni azt, hogy az eddigiekben statikus hálóról volt szó. Statikusnak nevezhetünk egy hálót, ha azt egy kiinduló geometriához elkészítettük, majd azon további módosításokat nem szándékozunk tenni. Azonban megtehetjük azt is, hogy a meglévő hálónkat a

megoldási folyamat során módosítjuk. Ezt nevezzük adaptációnak. Az adaptált háló többnyire a kiinduló statikus háló újrakészítését, sűrítését vagy ritkítását jelenti. Adaptálással figyelembe vehetők a kezdetben nem ismert áramlási viszonyok, pl. leválások, örvények, határréteg változások, nagyobb gradiensek, vagy fázishatárok jobban leírhatók, stb. Ezzel a lehetőséggel dinamikussá tehető a számítási folyamat igazodva az iterációs lépések során kialakult állapotokhoz. A 3. ábra alapján látható, hogy a kezdeti uniform háló $35 \rightarrow 1M$ adaptációs lépés után $1e-7$ nagyságrendű hibát eredményezett. Azonban nem szabad elfelejtenünk arról, hogy ez még továbbra sem a valósággal egyenértékű eredmény, tehát egy gyorsított konvergencia még nem elégséges feltétele a megoldásnak.

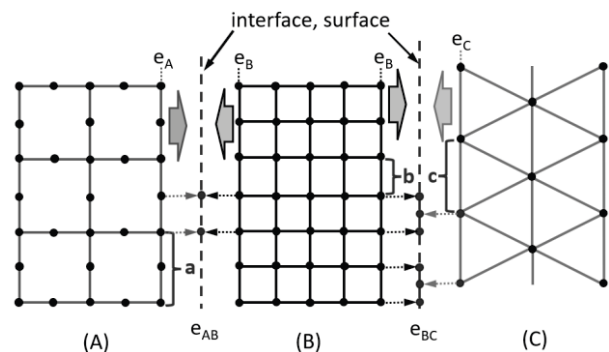


3. ábra. Csonkolási hiba (TE) alakulása a háló kialakításnak függvényében [4]

Nem esett szó eddig a numerikus háló geometriai megvalósításáról. A numerikus hálót a vizsgálat tárgyát képező geometria felületei burkolják. Ezáltal a jól definiálható felületek esetén lényeges (természetesen az élek esetén is) ha sok kis apró elemi cellával közelítjük. Különösen igaz a görbült felületekre és élekre. Belátható tehát, hogy egy bonyolult felületet minél több ilyen elemi cellával közelítjük annál jobban visszkapjuk az eredeti geometriai teret. A véges cella méretek miatt figyelembe

kell venni azt, hogy a cellán belüli adatokat milyen módon számítunk ki. A megfelelő diskretizációs módszer alkalmas megválasztásával a cellán belüli értékek kiszámíthatóak.

Egy háromdimenziós tér a korábban említett hálótípusok változatos elegyéből épülhet fel. Tételezzük fel, hogy a vizsgált tér kizárólag folyékony halmazállapotú közeget foglal magába, ami több kisebb térfogattól épül fel. Tehát az összefüggő folyadéktérrel belül kisebb térfogattal különbözőképpen oszthatunk fel ellenőrző térfogatokra, ezáltal az érintkező hálókat össze kell kapcsolni. Ezek a kapcsolatok igen nagy jelentőséggel bírnak, mert általánosságban elmondhatjuk, ha a kapcsolódás nem megfelelő felbontású, vagy illesztésű, akkor szükséges feltétele annak, hogy rossz konvergenciát és eredményeket kapjunk. A 4. ábra egy kétdimenziós hálórendszert és kapcsolódásukat mutatja. A kapcsolódás az „interface” vagy „surface” felületeken történik konkrétan az e_A , e_B , e_C vagy egyesített e_{AB} és e_{BC} éleken történik. A részletek kifejtése nélkül az ábra alapján látható, hogy a cella méretek összeegyeztetése, illetve a rácspontok számának kapcsolódása egy megoldandó feladat az egyenletmegoldó hatékony működéséhez. Az alap eset a (B) ún. elsőrendű 4 csomópontos négyzög elemekből felépülő háló, melynek oldalait egyenesek alkotják és az egyenesek végén vannak a csomópontok definiálva. Az (A) esetén kvadratikusan 8 csomópontból felépülő négyzög elemű, mely oldalfelezőket is tartalmaz, és (C) esetén elsőrendű 3 csomópontos háromszög cellákból felépülő hálót láthatunk. A cellaméretek a , b , c méretekkel definiálhatók. Látható, hogy (A)-(B) kapcsolódás esetén a cellaméret különbség áthidalható a csomópontok száma miatt, azonban B-C esetén külön interpolációval kezelhető, ami további számítást és ezáltal számítási hibát eredményez.



4. ábra. Háló típusok és kapcsolódásuk. (A) kvadratikusan négyzög, (B) elsőrendű négyzög, (C) elsőrendű háromszög elemek

Fontos értelmezni azt, hogy nem minden esetben kapcsolódnak különböző hálók csomópontjai. A (B) és (C) hálók közötti e_B és e_C élek mentén a csomópontok nem találkoznak, amit az egyesített e_{BC} élen láthatunk. Emiatt, hogy az értékátadás megtörténjen további interpoláció kell alkalmazni. A kapcsolódások milyensége miatt tehetünk különbséget ún. „surface” és „interface” között. A

„surface” olyan felületek találkozása, ahol a csomópontok nem találkoznak. Ebben az esetben az 4. ábra alapján az e_B és e_C élt külön-külön definiáljuk és a közöttük lévő kapcsolatot előírjuk. Tehát a két különböző típusú háló határoló éle rendelkezik önálló/saját határozott geometriai éllel. Az „interface” ellenben szoros kapcsolatot jelent, ahol a csomópontok találkoznak. Egy ilyen csomópont halmaz, mind a két hálótípushoz tartozik tehát csak egy van belőlük. Ezt az ábrán a e_{AB} él szemlélteti leginkább.

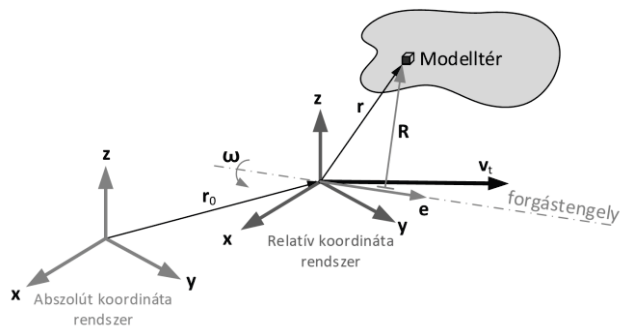
Eddigiekben olyan megfontolások sorakoztak fel, melyek leginkább a megoldhatóságra és konvergenciára fókuszáltak. A geometriai modell felépítése hasonló megfontolásokkal rendelkezik. A szimuláció számára egységes jól definiált felületekből és éllekből kell állnia a modellnek. A műszaki gyakorlatban a műhelyrajzok nem igényelnek különösebb megfontolásokat, kizárólag a gyártástechnológia számára kell géprajzi alapokkal egységes jól átláthatónak lennie. Ellenben különös figyelmet kell fordítani arra, hogy egy vonal vagy görbült él egy darabból legyen összeállítva, tehát egy görbe esetén a kezdő és végpont között szerkesztési pont nem lehet kizárólag egy folytonos függvényként kell értelmezni. A CAD és szimulációs rendszerekben előszeretettel a NURBS függvényeket használják. Ennek az elvnek az érvényessége elmondható az egyenesre, felületekre is, ahol értelemszerűen a felületen nem lehet olyan vonal, mely a felületet kettévágja. Ezeket a hibás szerkesztésből adódó pontok vagy vonalak hálókészítés szempontjából kényszerként vannak jelen. Tehát egy automata háló esetén ezekre a helyekre hálópontok fognak kerülni. A hibák megfelelő hibajavító technikák alkalmazásával kiküszöbölhetők. Ezt nevezzük tisztításnak.

3. FORGÓ GÉPEK MŰKÖDÉSI MECHANIZMUSA ÉS HÁLÓZÁSA

A forgó berendezések vizsgálatára számos módszer áll rendelkezésre. Közös feladat mindegyikben a mozgó és álló numerikus háló összekapcsolása, illetve esetleges hálóadaptáció, ahol a változó geometriához igazodva újra és újra előállítjuk a hálót. A két eset alapvető különbsége, hogy „surface” és „interface” felületek is lehetnek a számítási modelltől függően. Ebből következik, hogy a hálókapsolatoknak (ún. térkapsolatoknak) alkalmasnak kell lenniük az értékátadásra. Továbbá a modellkapsolatnak is képesnek kell lennie az abszolút és relatív sebességtér összekapcsolására. [5] Az 5. ábra szemlélteti a modelltér és koordináta rendszer kapcsolatát.

A forgó rendszerek esetén egy instacionárius áramlási modellt kell megoldani véges közelítéssel. Általában a forgó rendszer esetén a jellemző mozgásjellemző a fordulatszám, vagy kerületi sebesség.

Ahhoz, hogy az eredményünk értékelhető legyen, a kapott eredményekből diszkrét értékeknek pontosan követniük kell a várt függvényt. Emiatt az időnek, mint változónak megfelelő felbontásúnak kell lennie.



5. ábra. Modelltér elhelyezkedése és referencia koordináták

Példaként elmondható, hogy egy 1Hz frekvenciájú szinuszos függvény esetén a szimuláció során alkalmazott időlépésnek legalább periódusonként 50-100Hz frekvenciájúnak kell lennie. A forgó gépek esetén ezt minimális szinten a fordulatszám függvényében javaslatként a $1-3^\circ$ -hoz tartozó időlépést célszerű alkalmazni. Ennél nagyobb időlépéssel a tranzienst jellemzők eltűnhetnek.

4. ÖSSZEGZÉS

Annak érdekében, hogy a forgó gépek szimulációját numerikus hálóval kezelni és értelmezni tudjuk a megoldási folyamat során, elengedhetetlen a háló ún. „jószágának” megértése. A számítás során kapott visszajelzések, ami különböző változók, felületi átlagok, hálómínőségi paraméterek folyamatos monitorozása, olyan adatokat szolgáltatnak, amik előre jelzik a várható eredmények alakulását.

Továbbá az iteratív számítások jelentősége sokkal nagyobb, mint egy nem mozgó rendszer esetén.

5. IRODALOM

- [1] J. H. Ferziger és M. Peric, *Computational methods for fluid dynamics*, 3. kiad., köt. 50, sz. 3. 2002. doi: 10.1063/1.881751
- [2] J. Chawner, „Accuracy, convergence and mesh quality”, *The Connector*. 2012.
- [3] C. J. Stimpson, C. D. Ernst, P. Knupp, P. P. Pébay, és D. Thompson, „The Verdict Geometric Quality Library”, 2007. doi: 10.2172/901967
- [4] T. S. Phillips, C. J. Roy, E. J. Alyanak, és C. F. Ollivier-Gooch, „Optimal mesh adaption for Burgers’ equation”, *42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit 2012*, doi: 10.2514/6.2012-2710.
- [5] B. Fodor, „Forgó áramlástechnikai gépek numerikus vizsgálatának módszerei”, *GÉP*, sz. LXXII 2021/1-2., o. 46–49, 2021, ISSN 0016-8572.

SZÉN-DIOXID VÍZBEN TÖRTÉNŐ ABSZORPCIÓJÁNAK VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF ABSORPTION OF CARBON-DIOXIDE IN WATER

Kállai Viktória*, Szamosi Zoltán**

ABSTRACT

The goal of this study to reduce the carbon-dioxide content of wood gas and the investigation of the solubility of carbon-dioxide gas in water. Furthermore, the absorption of carbon-dioxide gas in water was studied with ChemCAD process simulation software in case of different values of pressure, temperature, and mass flow of the water. A cost estimation of the absorption column was prepared with modified number of trays in case of two different values of the diameter of the column.

It is determined that there is a relationship between the pressure, temperature, and solubility. With higher pressure and lower temperature, the solubility is growing in case of gases in water.

It was determined that the total cost function had a minimum point in both case, which means the optimal design of the column taking into consideration the investigated parameters of the cost.

1. BEVEZETÉS

Az elgázosítás olyan folyamat, amely szerves vagy fosszilis alapú anyagokat alakít át szén-monoxiddá, hidrogénné és szén-dioxiddá. Ezt úgy érik el, hogy az anyagokat magas hőmérsékleten ($T > 700^\circ\text{C}$) égés nélkül, szabályozott mennyiségű oxigénnel és/vagy gőzzel reagáltatják. Az így keletkező gázkeveréket szintézis gáznak nevezik [1]. Egyik felhasználása lehet ennek a gázelegynek, hogy gázmotorban történő elégetés során más energiaformává alakítják át, azonban ezen folyamathoz a gázkeverék szén-dioxid tartalmát szükséges lecsökkenteni. A tanulmányban fagáz szén-dioxid tartalmának csökkentését vizsgáltuk abszorpciós kolonnában víz mosófolyadék alkalmazásával.

Gyakran technológiai áramokból vagy füstgázból származó CO_2 -t vízben nyeletnek el, amely folyamat égetés utáni szén-dioxid leválasztási technológiának minősül (PCCC – Post Combustion Carbon Capture Technology). Ez azt jelenti, hogy a leválasztási

folyamat a füstgáztisztítás része és az égési folyamat után helyezkedik el [2].

Gyakran alkalmazott folyadékfázis CO_2 leválasztáshoz abszorpció során az MEA (monoetanol-amin). Azonban ennek hátránya, hogy erősen korrodáló hatású, nagy illékonysággal rendelkezik és a környezetre káros illékony szerves vegyületeket bocsájthat ki. Ennek az oldószernek a víz a környezetbarát helyettesítője. Azonban a víz nem nyeli el olyan jól a CO_2 -t, mint a MEA, így a megfelelő elválasztáshoz szükséges vízmennyiségek nagyok lehetnek [2].

Xiao és szerzőtársai [3] a szén-dioxid biogázból történő elválasztását vizsgálták vízmosó rendszer alkalmazásával. Tanulmányuk során bebizonyították, hogy a folyadék/gáz arány, a nyomás, a hőmérséklet és a CO_2 -tartalom fontos paraméterek a biogázból történő CO_2 leválasztás során. Eredményeik azt mutatták, hogy a CO_2 -eltávolítási arány 34,6 és 94,2% között volt, amely során a folyadék/gázfázisok aránya 0,14-ről 0,50-re nőtt. A nyomás növelése és a hőmérséklet csökkentése az oszlopban kedvezően hatott a CO_2 -tartalom csökkenésére. A legalacsonyabb CO_2 -tartalom az abszorpció után 1,2 MPa nyomáson elérheti a 2,6%-ot, amely érték megfelel a járműüzemanyagként használt földgáz CO_2 -tartalmára vonatkozó követelménynek.

2. A SZÉN-DIOXID VÍZBEN VALÓ OLDHATÓSÁGA

A vízben elnyelhető gáznemű szén-dioxid mennyiségét a Henry törvény adja meg, amely alapján a folyadékban oldott gáz koncentrációja arányos a folyadékkal érintkező gáz parciális nyomásával.

$$c_{\text{CO}_2} = K_H \cdot P_{\text{CO}_2} \quad (1)$$

ahol K_H a Henry állandó és értéke függ a gáztól, az oldószertől és a hőmérséklettől [2].

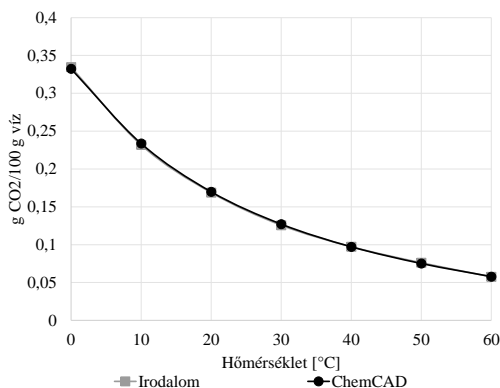
A szén-dioxid esetén az oldhatóság a víz hőmérsékletének csökkenésével nő. Ezen megállapítás

* tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

és a Henry-törvény alapján a magas nyomás és az alacsony hőmérséklet növeli a víz által elnyelt szén-dioxid mennyiségét [2, 4].

ChemCAD [5] folyamatszimulátor szoftverben vizsgáltuk a CO₂ vízben történő elnyelését, amely során a Henry-törvény termodinamikai modellel számoltunk. A szimulációs eredményeket összehasonlítottuk a [6] irodalomban található adatokkal, az eredmények az 1. ábrán láthatóak. Az irodalmi adatok és a szimulációs eredmények között kb. 1%-os eltérés volt tapasztalható 0 és 60 °C hőmérséklet értékek között 1 bar nyomáson.



1. ábra CO₂ vízben való oldhatósága a hőmérséklet függvényében

A CO₂ vízben való oldhatósága (S) a hőmérséklet függvényében az alábbi harmadfokú polinom összefüggéssel jellemezhető:

$$S = -0,000001 T^3 + 0,0002T^2 - 0,0113T + 0,3315 \quad (2)$$

3. A VIZSGÁLT RENDSZER

3.1. A vizsgált gázelegy

Fa elgázosításából származó gázelegyet vizsgáltunk, amely összetételét az 1. táblázat mutatja be. Két különböző mintavétel adatai láthatóak a táblázatban, amelyekből egy átlagos összetételt határoztunk meg, majd ezt az értéket korrigáltuk, hogy az összetételek összegére 100%-ot kapjunk.

Látható, hogy a gázelegyben CO₂ és CO komponensek találhatóak a legnagyobb arányban. A célunk, hogy a gázelegy 53,16 V/V%-os CO₂-tartalmát 10 V/V%-ra csökkentjük abszorpció alkalmazásával. Azért szükséges a gázelegy CO₂-tartalmának csökkentése, hogy a gázelegy gázmotorban elégethető legyen.

1. táblázat A vizsgált gázelegy

Minta	A gázelegy összetétele [V/V%]								Teljes
	CO ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	
1	51,1	0,2	0,8	0	0,7	4,7	1	33,5	92
2	50,6	0,2	1,2	12,6	0,2	1,3	1,7	31,4	99,2
Átlag	50,84	0,2	1	6,3	0,45	3	1,35	32,46	95,63
Korrigált	53,17	0,21	1,05	6,59	0,47	3,14	1,41	33,95	100

2. táblázat Betáplált anyagáramok és termékek összetétele

Paraméter	Gázelegy	Víz	Fejtermék	Fenéktermék
Hőmérséklet [°C]	10,000	10,000	10,170	10,830
Nyomás [bar]	6,000	6,000	6,000	6,000
Tömegáram [kg/h]	100,000	8507,501	38,064	8569,736
	H ₂ O	-	8507,801	0,055
	CO ₂	67,522	-	6,448
	C ₂ H ₆	0,182	-	0,000
	C ₂ H ₄	0,850	-	0,755
Összetétel [kg/h]	O ₂	0,434	-	0,421
	H ₂	0,384	-	0,378
	N ₂	2,538	-	2,501
	CH ₄	0,652	-	0,631
	CO	27,437	-	26,875

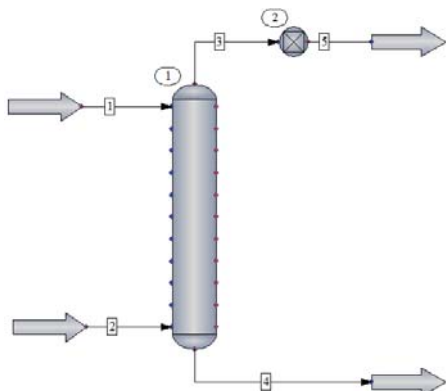
3.2. A vizgált abszorber oszlop modellje

A szimulációk elkészítéséhez ChemCAD 8 folyamatsszimulátor szoftvert alkalmaztunk.

A 2. ábra az abszorber oszlop modelljét mutatja be, amely két betáplálási árammal rendelkezik. Ezek közül a gázkeverék az oszlop alján kerül betáplálásra, míg az oszlop tetején víz kerül bevezetésre. Az oszlopban 6 db szitatányér található. Az oszlop fejterméke a CO₂-ben szegény gázelegy, a fenékterméke pedig a CO₂-ben dús víz. A 2-sel jelölt berendezés az ún. Controller, amely célja az elérni kívánt 10 mol%-os CO₂-tartalomhoz szükséges víz tömegáramának meghatározása. A betáplált gázelegy tömegárama 100 kg/h volt.

A szimulációk során nem vettük figyelembe az oszlop nyomásvesztését. Az oszlop nyomása és a betáplált anyagáramok nyomása megegyezett egymással. A betáplált anyagáramok hőmérséklete szintén azonos volt.

A 2. táblázat az ismertetett üzemi adatokkal rendelkező oszlop betáplált anyagáramainak és a termékeinek paramétereit mutatja be. Az adatokból látható, hogy a CO₂-n kívül, az etán 100%-ban, a többi komponens nagyon kis mértékben abszorbeált a vízbe.



2. ábra A vizgált abszorber oszlop modellje

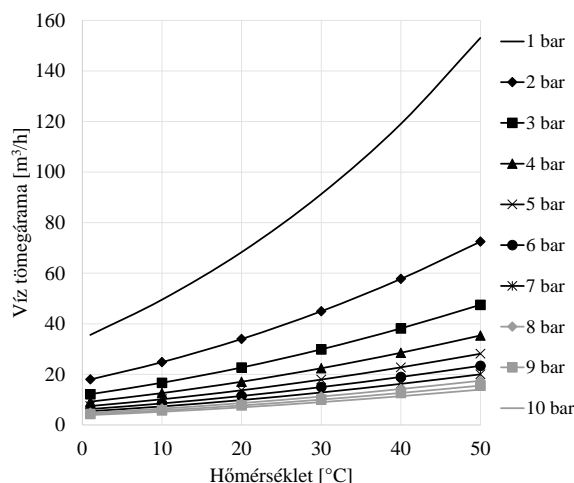
4. A RENDSZER VIZSGÁLATA ÉS EREDMÉNYEK

4.1. Paramétervizsgálat

Paramétervizsgálatot készítettünk az elérni kívánt fejterméktisztasághoz szükséges víz mennyiség meghatározására. A vizsgálat során a nyomást 1 és 10 bar között változtattuk, a hőmérséklet pedig 1 és 50°C között változott.

A paramétervizsgálat eredményei a 3. ábrán láthatóak, amelyen a szükséges víz tömegáramokat a hőmérséklet függvényében ábrázoltuk, a különböző görbék pedig a különböző nyomásértékekhez tartoznak.

Az eredményekből látható, hogy minél alacsonyabb a hőmérséklet annál kevesebb vízre van szükség a megfelelő fejtermék tisztaság eléréséhez. Az is megállapítható, hogy a nyomás növelésével is nagy mértékben csökkenthető a víz tömegárama. 1 bar-ról 2 bar-ra emelve a nyomást kb. fele mennyiségű víz bevezetésre van szükség. Az is megállapítható, hogy minél nagyobb a nyomás és minél alacsonyabb a hőmérséklet egyre csökken a szükséges vízmennyiség értékek közötti különbség. 20°C alatt és 6 bar nyomás felett már nincs számottevő különbség a szükséges víz tömegáramok között.



3. ábra A paramétervizsgálat eredményei

4.1. Költségbecslés

A költségbecslési eljárás során a következő üzemi paramétereket állítottuk be. A nyomás és a hőmérséklet értékeket a vizsgálat során állandónak vettük, azaz a kolonna és a betáplált anyagáramok nyomása 6 bar, a betáplált anyagáramok hőmérséklete pedig 10°C volt. A vizsgálatok során nem vettük figyelembe az oszlop nyomásesését, a hűtés, a szivattyú és a kompresszor költségeit. Az oszlopban szitatányérok találhatóak, amelyek számát a vizsgálat során 3 és 12 között változtattuk. A költségek becslését két különböző oszlopátmérő esetén határoztuk meg: 0,6 m és 0,8 m átmérőjű oszlopokat vizsgáltunk.

Az oszlop teljes költség függvényét az üzemeltetési és a beruházási költségek meghatározásával vettük figyelembe.

Az üzemeltetési költséget a szükséges víz tömegáramának árából határoztuk meg az alábbi összefüggéssel:

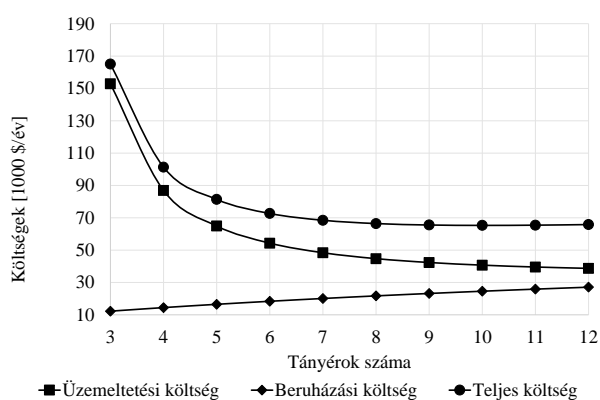
$$K_{\bar{u}} = \dot{m}_{\text{víz}} \cdot e_{\text{víz}} \cdot \bar{u} \quad (3)$$

ahol $K_{\bar{u}}$ az üzemeltetési költség [\$/év], $\dot{m}_{\text{víz}}$ a víz tömegárama [t/h], $e_{\text{víz}}$ a víz egységára [7] alapján [\$/t], \bar{u} az éves üzemóra, amelyet 8000 h/év értékkel vettünk figyelembe.

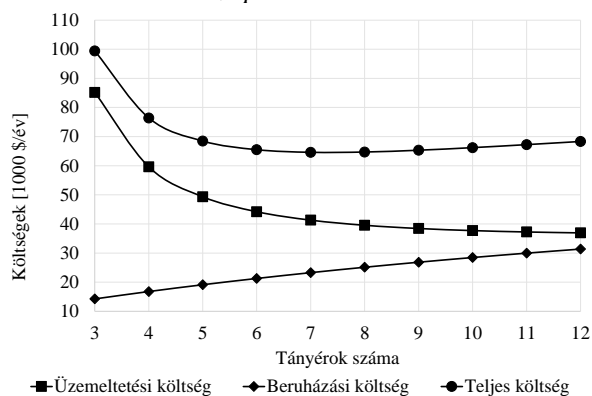
Az üzemeltetési költséget a ChemCAD szoftver költségbecslő funkciójával határoztuk meg. Ehhez szükséges volt megadni egy ún. Install factor nevű tényezőt, amely a telepítési költséget korrigálja a beszerzési költség alapján. A vizsgálataink során ezen tényező értéke 3 volt, ami azt jelenti, hogy a telepítési költség háromszorosa a beszerzési költségnek. Továbbá 5 éves amortizációt vettünk figyelembe az egy évre eső beruházási költség meghatározásához.

Minél nagyobb a tényérok száma annál nagyobb a beruházási költség értéke, illetve minél több tényér található az oszlopban annál kevesebb víz betáplálására van szükség a megfelelő tisztaságú fejtermék eléréséhez.

A 4. ábra 0,6 m oszlopátmérő esetén mutatja be a költségek értékeit. Ezek alapján a teljes költség függvénynek 10 darab tényérral rendelkező oszlopkonstrukció esetén van minimuma.



4. ábra A költségbecslés eredményei 0,6 m oszlopátmérő esetén



5. ábra A költségbecslés eredményei 0,8 m oszlopátmérő esetén

Ezután a költségeket 0,8 m oszlopátmérő alkalmazásával is megvizsgáltuk (5. ábra). A nagyobb átmérő az előző esethez képest nagyobb beruházási költségeket jelent, mert az üzemeltetési paraméterek változatlanok voltak a két esetben, illetve a tényérszámok változtatása ugyanazon intervallumban történt. A nagyobb oszlopátmérővel csökkent a szükséges víz tömegárama.

Az 5. ábráról leolvasható, hogy ebben az esetben a teljes költség függvénynek a 7 db tényérral rendelkező oszlopkonstrukció esetén van minimumpontja.

A fent bemutatott vizsgált eseteket összehasonlítva látható az is, hogy a teljes költség függvények minimuma közel egyforma értéket eredményez.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az eredményekből látható, hogy a nyomásnak és a hőmérsékletnek jelentős befolyásoló szerepe van a vízben történő CO₂ elnyelésre. Minél magasabb a hőmérséklet és minél alacsonyabb a nyomás annál nagyobb víz mennyiségre van szükség a fejtermék kívánt tisztaságának eléréséhez.

Látható az is, – a beruházási és üzemeltetési költségeket az ismertetett módon figyelembe véve – hogy a költségbecslési eljárás során a teljes költség függvények minimumponttal rendelkeznek, azaz megadható az oszlop optimális kialakítása a vizsgált költségek és a tényérok számának szempontjából.

A továbbiakban célunk vizsgálni az oszlopba betáplált gázelegy tömegáram változtatásának hatását a szükséges víz tömegáramára. Továbbá olyan megoldás talála a cél, amellyel a gyakorlatban is alkalmazható, az oszlop betáplált folyadék- és gázfázis arányának (L/G) megfelelőbb értéke érhető el.

7. IRODALOM

- [1] <http://biofuelsacademy.org/index.html%3Fp=396.html>, 2022.09.10.
- [2] BEIRON J.: Assessment of enhanced carbon dioxide absorption in water, The impact of carbonic anhydrase and pH regulation, *Master's Thesis in Sustainable Energy Systems*, Chalmers University of Technology, Sweden, 2017
- [3] XIAO Y. et al.: CO₂ Removal from Biogas by Water Washing System, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, Vol. 22, pp. 950-953, 2014
- [4] KNOCHE W.: Chemical Reactions of CO₂ in Water, *Biophysics and Physiology of Carbon Dioxide*, Springer-Verlag, Berlin, 1980
- [5] ChemCAD User Guide, *Chemstations*, 2020
- [6] GREEN W. D.: Perry's Chemical Engineers' Handbook, Eighth Edition, *The McGraw-Hill Companies*, 2008.
- [7] <https://vizmuvek.hu/hu/kezdolap/informaciok/dijszabasok/dijszabasok>, 2022.09.01.

ÚJ TÍPUSÚ HŐVEL MŰKÖDŐ SZIVATTYÚ ABSZORPCIÓS HŰTŐK ELEKTROMOS OLDATSZIVATTYÚJÁNAK KIVÁLTÁSÁRA

NOVEL HEAT DRIVEN PUMP TO SUBSTITUTE THE ELECTRIC SOLUTION PUMP IN ABSORPTION HEAT PUMP

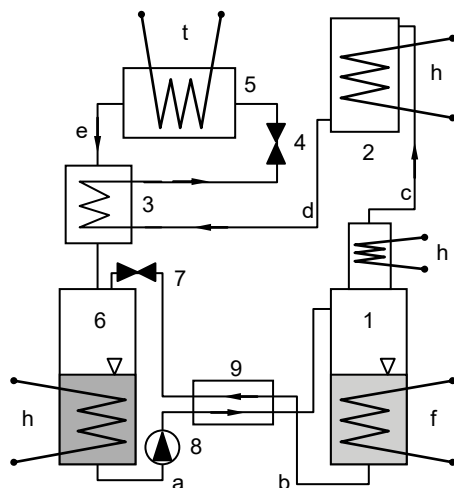
Krámer Gyula*, Dr. Siménfalvi Zoltán**, Dr. Szepesi L. Gábor***

ABSTRACT

This article shows an alternative to substitute the electrical solution pump in absorption heat pump system with a heat driven solution pump. This new machine can be utilized in several other areas.

BEVEZETÉS

Az abszorpciós hőszivattyú rendszerek [1] képesek az ipar különböző területein keletkező hulladékhő hasznosítására. Ezek között az Carré-féle rendszer a legsokoldalúbban használható eljárás. [2] Ha adott a hőforrás, ez a rendszer képes lenne kvázi üzemeltetési költség nélkül működni, de sajnos ennek van egy gyenge pontja, mégpedig az, hogy ehhez a rendszerhez szükséges egy oldatszivattyú, ami elektromos áram hajt. (1. ábra) [3]



1. ábra: Oldatszivattyús abszorpciós rendszer
1. generátor, 2. kondenzátor, 3. utóhűtő, 4. a hűtőközeg fojtószelepe, 5. elpárologtató, 6. abszorber, 7. az oldat fojtószelepe, 8. oldatszivattyú, 9. oldat hőcserélője. a. hűtőközegben gazdag oldat, b. szegény oldat, c. hűtőközeg gőze, d. folyékony hűtőközeg, e. elpárolgott hűtőközeg, f. fűtés, h. hűtés, t. a hűtött tér terhelése

Az elektromos oldatszivattyú a teljes berendezés energiafogyasztásának 3...7%-át is kiteheti. [3][4]

*PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Ugyan ez nem tűnik jelentős tételnek, de ha a rendszer a fennmaradó energiaszükségletét hulladékhőből fedezi, akkor a teljes berendezés üzemeltetési költségét leszámítva a rendszer szabályozásához szükséges elektromos áramot, ezen elektromos oldatszivattyú fogyasztása teszi ki. A fentiek miatt az oldatszivattyú kiváltására több próbálkozás is született. [5]

AZ ÚJSZERŰ OLDATSZIVATTYÚVAL SZEMBENI KÖVETELMÉNYEK

Az első, és legfontosabb szempont az, hogy az új szivattyú ugyanazzal az energiaforrással üzemeljen, mint maga a rendszer. Ez azt jelenti, hogy a gépnek 100-120 °C-os hőmérsékletű a hőforrása, és 30-40 °C-os a hőnyelő oldala.

A második az, hogy a berendezés önstartoló legyen. Tehát ne igényeljen semmilyen külső energiát az elinduláshoz.

További szempont a gép egyszerűsége, vagyis az, hogy minél kevesebb alkatrészből, azon belül a lehető legkevesebb mozgó alkatrészből épüljön fel.

A gép hatásfoka itt most nem a legfontosabb szempont, hiszen az energiaforrásunk eleve hulladékhő.

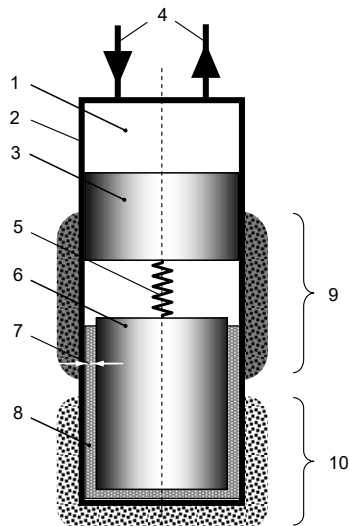
A SZIVATTYÚ FELÉPÍTÉSÉNEK ISMERTETÉSE

A szivattyú valójában egy szabaddugattyús motor (2. ábra). Fő része egy cső alakú ház, amit egy dugattyú oszt két részre. A felső, lezárt rész a munkatér, amihez két visszacsapó szelep csatlakozik, amelyek meghatározzák a szivattyúzott közeg útját. Tehát ez a tulajdonképpeni szivattyú.

A henger munkadugattyú alatti szakasza két részre osztható. A fenti a fűtött, a lenti pedig a hűtött szakasz. A dugattyú alatti térben egy újabb dugattyú helyezkedik el. De ez nem illeszkedik a henger falához, hanem mintegy félmilliméternyi hézag van közte, azaz egy gyűrű alakú rés van körülötte. Ennek a dugattyúnak nem a tömítés a feladata, hanem az, hogy a munkaközeg szükség esetén kiszorítsa a henger alsó, hűtött részéről, amely ekkor felemelkedik az alsó dugattyú, és a hengerfal közti vékony gyűrű alakú részbe, azaz a fűtött térrészbe. A két dugattyút, tehát a

munkadugattyút, és a kiszorító dugattyút egy rugó köti össze. A kísérleti berendezés esetén a munkadugattyú egy membrán, a rugót pedig a membrán rugalmassága helyettesíti.

Az ábra korántsem egy tervrajz, hanem inkább az érthetőség és az áttekinthetőség kedvéért készült vázlat. Ami nincs rajta, az egy, a kiszorító dugattyú alá szerelt mágnes, ami egyben annak mozgás-határolója is. Ez a kiszorító dugattyút hol a fenti, hol a lenti állásban állítja meg. A két végállás között pár milliméter van.



2. ábra: A szivattyú felépítése

1. munkatér, illetve a szivattyúzott közeg, 2. ház, 3. munkadugattyú, 4. visszacsapó szelepek, 5. összekötő rugó, 6. kiszorító dugattyú, 7. gyűrű alakú rész, 8. munkaközeg, 9. fűtött szakasz, 10. hűtött szakasz.

A GÉP MŰKÖDÉSE

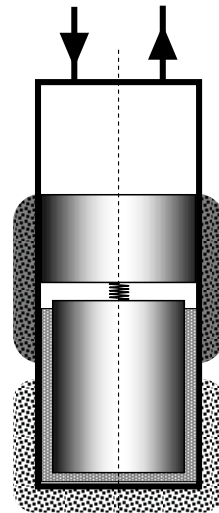
A gép csak függőleges állásban működik. A munkadugattyú alatti tér egy meghatározott részét a munkaközeg folyadék fázisa foglalja el, az afeletti részt pedig annak gőz fázisa tölti ki. Alapállapotban az adott hőmérsékletnek megfelelő gőznyomás uralkodik a hengerben. Mivel ez kisebb, mint a szivattyúzott közeg nyomása, a munkadugattyú a lehetséges legalsó pozíciót foglalja el. Ez a gép alaphelyzete. (3. ábra)

I. fázis

Értelemszerűen a gép alaphelyzetből indul. Vagy azért, mert most indult el a fűtés, vagy mert most tért ide vissza a befejező fázisból. (3. ábra)

A munkadugattyú az alsó holtponton van. Mivel a kiszorító dugattyú is az alsó holtponton van, a munkaközeg felemelkedve, kitölti a rés fűtött szakaszát is. Emiatt mind a hőmérséklete, mind a nyomása emelkedni kezd, de ebben a fázisban még mindkét dugattyú mozdulatlan marad.

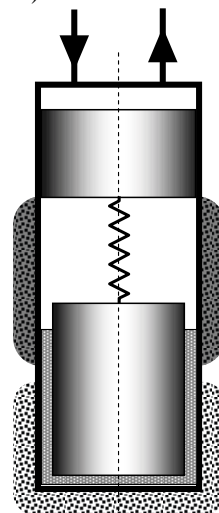
Megjegyzés: A résben lévő folyadékban hőátmenet van, de mivel a rés mérete csak tizedmilliméteres nagyságrendű, ezért az itt fellépő hőátadás, akárcsak a szigetelt dugattyúfalé, elhanyagolható.



3. ábra: I. Fázis, vagyis az alaphelyzet

II. fázis

Egy idő után, a hőmérsékletemelkedés miatt, a munkatér nyomása eléri a szivattyúzandó közeg nyomóoldali nyomását. Ekkor a munkadugattyú megkezdheti kiszorítani a szivattyúzott közeget a felette lévő térrészből, vagyis megkezdődik a II. fázis. Ez mindaddig folytatódik, amíg el nem éri a felső holtponatot. (4. ábra)



4. ábra: II. Fázis vége

A dugattyú alatti térrészt a folyamatosan elforralt munkaközeg gőz fázisa tölti ki. A folyadék fázis természetesen fogy, mert pótolnia kell a gőzfázist, de mindvégig érintkezik a ház fűtött falával.

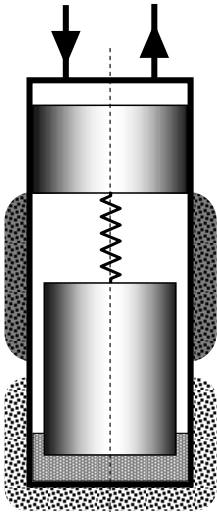
A munkadugattyú felső holtpontjának helyét az határozza meg, hogy az egyre inkább feszülő rugó ereje mikor éri el a kiszorító dugattyút rögzítő mágnes erejét.

Ekkor a mágnes egy pillanatra elengedi a házat, majd pár milliméterrel feljebb újból rögzül. Emiatt a kiszorító dugattyú is pár milliméterrel feljebb kerül. Ez már elég ahhoz, hogy a résben lévő folyadékfázis szintje lecsökkenjen, olyannyira, hogy a hűtött fal szabaddá váljon. (5. ábra)

Természetesen a dugattyúk lökethossza, átmérője és a rés mérete, illetve a fűtött és hűtött szakaszok hossza, a munkaközeg mennyisége, valamint a rugó és a mágnes minősége össze van hangolva.

III. fázis

Mivel a kiszorító dugattyú felső pozícióban van, a munkaközeg szintje lecsökkent, így szabaddá válik a ház hűtött szakasza. Megkezdődik a gőzfázisú közeg kondenzációja. A résben a folyadékszint emelkedni kezd, de nem lepi el a hűtött szakaszt.



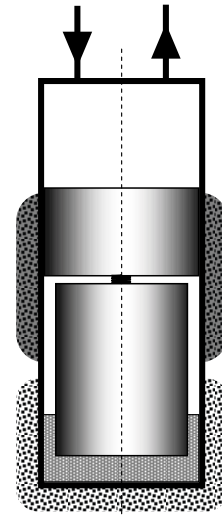
5. ábra: III. Fázis kezdete

Először a hőmérséklet és a nyomás is csökken, de ebben a fázisban még mindkét dugattyú mozdulatlan. Viszont idővel a gőznyomás lecsökken annyira, hogy elérje a szivattyúzott közeg szívó oldali nyomását.

IV. fázis

Ha a belső nyomás elérte a szívónyomást, a munkadugattyú megindul az alsó holtpont felé. A gőzfázis kondenzációja folytatódik, szintje egyre magasabbra emelkedik a házban, de még mindig marad felette hűtött, azaz kondenzáló felület.

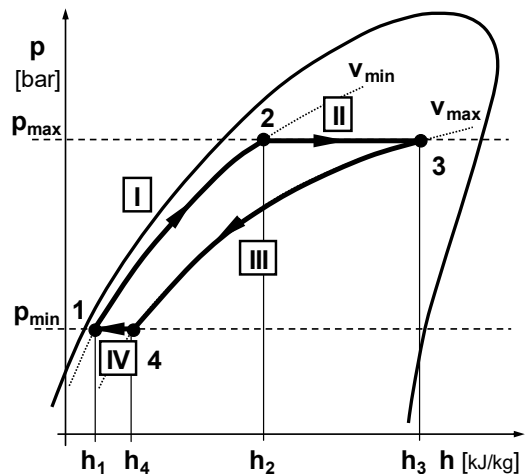
Viszont a rugó egyre jobban zömöl, és ahol a benne halmozódó feszültség eléri a mágnes tapadóerejét. Ahol ez megtörténik, az lesz a munkadugattyú alsó holtpontja. (6. ábra) Ekkor a kiszorító dugattyú pozíció vált, a résben felemelkedik a munkaközeg, az eddigi kondenzáció átvált forrásba, és megkezdődik az I. fázis.



6. ábra: IV. Fázis vége

A KÖRFOLYAMAT NYOMÁS-ENTALPIA DIAGRAMMJA

A körfolyamat, az imént ismertetett 2 izochor és két izobár fázisra bontható (7. ábra).



7. ábra: p-h diagram

A p_{max} , p_{min} nyomó és szívóoldali nyomások,
A v_{max} , v_{min} a fajtérfogatok szélsőértékei.

Nem lett érzékeltetve az, hogy a kiszorító dugattyú váltása, és természetesen a folyadék, illetve a gép belső sűrűdása a II. és a IV. fázist némileg magasabb, illetve alacsonyabb nyomásra helyezi, mivel ez elhanyagolható.

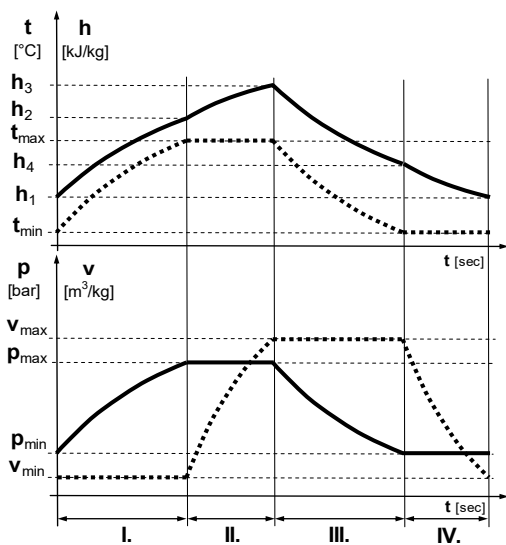
A FIZIKAI JELLEMZŐK VÁLTOZÁSA A KÖRFOLYAMAT SORÁN

A körfolyamatot meghatározó fizikai jellemzők értékeit az 1. táblázat tartalmazza.

	1	2	3	4
p [bar]	0.5	2	2	0.5
t [°C]	81.24	120.12	120.12	81.24
v [m ³ /kg]	0.2001	0.2001	0.3027	0.3027
h [kJ/kg]	482.9	997.8	1252.7	556.8

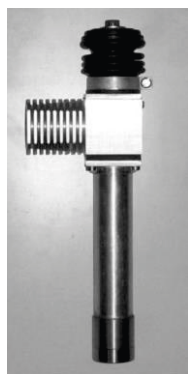
1. táblázat, a körfolyamat sarokszámai.

A gép munkaközegének fizikai jellemzői láthatóan az egyes fázisokon belül folyamatosan változnak, de azok átlépésekor, a munkadugattyú elmozdulása, vagy a kiszorító dugattyú pozícióváltásakor megváltoznak a körülmények és törést szenvednek.



8. ábra: A fizikai jellemzők változása

A kísérleti gép (9. ábra) nem rendelkezik túl magas hatásfokkal. A számított érték mintegy 5%, de nem is ez a gép fő erénye, hanem az, hogy tág határok közötti üzemi körülményekhez adaptálható.



9. ábra: A kísérleti gép

Az itt bemutatott esetben víz volt a munkaközeg, és adottak voltak a hőmérsékletek, illetve a szívó és a nyomó oldal nyomásai, de ez változtatható.

Változatos nyomáskülönbségekre és tetszőleges hőmérsékletekre tervezhető a megfelelő munkaközeg megválasztásával, természetesen, a szerkezeti anyagok adta korlátok között.

Ha a leírtaktól is alacsonyabb a hőforrás hőmérséklete, munkaközegként alkalmazható etilalkohol, vagy metilalkohol, de extrém esetben propán vagy bután gáz is. Valójában minden, az adott hőforráshoz és az adott nyomáskülönbségekhez illeszkedő anyag megfelel, ha annak kicsi a viszkozitása, és nem okoz korróziót.

ÖSSZEFOGLALÁS

A fentebb ismertetett újszerű gép, alkalmassá téve az oldatszivattyú feladatára, gyakorlatilag nullára redukálhatja az abszorpciós hőszivattyúk elektromos áram fogyasztását. De nem csak erre a célra használható. Felszerelhető forgattyús mechanizmussal is, és a tengelyről levett teljesítmény változatos módon hasznosítható. De így, szabaddugattyús gépként is alkalmazható például napkollektorokban, kutakban, vagy belsőégésű motorok hűtővíz szivattyújaként.

HIVATKOZÁSOK

- [1] Carl G Almén: Gas Absorption refrigeration, 2009
- [2] Wei Wu, Baolong Wang, Wenxing Shi, Xianting Li.: An overview of ammonia-based absorption chillers and heat pumps, 2013
- [3] Dr. Siménfalvi Zoltán, Dr. Szepesi L. Gábor, Krámer Gyula: Módszer az ammónia-víz abszorpciós rendszerű hűtési folyamat hatásosságának és hőigényének számítására, 2015
- [4] Micallef D, Micallef C., Mathematical model of a vapor absorption refrigeration unit. Int j simul model 9 (2010) 2, 86-97
- [5] Alexander Arnitz, René Rieberer: A thermally driven solution pump for NH₃/H₂O-absorption chillers Une pompe à solution à entraînement thermique pour les refroidisseurs à absorption de NH₃/H₂O, 2019

ENERGIA- ÉS ÉLETCIKLUS-ÉRTÉKELÉSI MODELLEK INTEGRÁLÁSA GYÁRTÁSI FOLYAMATOK KÖRNYEZETI TERHELÉSEINEK OPTIMALIZÁLÁSÁRA

INTEGRATION OF ENERGY AND LIFE CYCLE ASSESSMENT MODELS TO OPTIMIZE THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PRODUCTION PROCESSES

Dr. Mannheim Viktória*

ABSTRACT

To take the major differences to identify good waste management processes, complex comparisons need to be discussed. This article discusses the advances and future directions of the given specific research area from the viewpoint of the author with a review of professional literature. This research work assesses and compares the environmental impacts of two end-of-life scenarios (landfilling and conventional incineration) in the European Union. To find the research answers, eight main environmental impact categories and primary energies were analysed using the GaBi 10.6 software. Based on the results, it can be concluded that in the case of incineration, the emissions and the electricity power credit are higher. These research results can be used to compare waste treatment processes with lower environmental impacts, and to perform further research on these processes.

1. BEVEZETÉS

Gyártási folyamatoknál a hulladékcsökkentés elve - az integrált hulladékgazdálkodással összhangban - a gyors ipari fejlődés következtében folyamatosan növekvő mennyiségű termelési hulladék minimalizálása kapcsán jelenik meg. Számos kutatási tanulmány (Stahel, 2016; Grosso és mtársai, 2017; Andersen és mtársai, 2022; Avató és mtársa, 2022) feltételezte és bizonyította azt az utóbbi években, hogy a körforgásos gazdaság támogatja a gyártási folyamatok hulladékainak csökkentését azáltal, hogy kihasználja az életciklus-értékelés (Life Cycle Assessment, LCA) által kínált lehetőségeket. Egy termék teljes életciklusa alapvetően három életciklus szakaszra (termelés, használat és életciklus-vége)

tagolható, melyek vizsgálata során számos környezeti mutatót érdemes felismernünk és meghatározni. Környezetmenedzsment eszközként, az életciklus-értékelésnek olyan technológiai megvalósításokra kell rámutatnia, melyek alacsonyabb környezeti terheléssel járó gazdasági és energetikai előnyökkel járnak. Következésképpen, a gyártási folyamatokat jellemző döntéshozatali modelleknél célszerű kombinálnunk az életciklus-értékelés eredményeit a gazdasági és energetikai mutatókkal. Egy optimális döntéshozatali modell fő szempontjává egy olyan holisztikus megközelítés válhat, ami magában foglalja a gyártott termék életciklusát anélkül, hogy megváltoztatnánk azokat a gyakorlatokat, amelyek közvetlen hatással vannak a környezetre. Napjainkban a különböző számvetési módszerek (Kharrazi és mtársai, 2014; Arbault és mtársai, 2014) és információalapú megközelítések (Santos és mtársai, 2020) életciklus elemzéssel történő integrálása került előtérbe. Gondoljunk csak az exergia-elemzésre és a BIM-alapú (Building Information Modelling) integrációkra. Civancik-Uslu és munkatársai (Civancik-Uslu és mtársai, 2019) már több komplex életciklus modellel állítottak fel termelési hulladékfrakciók kezelésére. Taşkın és Demir (Taşkın és Demir, 2020) kutatási eredményei alacsony emisszióval bíró energiamodelleket biztosítottak a hulladékgazdálkodási rendszerek számára. A gyártási technológiák és a gyártott termékek innovatív fejlesztése által, egyrészt, csökken a felhasznált anyag- és energiaigény, másrészt pedig a keletkezett hulladékok kezelése módjait egy kisebb környezetterhelés jellemzi. Ebből kifolyólag, a sokszor költségnövekedéssel, de ugyanakkor a környezetterhelés és energiaigény redukálásával járó technológiai innováció érdeke kell, hogy legyen minden gazdasági szereplőnek. Az elmúlt években a környezetmenedzsment és a hulladékgazdálkodás egyre növekvő jelentősége felkeltette az életciklus-értékelés iránti érdeklődést. A kutatók világszerte bővítik az LCA

* tudományos főmunkatárs, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

módszertanát a környezeti információk és a fenntarthatósági mutatók iránti megnövekedett igény következtében.

2. GYÁRTÁSI FOLYAMATOK OPTIMALIZÁLÁSA LOOPING-MÓDSZERREL

Az IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) átfogó értékelő jelentéseket készít az éghajlatváltozással kapcsolatos tudományos, műszaki, társadalmi és gazdasági ismeretek állapotáról, annak hatásairól és jövőbeli kockázatairól. Az IPCC jelenleg a hatodik értékelő jelentésen (AR6) dolgozik, ami három IPCC-munkacsoport hozzájárulásából és egy összefoglaló jelentésből (SYR) áll. Az IPPC egyik alapvető követelménye az „elérhető legjobb technika” (Best Available Techniques, BAT) bevezetése, ami azokat a hatékony és innovatív eljárásokat foglalja magába, amelyek biztosítják a környezetterhelés minimalizálását. A terhelés- és hulladékcsökkentésre irányuló folyamattervezés innovatív és fenntartható technológiák kialakítása, vagy a már rendelkezésre álló technológiák fejlesztése által valósítható meg. A fenntartható és optimális gyártási folyamatok megtervezéséhez elengedhetetlen a pontos anyag- és energiamérlegek ismerete. Ugyan hulladékmentes technológiák megvalósítása teljesen lehetetlen, azonban optimalizálhatjuk azt, hogy milyen mértékű input anyag- és energiaáramok felhasználása mellett gyártunk terméket, illetve milyen mértékben hasznosítjuk a melléktermékekből és gyártási selejtből keletkezett termelési hulladékáramot. Fentiekkel összefüggésben, több lehetőség is kínálkozik: nyersanyagok és segédanyagok helyettesítése és kiváltása, hulladék visszaforgatása, fosszilis energiaáram kiváltása megújuló energiaforrásokkal, illetve megváltoztatott reakcióutak, eljárások és berendezések.

Az életciklus-értékelés módszere elsősorban az egymást helyettesítő anyagok, termékek és eljárások esetén ígéretes és célravezető. A különböző életciklus-értékelési modellek segítségével mérlegelhetők a feladásra kerülő anyagáramok, a felhasználásra kerülő energiaforrások, valamint a gyártott termékek mennyiség és felhasználási kör szerint (Mannheim, 2021). Azonban az életciklus elemzéseket és a döntéstámogató értékeléseket egy hárompontos szempontrendszer (környezetterhelési, energiahatékonysági és gazdaságossági aspektusok) függvényében célszerű elvégezni. Ez a hárompontos döntéstámogató-értékelési módszer egy új döntéshozatali irányt képezhet az ipari környezetvédelemben. A környezeti hatáserkékelésnél a gyártási folyamatok input-output áramait hatáskategóriákba soroljuk a leltáreredményeinek hozzárendelésével. Minden egyes környezeti hatáskategóriára vonatkoztatva meghatározunk egy referencia egységet, majd normalizáljuk és súlyozzuk őket egy kiválasztott hatásvizsgálati módszerrel.

Az ún. hurkolás módszerét (looping method) ma már egyre gyakrabban alkalmazzuk LCA tervek (LCA planek) felépítése kapcsán az életcikluselemző szoftverekben. E módszer alkalmazása során a szilárd és folyékony hulladékáramokat olyan mértékben forgatjuk vissza és hasznosítjuk újra az adott gyártási folyamaton belül, amely mérték még nem veszélyezteti a gyártott termékkel szemben támasztott követelményeket és az elvárt minőséget. A looping-módszer egyértelműen a gyártási folyamatok optimalizálását szolgálja.

A körkörös gazdaság (Circular Economy, CE) céljaival összefüggésben, alapvetően az erőforrások fenntartható felhasználása, a hulladékképződés minimalizálása, illetve a hulladék gyártási folyamaton belül történő visszaforgatása és újrahasznosítása kell legyen az elsődleges célunk, mely alapcélokkal a gyártási folyamatok környezeti terheléseit egyértelműen optimalizálhatjuk.

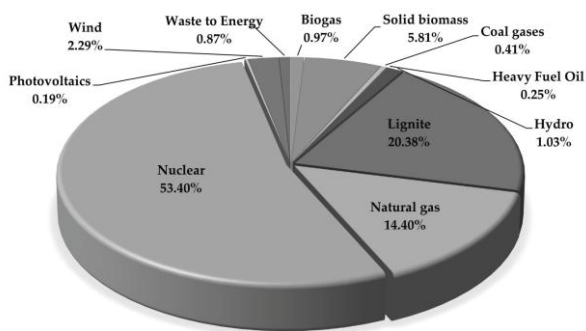
3. GYÁRTÁSI FOLYAMATOK OPTIMALIZÁLÁSA MEGFELELŐ HULLADÉKKEZELÉSI MÓDSZER ÁLTAL

Az életciklus végi hulladékkezelés kihívást jelent valamennyi gazdasági szereplő számára a különböző számítási megközelítések elérhetősége és a tudományos konszenzus hiánya miatt, amelyet az akadémiai kutatások és az ipari érdekek egyaránt táplálnak. Az optimális hulladékkezelési gyakorlatok megválasztása érdekében, komplex összehasonlításokat kell végeznünk és megvitatnunk. Az életciklus-értékelés a termelési hulladék kezelési eljárásainak helyes megválasztása kapcsán is egy hatékonyan alkalmazható módszer a környezetterhelés vizsgálatára, melynek eredményei felhasználhatók a kezelési technológiák mérlegelésére, segítve ezáltal a hulladékkezelő vállalkozások döntéshozatalát. A hazai hulladékgazdálkodásban 2013 óta kap kiemelkedő szerepet az életciklus-értékelés azáltal, hogy az új hulladékgazdálkodási törvényben (Ht.) már helyet foglal az életciklus-szemléletben történő gondolkodásmód. Az integrált hulladékgazdálkodás alapvetően az életciklus végi kezelési eljárások megfelelő kiválasztására helyezi a hangsúlyt azáltal, hogy a hulladékképződés megelőzésére és a veszélyesség csökkentésére törekszik. Az életciklus végi modellezés egyik fő kihívása a megfelelő újrahasznosítás hiteles meghatározása nyílt és zárt hurkú rendszerekben. Napjainkban egyre több kutatási eredmény áll rendelkezésünkre az egyes hulladékkezelési eljárások kiértékelésére vonatkozóan, mérlegelve ezáltal az egyes módszerek környezeti hatásait. A termelési hulladék leggyakoribb kezelési módszerei a lerakás és a hagyományos égetés. Genovesi és munkatársai (Genovesi és m. társai, 2022) szerint azonban a hulladéklerakás az emberi metán kibocsátás harmadik legnagyobb forrása. Ami a termikus kezelési eljárásokat illeti, a hulladékáramok energetikai célú

hasznosítási technológiáival javulást érhetünk el. Alternatív termikus kezelési technikaként számos kutatási tanulmány javasol gázosítást vagy plazmatechnológiát. Voss és munkatársai (Voss és mtársai, 2021) olyan integrált életciklus-modelleket vezettek be, melyek összehasonlítják a pirolízist és a gázosítást; megállapítva azt, hogy a gázosítás nagyobb emissziócsökkenéssel jár. Korábbi kutatási eredményeim (Mannheim, 2014) is azt mutatják, hogy a gázosítás és a plazmatechnológia jobb környezeti teljesítményt nyújtanak az összes vizsgált hatáskategória tekintetében, mint a hagyományos égetés. A hagyományos termikus technológiákhoz képest, plazmagázosítással a villamos energia hatékonyabban előállítható, illetve nem keletkezik dioxin és furán.

4. HULLADÉK ÉLETCIKLUS VÉGI FORGATÓKÖNYVEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

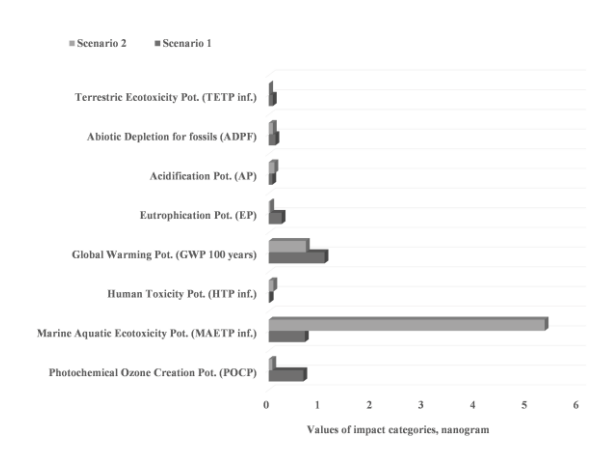
Amennyiben az életciklus-értékelés rendszerhatárait helyesen meghatározzuk, akkor egy megfelelő LCA szoftver segítségével pontos életciklus-leltárelemzést (Life Cycle Inventory, LCI) és életciklus-hatásértékelést (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) tudunk felállítani az életciklus végi szakaszra. Ebben a tanulmányban a lerakás és a hagyományos égetés környezeti terheléseit és energia értékeit hasonlítottam össze, melynek keretében a funkcionális egységet 1 kg hulladékban határoztam meg. A modellezéshez termékspecifikus információkat használtam és felállítottam egy magyarországi energiamix kördiagramot a GaBi szoftver adatai alapján a 2018. évre vonatkozóan (ld. 1. ábra).



1. ábra. Hazai energiamix (Mannheim, V., Kruszelnicka, W.: Energy-Model and Life Cycle-Model for Grinding Processes of Limestone Products. Energies 15, 2022, no. 10: 3816.).

A konzisztens életciklus-leltárelemzés magában foglalta és számszerűsítette a vizsgált folyamatok input-output anyagáramlását és energiaellátását. Az életciklus-modelleket csurgalékvízzel iszapkezeléssel és hulladéklerakó-gázfelhasználással egészítettem ki.

Feltételeztem azt, hogy a keletkezett energia hasznosításra kerül és a hulladéklerakás újrahasznosított iszapot és szennyvizet is termel. Az életciklus-értékelés a kaputól a bölcsőig tartott azáltal, hogy a termék használati szakaszát követően a termék életciklus-vége szakaszát vizsgáltam két különböző forgatókönyv megválasztásának függvényében. A vizsgált rendszerben az energiaellátást és a hulladékkezelést a rendszerhatárok határozták meg. A berendezések, gépek és teherautók a vizsgált rendszerhatáron kívül estek. A fűtés, hűtés és világítás energiamennyisége szintén. Az életciklus-vége megoldások környezeti hatáskategóriáit CML 2016 módszer segítségével számoltam GaBi 10.6 szoftverrel. Nyolc fő környezeti hatáskategóriát - fotokémiai ózonképződés (POCP), tengeri és szárazföldi ökotoxicitás (MAETP, TETP), emberi toxicitás (HTP), globális felmelegedés (GWP), eutrofizáció (EP), savasodás (AP) és fosszilis abiotikus kimerülés (ADPF) - emissziókat és primer energia értékeket vizsgáltam, melynek értékeit a 2. ábra szemléltet nanogrammban. Az alkalmazott normalizálási és súlyozási módszerek (CML 2016, Európai Unió) mindkét hulladékkezelési modellre azonosak voltak. 1 kg hulladék funkcionális egységre vonatkoztatva a hulladéklerakásnál 0.48 MJ hulladék hő, 0.02 MJ primer energia és 0.3 MJ villamos energia (a lerakó gázhasználatából) keletkezik. A hagyományos égetés 1.23 MJ villamos energiát termel, ami visszanyerhető.



2. ábra. Hulladéklerakás (Scenario 1) és hulladékégetés (Scenario 2) vizsgált környezeti hatásainak normalizált és súlyozott értékei. (Mannheim, V.: Perspective: Comparison of end-of-life scenarios of municipal solid waste from viewpoint of life cycle assessment. Front. Built Environ. 2022, 8:991589).

Elsődleges kutatási eredményeim szerint, a fotokémiai ózonképződés, a fosszilis abiotikus kimerülés, az eutrofizáció, a globális felmelegedés és szárazföldi ökotoxicitás értékei magasabbak a lerakásnál, azonban hagyományos égetés teljes környezetterhelése kétszerese a lerakásnak. A tengeri ökotoxicitás az

égetésnél kiemelkedő. Az általam eddig áttekintett LCA-tanulmányok hasonlóképpen arra a következtetésre jutottak, hogy a hulladéklerakókban történő hulladékelhelyezés kisebb hatást gyakorolt a környezetre. Égetésnél azonban a villamosenergia-jóváírás értéke ötször magasabb. Azaz, itt olyan hulladékkezelési módról beszélhetünk, ami energia-visszanyeréshez és energetikai hasznosításhoz kapcsolódik.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Európa az európai zöld megállapodással, a fenntartható fejlődési célokkal és a körforgásos gazdaságra vonatkozó stratégiával összefüggésben 2050-re igyekszik elérni a klímasemlegességet (Kaczmarczyk és Urych, 2022). Következésképpen, fontos tényező a termelési hulladék csökkentése és az életciklus végi lehetőségek mérlegelése. Kutatási eredményeim felhasználhatók hulladékkezelési folyamatok összehasonlítására, valamint életciklus-vége eljárások környezeti terheléseinek további kutatására. A döntéshozatal támogató következtetések eredményeinek javítása érdekében előnyt jelenthet a technológiai jellemzők bizonytalansági elemzése és a hosszú távú hatások mérése. A bizonytalanság felméréséhez két megközelítés alkalmazható életciklus-értékelés segítségével: érzékenységi elemzés hot spotokon keresztül vagy Monte Carlo szimuláció. A hosszú távú hatások mérésével az erőforrások és a kibocsátások értékei választ adhatnak arra, hogy melyek a hulladékgazdálkodás gyenge pontjai és lehetőségei.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tématerületi kutatás a Miskolci Egyetemen, a Technológiai és Ipari Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kibocsátott támogatói okirat (Támogatói Okirat ikt. száma: TKP-17-1/PALY-2020) alapján végrehajtott projekt részeként valósult meg.

7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] STAHEL, W.R.: Circular economy. *Nature*. 531, (2016) pp. 435–438.
- [2] GROSSO, M.; NIERO, M.; RIGAMONTI, L.: Circular economy, permanent materials and limitations to recycling: Where do we stand and what is the way forward? *Waste Manag. Res.* 35(8), (2017) pp. 793-794.
- [3] ANDERSEN, S.C., BIRGISDOTTIR, H. AND BIRKVED, M.: Life Cycle Assessments of Circular Economy in the Built Environment - A Scoping Review. *Sustainability*. 14, (2022) 6887.
- [4] AVATÓ, J.L., MANNHEIM, V.: Life Cycle Assessment Model of a Catering Product: Comparing

Environmental Impacts for Different End-of-Life Scenarios. *Energies*. 15 (2022) 5423.

- [5] KHARRAZI, A., KRAINES, S.B., HOANG, L. AND YARIME, M.: Advancing quantification methods of sustainability: A critical examination emergy, exergy, ecological footprint, and ecological information-based approaches. *Ecological Indicators*. 37 (PART A), (2014) pp. 81–89.

[6] ARBAULT, D., RUGANI, B., BARNA, L. AND BENETTO, E.: A semantic study of the emergy sustainability index in the hybrid lifecycle-emergy framework. *Ecological Indicators*. 43, (2014) pp. 252–261.

- [7] SANTOS, R., AGUIAR COSTA, A., SILVESTRE, J.D. AND PYL, L.: Development of a BIM-based Environmental and Economic Life Cycle Assessment tool. *Journal of Cleaner Production* 265 (2020), 121705.

[8] CIVANCIK-USLU, D., PUIG, R., FERRER, L. AND FULLANA-I-PALMER, P.: Influence of end-of-life allocation, credits and other methodological issues in LCA of compounds: An in-company circular economy case study on packaging. *J. Clean. Prod.* 212, (2019) pp. 925–940.

- [9] TAŞKIN, A. AND DEMIR, N.: Life cycle environmental and energy impact assessment of sustainable urban municipal solid waste collection and transportation strategies. *Sustainable Cities and Society*. 61 (2020), 102339.

[10] MANNHEIM, V.: Life Cycle Assessment Model of Plastic Products: Comparing Environmental Impacts for Different Scenarios in the Production Stage. *Polymers* 13(5) (2021), 777.

- [11] GENOVESI, A., AVERSA, C., BARLETTA, M., CAPPIELLO, G. AND GISARIO A.: Comparative life cycle analysis of disposable and reusable tableware: The role of bioplastics', *Cleaner Engineering and Technology*. 6 (2022), 100419.

[12] VOSS, R., LEE, R.P., SEIDL, L., KELLER, F. AND FRÖHLING, M.: Global warming potential and economic performance of gasification-based chemical recycling and incineration pathways for residual municipal solid waste treatment in Germany. *Waste Management*. 134 (2021) pp. 206-219.

- [13] MANNHEIM, V.: Examination of thermic treatment and biogas processes by LCA. *Ann. Fac. Eng. Hunedoara Int. J. Eng.* 12 (2014) pp. 225–234.

[14] MANNHEIM, V.: Perspective: Comparison of end-of-life scenarios of municipal solid waste from viewpoint of life cycle assessment. *Front. Built Environ.* 8 (2022), 991589.

- [15] MANNHEIM, V., KRUSZELNICKA, W.: Energy-Model and Life Cycle-Model for Grinding Processes of Limestone Products. *Energies* 15, no. 10 (2022) 3816.

[16] KACZMARCZYK, B., URYCH, I.: Perception of the transition to a zero-emission economy in the opinion of polish students. *Energies* 15 (2022) 1102.

LEFÚVATOTT ROBBANÁSOK MAXIMÁLIS REDUKÁLT NYOMÁSÁNAK VIZSGÁLATA AZ EN 14994 ÉS NFPA 68 SZABVÁNYOK TÜKRÉBEN

INVESTIGATION OF THE MAXIMUM REDUCED PRESSURE OF VENTED EXPLOSIONS IN THE SCOPE OF EN 14994 AND NFPA 68 STANDARDS

Mikáczó Viktória*, Siménfalvi Zoltán**

ABSTRACT

When an explosion occurs in a closed vessel, its effect can be minimized with venting protection. To direct the released components, vent ducts can be used. However, this solution presents a backpressure to the flow, and has negative influence on the reduced pressure in the vessel. Based on the relevant standard relations, the authors performed a new relationship to calculate the increased reduced explosion overpressure that occurs when using a vent duct. The relation is applicable to the venting of propane-air mixtures between 2.8-6.3 vol.% from a 20 liter spherical vessel, besides using a straight vent duct of 30 mm diameter and $l/d = 33,3$ or shorter lengths, and a rupture disk with 0.49 bar_g activation pressure or less.

1. BEVEZETÉS

A por- és gázrobbanásveszély kielégítő kezelésének két alappillére a megelőzés és a védelem. Mivel a veszélyes állapot a bekövetkezési valószínűségének zérusra csökkentése lehetetlen, ezért egy esetleges robbanás során keletkező nyomáshullámokat és a lángot biztonságos határok közt kell tartani vagy elfojtani. Ez megoldható pl. robbanási nyomásálló építési móddal, lefúvásos védelem vagy elfojtás alkalmazásával [1].

Amennyiben a zárt térben bekövetkező robbanás lefúvatásra kerül, annak kedvezőtlen hatása minimalizálható. A hasadóelemek megfelelő méretezés esetén a robbanás korai szakaszában (névlegesen a P_{stat} statikus aktivációs nyomás elérésekor) kinyílnak, és elvezetik a lángokat, égéstermékeket, így mérsékelve biztonságos értékig a nyomást a készülék, berendezés vagy épület belsejében, a maximális redukált nyomás a készülék különböző pozícióiban mérve is azonos értéken tartható [2][3].

Ahhoz, hogy a lefúváskor távozó anyagok elkerüljék a munkaterületet vagy a szomszédos készülékeket, például lefúvató csatornák alkalmazása ajánlott. Ez a

megoldás azonban jelentős ellenállást jelent a lefúvatott közeg áramlásával szemben, amely kedvezőtlen befolyással van a védendő szerkezetben mérhető redukált nyomásra is [4][5][6].

A lefúvató csatornában lejátszódó folyamatok igen összetettek, amelyek befolyásolják a lefúvatást és a készülékben mérhető robbanási jelzőszámokat [7]. A közeg lefúvóvezetékben történő áramlása közben fellépő ellenállások a következők lehetnek (Russo [8] nyomán, kiegészítve):

- súrlódási veszteségek,
- szűkülő keresztmetszeten történő kiáramlás a készülékből a csatornába,
- a csatornában lévő légtömeg tehetetlensége,
- másodlagos robbanás a csatornában,
- akusztikus oszcillációk.

A lefúvató csatornákra vonatkozó vizsgálatok kevés kivételtől eltekintve kétféle irányba haladnak. A lefúvatásra érvényes számítási összefüggések többsége – így a szabványokban megtalálható számítási módszerek nagy része is – kiterjedt mérésorozatok eredménye, amelyekből a megfelelő következtetéseket levonva empirikus vagy félempirikus egyenletek származnak. A másik kutatási irány a szimulációk segítségével végrehajtott vizsgálatokat takarja.

2. MÉRÉSEK

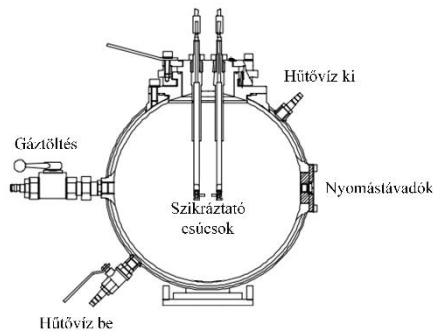
2.1. A mérőeszközök bemutatása

A szerzők a vizsgálataikhoz kapcsolódó méréseket a Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszékének DustLab laboratóriumában végezték.

A vizsgálatok központi berendezése egy, az EN 14034-1:2004+A1 szabvány [9] előírásainak megfelelő 20 liter űrtartalmú, Kühner gyártmányú robbantókamra volt, amelyet az 1. ábra szemléltet.

* tanársegéd, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** habilitált egyetemi docens, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet



1. ábra Gázmérésre szerelt 20 liter űrtartalmú Kühner robbantókamra vázlatja Cesana [10] nyomán

Fő egysége a gömb alakú, dupla korrózióálló acél fallal ellátott kamratest. Ennek két falrétege között víz áramoltatható a kontrollált teszthőmérsékletek biztosítása, a robbanás közben keletkező hő elvezetése és a kamra állandó hőmérsékleten tartása érdekében.

A gyújtóforrás a kamra középpontjában helyezkedik el. A vizsgálandó gázelegy gyújtását szikráztató csúcsok végzik, melyek távolsága 5 mm volt. Gázok gyújtóforrása 10 J energiájú folyamatos villamos ív.

A felépülő nyomásprofil rögzítését két darab Kistler gyártmányú piezoelektromos szenzor végzi, továbbá lehetőség van egy harmadik távadó felszerelésére is. A kamra középső övén kialakított karimára további mérőegységek rögzíthetők. Az egység mérés utáni tisztítása a felső csonkon át, gázzal (többnyire környezeti levegővel) történő átöblítése pedig az oldalsó gömbcsapon keresztül történik.

A mérési program vezérlését, valamint a Kistler távadók által továbbított jel feldolgozását a KSEP számítógépes szoftver végzi.

A mérés kezdetén, annak érdekében, hogy a kamra belsejében a robbanóképes elegy betöltése után légköri nyomás alakuljon ki, a kamra előzetes vákuumozása szükséges $-0,6 \text{ bar}_g$ értékre. Gázelegyek mérése esetén az adagolásért és a vákuumozásért felelős szerelvények kézi vezérlésűek. A betöltés után 60 ms időtartamú, szoftveresen vezérelt késleltetés után megtörténik a gyújtás. Az adott anyagpárra jellemző robbanási karakterisztika felvételéhez több méréssorozatot is el kell végezni, előre meghatározott koncentrációk sorozata szerint.

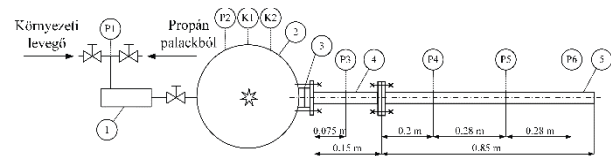
2.2. Lefúvatott robbanásokkal kapcsolatos mérések

A lefúvatott robbanások vizsgálata a már bemutatott Kühner robbantókamrával és annak a szerzők által kidolgozott [11] töltési módjával történt. A Kistler távadókon kívül a nyomásértékek rögzítése külső távadókkal és HBM típusú mérő-adatgyűjtő egységgel valósult meg.

A vizsgált propán-levegő elegyek 2,8, 3,8, 4,8, 4,8, 6,3 V/V\% propánt tartalmaztak. Minden egyes feltüntetett koncentrációhoz legalább három különböző mérés tartozik.

Hasadóelemként a szerzők kereskedelmi forgalomban is elérhető alumínium fóliákat alkalmaztak, amelyeket 300°C -on 30 percig való hűn tartással, majd levegőn való hűtéssel készítették elő. Az alkalmazott alumínium fólia működése során síktárcsaként viselkedik, amelynek az EN ISO 4126-6 jelű szabvány [12] által ajánlott maximális nyitási türése $\pm 50\%$.

A hasadóelemeket az ipari gyakorlatban alkalmazott hasadótárcsa-befogók mintájára tervezett befogókkal a kamrán kialakított kémlelőnyílás helyére illesztették. A lefúvatásért felelős elemek mérési elrendezésének sémáját a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A lefúvatott robbanások mérési elrendezésének vázlatja

Az ábra jelölései a következők: 1: gáztöltő kamra, 2: 20 liter űrtartalmú robbantókamra, 3: hasadóelem a befogókkal, 4: 0,15 m hosszúságú lefúvató csatorna elem, 5: 0,85 m hosszúságú lefúvató csatorna elem, K1, K2: Kistler gyártmányú piezoelektromos távadó vezérlésre, maximumértékek rögzítésére, P1 – P6 Hottinger gyártmányú nyomástávadó a teljes nyomásgörbék rögzítésére.

Mind a hasadóelem nyílófelülete, mind a csatornák belső átmérője 30 mm volt. A szerzők lefúvató csatorna nélkül (0 m hosszúságú csatorna), valamint 0,15 m és 1 m hosszú csatornával végeztek méréseket, tehát a vizsgált csatornák l/d viszonya rendre 0, 5 és 33,3 értékre adódott.

A szerzők minden mérési adatsorból jelen vizsgálatok elvégzéséhez két fő paramétert határoztak meg:

- a fólia nyitónyomását (P_{set}),
- a propán-levegő keverék maximális redukált nyomását ($P_{red,max}$).

2.3. Mérési eredmények

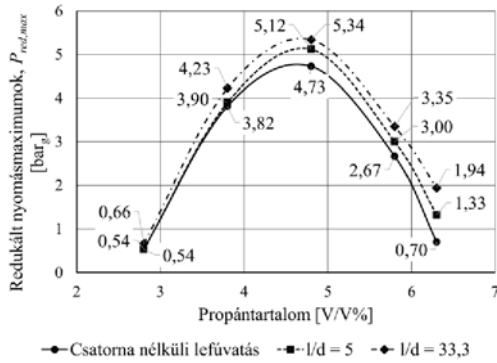
2.3.1 A hasadóelemek nyitónyomása

A hasadóelemként használt fóliák nyitónyomása a robbanás során felvett nyomásgörbékből állapítható meg, mind lefúvóvezeték nélküli, mind a lefúvóvezetékkel végzett esetben. A szerzők a nyitónyomást a készüléken elhelyezett P2 jelű nyomástávadó jelében a robbanás kezdeti szakaszán bekövetkezett változásból határozták meg. Így a fóliák átlagos nyitónyomására $P_{set} = 0,49 \text{ bar}_g$ adódott, +8,81%

és -8,25% túréson belül, amely jóval az EN ISO 4126-6 szabvány által megfogalmazott $\pm 50\%$ -os határ alá esik.

2.3.2 Mért karakterisztikus jellemzők

Az 3. ábra grafikusan szemlélteti a redukált nyomások átlagértékeit a kezdeti propántartalom függvényében.



3. ábra A robbantókamrában mért redukált nyomások átlagos maximumértékei

Megfigyelhető, hogy a csatorna alkalmazása és annak hossza jelentős hatással van a kamrában mérhető nyomásértékekre. Továbbá az is látható, hogy a tüzelőanyagban szegényebb keverék kisebb hatást gyakorolt a kamrában mérhető maximumokra. A 2,8 V/V% propántartalom esetén a maximális redukált nyomások átlagértékei megegyeznek a csatorna nélküli és az $l/d=5$ hosszúságú csatorna esetén. Emelkedő propánmennyiségeknél a nyomások közötti különbségek is egyre jelentősebbé válnak.

3. A SZABVÁNYI AJÁNLÁSOK ALKALMAZHATÓSÁGA

A kamrában mérhető redukált robbanási nyomás maximumértékének becslésére mind az EN 14994 [13], mind az NFPA 68 [14] szabvány közöl számítási módokat. A továbbiakban a szerzők azt vizsgálták, hogy az elvégzett mérések során ezek az ajánlások mennyiben feleltek meg a redukált nyomás értékének becslésére.

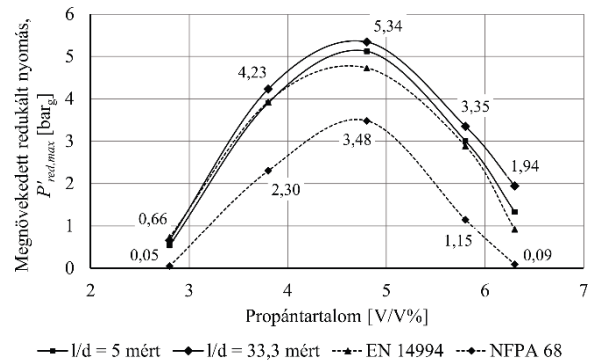
Az EN 14994 szabványban szereplő összefüggés szerint a csatorna redukált nyomást növelő hatása, amennyiben a lefűvővezeték hossza 3 méternél rövidebb:

$$P'_{red,max} = 1,24 \cdot P_{red,max}^{0,8614} \quad (1)$$

Az NFPA 68 szabvány szerint, ha a lefűvővezeték hossza 3 és 6 méter közé esik, vagy annál rövidebb, de a hossza a hidraulikai átmérő négyszeresénél nagyobb, a csatorna hatására megnövekedett redukált nyomás a (2) összefüggés segítségével számítható.

$$P'_{red,max} = 0,172 \cdot P_{red,max}^{1,936} \quad (2)$$

A szerzők az (1) és (2) összefüggéseket alkalmazták az általuk vizsgált esetekre. A szabványok részletesen taglalják az összefüggések alkalmazhatósági feltételeit, amelyeknek a vizsgált mérési geometriák megfelelnek. Mivel az összefüggések nem tartalmazzák a csatornahossz hatását, ezért célszerű volt a nyomásemelkedés szempontjából kedvezőtlenebb, $l/d=33,3$ hosszúságú lefűvató csatorna mérési eredményeivel összevetni őket. A számítási eredmények és a kamrában mért átlagos nyomásmaximumok összehasonlítását a 4. ábra, az eredményeket tételesen pedig az 1. táblázat tartalmazza.



4. ábra A mért, valamint az EN 14994 és NFPA 68 szabványok szerint meghatározott redukált nyomásmaximumok

1. táblázat A megnövekedett redukált nyomás maximumértékei

Propánt. [V/V%]	Mért maximumok		Szabványi számítások	
	l/d = 5	l/d = 33,3	EN 14994	NFPA 68
2,8	0,54	0,66	0,73	0,05
3,8	3,9	4,23	3,93	2,3
4,8	5,12	5,34	4,73	3,48
5,8	3	3,35	2,89	1,18
6,3	1,33	1,94	0,92	0,09

Ahogy a táblázatban szereplő adatokból is látható, a legnagyobb különbségek a mért és a számított értékek között a 4,8 V/V% kezdeti összetételű keverék esetén adódtak. Ekkor az EN 14994 szabvány 11,46%-kal, míg az NFPA 68 szabvány 34,8%-kal becsülte alá az $l/d=33,3$ hosszúságú csatornához tartozó eredményt. A nagymértékű pontatlanságok a lezajló részfolyamatok összetettsége okán szokványosak a robbanásbiztonságtan területén, ám a szabványi számítások a legkritikusabb koncentráció esetén alulról közelítik a mérési eredményeket, amelyek önmagukban is kockázatot jelentenek a lefűvő védelem tervezése során.

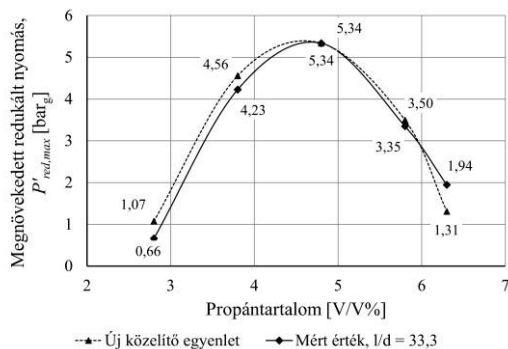
Az eltérések csökkentésének és a redukált nyomásmaximum megfelelő közelítésének érdekében szükségessé vált egy, az (1) és a (2) összefüggésekhez hasonló alakú egyenlet megalkotása. Az egyenlet az alábbi formában áll elő:

$$P'_{red,max} = a \cdot P_{red,max}^b \quad (3)$$

ahol a és b a keresett konstansok. Ezek értékét a szerzők az $l/d=33,3$ hosszúságú lefúvató csatorna esetén kapott redukált nyomásértékekhez igazították a legkisebb négyzetek módszerével úgy, hogy eközben az egyenlet a maximális nyomást eredményező koncentrációnál is felülről közelítse a mérési eredményeket. Így a következő konstansok adódtak: $a = 1,6953$ és $b = 0,7384$, amellyel az új közelítő egyenlet:

$$P'_{red,max} = 1,6953 \cdot P_{red,max}^{0,7384} \quad (4)$$

A (4) összefüggés segítségével kapott redukált robbanási nyomások a 5. ábrán láthatók. Az új összefüggés az elvárásoknak megfelelően a maximumértéknél 0%-os hibával közelíti a mérési eredményeket, valamint annak szomszédos értékeinél is felülről burkolják a mérési eredmények görbéjét.



5. ábra A mért redukált nyomásmaximumok összevetése a (4) egyenlet szerinti eredményekkel

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A használatban lévő, vonatkozó szabványos összefüggések mintájára a szerzők megalkottak egy új összefüggést a lefúvató csatorna használata mellett fellépő, megnövekedett redukált nyomásmaximum számítására.

Az összefüggés 2,8–6,3 V/V% kiindulási összetételű propán-levegő keverékek lefúvatása esetén alkalmazható, 20 literes űrtartalmú készülékből, 30 mm vagy annál nagyobb átmérőjű és $l/d=33,3$ hosszúságú vagy annál rövidebb egyenes lefúvató csatorna használatával, 0,49 bar_g vagy annál kisebb nyitónyomású hasadóelem alkalmazása mellett.

5. IRODALOM

- [1] BARTON J.: *Dust explosion prevention and protection – A practical guide*, Gulf Professional Publishing, 2002.
- [2] SUN S., WANG M., GAO K., ZHAO T., GUO Q.: Effect of vent conditions on internal overpressure time-history during a vented explosion, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 54, No. 1, (2018), pp. 85-92.
- [3] SUN S., QIU Y., XING H., WANG M.: Effects of concentration and initial turbulence on the vented explosion characteristics of methane-air mixtures, *Fuel*, Vol. 267., No. 1, (2020), pp. 1-9.
- [4] ECKHOFF R.K.: Current status and expected future trends in dust explosion research, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 18, No. 4-6, (2005), pp. 225-237.
- [5] TAMANINI F., VALIULIS J. V.: A correlatopn for the impulse produced by vented explosions, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 13, No. 3-5, (2018), pp. 227-289.
- [6] LUNN G. A., NICOL, A. M., COLLINS P. D., HUBBARD N. R.: Effects of vent ducts on the reduced pressures from explosions in dust collectors, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 11, (1998), pp. 109-121,
- [7] PANG L., ZHANG Z., CUI S., SUN S.: Experimental study of the venting characteristics of dust explosion through a vent duct, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 65, (2020), pp. 104144, doi:10.1016/j.jlp.2020.104144
- [8] RUSSO P., DI BENEDETTO P.: Effects of a duct on the venting of explosion – Critical review, *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 85, No. 1B, (2007), pp. 9-22.
- [9] EN 14034-1:2004+A1 standard: Determination of explosion characteristics of dust clouds – Part 1: Determination of the maximum explosion pressure P_{max} of dust clouds, 2004
- [10] CESANA C., SIWEK R.: *Manual for 20-l Apparatus 7.1*, Cesana AG, Switzerland, 2020
- [11] MIKACZO V., SIMENFALVI Z., SZEPESI L.: G.: Practical extension of ideal gas model for propane explosion simulation, *Pollack Periodica*, (2022), doi:10.1556/606.2022.00603
- [12] EN ISO 4126-6 standard: Safety devices for protection against excessive pressure – Part 6: Application, selection and installation of bursting disc safety devices, 2003
- [13] EN 14994 standard: Gas explosion venting protective systems, 2007
- [14] NFPA 68 standard: Standard on explosion protection by deflagration venting, 2018

BORDÁSCSÖVES HŐCSERÉLŐ SZERKEZETEK KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FINNED TUBE HEAT EXCHANGER STRUCTURES

Petrik Máté

ABSTRACT

Finned tube heat exchangers are preferably used in heat transfer processes where one of the media, typically the heat receiving medium, is in gas phase. Due to the material properties, the resulting heat transfer coefficient is typically low, resulting in a low heat performance. To compensate for this, an extended surface is used, which, despite the relatively low heat transfer coefficient, results in a significant increase in heat performance. As in the case of other forms of heat transfer, empirical Nu numbers can be derived from experimental investigations, this test method is also widely used for fin-tube heat exchangers. This paper presents the feasibility of experimental studies and the conclusions that can be drawn.

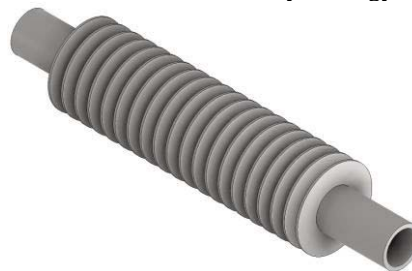
1. BEVEZETÉS

A hőcsereberendezések az egyik legszélesebb körben alkalmazott berendezések a vegyiparban és rokon iparágakban, például az energiaiparban és élelmiszeriparban. Az esetek többségében közvetett hőcsere megy végbe a fluidumok között (kivételek lehetnek például a hűtőtornyok, ahol a közvetlen hőátadást alkalmazzuk), a két áramló közeget a berendezés szilárd fala választja el egymástól.

A hőcsereberendezések egyik nagy csoportját a bordáscsöves hőcsereberendezések alkotják. Ezekről általánosságban elmondható, hogy olyan hűtési rendszerekben alkalmazzák, ahol a nagyobb hőmérsékletű folyadék entalpiájának egy részét a berendezés keresztáramló levegőnek adja át. A csövek belsejében áramló folyadék fázisú közeg rendszerint a többi hőcsereberendezésnél tapasztalt hőátadási tényezőt fog eredményezni. A gáz- vagy levegőoldalon viszont a kalorikus anyagjellemzők miatt a kialakuló hőátadási tényező értéke több nagyságrenddel is kisebb lehet, nem ritka itt a $15-20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ -s érték sem. Mivel a hőátviteli tényező ettől az értéktől is kisebb értékű lesz, az épített berendezés hőteljesítménye is alacsony értékű lesz. Ezt a jellemzőt kompenzálóan a hőátadási felületet érdemes megnövelni, melynek következtében kialakultak a bordáscsöves hőcsereberendezések [1,2].

2. BORDÁZOTT CSÖVEK

Megjegyzendő, hogy a bordák jelentős hatással vannak az áramlási viszonyokra is, mind a geometriai viszonyokra, mind a hidraulikai átmérő vonatkozásában. Ezt a számításokban úgy vehetjük figyelembe, hogy a sima, vagyis bordátlan csőre számított hőátadási tényezőt egy korrekciós tényezővel, a bordahatásfokkal módosítjuk. Ez a kiterjesztett felület többféleképpen is kialakítható, melyek mind gyártástechnológiai szempontból, mind felhasználási szempontból eltérnek egymástól. Továbbá a bordák ezekben az esetekben más-más hatással lesznek a hőátadási tényező nagyságára [3].



1. ábra Radiális bordák

Az 1. ábra kör alakú radiális bordák ábráját mutatja. Ezek a típusok nevezhetők a legáltalánosabb bordatípusnak. A bordák jellemzően egyenlő távolságokra vannak egymástól elhelyezve és egyenlő falvastagságúak. Sok esetben passzív hűtésekhez is alkalmazhatók, például számítógépek tápegységeit ilyen bordázattal látják el. A jó hővezetési tényezőjű szerkezeti anyag nagy felületen érintkezik a levegővel, így a szabadkonvekcióra jellemző rendkívül kicsi hőátadási tényező ellenére is egy viszonylag nagy hűtőteljesítmény érhető el [4].

Gyártástechnológiai szempontból is ezt a legegyszerűbb elkészíteni; a bordákat lemez alapanyagból valamilyen vágási technológiával kivágják (pl. lézersugár, vízsugár, plazma), majd a hagyományos csőre felhúzzák és a szabad oldaláról összehegesztik. Ilyen technikával gyakorlatilag bármilyen sűrűségű bordázás elkészíthető. Megjegyzendő, hogy bármilyen alakú bordák elkészíthetőek, de jellemzően a kör és négyzet alakzat a preferált. Ilyenkor azonban minden

adjunktus, Miskolci Egyetem, Energetika és Vegyipari Gépezeti Intézet

borda külső és belső profilját is el kell készíteni. Van olyan lehetőségünk is, amikor a belső anyagrészt nem távolítják el, hanem keresztben bevágják, és egy csővel megegyező átmérőjű munkadarabra ráhúzzák a bordát. Ilyenkor a felhajtott élek távtartóként működnek, ami a hővezetésre lesz pozitív hatással, mert nem lesz varrat, nem lesz hőhatásövezet, melyek hővezetési tényezője jellemzően kisebb, mint az alapanyagé [5]. Ilyen kialakításra mutat példát a 2. ábra.



2. ábra: Bevágással készített borda ábrája

A másik gyakran alkalmazott bordázási lehetőség a spirálbordák alkalmazása, melyet a 3. ábra mutat. Ebben az esetben a bordákat nem egyenként kell kialakítani, hanem egyetlen szalagból kerülnek kialakításra.



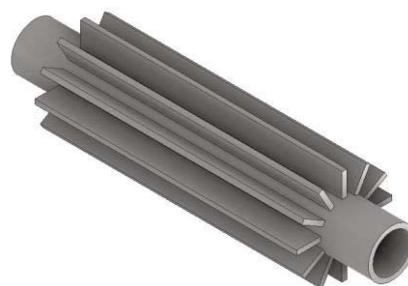
3. ábra Spirálbordák

Többféle technika is létezik az előállításukra, melyek közül a leggyakrabban alkalmazottak:

- a szalagot kézi vagy gépi erővel a csőre tekercselik, ilyen esetben nem szükséges hegesztetni,
- a csőbe a bordázásnak megfelelően a szalag lemezvastagságával megegyező szélességű hornyot munkálnak, és a szalagot ebbe tekercselik be. Ilyenkor a szalag két végét hozzá kell hegesztetni a csőhöz.
- Hegesztéssel vagy keményforrasztással is összeköthetők az elemek, ilyenkor előkészületekre nincs szükség.

Ilyen bordázást kazánokban, kemencékben, hőhasznosítóknál alkalmaznak [6], de a társasházak lépcsőházának jellemző fűtési berendezése is.

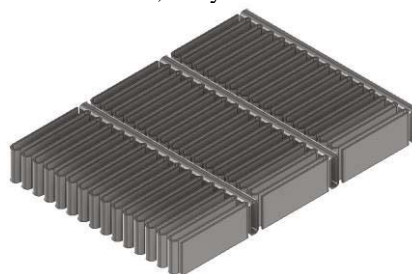
A 4. ábrán a hosszirányú bordákkal ellátott cső látható. Jellemzően ezen bordázási típus a legkevésbé elterjedt. A bordák ilyenkor is lehetnek egyenes szalagok (ahogy az ábrán is látható), de sok esetben a szalagokból U-alakú profilokat alakítanak ki, majd ezeket a profilokat lábaival kifelé rögzítik hozzá a csőhöz.



4. ábra: Axiális bordák

A hozzáférhetőség axiális bordák esetén korlátozott, így szinte kivétel nélkül ellenállás hegesztéssel készülnek. Jellemzően cső a csőben hőcserélőkben, tartályfűtő hőcserélőkben alkalmazzák. Kialakítása miatt célszerű függőlegesen beépíteni az üríthetőség és a korróziós problémák miatt [7].

A negyedik bemutatásra kerülő típus a rácsos bordás hőcserélők téma-területe, melyet az 5. ábra mutat.



5. ábra Lamellás kialakítás

Míg az eddig bemutatott bordázott csöveket olyan területeken alkalmazzák, ahol az üzemelés során szabadkonvekciós hőátadás alakul ki, addig a rácsos bordás hőcserélők esetén mindkét hőcserélőben részt vevő közeg kényszeráramoltatott, viszont a beépítési térfogat korlátozott. Ennek megfelelően két leggyakoribb alkalmazási területük a gépjárművek és a számítástechnika. A működési elvük teljesen azonos, mindössze a beépített méretükben van különbség: a hűtendő térfogat és a levegő között a hőcsere a hűtőközeggel valósítható meg. Gépkocsik esetén a hagyományos és elektromos meghajtással épített típusok esetén is jelentőségük van (előbbi esetben a belső égésű motorblokkot, utóbbi esetben az akkumulátor egységet szükséges hűteni), a számítógépek esetén pedig a processzor hűtésében játszik szerepet.

Az ábrán látható vékony csatornában párhuzamosan áramlik a hűtőközeg, a levegő pedig a bordák közötti réseken áramlik keresztül. Bárán kijelenthető, hogy ez az a hőcserélő típus, amelynek a hőátviteli tényezője a legnehezebben határozható meg, mert ez tartalmazza a legtöbb geometriai adatot és számítási bizonytalanságot [8-10]. Néhány, a bizonytalansági faktort növelő tényező:

- a hűtőközeg csatornái jellemzően nem kör keresztmetszetűek, hanem lekerekített téglalap

alakúak, és míg a kis méretek miatt az áramlást jellemző Reynolds szám a lamináris tartományba esik, addig a valóságban szinte bizonyosan az átmeneti áramlásra jellemző áramlási kép alakul ki.

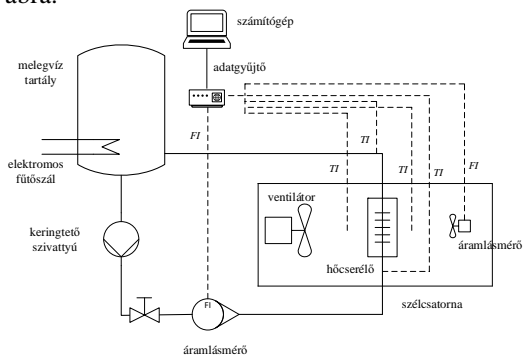
- A berendezések a csőoldalon kétjáratúak, viszont mindkét közeget tekintve keresztáramban áramlik egymáshoz képest a levegő és hűtőfolyadék.
- A csatornák jellemzően 15-28 sorban és 2-3 oszlopban kerülnek kialakításra. Az osztókamra és a belépő csonek geometriai kialakítása függvényében a csatornában tapasztalt eltérés a 10-15%-ot is meghaladhatja.
- A berendezések négyszögletesek, a légáramlást biztosító ventilátorok azonban kör alakúak, így a levegő áramlási sebessége is a pozíciótól függő érték lesz.

Az előző felsorolásból látható az analitikus számítás komplexitása. Ahogy a többi hőátadási formánál, ezek esetében is a kísérleti vizsgálatokból levont következtetések fogják a tapasztalati összefüggéseken szereplő konstansokat eredményezni. Jelen cikk célja, hogy a kísérleti vizsgálatok megvalósítása során milyen szempontokat kell szem előtt tartani.

3. KÍSÉRLETI BERENDEZÉS ÖSSZEÁLLÍTÁSA

A kísérleti vizsgálatok elvégzéséhez olyan mérőkört szükséges kialakítani, melyben négy egység összehangolt működése valósul meg: a melegvíz kör, a hűtőlevegő kör, a vizsgált berendezés és adatgyűjtés.

Egy ilyen mérőkör sematikus kialakítását mutatja a 6. ábra.



6. ábra: Mérőkör sematikus kialakítása

3.1. A melegvíz kör

A melegvízkör feladata a nagyobb hőmérsékletű (jellemzően 85-95°C) hűtőfolyadék szerepének betöltése. A kör megépítéséhez négy berendezés szükséges. Egy nagyobb térfogatú nyomástartó edényre, mely valamilyen elektromos vagy termikus módon fűthető; egy keringtető szivattyúra, mely a melegvíz szállítását biztosítja; egy áramlásmérőre, hogy információt kapjunk a keringtetett mennyiségre, valamint az ezeket összekötő csövezetékre és szerelvényeire. Az edény méretét a vizsgált hőcserélő

teljesítményének függvényében kell meghatározni, mérés során biztosítani kell, hogy 5-10 percnyi mérés során nem szabad számottevően lehűlnie, mert ezzel a stacioner működésre vonatkozó feltételek nem teljesülnének.

3.2. Levegőkör

A levegőkör feladata, hogy biztosítsa a berendezésen keresztülráramló levegő mozgását. Ez esetén célszerű olyan áramlási viszonyokat biztosítani, amilyen viszonyok a működés közben ébrednek. Alapvetően két módszer alkalmazható: szélcsatornában végzett mérések, amivel a mozgó gépjármű haladása modellezhető, valamint ventilátorral történő légszállítás. Utóbbi esetben akkor járunk el a legjobban, ha azzal a ventilátorral hozzuk létre az áramlást, amit üzem közben is alkalmazni fogunk. Itt visszautalnánk a pozícionálási problémákra is; annak is jelentősége lesz, hogy a ventilátor tengelye a hőcserélőhöz képest hol helyezkedik el.

3.3. Adatgyűjtés és feldolgozás

A vizsgálat gyakorlatilag legfontosabb elemei. A kísérletek során mind a levegőkörre, mind a melegvíz körre vonatkozóan információt kell kapnunk az áramlási sebességekre vagy térfogatáramokra, a be- és kilépő hőmérsékletekre, valamint a melegvízkör nyomására. Célszerű a vizsgálatokat tiszta közegekkel elvégezni így javasolt a melegvízkörnél a tiszta víz alkalmazása, de desztillált víz alkalmazása még pontosabb eredményt szolgáltat. A levegő esetén a páratartalom ismerete feltétlenül szükséges, mely zárt laboratóriumban jellemzően nem változik pillanatszerűen, így ennek a folyamatos detektálása nem szükséges.

A nyomás, hőmérséklet, páratartalom ismeretében a vizsgált közegek anyagjellemzői meghatározhatóvá válnak. Javasolt a kiértékelés során a mérés hőmérséklet tartományában az anyagjellemzőkből egy polinomfüggvényt meghatározni [11].

A hőmérséklet detektálására K-típusú hőelemek ajánlottak [12]. Ezek a legszélesebben alkalmazott hőelemek közé tartoznak, több előnyös tulajdonságuk miatt is:

- a hőmérséklet tartományuk -270°C és $+1260^{\circ}\text{C}$ között változik,
- hosszú élettartammal rendelkeznek,
- olcsók,
- gyors visszajelzést szolgáltatnak,
- pontossága $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$ vagy $\pm 0,75\%$.

A közegek áramlási sebessége lesz a másik fontos paraméter a kiértékelés során. Mivel a hőátadási tényezők a Re szám függvényeként értelmezhetők, ezért a vizsgálatok során az egyik közeg és a hajtóerőt szolgáltató hőmérséklet-különbség változatlansága mellett vizsgálhatóvá válik a hőátadási tényező értéke.

Mivel a víz zárt csővezetékben, a levegő pedig szabadon áramlik, így a mérési módjuk és eszközeik is különböznek egymástól. A csővezetéki áramlás indukciós, ultrahangos turbinás készülékekkel vagy rotaméterrel mérhető, míg légáramlás esetén szárnykerekű légsebességmérővel történhet.

4. KIÉRTÉKELÉS

A kísérleti vizsgálatok során a hőmérséklet értékeket elegendő 1-5 Hz mintavételezési frekvenciával detektálni. A mért értékek ismeretében a kalorikus anyagjellemzők meghatározhatók, az áramlási viszonyok és a hőátadó felület pedig a vizsgált berendezés és csővezetéki elemek geometriai méreteiből adódnak.

A kísérleti berendezéssel így gyakorlatilag egy egyszerűsített modell alkotható meg. A kapcsolatot a hőátadásra jellemző fizikai paraméterek között különböző hasonlósági kritériumokkal lehet felállítani. A hőátadás hasonlósági kritériuma a Nu szám, mely empirikus összefüggése jellemzően az alábbi alakban fejezhető ki:

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^m \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_w} \right)^{0,14}, \quad (1)$$

ahol

- C egy konfigurációtól függő tényező [-],
- Re a vizsgált közeg Reynolds száma [-],
- Pr a vizsgált közeg Prandtl száma [-],
- η a közeg közepes hőmérsékleten vett dinamikai viszkozitása [Pa·s],
- η_w a közeg dinamikai viszkozitása a fal hőmérsékletén [Pa·s],
- n, m empirikus kitevők [-].

A C, m, n konstansok meghatározásához a legkisebb négyzetek módszere alkalmazandó [13].

A vázolt mérési összeállítással nem csupán a stacioner hőátadási folyamatokat, hanem az időben változó folyamatokat is lehet modellezni. Ekkor a felfűtési és lehűlési folyamat során a hőcserélő berendezés viselkedésére kapunk mért értékeket.

Egy valós autóhűtő radiátor a saját ventilátoraival végzett kísérletei alapján a Nu számra vonatkozóan a következő összefüggést határozta meg [14]:

$$Nu = 0,817 \cdot Re^{0,6} \cdot \left(\frac{A}{A_{i0}} \right)^{-0,39} \cdot Pr^m, \quad (2)$$

ahol A a teljes hőátadó felület, A_{i0} pedig a bordázatlan cső hőátadó felület.

5. IRODALOM

- [1] SADEGHIANJAHROMI, A., & WANG, C.-C.: *Heat transfer enhancement in fin-and-tube heat exchangers – A review on different mechanisms*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137, 110470. (2021).
- [2] KOCUREK, R., & ADAMIEC, J.: *Manufacturing Technologies of Finned Tubes*. Advances in Materials Sciences, 13(3). (2013).
- [3] PETRACCI, I., MANNI, L., & GORI, F.: *Numerical simulation of the optimal spacing for a radial finned tube cooled by a rectangular jet. I – Average thermal results*. International Journal of Thermal Sciences, 104, 54–67. (2016).
- [4] TAHSEEN, T. A., ISHAK, M., & RAHMAN, M. M.: *An overview on thermal and fluid flow characteristics in a plain plate finned and un-finned tube banks heat exchanger*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 43, 363–380. (2015).
- [5] FENG, Z., MA, N., LI, W., NARASAKI, K., & LU, F.: *Efficient analysis of welding thermal conduction using the Newton–Raphson method, implicit method, and their combination*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 111(7–8), 1929–1940. (2020).
- [6] PONGSOI, P., PIKULKAJORN, S., & WONGWISES, S.: *Heat transfer and flow characteristics of spiral fin-and-tube heat exchangers: A review*. International Journal of Heat and Mass Transfer, 79, 417–431. (2014).
- [7] NÓBREGA, C. R. E. S., ISMAIL, K. A. R., & LINO, F. A. M.: *Solidification around axial finned tube submersed in PCM: Modeling and experiments*. Journal of Energy Storage, 29, 101438. (2020).
- [8] ZHANG, X., HUANG, Y., SONG, J., MA, Z., CHEN, L., & LI, T.: *Numerical investigation of the air-side performance of louver fin-and-tube radiators having rectangular, tapered and airfoil section configuration*. Energy Reports, 8, 11799–11809. (2022).
- [9] PETRIK, M., & SZEPESI, G.: *Experimental and numerical investigation of the air side heat transfer of a finned tubes heat exchanger*. Processes, 8(7). (2020).
- [10] SALEEM, A., & KIM, M.-H.: *Airside Thermal Performance of Louvered Fin Flat-Tube Heat Exchangers with Different Redirection Louvers*. Energies, 15(16), 5904. (2022).
- [11] CUNIS, T.: *The pwpfit Toolbox for Polynomial and Piece-wise Polynomial Data Fitting*. IFAC-PapersOnLine, 51(15), 682–687. (2018).
- [12] MANJHI, S. K., & KUMAR, R.: *Performance assessment of K-type, E-type and J-type coaxial thermocouples on the solar light beam for short duration transient measurements*. Measurement, 146, 343–355. (2019).
- [13] JIANG, B.-N.: *On the least-squares method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 152(1), 239–257. (1998).
- [14] PETRIK, M., ERDŐS, A., JÁRMAI, K., SZEPESI, G.: *Experimental Investigation of the Air-Side Heat Transfer Coefficient on Louver Finned Tube Automotive Radiator*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, 22 pp. 401-416. (2021)

NAPENERGIÁT HASZNOSÍTÓ, KÖZVETETT PÁROLOGTATÁSOS ELVEN ÜZEMELŐ LÉGKONDITIONÁLÓ BERENDEZÉS - ELVEK ÉS EGY LEHETSÉGES MEGVALÓSÍTÁS

INDIRECT EVAPORATIVE AIR CONDITIONING SYSTEM WITH SOLAR ENERGY UTILIZATION – PRINCIPLE OF OPERATION AND A POSSIBLE IMPLEMENTATION

Szaszák Norbert*

ABSTRACT

Both the industrial and the residential air conditioning systems are spreading year after year. The overwhelming majority of these systems uses compressors to produce the suitable pressures which are required for the applied heat-pump cycle. These compressors are driven by electric motors which – despite of the relative high efficiency of the thermal cycle – consume a significant amount of electrical energy. A remarkable portion of this energy required for the condensation of the evaporated cooling agent (compression work required) which circles around in the closed system. An alternative cooling method is that where the evaporation of clean water is applied to extract energy from the treated air which hence cools down. In this case the energy consuming compression along with the condensation of the water vapor is not required. However, the reduction of the humidity of the treated air is necessary by using desiccant in a closed loop. This process requires heat input for regeneration which – in this case – can be originated from solar thermal energy which is supposed to be eco-friendly and is cheaper than electrical energy. This paper shows the basic principles and a possible implementation of this kind of air conditioning system.

1. BEVEZETÉS

A komfortelméleti szempontokat figyelembe véve mind az ipari-, mind pedig a lakóépületekben fontos biztosítani az emberi komfortnak megfelelő levegő-paramétereket [1]. Ez magában foglalja a hideg évszakokban a zárt terek levegőjének fűtését, továbbá a meleg időszakokban a levegő hűtését. Emellett továbbá a kellemes klíma biztosításához még a levegő páratartalmát is megfelelő, az ember számára komfortos szinten szükséges tartani. Ez fűtés esetén jellemzően a

levegő párasítását, míg hűtés esetén annak szárítását jelenti. E dolgozatban a hűtést és az ezzel egyidejű légszárítást megvalósító, közvetett párologtatáson alapuló berendezés lehetséges kialakításával továbbá a működés elméleti hátterével foglalkozunk.

Több irodalmi forrás szerint az emberek számára a legalkalmasabb belső tér hőmérséklet – szellemi munkavégzés esetén – 20-26°C között változik, továbbá az ideális relatív páratartalom 40-60% [2, 3, 4]. Ezek az értékek azonban függenek az emberi tényezőtől (nem, életkor, lakóhely stb.), továbbá az aktivitás típusától is. Egy NASA tanulmány [5] szerint a munkakörnyezet hőmérsékletének növelésével jelentősen megnő a munkahibák előfordulási lehetősége is: 35°C esetén akár a 7-szeresére is nőhet ennek értéke az optimális hőfokon (itt 24°C) mérthez képest. Elmondható, hogy magasabb hőmérsékletek akkor komfortosak, amennyiben alacsonyabb a levegő relatív páratartalma.

Az előzőekben már említett relatív páratartalom jele φ , és értéke megadja a nedves levegőben található vízpára parciális nyomásának ($p_{p,vizpára}$) és az azonos hőmérsékletű (T_a) és nyomású (p_a), vízpárával telített levegőben lévő pára parciális nyomásának ($p_{vizpára}^*$) arányát:

$$\varphi = \frac{p_{p,vizpára}}{p_{vizpára}^*(T_a, p_a)} \cdot 100\% \quad (1)$$

Teljesen száraz levegő esetén a relatív páratartalom zérus, míg vízgőzzel telített levegő esetén $\varphi = 100\%$. Az ilyen levegő az adott hőfokon több párat már nem tud felvenni, viszont hűtés hatására megindul a pára kicsapódás: a levegő hőmérséklete csökken, belőle cseppfolyós (harmat) vagy szilárd halmazállapotú vízjég (dér) válik ki, miközben relatív páratartalma továbbra is 100% marad. Ebből következik, hogy szükséges egy olyan mennyiség bevezetése is, amely együtt változik a páralecsapódással és így megadja azt, hogy a levegő egységnyi tömegében mekkora tömegű vízgőz van

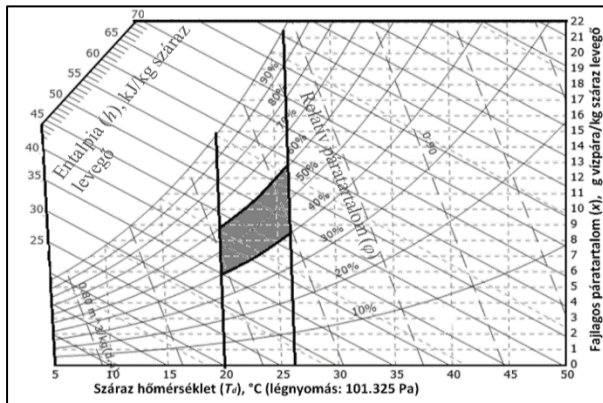
* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

jelen. Ezt fajlagos páratartalomnak nevezzük és x -szel jelöljük (kg vízpára/kg száraz levegő):

$$x = \frac{m_{\text{vízpára}}}{m_{\text{száraz levegő}}} \quad (2)$$

E mennyiségnek a klimatizálásnál fontos szerep jut, hiszen a levegő hűlésekor kialakuló kondenzáció esetén a kicsapódott víz mennyisége egységnyi tömegű száraz levegőre (dry-air; d.a.) vonatkoztatva éppen megegyezik a fajlagos páratartalom csökkenésével.

Az emberek számára komfortos levegő tartománya kijelölhető egy pszichrometriai diagramon, amely a levegő-vízgőz elegy fizikai és termodinamikai tulajdonságai közötti kapcsolatot ábrázolja. Egy ilyen diagram látható az 1. ábrán, amelyen bejelöltük a komfort-tartományt is.



1. ábra A nedves levegő termodinamikai tulajdonságai, továbbá az emberi komfort-zóna (módosított diagram, eredeti [6])

Az előző ábra értő ismerete nélkülözhetetlen a klimatizálás folyamatának megértése szempontjából. Látható a diagramon, hogy az emberi komfortzóna egy szűk tartományt jelöl ki, így az azon kívül eső jellemzőkkel bíró levegőt kezelni szükséges. Ez jelenthet párasítást vagy szárítást, továbbá hűtést vagy éppen fűtést.

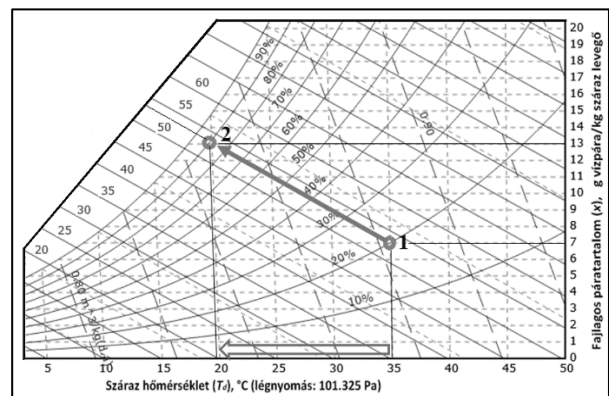
A jelen cikkben bemutatandó klimatizáló egység szempontjából a levegő hűtésének és szárításának folyamata a releváns, így ennek ismertetésére hagyatkozunk. A kompresszoros klímaberendezésektől eltérően a víz párologtatásán alapuló hűtőegységek nem tartalmaznak kompresszort, mivel nem szükséges az elpárolgott vizet újra cseppfolyós állapotba hozni; az pótolható frissvízzel. Ebből következik, hogy az ilyen rendszerek esetében a kompressziómunka megspórolható, azonban hátrányos tulajdonságuk is megemlítenél: az elérhető hűtött-levegő hőmérséklet függ a környezeti paraméterektől (mindig a környezeti levegő harmatponti-hőmérséklete feletti), ami jóval magasabb érték, mint a kompresszoros klímák esetében (ott a minimális hőfok az alkalmazott hűtőközegnek a

párologtatóban kialakuló nyomásához tartozó forráspontja közelébe esik). Azonban megfelelő környezeti viszonyok mellett ezzel a megoldással is jelentős mértékben csökkenthető a hűtött légtér hőmérséklete, ilyen módon a komfort-tartományba vihető a léghőmérséklet.

2. PÁROLOGTATÁS ELVÉN ÜZEMELŐ LÉGHŰTŐ BERENDEZÉSEK

A víz párologtatásának hőelvonó hatása alapján működő berendezések között megkülönböztetünk direkt és indirekt módon üzemelő berendezéseket.

A direkt, azaz közvetlen párologtatást megvalósító egységek közvetlenül a hűtendő légtérbe párologtatnak, így működésük független a külső környezet paramétereitől. Ennek a gyakorlatban két módja terjedt el: az egyik a porlasztásos párologtatás, a másik pedig a folyadékfilm-párologtatás. A porlasztás esetén a cél minél kisebb méretű vízcseppek létrehozása, így pedig a levegővel érintkező minél nagyobb – a folyadéktömegre vonatkoztatott – folyadékfelület biztosítása az intenzív párologtatás elérése céljából. A másik megoldás olyan anyagok alkalmazása, amelyeknek nagy a fajlagos felületük, s azt folyadékkal nedvesítve egy folyadékfilm alakul ki. A nedves felület felett, vagy porózus anyag esetén az azon keresztül biztosított légáramlás segítségével intenzív párologtatás valósítható meg, azonban ehhez a levegő számára megfelelően átjárható szerkezetű közeg szükséges [7, 8]. Direkt párologtatás esetében a hűtendő légtér hőmérséklete közvetlenül a párologó víz párologtató hője miatt csökken, ennek elvi folyamata tekinthető meg a 2. ábrán, ahol az 1-es állapotú meleg és alacsony páratartalmú levegő a benne történő párologtatás hatására izentalpikus ($h=áll.$) módon a 2-es állapotba jut.



2. ábra Közvetlen párologtatás során végbemenő légállapot-változás (módosított diagram, eredeti [6])

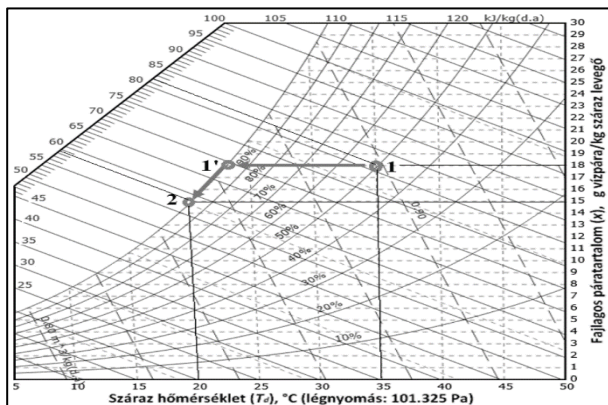
Megfigyelhető, hogy az entalpia állandósága mellett a levegő páratartalma $\varphi=20\%$ -ról $\varphi=90\%$ -ra emelkedett, miközben annak fajlagos páratartalma 7-ről 13 g/kg-ra

nőtt (jobb oldali tengely). Tehát száraz-levegő kg-onként 6 g víz elpárolgása történt meg. Egyébként az elméletileg maximálisan elpárolgatható vízmennyiség akkor adódna, ha a páratartalmat 100%-ig növelnénk, hiszen attól nagyobb mennyiségű vízgőz felvételére nem képes a levegő. A víz párolgásának energiaigénye számos tényezőtől függ, de közelítőleg a 3-as, igen egyszerű összefüggéssel adható meg:

$$E = m_{\text{víz}} \cdot r_{\text{víz}} \quad (3)$$

ahol $r_{\text{víz}} \approx 2436$ kJ/kg a víz párolgáshője 27 °C-on. Ennek alapján a 6 g víz elpárolgása 16,62 kJ hőt von el minden kilogrammnyi száraz levegőből, amely eredményeképpen a kezdetben 35°C-os levegő 20°C-ra hűl le (a 2. ábrán a „száraz hőmérséklet” tengelyén való elmozdulás). Az ilyen elven működő léghűtő berendezések működési elvének matematikai modelljét Camargo et al [9] írták le, majd a vizsgálataikkal [10] igazolták is a modellt. Később a folyamat numerikus modellezését, majd annak validálását Kovacevic és Sourbron [11] végezte el. A közvetlen párologtatás legnagyobb hátránya is látszik az ábrán: a lehűtött levegő relatív páratartalma megnő. Ez a magas érték (a példában 90%) messze az emberi komfortérték felett van: az ilyen levegőben nedvesnek érezzük testünket, ruházatunk a bőrünkhöz tapad. Ebből adódóan nem célszerű az ilyen elven működő berendezések emberi életterekben történő alkalmazása, azonban az ilyen gépek gyártói jellemzően nem hívják fel a vásárlók figyelmét e hátrányos tulajdonságra. Mindazonáltal ezek a berendezések igen jó hatékonysággal alkalmazhatók például üvegházak levegő-jellemzőinek beállítására [12].

A fajlagos páratartalom növelése nélkül valósítható meg léghűtés a közvetett típusú berendezés segítségével. Ekkor a víz párologtatása nem a hűtendő légtérbe, hanem a külső környezetbe történik. A hűtendő tér hőmérsékletét – a részleges párolgása miatt lehűlt – víz egy folyadék-levegő hőcserélőn keresztül csökkentti. Ezt a folyamatot tekinthetjük meg a 3. ábrán.

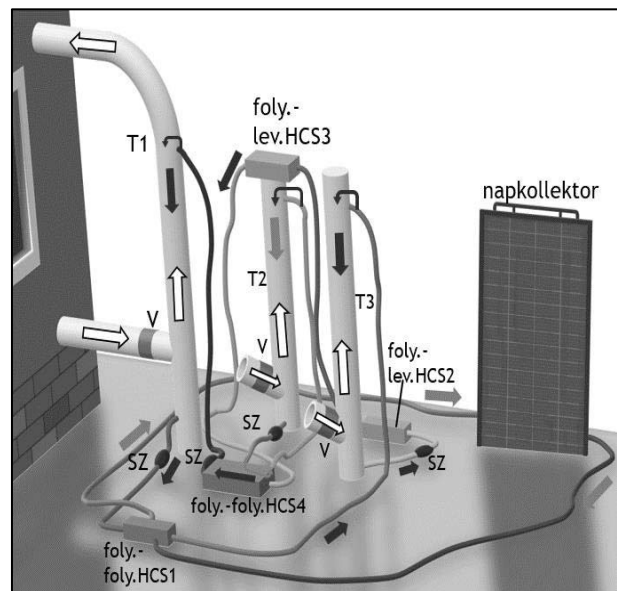


3. ábra Közvetett párologtatás során végbemenő légállapot-változás (módosított diagram, eredeti [6])

A hűlés során a relatív páratartalom a telítésig (1-1') konstans marad: $x = \text{áll.}$, azonban további hőelvonás esetén megkezdődik a kicsapódás (1'-2), aminek eredményeként a hűtött levegő fajlagos nedvességtartalma csökken ($x_2 < x_1$), miközben $\varphi = 100\% = \text{áll.}$ Ezzel a megoldással a kezelt levegő – a belső és külső légparaméterek függvényében – akár alacsonyabb hőfokúra is hűthető, mint direkt párologtatás esetén, azonban itt is párával telített levegőt kapunk.

A magas páratartalom csökkentése tehát elengedhetetlen a komfort-tartomány eléréséhez: e célra higroszkopikus (vízfelvevő) anyagokat alkalmazhatunk. Egy légszárításra alkalmas és könnyen elérhető anyagkeverék például a kalcium-klorid vizes oldata. A tömény oldatot tartalmazó folyadékfilmmel vagy folyadékcseppekkel érintkező levegő páratartalmának egy részét felveszi az oldat, miközben a levegő páratartalma csökken, az oldat pedig hígul. A felhígult oldatot regenerálni szükséges, amely eredményeként ismét tömény oldat jön létre. Ehhez az oldat melegítése szükséges, majd a meleg oldatot tartalmazó nagy felületű folyadékfilm és/vagy folyadékcseppek – a megnövekedett vízgőz-nyomás miatt – a külső környezet levegőjébe adják le víztartalmuk egy részét, miközben töménységük nő. Az indirekt evaporatív léghűtő berendezés előnye éppen abban rejlik, hogy a regenerációhoz szükséges hőigényt a napenergia segítségével napkollektorban előállított meleg hőhordozó közeg segítségével is biztosíthatjuk.

Egy ilyen elven működő léghűtő és -szárító berendezés vázlatát mutatja be a 4. ábra, amely felépítéséhez és a működésének részleteihez Robert Heron videója [13] szolgált hasznos információkkal.



4. ábra Közvetett párologtatást és légszárítást megvalósító berendezés vázlatát. T: torony, V: ventilátor, SZ: szivattyú, HCS: hőcserélő.

A berendezés működése a következő. A T1 toronyban található a kezelendő levegő a telített és hideg sóoldattal, aminek hatására a levegő hőmérséklete és fajlagos páratartalma is csökken, tehát ez maga a légtisztító rendszer célja. A HCS1-ben a napkollektorból érkező forró közegtől átvett hő miatt a beérkező felmelegedett és hígabb sóoldat felhevül, majd a T3 regeneráló-toronyba kerül. Itt a környezeti levegővel szembe áramoltatva víztartalmának egy része elpárolog miközben hőfoka csökken. A környezettől még melegebb, de már nagyobb koncentrációjú oldat a HCS2 hőcserélőben tovább hűl – közel a környezeti hőfokig –, majd ezt követően a víz párolgása miatt lehűlt levegővel hűtött HCS3 hőcserélőben (T2 tetején) a környezeti hőfok alá hűl. Ezt követi a HCS4 ellenáramú hőcserélőben történő hőelvonás, ahol a tömény oldat jó közelítéssel a hűtővíz hőfokára hűl le. Innen már ismét a T1 toronyba kerül, s a ciklus újraindul. A hűtővíz alacsony hőmérsékletét a T2-es párologtató-toronyban a környezeti levegő által okozott intenzív párolgás biztosítja (lásd a (3) összefüggést). E toronyban a hűtővíz folyamatosan kering a felfelé áramló levegővel szemben (folyadékfilm és folyadékcseppek a nagy párolgási felület céljából), miközben egy része elpárolog (ezt lágyvízzel pótolni szükséges), továbbá a megmaradó rész pedig lehül.

A cikk írásának idején a 4. ábrán vázolthoz hasonló rendszer összeállítása már megkezdődött. A berendezés laboratóriumi vizsgálatát klímakamrában kívánjuk elvégezni, ahol biztosítható a működési jellemzők állandó légparaméterek melletti meghatározása. A vizsgálatokhoz szükséges állandó értékű paraméterek biztosításához egy elektromos folyadékfűtő rendszerrel helyettesítjük a napkollektort, mivel így valósítható meg a konstans hőbevitel. Sikeres vizsgálatok és a rendszer alkalmas továbbfejlesztését követően már napkollektorral kívánjuk azt üzemeltetni, így a villamosenergia-fogyasztása csupán a szivattyúk és a ventilátorok energiafogyasztására fog korlátozódni.

6. IRODALOM

- [1] KONG D., LIU H., WU Y., LI, WEI B., YUAN M.: *Effects of indoor humidity on building occupants' thermal comfort and evidence in terms of climate adaptation*, Building and Environment, Vol. 155, (2019), pp. 298-307, doi:10.1016/j.buildenv.2019.02.039.
- [2] ANSI/ASHRAE standard 55–2010: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc, Tullie Circle, NE, Atlanta, 1791
- [3] ORMANDY, DAVID & EZRATTY, VÉRONIQUE.: *Health and thermal comfort: From WHO guidance to housing strategies*, Energy Policy Vol. 49. doi:10.1016/j.enpol.2011.09.003.(2011)
- [4] LEUSDEN, E, FREYMARK, H. " *Documentation of comfort for practical use*", Gesundheitsingenieur (1951) pp. 271-273 (német nyelven).
- [5] ANSI/ASHRAE standard 55–2010: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, American Society for Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc, Tullie Circle, NE, Atlanta (1791)
- [6] Online Interactive Psychrometric Chart. <http://www.flycarpet.net/en/psyonline>; hozzáférés: 2022.10.10.
- [7] Rafique, M. M., Gandhidasan, P., Rehman, S., Al-Hadhrami, L. M.: *A review on desiccant based evaporative cooling systems*, Renew. Sustain. Energy Rev. Vol. 45, pp. 145–159 (2015)
- [8] Bishoyi, D., Sudhakar, K.: *Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India*, Energy and Buildings Vol. 153, pp. 190-200. (2017)
- [9] Camargo, J.R., Ebinuma, C.D., Cardoso, S.: *A mathematical model for direct evaporative cooling air conditioning system*, Engenharia Térmica Vol. 4, pp. 30–34. (2003)
- [10] Camargo, J. R., Ebinuma, C.D., Silveira, J.L.: *Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city*, Int. J. Refriger. Vol. 28, pp. 1124–1132. (2005)
- [11] Kovacevic, I., Sourbron, M.: *The numerical model for direct evaporative cooler*, Appl. Therm. Eng. Vol. 113, pp. 8–19. (2017)
- [12] Franco, A., Valera, D.L., Pena, A.: *Energy efficiency in greenhouse evaporative cooling techniques: cooling boxes versus cellulose pads*, Energies, Vol. 7, pp. 1427–1447. (2014)
- [13] R. Heron: *Tech Ingredients channel* (<https://www.youtube.com/c/TechIngredients>); hozzáférés: 2022.10.14.

SZELEP HIRTELEN ZÁRÁS OKOZTA NYOMÁSLENGÉS VIZSGÁLATA

INVESTIGATION OF PRESSURE SWING IN CASE OF SUDDEN CLOSURE OF VALVE

Szepesi L. Gábor*

ABSTRACT

This article shows the effect that sudden closure of a valve has on the pressure in the system. It uses CFD simulations to investigate the phenomenon at different pressure levels. It points out that safety fittings in the system (in particular the rupture discs) may not function as intended.

1. BEVEZETÉS

A vegyipari és élelmiszeripari környezetben a közegek szállítása csővezetékeken keresztül történik. Különböző technológiai folyamatok, beavatkozások elvégzéséhez elzáró, szabályozó szerelvényeket alkalmaznak. Ezen szerelvények alapvetően lehetnek szelepek, csapok, tolózárak. Szelepek esetében az áramlás iránytörést szenved, míg csapok esetében alapvetően nem. Mindkét elzárószerelvény számos kedvező és kedvezőtlen tulajdonságokkal rendelkezik, de mindkét típusnak megvan a célzott felhasználási területe. Szabályozási feladatokra szelepeket, izolálásra csapokat használhatunk alapvetően. A kisméretű szerelvények (ha nem automatizált eszközről van szó) lehet közvetlen kézi működtetésű, a nagyobb dimenziók esetében valamilyen hajtómű alkalmazásával szükséges ezeket mozgatni. Az izolálásra használt kézi gömbcsapok egyik legnagyobb hátránya, hogy a teljesen nyitott állapotból rövid idő alatt teljesen zárt állapotba lehet állítani, ami a csővezetékrendszerben nyomáslengéseket okozhat [1]. Hasonló jelenséget mutathat szivattyúk hirtelen indulása és leállása [2]. Az ilyen módon kialakuló nyomáshullámok amplitúdója, időbeli lefutása számos geometriai paramétertől, közeg jellemzőitől és a csővezeték anyagától függ.

Li Jingpin et al [3] kísérleti berendezés segítségével elemezte a csővezetékben kialakuló sebességlengéseket, majd igazolta, hogy a SIMPLE nyomáskorrekciós algoritmus alkalmas a folyamat CFD szimulációjára.

Nikpour et al [4] szintén kísérleti és szimulációs módszereket alkalmazott csőszakaszban kialakuló nyomáslengések vizsgálatára. CFD környezetnek a FLUENT-et használták, ahol íves csőszakaszokkal

tartalmazó modellt elemeztek. A szimulációs és kísérleti eredmények összevetése során megállapították, hogy a csúcshullámok közötti eltérés maximálisan 2,64%, mely igazolja, hogy a CFD módszerekkel megbízható eredmények érhetőek el. Továbbá rámutattak arra, hogy a k-eps turbulenciamodellel kapott eredmények álltak a kísérleti méréshez legközelebb. Zhang és társai [5] gravitációs kialakítású csővezetékben vizsgálták a nyomáslengést 2s-ig tartó zárási folyamat során. Kutatásukban kimutatták, hogy levegő jelenléte a rendszerben jelentős hatást gyakorol a kialakuló nyomáslengésre.

2. NYOMÁSLENGÉS KIALAKULÁSA

Az elzárószerelvény hirtelen zárásakor kialakuló nyomáshullám a zárási helytől indul el egy meghatározott sebességgel. A hullámfront sebességének a meghatározásához szükséges ismerni a csőfal anyagát, a folyadék anyagjellemzőit, a folyadék sebességét. A folyadékelem hirtelen zárásakor összenyomódik, melyet a Hooke-törvénnyel írhatunk le:

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta p}{E_f}, \quad (1)$$

ahol

Δh - a folyadékelem összenyomódása,

h - a folyadékelem eredeti hossza,

Δp - a kialakuló nyomásváltozás,

E_f - a folyadék rugalmassági modulusa.

Ha feltételezzük, hogy a csőfal is rugalmas, akkor a folyadékelem által kifejtett nyomás hatására a csőfal kitágul, amit szintén a Hooke-törvénnyel tudunk leírni:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\Delta p}{2 \cdot \delta \cdot E_p} \quad (2)$$

ahol

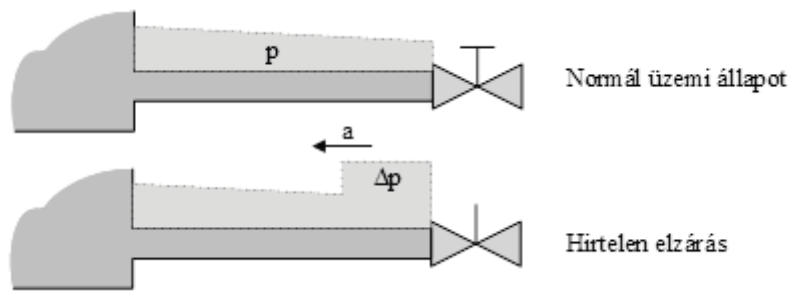
ΔD - a csőfal kitágulása,

D - a cső átmérője,

δ - a cső falvastagsága,

E_p - a csőfal rugalmassági modulusa.

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépezeti Intézet



1. ábra Nyomáshullám kialakulása hirtelen zárás esetén

A fenti egyenletekből definiálhatunk egy redukált rugalmassági modulust, mely figyelembe veszi mind a csőfal, mind a folyadék rugalmasságát:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1}{E_f} + \frac{1}{E_p \cdot \delta / D}, \quad (3)$$

A hullámsebesség terjedését a redukált rugalmassági modulus segítségével meghatározhatjuk:

$$a = \sqrt{\frac{E_r}{\rho}}, \quad (4)$$

A csővezeték hirtelen zárásakor fellépő nyomásemelkedés a Zsukovszki-összefüggéssel határozható meg.

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot \Delta v, \quad (5)$$

ahol
 Δp - nyomásváltozás,
 ρ - áramló közeg sűrűsége,
 a - visszaáramlási sebesség,
 Δv - sebességváltozás.

Abban az esetben, ha a zárás sebessége az alábbi összefüggés által számolt értéknél kisebb, akkor hirtelen zárásnak minősül, ellenkező esetben nem, így a kialakuló maximális nyomás kisebb lesz. A kritikus zárási idő:

$$\tau = \frac{2 \cdot l}{a}, \quad (6)$$

ahol
 l - a vizsgált egyenes csőszakasz.

A Joukowsky összefüggés felhasználja azt, hogy a folyadék áramlási sebessége nagyságrendekkel kisebb, mint a hullám terjedési sebessége.

Az 1-es ábrán szemléltetésre került, hogy a hirtelen zárásakor milyen módon épül fel a nyomásemelkedés. Ez

a nyomáshullám a folyadékáramlással ellentétes irányba indul meg, visszaverődik az elzárás helyétől. A nyomáshullám mögött depresszió is kialakulhat. A folyadék belső súrlódása csillapítja a jelenséget.

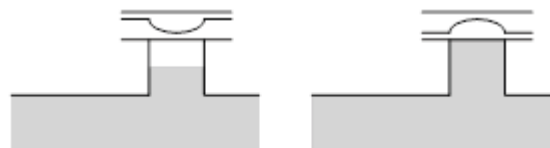
3. HASADÓTÁRCSA KONSTRUKCIÓK CSŐVEZETÉKEK TÚLNYOMÁS ELLENI VÉDELME

A csővezetékek, készülékek és egyéb rendszerek túlnyomás elleni védelmét alapvetően egy önműködően nyíló biztonsági szerelvényvel lehet kivitelezni. Az ilyen eszközök két típusba sorolhatóak: 1 – visszazáródó, 2 – nem visszazáródó. A működés után visszazáródó berendezések a biztonsági szelepek, míg a működés után nyitottan maradó eszközök a hasadótárcsák. Olyan esetekben, amikor egy veszélyes zavar következtében a nyomásemelkedés sebessége nagy, nem alkalmazható biztonsági szelep, mert a benne mozgó alkatrészek tehetetlensége miatt a nyitás sebessége nem tudja követni a nyomásemelkedés karakterisztikáját. Ilyen esetekben kivétel nélkül hasadótárcsákat szükséges alkalmazni.

A hasadótárcsa konstrukcióknak két típusa van:

- hagyományos típus,
- átbillenő típus.

A hagyományos típusú tárcsák lehetnek sík vagy elődomborított kivitelűek. (lásd 2. ábra, jobb oldali kép) Korlátok nélkül alkalmazhatóak folyadékos rendszerekben. Ezzel szemben az átbillenő típusú tárcsák csak abban az esetben alkalmazhatóak folyadékos rendszerben, ha a tárcsa előtti térfogatban található egy gáztér.



2. ábra Hasadótárcsa típusok

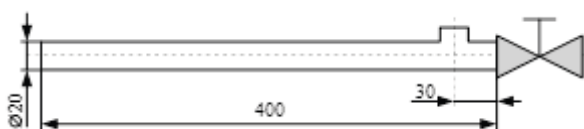
Ennek az az oka, hogy egy esetleges nyomáslengés az átbillenő hasadótárcsát átbillenti a neutrális pozíciójából, de akkora energiával nem rendelkezik,

hogy a hasadótárcsát ki is szakítsa. Ebben az új átbillent állapotban a hasadótárcsa nyitónyomása nem egyezik meg a bizonylatolt értékkel, hanem a biztonság rovására nagyobb értéken fog hasadni, ezáltal álbiztonságot teremt. Ezt leszámítva az átbillenő konstrukció számos előnnyel bírnak a hagyományos típussal szemben. A műszaki gyakorlatban, ahol lehetséges, gyakorlatilag kivétel nélkül ilyen, átbillenő (reverse) hasadótárcsákat alkalmaznak. A vizsgált rendszerben, mivel teljesen folyadékkal töltött rendszerről van szó, hagyományos típusú tárcsát vettem figyelembe.

3. NYOMÁSHULLÁM VIZSGÁLATA SZIMULÁCIÓVAL

A szerelvény hirtelen zárása következtében kialakuló nyomáshullám hatására a csővezeték túlnyomás elleni védelmét biztosító hasadótárcsa kiszakadhat. Arra kerestük a választ, hogy ilyen esetben milyen nyomás fog hatni a hasadótárcsára, elérheti-e a hasadótárcsa nyitónyomás értékét.

A numerikus szimuláció során alkalmazott geometriai modellt a 3. ábra szemlélteti.

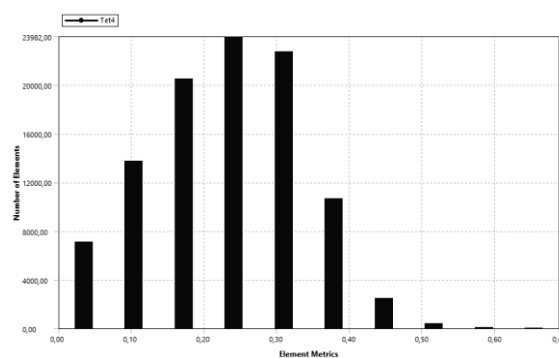


3. ábra Vizsgált csőszakasz

A 3-as ábrán látható modell a numerikus áramlástani szimulációhoz egyszerűsítésre került, a szeleptestet nem került modellezésre, az egy egyszerű falként volt kezelve. A számítási háló kialakításához tetraéder elemek kerültek alkalmazásra. A hálófüggetlenségi vizsgálat elvégzése után kijelenthető, hogy a 101449 elemet tartalmazó modell numerikusan megfelelő.



4. ábra Az alkalmazott numerikus háló



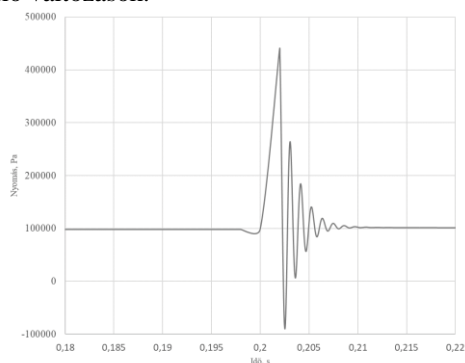
5. ábra Elemek minősége az alkalmazott hálón

Az 5. ábrán látható az elemek minőségét jellemző „skewnewss” értékek eloszlása. Jól látható, hogy a maximális érték 0,69, mely az elemek torzultságát jelenti (gyakorlatban a 0,8 alatti értékek megfelelőek).

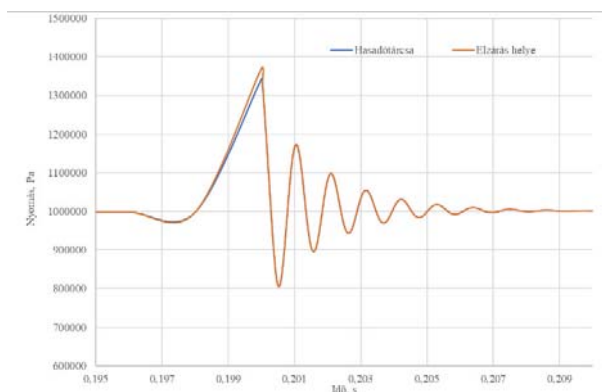
A számítás elvégzéséhez a preprocessálás során időben változó esetet volt szükséges vizsgálni, hiszen a tranzienseket kívántam meghatározni. A választott időlépték 3×10^{-5} s volt. Az áramló folyadékot összenyomható víznek volt feltételezve, ahol a víz rugalmassági modulusa $2,2 \times 10^9$ Pa. A kezdeti és peremfeltételek az alábbiak szerint alakultak:

- a belépési keresztmetszetben nyomás peremfeltétel található, melynek értéke 101325 Pa,
- a kilépési pontban sebesség peremfeltétel található az idő függvényében. A szimuláció kezdetén 2 m/s a sebesség, mely, 0,2 s alatt nullára csökken,
- a csővezeték falként volt figyelembe véve.

A számítások elemzéséhez szükséges volt egy felületet kijelölni, ahol a keletkező nyomásváltozás került regisztrálásra az idő függvényében, ez a modellben „rupturedisk” néven szerepel, valamint az elzárás közvetlen környezetében is regisztrálásra kerültek a kialakuló változások.



6. ábra Nyomásváltozás a hasadófelület közelében - szimulációs eredmények



7. ábra Nyomásváltozás a hasadófelület és az elzárás közelében - szimulációs eredmények

A 6. ábrából jól látható, hogy a 0,2s-nál bekövetkező hirtelen zárás milyen nyomásváltozást okoz. Egyértelműen kijelenthető, hogy a közel 4,5-szeres nyomásváltozás már a hasadótarcsa nyitónyomását meghaladhatja, ezért az nem tervezett veszélyforrás bekövetkezésének hatására fog kiszakadni. Jól látható továbbá, hogy milyen nyomáslengés fog a csővezetékben kialakulni. Elképzelhető, hogy a nyomáslengési csúcs hatására esetleg még nem éri el a nyomás a hasadótarcsa nyitónyomását, azonban a lengés a hasadótarcsa anyagában kisciklusú kifáradáshoz vezethet, mely szintén a hasadótarcsa indokolatlan nyitását fogja eredményezni.

A szimulációk különböző nyomások esetén kerültek elvégzésre. A 6. ábrán 1 barg-os a vízrendszer alapnyomása, míg a 7. ábrán látható eredmények esetén a rendszer nyomása 10 barg volt. Ezen az ábrán látható, hogy az elzárás helyén és a hasadófelület között milyen nyomásváltozás tapasztalható, ahogyan várható volt a hasadófelület közelében kis mértékben csökkent a kezdeti nyomáshullám maximum. A görbék közötti különbségből meghatározható a hullámterjedés sebessége, mely összevethető a (4)-es összefüggéssel.

Az elemzések eredménye rámutatott arra, hogy nem elegendő önmagában az áramlásból származó, folyadékban kialakuló nyomáslengést meghatározni, hanem a folyadékot körülvevő csővezeték és hasadótarcsa szilárdságtani állapotváltozását is szükséges vizsgálni. Ezért a kutatás a jövőben ebbe az irányba mutat.

ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott szimuláció egy, a műszaki gyakorlatban nagyon sokszor előforduló problémára világít rá. Számos esetben okozhat problémát szerelvények hirtelen zárása folyadékos környezetekben. Jelen cikk rámutat arra, hogy nem csak a hirtelen zárás, hanem szivattyú indulások is kiválthatnak ilyen folyamatokat. A nemkívánatos nyomáshullámok kialakulását megelőzendően a csővezetékrendszerbe építhetők csillapító elemek, vagy más típusú elzárószerelvények alkalmazása válhat szükségessé.

A folyamatok teljes értékű, szimulációs elemzéséhez ún. kapcsolt szimulációs eljárások elvégzése szükséges.

A kapcsolt szimulációhoz ugyan azt a modellt szükséges alkalmazni, mint a tisztán áramlási modellhez. A szimuláció során az áramlási szimulációval kapott eredmények megosztásra kerülnek a mechanikai, alakváltozást és feszültségeket leíró modellek eredményeivel is és ez visszafelé is érvényes. A kapcsolt szimuláció létrehozására (FSI – Fluid Structure Interaction) az ANSYS környezet lehetőséget biztosít.

6. IRODALOM

- [1] Dr. Szlivka F.: Hő- és áramlástechnika, Óbudai Egyetem, 2014.
- [2] Waterhammer – KSB know how brochures (<https://live-resources-e2e-sales.ksb.com/resource/blob/227418/b03ed4dd6aa0139a876090d66fe3b9f2/dow-1water-hammer-data.pdf>) link ellenőrizve: 2022.09.26.
- [3] LI Jinping, WU Peng és YANG J - Cfd Numerical Simulation of Water Hammer in Pipeline Based on the Navier-Stokes Equation - V European Conference on Computational Fluid Dynamics. Lisbon, Portugal, 14–17 June 2010
- [4] M. R. Nikpour · A. H. Nazemi · A. Hosseinzadeh Dalir F. Shoja · P. Varjavand- Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer, Arab J Sci Eng (2014) 39:2669–2675. DOI 10.1007/s13369-013-0942-1
- [5] Boran Zhang, Wuyi Wan, Mengshan Shi - Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer in Gravitational Pipe Flow with Continuous Air Entrainment. Water 2018, 10, 928; doi:10.3390/w10070928

SZÉLERŐMŰLAPÁTOK JEGESEDESE OKOZTA PROBLÉMÁK, A JEGESEDEÉS MODELLEZÉSE

ICING PROBLEMS OF WIND TURBINE BLADES, MODELLING OF ICING

Dr. Bolló Betti*, Tollár Sándor**

ABSTRACT

A significant proportion of the world's wind turbines, more than 30%, are installed in cold climates. Ice accretion on turbine structures can lead to a severe reduction in turbine energy production. The ice accretion increases the structural load and can also cause safety problems due to large ice particles falling off rotating turbine blades. Therefore, the study of wind turbine icing is receiving increasing attention. The modelling of icing and its effects is a complex task. By reviewing the relevant literature, we present the meteorological background and the factors influencing the formation of ice shapes. Simulation and empirical investigation options are described.

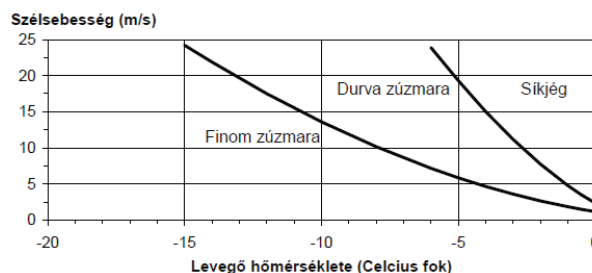
1. BEVEZETÉS

A világon egyre nagyobb számban telepített szélturbinák jelentős része, több mint 30%-a hideg éghajlaton üzemel [1]. Ezen kívül a mérsékelt égövi szélturbinák esetében is kialakulhatnak jegesedést okozó időjárási körülmények. A turbinaszervezeteken kialakult jégfelhalmozódás a turbinák energiatermelésében komoly csökkenést eredményezhet [2-5]. A kialakult jég szerkezeti terhelés növekedést jelent és biztonsági problémákat is okozhat a forgó turbinalapátokról leváló nagy méretű jégdarabok lezuhanása miatt [6-8]. Ezért egyre nagyobb figyelmet kap a szélturbinák jegesedésének vizsgálata. A jegesedés és hatásának modellezése összetett feladat. A vonatkozó irodalom áttekintésével bemutatjuk a jégrétegek kialakulásának meteorológia háttérét és a befolyásoló tényezőket. Ismertetjük a szimulációs és empirikus vizsgálati lehetőségeket.

2. JÉGKÉPZŐDÉS A FELÜLETEKEN

Jég akkor képződik, amikor a túlhűtött vízcseppek vagy köd ráfagy a felületekre. A szélturbinák jegesedési problémáit légköri jegesedési szituációk közül a felszínközeli jegesedés jelenti. A légköri jegesedést hagyományosan kétféle képződési folyamat alapján osztályozzák: felhőn belüli jegesedés és csapadékból

származó jegesedés. A mi esetünkben a csapadékból származó felszín közeli jegesedést kell figyelembe venni. Felszíni jegesedés alatt értünk minden olyan esetet, amikor a felszín tereptárgyain mikro- vagy makrocseppek által jeges lerakódás képződik. A csapadék lehet zúzmara, köd, ónos eső vagy tapadó hó. A kialakuló jég fajtája függ a szélsébségtől és a környezeti hőmérséklettől is, ez látható a 1. ábrán [9].



1. ábra: A kialakuló jég fajtái [9]

Meteorológiai szempontból három alapvető jégtípust különböztetnek meg, melyek fizikai tulajdonságaikban is különböznek egymástól:

- A finom zúzmara képződmények fehér jégtűk és pikkelyek megjelenését mutatják; törékenyek és könnyen lerázhatók a tárgyokról.

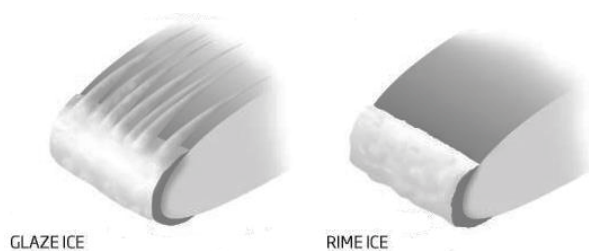
- A durva zúzmara akkor képződik, amikor a ködben lévő vízcseppek a tárgyak külső felületéhez fagnak.

- A síkjég, vagy mázas jég, sima, átlátszó és homogén jégbevonat, amely akkor keletkezik, amikor fagyos eső vagy szitálás esik a felületre.

A zúzmara jeget a nemzetközi szakirodalom *rime ice*-nek nevezi, míg a mázas jeget *glaze ice*-nek. A jégfajták közti különbség látható az 2. ábrán. A földfelszín közelében a mázas jég a fagyos esőcseppek felületre fagyásából alakul ki, míg a zúzmara jégképződést általában a túlhűtött köd okozza. A mázas jégképződés egyik tipikus megjelenési formája látható az ábra bal oldalán, amikor a repülőgépek szárny, vagy a szélturbina lapát belépő éléről a csapadék egy része az áramlás

*egyetemi docens, ** mesteroktató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

irányába folyva fagy meg. Az ábra jobb oldalán a zúzmarás jég látható.



2. ábra: jégformák szárnyprofilokon (NewScientist)

3. A SZÉLTURBINA ROTORLAPÁTOK JEGESEDESÉNEK KÖVETKEZMÉNYE

A jég lerakódása a turbinalapátokon jelentős mértékben megváltoztatja annak áramlástani profilját, ezáltal drasztikusan befolyásolja a működés szempontjából kiemelten fontos aerodinamikai jellemzőket. A felhajtóerő csökkenését és az ellenállásnövekedést idéz elő, ami a hideg éghajlati turbinák esetében éves szinten akár 50%-os termelési veszteséget eredményezhet [10]. Ezenkívül az egyenetlenül eloszló jégszerkezet többlet terhelést jelenthet a turbina szerkezetére, illetve élrezgések és kiegyensúlyozatlanság léphet fel, ami lerövidítheti a szélturbinák élettartamát [11, 12]. Egy 2014-ben megjelent átfogó értékelés a jég okozta teljesítménycsökkenésről és szerkezeti degradációról egy szimulált NREL 5 MW-os turbináról készült [13]. A tanulmány akár 35%-os összteljesítményvesztést és a névleges teljesítmény 11 m/s szélességről 19 m/s-ra történő eltolódását mutatta ki, hasonlóan más tanulmányokhoz [2, 14].

4. A TURBINALAPÁTOK JEGESEDESÉNEK SZIMULÁCIÓJA

A jegesedési jelenségek megismerésének és modellezhetőségének fontos szerepe van többek között az egyre elterjedtebb szélenergia villamos energia termelésének veszélyeztetése miatt. A kutatások a XXI. század elején kaptak nagyobb lendületet. A kezdeti kutatások L. Makkonen és E. P. Lozowski nevéhez fűződnek, akik több publikációban is összefoglalták a megelőző évtizedek jegesedésre vonatkozó előrejelzési kísérleteit [15-17]. A pontosabb szimulációs modellek fejlődését szintén L. Makkonen és E. P. Lozowski munkája indította jegesedés folyamatának fizikai részleteit is figyelembe vevő modellek fejlesztésével [9].

4.1. Jegesedés szimulációja a szélturбина lapátokon

A turbinalapátok jegesedésének hatását tapasztalati úton vagy szimuláció segítségével lehet meghatározni. A

lapátgeometria változtatása esetén a különböző jegesedési körülmények sokrétűsége miatt a teljes tapasztalati adatgyűjtés szinte kizárt. A szimulációs vizsgálatok helyességének megállapítása nehéz feladat. Bár a hasonló problémát jelentő repülőgépszárnyak jegesedésvizsgálata jóval korábban kezdődött és jelentős mennyiségű empirikus tapasztalat áll rendelkezésre – a különbségek miatt azok az eredmények nem használhatók fel maradéktalanul a turbinalapátok vizsgálatai során. Ilyen különbség például a jég kialakulásának helye. Míg a turbinalapátokon kialakuló jég a felszín közeli környezetben jön létre, addig a repülőgép szárnyakon megjelenő jég többségében a felhőkben lévő túlhűtött csapadék miatt alakul ki. A lapátprofilok geometriai mérete és alakja sem egyezik meg. A modern szélturбина lapátok profiljai jelentős mértékben aszimmetrikusak, valamint a szárnyprofil körüli áramlási sebesség is jelentősen eltér. Ezen kívül a turbinalapátokra érkező jegesedést okozó csapadék relatív becsapódási szöge a forgó lapátmozgás miatt folyamatosan változik. Mindezen különbségek indokolják a turbinalapátok külön vizsgálatát.

Jelenleg a probléma irodalmának áttekintése alapján elmondhatjuk, hogy a jég okozta hatások vizsgálati túlnyomóan numerikus szimulációkra alapulnak. Azonban a valós méretű és pontos lapátgeometria mellett végzett teljes turbina szimulációk reálisan nem oldhatók meg annak jelentős anyagi és időbeli ráfordítás igénye miatt. A jég miatt érdekessé váló felület közelében lévő tartomány pontos áramlástani megoldása technikailag problémás a nagy méretű, de finom szerkezetű háló generálása és használata miatt. Kezdetben a szárnyprofilok hengermetaszeteinek 2D, vagy kvázi 3D modelljein végeztek numerikus szimuláció segítségével jegesedés vizsgálatokat. A kapott eredmények alapján vizsgálják a szárnyprofilokat jegesedés szempontjából.

A jégakkumuláció kiszámítására leggyakrabban a FENSAP-ICE, a LEWICE, a TURBICE és hasonló jégképződés szimulációra alkalmas programokat alkalmaznak. Ezek használatával állítják elő az adott környezeti beállítások esetén kialakuló jég alakokat [18]. A különböző jegesedési körülmények mellett kialakuló szimulációval előállított jég alakok láthatók NACA profilokon a 3. ábrán.

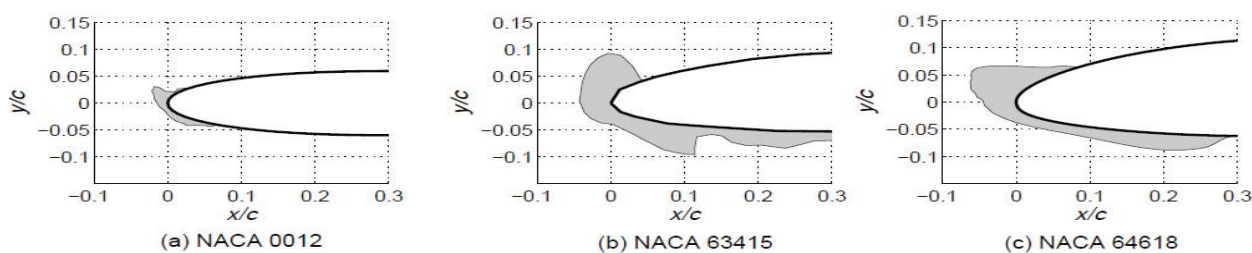
A jegesedés szimulációjában a légköri jegesedési körülmények meghatározása a legfontosabb. Ezek határozzák meg a jég típusát és a jegesedés intenzitását. Három meghatározó környezeti paraméter van:

- a csapadéksepp közepes átmérője (MVD),
- a fajlagos nedvességtartalom (LWC),
- a levegő hőmérséklete.

Amint már említettük a kialakuló jég fajtája függ a szél sebességétől is, így ezt is változó paraméternek kell tekintenünk. További adat a turbinalapát kerületi

sebessége és a jégakkumulációs idő, azaz a jég fejlődésére rendelkezésre álló idő. A lapátprofilok és a

megfúvási szögek ismeretében a jégképződési szimulációk elvégezhetők.



3. ábra: Különböző jégalakok NACA profilok belépő élén – szimuláció [18]

4.2. Az aerodinamikai jellemzők meghatározása szimulációval

A vizsgálat szempontjából fontos áramlástan jellemzőket, a felhajtóerő tényezőt, illetve az ellenállásérő tényezőt a jeges lapátalak meghatározását követően CFD szimulációk segítségével számítják ki. A legnagyobb problémát a jegesedett felület finom hálózása okozza, amely nélkül nem tudjuk pontosan számítani a profil körüli nyomáseloszlást. Erre a problémára különböző megoldások születtek az elmúlt időszakban. Ezen kívül a szimulációban használt turbulencia modell kiválasztása is nehéz, mivel nincs egyértelmű álláspont arra vonatkozóan, hogy melyik modell adja a legjobb eredményt. A különböző hengermetzeteken kapott eredmények a lapátelelem-impulzus (BEM) elmélet alkalmazásával tovább integrálódik a turbinák teljesítményadataiba [2, 14].

Azonban a turbinák jegesedésének erőteljes szimulációs erőfeszítései ellenére még a legkorszerűbb modellezések esetében is jelentős eltérés van a szimulációban használt beállítások és a turbinák terepen történő jegesedéséhez kapcsolódó beállítások között. A jelenlegi szimulációk elsősorban a jég felhalmozódásának és a kapcsolódó aerodinamikai paraméter romlásoknak a 2D-s modellezését használják, elhanyagolva a felhajtóerő és a légellenállás becslésére gyakorolt fontos 3D-s áramlást és turbulens hatást. De még ilyen egyszerűsített modellezés mellett is túl magasak a számítási költségek ahhoz, hogy a turbina jegesedési folyamata során az időben felbontott teljesítményt meg lehessen adni.

5. A SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK VALIDÁLÁSA

Jelenleg a legtöbb kísérletet a turbinák jegesedési szimulációinak validálására modellméretű turbinákkal végzik laboratóriumban, ellenőrzött jegesedési körülmények között. Ilyen vizsgálatok folytak például az Iowa Állami Egyetem jegesedési kutatólaboratóriumának felhasználásával [19-21]. A kísérletsorozatban 3D

jégakkumulációs profilokat kaptak a lapátrészeken és meghatározták a megfelelő aerodinamikai paramétereket, amelyek beépíthetők a jegesedési körülmények között működő turbinák energiavesztésének becslésére szolgáló BEM-modellekbe [4]. Egy másik vizsgálat során egy 100 W-os modellturbina 7,8 m × 11,6 m-es mesterséges klímakamrába helyezésével [22, 23] szisztematikusan jellemezték a turbina terhelési teljesítményének, rotorfordulatszámának és tengelynyomatékának változását egy 8 perces jegesedési folyamat során. Eredményeik azt mutatták, hogy a terhelési teljesítmény és a rotorfordulatszám 90%-ban csökken az első 4 percben. Azonban mind a turbina, mind a környezeti feltételek ezekben a laboratóriumi tesztekben lényegesen eltérnek a terepen működő turbináktól. Ezért e numerikus és laboratóriumi jegesedési vizsgálatok végső értékelésének biztosítása és a turbinák jegesedésére való gyakorlati alkalmazhatóságuk javítása érdekében kívánatos volna a turbina működésének részletes jellemzése a terepen, reális jegesedési körülmények között.

Sajnos az irodalomban ilyen információ nagyon ritka, elsősorban a szélérőmű-tulajdonosok által nyilvánosan hozzáférhető adatok hiánya miatt. A publikált irodalomban eddig szinte minden terepi mérés a jég által kiváltott teljesítménycsökkenés vizsgálatára irányult a SCADA rendszer adataival.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A szélturbina lapátokon kialakuló jégreteg hatása az energiatermelésre jól dokumentált. A folyamat szimulációjára rendelkezésre állnak megfelelő módszerek, illetve szoftverek. A jegesedett lapátok teljes 3D-s CFD szimulációja azonban a szélturbinák lapátjainak mérete miatt még nem általánosan használt megoldás. Ha különválasztjuk a jegesedés szimulációját és az áramlástan jellemzőket meghatározó CFD szimulációt, akkor látható, hogy a jegesedés modellezése 2D metszeteken nem ad elegendően pontos eredményt. A jégképződés 3D szimulációja azonban jó egyezést mutat a tapasztalati értékekkel. A létrejött felületek további áramlástan vizsgálata az érdekes és nagyon összetett

jégfelületek miatt három dimenzióban költséges és nehezen kivitelezhető, illetve nem elegendően pontos. Ezért az a megoldás tűnik járhatónak, hogy a 3D szimulációval előállított jegesedett felületekről készült 2D metszeteket vetjük alá jobban kezelhető CFD számításoknak. Az eredmények alapján a vizsgált profilokat összehasonlító elemzésnek vethetjük alá a jegesedési körülmények között kialakuló jégalak aerodinamikai tulajdonság módosító hatása szerint.

7. IRODALOM

- [1] Battisti, L., 2015. **Wind Energy in Cold Climates**, Green Energy and Technology, 43-111. DOI: 10.1007/978-3-319-05191-8_2
- [2] Homola, Matthew C., Virk, Muhammad S., Nicklasson, Per J., Sundsbo, Per A., 2012. **Performance losses due to ice accretion for a 5MW wind turbine**. Wind Energy 15, 379–389., DOI: 10.1002/we.
- [3] Lamraoui, F., Fortin, G., Benoit, R., Perron, J., Masson, C., 2014. **Atmospheric icing impact on wind turbine production**. Cold Regions Science and Technology, 100, 36–49. DOI: 10.1016/j.coldregions.2013.12.008.
- [4] Blasco, P., Palacios, J., Schmitz, S., 2017a. **Effect of icing roughness on wind turbine power production**. Wind Energy 20, 601–617. DOI: 10.1002/we.2026.
- [5] Zanon, A., De Gennaro, M., Kühnelt, H., 2018. **Wind energy harnessing of the NREL 5 MW reference wind turbine in icing conditions under different operational strategies**. Renew. Energy 115, 760–772.
- [6] Alsabagh, A.S.Y., Tiu, W., Xu, Y., Virk, M.S., 2013. **A review of the effects of ice accretion on the structural behavior of wind turbines**. Wind Engineering, 37(1), 59–70. DOI: 10.1260/0309-524X.37.1.59.
- [7] Gravesen, H., Sørensen, S.L., Vølund, P., Barker, A., Timco, G., 2005. **Ice loading on Danish wind turbines: part 2. Analyses of dynamic model test results**. Cold Reg. Sci. Technol. 41, 25–47. DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.05.009.
- [8] Barker, A., Timco, G., Gravesen, H., Vølund, P., 2005. **Ice loading on Danish wind turbines. Part 1: dynamic model tests**. Cold Reg. Sci. Technol. 41, 1–23., DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.05.002.
- [9] K. Tóth, 2007 **Zúzmaraképződés előre jelezhetőségének vizsgálata numerikus modell outputok alapján**. ELTE
- [10] Fakorede, O., Feger, Z., Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J., Masson, C., 2016. **Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, 662–675. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.080
- [11] Hu, L., Zhu, X., Hu, C., Chen, J., Du, Z., 2017. **Wind turbines ice distribution and load response under icing conditions**. Renew. Energy 113, 608–619. DOI: 10.1016/j.renene.2017.05.059.
- [12] Shi, W., Tan, X., Gao, Z., Moan, T., 2016. **Numerical study of ice-induced loads and responses of a monopile-type offshore wind turbine in parked and operating conditions**. Cold Regions Science and Technology, 123, 121–139. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.12.007
- [13] Etemaddar, M., Hansen, M.O.L., Moan, T., 2014. **Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions**. Wind Energy, 17(2), 241–265. DOI: 10.1002/we.1573.
- [14] Homola, M.C., Virk, M.S., Nicklasson, P.J., Sundsbø, P.A., 2012a. **Performance losses due to ice accretion for a 5 MW wind turbine**. Wind Energy, 15(3), 379–389. DOI: 10.1002/we.477.
- [15] Lozowski, E P; Makkonen, L 2005.: **Fifty Years of Progress in Modelling the Accumulation of Atmospheric Ice on Power Network Equipment**, The 11. International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 55-62., ISBN 2-9805200-1-2
- [16] Makkonen L., 2000. **Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures**, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 358. 2913-2939, 2000., DOI: 10.1098/rsta.2000.0690
- [17] Makkonen, L., Laakso, T., Marjaniemi, M., Finstad, K.J., 2001. **Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines**. Wind Eng. 25, 3–21. DOI: 10.1260/0309524011495791.
- [18] Gantasala, S., Tabatabaei, N., Cervantes, M., Aidanpää, J.O., 2019. **Numerical investigation of the aeroelastic behavior of a wind turbine with iced blades**. Energies, 12(12), 2422. DOI: 10.3390/en12122422.
- [19] Gao, L., Liu, Y., Zhou, W., Hu, H., 2019. **An experimental study on the aerodynamic performance degradation of a wind turbine blade model induced by ice accretion process**. Renewable Energy. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.032.
- [20] Gao, L., Veerakumar, R., Liu, Y., Hu, H., 2019. **Quantification of the 3D shapes of the ice structures accreted on a wind turbine airfoil model**. Journal of Visualization. DOI: 10.1007/s12650-019-00567-4.
- [21] Shu, L., Liang, J., Hu, Q., Jiang, X., Ren, X., Qiu, G., 2017. **Study on small wind turbine icing and its performance**. Cold Regions Science and Technology, 134, 11–19. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.11.004.
- [22] Shu, L., Li, H., Hu, Q., Jiang, X., Qiu, G., McClure, G., Yang, H., 2018. **Study of ice accretion feature and power characteristics of wind turbines at natural icing environment**. Cold Regions Science and Technology, 147, 45–54. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.01.006.

SZIMULÁCIÓS MODELL KIALAKÍTÁSA SZABAD ÁRAMLÁSBA HELYEZETT SZÁRNYPROFILOK VIZSGALATAHOZ

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR THE INVESTIGATION OF AIRFOIL PROFILES PLACED IN FREE FLOW

Tollár Sándor*

ABSTRACT

The aim of this article is to define the CFD simulation setup parameters for airfoil simulation in the free flow. We intend to use this model in further research to investigate the effects of different ice layers on airfoils. The NACA series 4412 airfoil was investigated at $Re = 10^6$. We have defined the domain, the mesh considering the boundary layer and the convergence criteria. Our results were compared with published computational data.

1. BEVEZETÉS

A szélturbinák szélsőséges üzemi körülmények között működnek. A jegesedési körülmények drasztikusan meg tudják változtatni a turbinák alapvető működési paramétereit. Amennyiben a lapátok felületén jég képződik, az lerontja a turbinalapátok aerodinamikai jellemzőit. A megváltozott jeges kontúr körül kialakult áramlás kisebb felhajtóerőt termel, az ellenállása viszont nagyobb lesz. A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy az erős jegesedés a turbina teljes leállítását eredményezheti és hogy a jég jóval tovább maradhat a lapátokon, mint a jegesedési állapotok kialakulása. Ennek következtében a zord helyszíneken az éves teljesítményvesztés akár 20-50%-ra is nőhet [1-5]. Kutatásunk témája a lapátprofilok jegesedésre való érzékenységének vizsgálata. Első lépésként a jegesedés nélküli profil vizsgálatával foglalkoztunk.

2. A SZÁRNYPROFILOK SZIMULÁCIÓS MODELLJÉNEK FŐBB PARAMÉTEREI

A vizsgálatokhoz az ANSYS Fluent 19R3 szoftver akadémiai verzióját használtuk. A vizsgálatot 2-D modell-vizsgálat formájában végeztük. A Reynolds-szám értéke $Re = 10^6$, a referencia megfűvási szög 10° volt. A geometria rögzítése után meghatározásra kerül a vizsgálati tartomány. Kialakítjuk a feladat jellegének leginkább megfelelő hibrid hálót: a profil közelében strukturált hálót használunk, a tartomány további

részében strukturálatlan hálót alkalmazunk. Ezt követően meghatározzuk a peremfeltételeket, majd kiválasztásra kerül a turbulencia modell, amihez az irodalmi ajánlásokat vesszük alapul, saját szimulációkat végzünk, melyek eredményeit a publikált számítási adatokkal összevetjük.

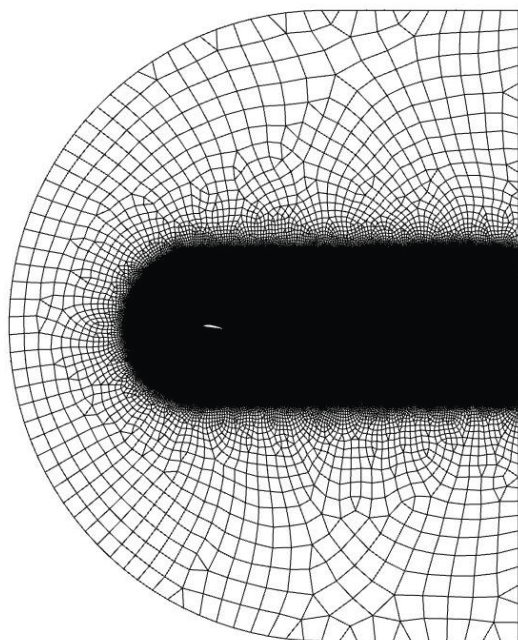
2.1. A vizsgált geometria

Kiválasztottuk a NACA4412-es profilt $L = 1$ m húrhosszal. Választásunk azért erre a profilra esett, mert az általunk kiindulásként használt Kollár és Mishra [6] féle jegesedési vizsgálatnak is ez a profil volt a tárgya.

2.2. Hálókészítés

A feladat megoldásához először meg kell határoznunk azt a 2-D tartományt- domain-t, ahol a számításokat el kívánjuk végezni. A szakirodalmi ajánlások alapján egy „D” alakú tartományt alakítottunk ki a vizsgálandó profil körül, melynek geometriai méretei a húrhosszhoz viszonyítva lettek meghatározva [7, 8]. A tartomány köríves belépő élének sugara $12,5L$, a tartomány hossza a félkör tartomány után szintén $12,5L$. A profil a körív origójában van pozícionálva. A tartomány köríves határa a vele tangenciális párhuzamos határoló egyenesekkel alkotja a belépő felületet, az inlet-et. A tartomány hátsó függőleges lezáró egyenese pedig a kilépő felületet, az outlet-et. A tartományon belül kialakítottunk egy közel-környezetet is, amelynek alakja szintén D , sugara $5L$, hossza pedig a tartomány hosszával megegyező $12,5L$. Ez a résztartomány tehát a kilépő felületig tart. A vizsgálati tartomány hálókialakítása az 1. ábrán látható. A vizsgálandó esetekben a Reynolds-szám értéke 10^6 , így számolnunk kell a turbulencia kialakulásával. A turbulencia a határrétegben alakul ki, a mi esetünkben a szabad áramlásba helyezett profil felülete mentén. Mivel a profil körül kialakuló nyomáseloszlás és az ebből származó felhajtóerő, valamint ellenálláserő számunkra értékes adat, a lehető legjobban kell számítanunk a határrétegben kialakuló nyomásértékeket.

* mesteroktató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék



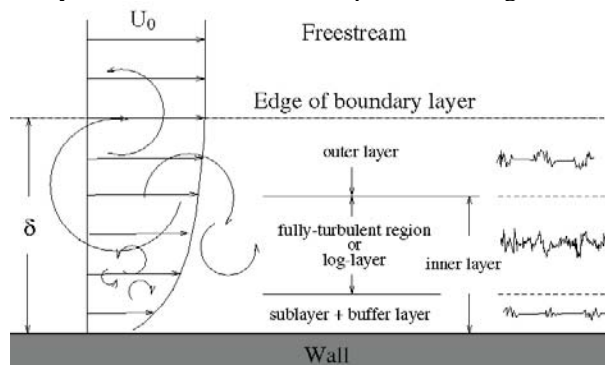
1. ábra: A vizsgálati tartomány

A számítási kapacitások optimális kihasználása is fontos a kutatás szempontjából, mivel a jövőben számos jeles profil vizsgálatát tervezünk különböző körülmények és megfúvási szögek mellett. Ezért keressük a szóba jöhető megoldások közül a leghatékonyabb módszert. A számítások műveletszáma nagymértékben függ a háló méretétől. Az eredmények pontossága pedig a háló minőségével áll szoros összefüggésben. Elkerülhetetlen a profil felülete mentén a háló szerkezetének finomítása. A határréteg vizsgálatához többretegű prizmatikus elemekből felépített háló szükséges. A rétegek száma és azok vastagsága csak komoly megfontolás után adható meg, mivel az függ a határréteg vastagságától, annak szerkezetétől, és a határrétegben kialakuló viszonyokat modellező módszertől is.

2.2.1. A határréteg kezelése a szimulációban

A határréteg alapvetően két részre bontható, a belső határrétegre, illetve a külső határrétegre [9, 10]. A belső határréteg tovább osztható a falhoz közvetlenül kapcsolódó viszkózus rétegre (viscous sublayer), és a külső határréteg felől található turbulens határrétegre (log-layer) illetve a két réteget összekapcsoló rétegre (buffer layer). Ez a felbontás figyelhető meg a 2. ábrán. Az áramlásba helyezett profil esetében a határrétegben azt tapasztalhatjuk, hogy a fal közvetlen közelében a viszkózus rétegben az áramlás lamináris, majd átlépve a buffer rétegbe megjelenik a turbulens áramlás. A belső réteg további tartományában teljesen turbulens áramlást tapasztalhatunk, majd a külső rétegben a turbulencia

mértéke csökken. A határréteg vastagsága azonban függ a Reynolds-számtól, valamint a profil állásszögétől.



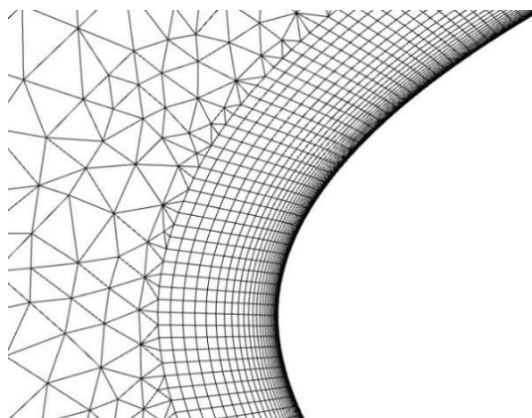
1. ábra: A határréteg felbontása [10]

A határrétegben a faltól mért távolság és a sebesség között a falhoz közel lineáris kapcsolat van, a faltól távolabb pedig logaritmusos. A két jelleg elvi határa a szakirodalomban használt y^+ dimenzió nélküli faltávolsággal megadva az $y^+ = 11,067$ értéknél lenne, ami a „buffer layer” tartományba esik. A viszkózus réteg ugyanis megközelítőleg az $y^+ = 5$ távolságig tart, míg $y^+ = 25$ fölött már a logaritmusos faltörvény érvényesül. A belső réteg határa $y^+ = 200$ körül található. A gyakorlatban két alapvető megoldás terjedt el a határréteg kezelésére: a fal funkciók használata és a viszkózus réteg megoldása.

2.2.1.1. Fal funkciók használata

A 2. ábrán látható határréteg profilt használja ez a módszer. A fal melletti cellákra érvényes értékek, mint például a nyírófeszültség meghatározásához a cella középpontjának a „log-layer” tartományba kell esnie. Ahhoz, hogy ez teljesüljön az első csomópontot $y^+ = 30$ és 300 között kell felvennünk (a cella középpontja így $y^+ = 15$ és 150 között lesz, ami az ábrán is láthatóan biztosan a „log-layer” tartományba esik). A mi esetünkben ez a módszer nem adna elegendően pontos megoldást, bár sokkal kevesebb cellaszámot kívánna.

2.2.1.2. A viszkózus réteg megoldása



2. ábra: Hálóstruktúra a profil közelében

Ahhoz, hogy a háló képes legyen a gradiensek megfelelő kezelésére, az első rácsméretnek $y^+ = 1$ -nek kell lennie és a rács növekedési faktora nem lehet nagyobb 1,2-nél. Ez a módszer sokkal több cellaszámot követel, így a számítási idő is jelentősen megnövekedik. A mi esetünkben azonban ez a módszer a javasolt a falon ébredő erők kiszámítására. Kutatásunk célja a jegesedett profilok vizsgálata, ezért a viszkózus réteg megoldást fogjuk alkalmazni. Az ezzel a módszerrel kialakított profil közeli prizmatikus háló a 3. ábrán látható.

2.3. Peremfeltételek és a szimuláció beállításai

A szárnyprofil kontúrján a sebesség értékeire Dirichlet típusú peremfeltételt írtunk elő, a nyomásra pedig Neumann típusú peremfeltételt adtunk meg. Az áramlás belépési felületét sebesség bemenetnek definiáltuk, a kilépő felületet pedig nyomáskimenetnek. Az áramló közeg levegő. Nyomás alapú megoldósémát alkalmaztunk, mivel az áramlás Mach száma 0,3 alatti. Valamennyi transzport-változó csillapítási faktorát 0,8 értékre állítottuk. A megoldás inicializálása a belépő felületről kezdve került kiszámításra. Az egyenletek megoldására 10^{-5} konvergencia kritériumot írtunk elő, melynek valamennyi maradványértékre teljesülnie kell.

3. A TURBULENCIA MODELL KIVÁLASZTÁSA

A szabad áramlásba helyezett profil körül kialakuló áramlás modellezésére magas Reynolds-szám mellett is különböző turbulencia modellt javasol a szakirodalom. Valamennyi modell rendelkezik bizonyos előnyökkel a többivel szemben a számítási kapacitás, a futásidő, az eredmények pontossága alapján. Az általunk vizsgált turbulencia modelleket röviden ismertetjük.

3.1. A RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Simulation) ismertetése

A RANS szélese körben alkalmazott megközelítés az ipari áramlások modellezésére, amely alkalmas a turbulens mozgás megjelenítésére. Az időátlagolt áramlás és turbulenciaszint elegendő információt szolgáltat a számunkra fontos felhajtóerő- és ellenállástényezők kiszámításához [11]. A RANS módszeren belül több különböző modell is elérhető az ANSYS Fluentben.

3.1.1. A Spalart-Allmaras modell

A Spalart-Allmaras modell egy-egyenletes modell, amit elsősorban repülőgépek alkalmazásához terveztek, hatékonyan modellezi az áramlást a szárnyprofil körül. A Spalart-Allmaras módosított kontinuitási egyenlet a turbulens viszkozitásra van felírva, ami azonban nem

érvényes a falhoz közeli zónára. Megjegyzendő, hogy ebben a modellben a turbulens kinetikus energiát nem számítják ki, ezért a transzportegyenlet utolsó tagját figyelmen kívül hagyják [11, 12].

3.1.2. A $k-\epsilon$ modell

A két-egyenletes $k-\epsilon$ modell a turbulens kinetikus energiát (k), illetve az örvény disszipációt (ϵ) számolja. A módszer a faltól távolabbi helyeken hatékony és pontos. A fal közelében nem ad jó eredményt, ezért valamilyen technikával ki kell egészíteni a módszert a fal közeli állapotok számításához. Ilyen technika lehet például a falfüggvények alkalmazása. A turbulens viszkozitás a k és az ϵ ismeretében számítható [11].

3.1.3. A $k-\omega$ modell

A szintén két-egyenletes $k-\omega$ modell a turbulens kinetikus energia (k) mellett a specifikus szóródási rátát (ω) állítja elő. Ez a módszer a fal közelében jó értékeket ad, azonban a faltól távolabbi terek feltérképezésére nem elég hatékony. A turbulens viszkozitás a k és az ω ismeretében számítható [11, 12].

3.1.4. Az SST $k-\omega$ módszer

Az SST $k-\omega$ (shear-stress transport - nyírófeszültség átvitel) módszer hatékony kombinációja a standard $k-\omega$ modell robusztusságának és pontosságának a fal közeli régióban és a $k-\epsilon$ modell faltól távolabbi független szabad áramlási szimulációjának. Lényege, hogy a turbulens viszkozitás meghatározását úgy módosítja, hogy a turbulens nyírófeszültség transzportját is figyelembe veszi [11].

1. táblázat A vizsgált turbulencia modellek

		Turbulencia modell
1.	időben állandó (Steady)	<i>Spalart-Allmaras</i>
2.	időben állandó (Steady)	<i>Standard $k-\omega$</i>
3.	időben változó (Transient)	<i>Spalart-Allmaras</i>
4.	időben változó (Transient)	<i>Realizable $k-\epsilon$</i>
5.	időben változó (Transient)	<i>Standard $k-\omega$</i>
6.	időben változó (Transient)	<i>SST $k-\omega$</i>

Vizsgálataink során hat különböző modellt alkalmaztunk a profil körüli nyomáseloszlás és az együtthatók megállapítására. A tesztelt modellek az 1. táblázatban láthatók. Két időben állandó beállítást is teszteltünk.

4. A SZIMULÁCIÓK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

Vizsgálatunk tárgya a NACA4412 jelű szárnyprofil 1 m húrhosszal [13]. A szimulációs vizsgálatokat 2-D szimulációként végeztük, a Reynolds-szám értéke $Re = 10^6$, a megfúvási szög $\alpha = 10^\circ$ volt. A referenciaként a NACA4412 szárnyprofilnak a nyilvános Airfoil Tools portál XFOIL program segítségével készült szimulációs eredményei szolgálták [13, 14]. Az adatok közt megtalálható az $Re = 10^6$ értékhez tartozó felhajtóerő tényező és ellenállástényező. A tranziens szimulációkhoz $5 \cdot 10^{-3}$ s időlépést állítottunk be, 20.000 lépéssel. A steady szimulációkat pedig 5000 iterációig futtattuk. A tranziens szimulációknál a reziduálok értékét 10^{-5} -re állítottuk. A szimulációs vizsgálatokat sorra elvégeztük, az eredményeket a referencia adatokkal együtt a 2. táblázatban összesítettük.

2. táblázat Az eredmények összehasonlítása

Reynolds-szám: 10^6			
megfúvás szöge: 10°			
	turbulencia modell	C_d	C_l
időben állandó	Spalart- Allmaras	0,0364	1,212
	$k-\omega$ Standard	0,0396	1,171
időben változó	$k-\epsilon$ realizable	0,0343	1,160
	Spalart - Allmaras	0,0327	1,230
	$k-\omega$ Standard	0,0305	1,369
	$k-\omega$ SST	0,0368	1,179
	XFOIL (ref.) [14]	0,0175	1,432

A szárnyprofil körül kialakult sebességeloszlás nagyon hasonló képet mutat minden általunk vizsgált módszer esetén.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Tapasztalataink alapján valamennyi beállítás konvergált C_l és C_d értékekhez és értékelhető eredményre vezetett. A további vizsgálatainkhoz a referencia értékekhez leginkább közel eső 3 modellt választottuk, melyek a tranziens modellek közül a Spalart-Allmaras, a $k-\omega$ standard és a $k-\omega$ SST módszer. További vizsgálatainkat $Re = 3 \cdot 10^6$ mellett végezzük és mérési adatokkal is összevetjük azokat, hogy a későbbi jegesedés vizsgálatokhoz kiválasszuk a turbulencia modellt.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

7. IRODALOM

- [1] L. Battisti, R. Fedrizzi, A. Brighenti, T. Laakso: **Sea ice and icing risk for offshore wind turbines**, Owemes 2006, 20-22 April. Citavecchia, Italy
- [2] Laakso, T., Holttinen, H., Ronsten, G., Horbaty, R., Lacroix, A., Peltola, E., Tammelin, B.: **State-of-the-art of wind energy in cold climates**, <http://arcticwind.vtt.fi>, 2003.
- [3] Tammelin, B., Cavaliere, M., Holttinen, H., Morgan, C., Seifert, H.: **Wind Energy in Cold Climate**, Final Report WECO (JOR3-CT95-0014) ISBN 951-679-518-6, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland, 2000.
- [4] Bose, N., Rong, J. Q.: **Power reduction from ice accretion on a horizontal axis wind turbine**, Proc.12th British Wind Energy Association, Wind Energy Conference Norwich, UK, 1990.
- [5] Maissan, J. F.: **Wind Power Development in Sub-Arctic Conditions with Severe Rime Icing**, TSYE Corporation - Circumpolar Climate Change Summit and Exposition, 2001.
- [6] L. E. Kollar, R. Mishra: **Inverse design of wind turbine blade sections for operation under icing conditions**, Energy Conversion and Management (2019) DOI:10.1016/j.enconman.2018.11.015
- [7] A. Meana-Fernández, J. M. F. Oro, K. M. A. Díaz, S. Velarde-Suárez: **Turbulence-Model Comparison for Aerodynamic-Performance Prediction of a Typical Vertical-Axis Wind-Turbine**, Airfoil, Energies (ISSN 1996-1073) (2019) DOI:10.3390/en12030488
- [8] S. Jain, N. Sitaram, S. Krishnaswamy: **Effect of Reynolds Number on Aerodynamics of Airfoil with Gurney Flap**, International Journal of Rotating Machinery, (2015) DOI: 10.1155/6149
- [9] J. Nikuradse: **Laws of Flow in Rough Pipes**, NACA, Washington (1950)
- [10] **Introduction to ANSYS Fluent - Turbulence Modeling**, ANSYS, Canonsburg, Pa, USA, (2014)
- [11] **ANSYS FLUENT Theory Guide**, ANSYS, Canonsburg, Pa, USA, (2014)
- [12] Spalart P. R. and Allmaras S. R., **A one-equation turbulence model for aerodynamic flows**, AIAA, vol. 092, no. 0439, (1992) DOI:10.2514/6.1992-439
- [13] Airfoil Tools - **NACA 4412 Xfoil prediction polar at RE=1,000,000**, <http://airfoiltools.com/polar/details?polar=xf-naca4412-il-1000000>
- [14] M. Drela, **XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils**, Conference on Low Reynolds Number Aerodynamics, University of Notre Dame (1989) DOI:10.1007/978-3-642-84010-4_1

REAKTORTARTÁLY TERMIKUS SOKKBÓL SZÁRMAZÓ FESZÜLTSEGEINEK VÉGESELEM MÓDSZERREL TÖRTÉNŐ ELEMZÉSE

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF PRESSURIZED THERMAL SHOCK INDUCED STRESSES IN A REACTOR PRESSURE VESSEL

Spisák Bernadett*, Szávai Szabolcs**

ABSTRACT

The APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock (PTS) Analysis for Long-Term Operation (LTO)) project was launched in October 2020 for four years with funding from the European Union's HORIZON 2020 program. This project contains 7 work packages (WP), the article introduces some of the results from WP3 where structural calculations for the determination of strain, stress and temperature in the RPV wall were carried out for a selected reference case.

1. BEVEZETÉS

Az APAL projekt fő célkitűzései egy korszerű valószínűségi számítási módszer kifejlesztése a nyomás alatt lévő termikus sokk értékelésére, a hosszú távú üzemeltetés javítására szolgáló biztonsági tartalékok számszerűsítése és a legjobb gyakorlatra vonatkozó útmutatás kidolgozása. A projekt a reaktortartályok (RPV) biztonsági értékelésével kapcsolatos multidiszciplináris és multifizikai kihívásokkal foglalkozik a termikus sokk (PTS) enyhítése tekintetében. Az e célok elérése érdekében öt technikai munkacsoport (WP) került kialakításra:

- WP1: kiterjedt szakirodalmi áttekintés és tapasztalatgyűjtés, célja az LTO-fejlesztések (hardver és szoftver) jelenlegi állásának azonosítása, amelyek kedvező vagy kedvezőtlen hatással lehetnek a PTS-elemzés eredményeire.
- WP2: termohidraulikai (TH) értékelés. Az LTO-fejlesztések és az emberi tényező TH vizsgálatra gyakorolt hatásának számszerűsítése, majd a későbbi szerkezeti és törésmechanikai benchmarkok (WP3 és WP4) segítségével értékelése.
- WP3: determinisztikus szerkezeti és törésmechanikai elemzések, célja az LTO-fejlesztésekhez kapcsolódó biztonsági tartalékok és a TH-elemzés bizonytalanságainak számszerűsítése.

- WP4: valószínűségi törésmechanikai elemzésen alapuló valószínűségi határértékelés. Ez lehetővé teszi a biztonsági tartalékok számszerűsítését a meghibásodás kockázatának szempontjából.
- WP5: az elvégzett munkából származó ajánlások és következtetések összegyűjtése a legjobb hosszútávú üzemeltetés korszerű PTS-elemzési módszereinek meghatározásához.

Jelen cikk a hármas munkacsoportban végzett feladatok és eredmények egy kis részét foglalja magába. A termohidraulikai vizsgálatok elvégzését követően a következő lépés a numerikus (pl. végeselemes) számítások voltak, amelyek segítségével a feszültség és a hőmérséklet eloszlások meghatározhatók a reaktortartály falában, és felhasználhatók a törésmechanikai értékeléshez. Azonban ennek eléréséhez szükséges a TH adatok megfelelő átvihetőségének a meghatározása, mivel a determinisztikus vizsgálatok nagy része 1D vagy tengelyszimmetrikus modell segítségével kerülnek megvalósításra. A következőkben a WP2-ben meghatározott TH terhelések végeselem modellre történő implementálása kerül bemutatásra.

2. A MODELL FELÉPÍTÉSE

A számításokat egy 4870 mm belső átmérőjű és 249 mm falvastagságú reaktortartályon végeztük el. A nyomástartó edény falán egy 6 mm vastag bevonat helyezkedik el. A szimulációk MSC.Marc Mentat végeselem szoftverben kerültek megoldásra.

2.1. Anyagtulajdonságok

Az alapanyag 22NiMoCr37 ferrites acélból, míg a bevonat 1.4551 ausztenites korrózióálló acélból készült. Ezek releváns hőmérsékletfüggő tulajdonságait az 1. és 2. táblázat mutatja be. A szimulációk során lineárisan rugalmas anyagmodell lett alkalmazva.

* tanársegéd, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, tudományos munkatárs, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Intézet, osztályvezető, Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.

1. táblázat Az alapfém (22NiMoCr37) anyagi jellemzői [1]

T [°C]	20	100	200	300	350
Rugalmassági modulus [GPa]	206	199	190	181	172
Poisson tényező	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Hővezetőképesség [W/(m·K)]	44,4	44,4	43,2	41,8	39,4
Fajhő [J/(g·K)]	0,45	0,49	0,52	0,56	0,61
Hőtágulási tényező [10 ⁻⁶ /K]	10,3	11,1	12,1	12,9	13,5

2. táblázat Az ausztenites bevonat (1.4551) anyagi jellemzői [1]

T [°C]	20	100	200	300	400
Rugalmassági modulus [GPa]	200	194	186	179	172
Poisson tényező	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Hővezetőképesség [W/(m·K)]	16	16	17	17	17
Fajhő [J/(g·K)]	0,5	0,5	0,54	0,54	0,59
Hőtágulási tényező [10 ⁻⁶ /K]	15	16	17	19	21

2.2. Terhelések

A reaktortartályra gyakorolt termikus terhelések a RELAP5 kódban [1] végzett szimulációkból származnak, amely a vízhűtéses atomerőművekben és a kapcsolódó rendszerekben bekövetkező tranziensek és balesetek elemzésére, valamint a korszerű reaktortervek elemzésére használható. Azonban annak érdekében, hogy ezek alkalmazhatók legyenek egy tengelyszimmetrikus modellben, egyszerűsítések kerültek bevezetésre. Ezáltal úgynevezett 0D/1D/2D TH adatokat generáltunk, amelyeket a 3. táblázat részletez. A 0D a TH adatok magasság és kerület menti átlagolását, az 1D az adott magasságnál a kerület menti átlagolását, míg a 2D az adatok egzakt pontból való kinyerését jelölik. A számítások során a reaktortartályon található két körvarratnál ébredő feszültségek meghatározása volt a cél, mivel ezek képezik a tartály leggyengébb pontjait. Ezáltal a hét verzióból három a magvarratra (CW) három pedig a peremnél található varratra (FW) vonatkozik.

A generált TH bemenetek és a magasságok eloszlásának jobb megértése érdekében a 4. táblázat és 2. ábra felső része a be- és kimeneti csomók elhelyezkedését mutatja be. A 2. ábra alsó fele a reaktor csomóponti elrendezését, az 5. táblázat pedig a létrehozott térfogatok magasságát szemlélteti. A

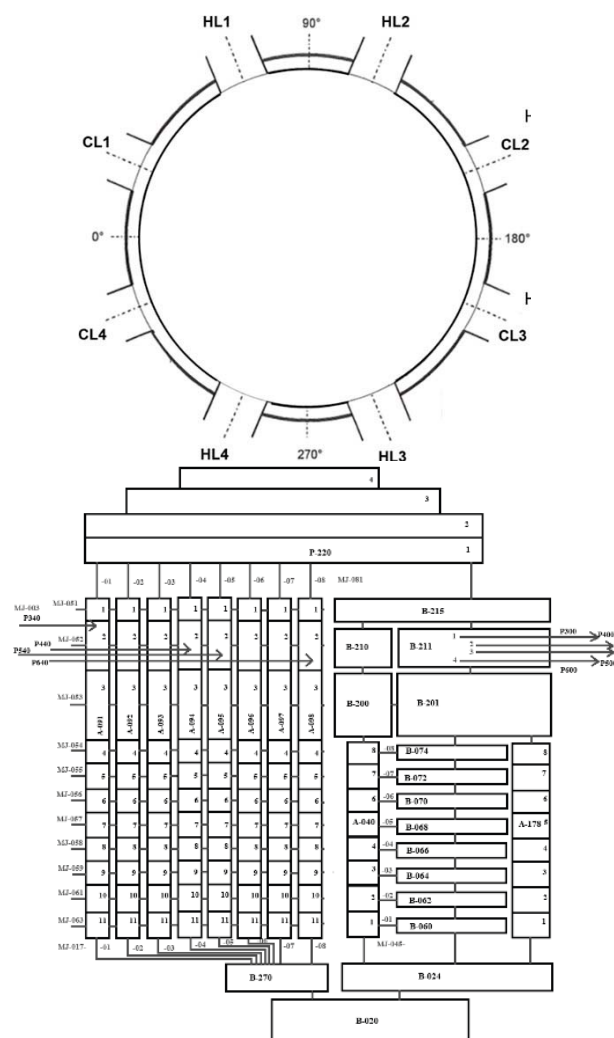
kiválasztott ágakat és térfogatoikat szürke színnel jelöltük a táblázatokban.

Ezeket az átlagolásokat mind a folyadék hőmérsékletére, mind a hőátadási tényezőkre elkészítettük, amelyeket később a szimulációkba implementáltunk.

3. táblázat RELAP5 adat variációk [1]

Elnevezések	RELAP5 adat helye	
	Magasság	Kerületi szög
0D – átlag	átlag	átlag
1D – CW	2638 mm (V05)	átlag
2D – CW/CL	2638 mm (V05)	202,5° (CL3)
2D – CW/ambient	2638 mm (V05)	337,5° (CL4)
1D – FW	1130 mm (V03)	átlag
2D – FW/CL	1130 mm (V03)	202,5° (CL3)
2D – FW/ambient	1130 mm (V03)	337,5° (CL4)

*CW: magvarrat, CL: hidegág FW: peremvarrat



2. ábra A reaktor nodalizálása [1]

4. táblázat Be- és kimenő ágak orientációja

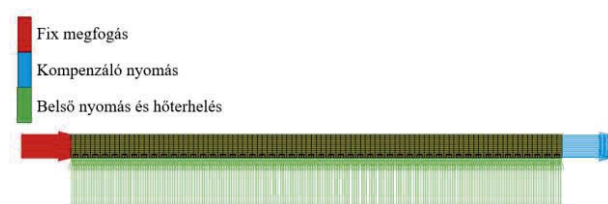
Csonk	CL1	HL1	HL2	CL2	CL3	HL4	HL4	CL4
Kerületi szög	22,5°	67,5°	112,5°	157,5°	202,5°	247,5°	292,5°	337,5°

5. táblázat DC térfogatok magassága

Térfogat	V01	V02	V03	V04	V05	V06	V07	V08	V09	V10	V11
Magasság	+0,5725	0,0	-1,13	-2,083	-2,638	-3,3215	-3,9745	-4,6275	-5,2809	-5,9335	-6,5155

A reaktortartály külső oldalát adiabatikusnak feltételeztük, itt a külső nyomást 0 MPa-nak vettük fel. Továbbá a belső oldalon egy időben változó nyomást helyeztünk el, amelyet hasonlóan a termikus adatokhoz a RELAP5 kód biztosított. Végezetül a fal végén jelen lévő, tengelyirányú feszültség figyelembevételéhez az egyik végére felkerült a belső nyomásból származó kompenzáló nyomás, a másikra pedig egy megfogás (3. ábra).

A számítások során a bevonatban jelen lévő maradót feszültségeket a kezdeti tranziens hőmérséklet megadásával lehet figyelembe venni, amely 291,042°C. Az 1. és 2. táblázatban szereplő adatok referencia hőmérséklete 20°C, ezáltal ennek az átváltása szükséges volt.



3. ábra Terhelések

Annak érdekében, hogy a két varratnál a feszültség profilok ellenőrizhetők legyenek 3D-s szimulációkat is készítettünk, melynek során a belső falon az egyes esetekben származó adatok kerültek elhelyezésre, így vizsgálhatóak voltak a geometria hatások. A 3D modellt a 4. ábra szemlélteti.

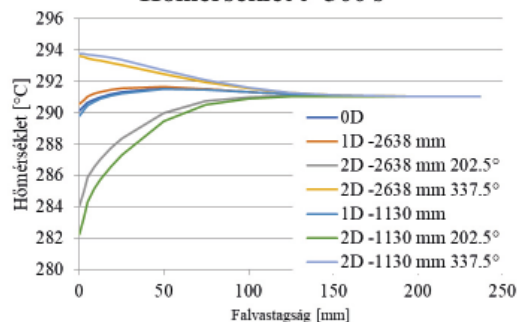


4. ábra 3D modell

3. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

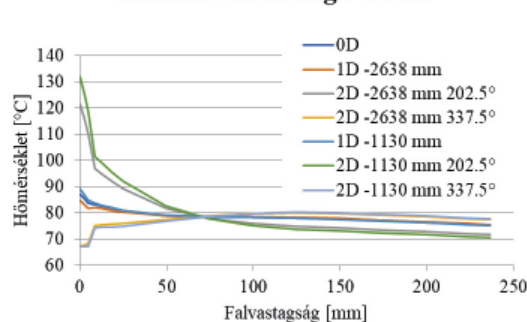
A munkacsomagban az első lépés a 3. táblázatban bemutatott esetek közül a legrosszabb, vagyis a legnagyobb feszültségekkel járó egyszerűsítés kiválasztása volt. Az 5. és 6. ábra a hét verzió esetén kapott hőmérséklet, illetve kerületi feszültség eloszlást szemlélteti 300 s-nél. Az eredményekből megállapítható, hogy a teljes átlagolás (0D eset) és az adott magasságnál a kerületi irányú átlagolás (1D TH adatok) során a hőmérséklet és a feszültségprofilok jelentősen eltérnek az adott pontban jelen lévő terhelésekből származóktól. Továbbá látható, hogy a legnagyobb feszültségekkel a 202,5°-os kerületi szögnél kivett adatok rendelkeznek mind a CW mind a FW esetében.

Hőmérséklet t=300 s



5. ábra A hét vizsgált eset fal menti hőmérséklet eloszlása 300 másodpercnél

Kerületi feszültség t=300 s

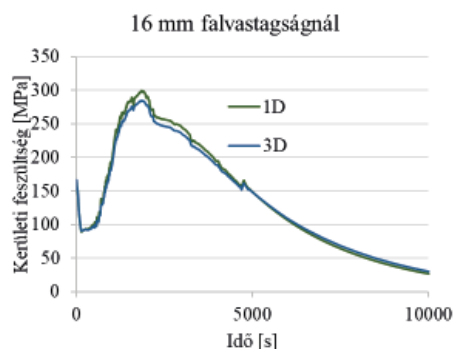


6. ábra A hét vizsgált eset fal menti kerületi feszültség eloszlása 300 másodpercnél

A következő lépés a geometriai hatások vizsgálata volt, amelynek során a tengelyszimmetrikus és a 3D modellekből származó eredmények kerültek

összehasonlításra. A CW-re vonatkozó, időben változó feszültségeloszlásokat a 7. ábra, míg a FW-re vonatkozókat a 8. ábra szemlélteti a reaktortartály belső sugarától 16 mm-re. Ez a távolság a későbbiekben vizsgált repedések repedéscsúcsát jelöli.

A 7. ábrából jól látható, hogy a két szimuláció között csak egy kis mértékű eltérés tapasztalható, továbbá az egyszerűsített modell a biztonság irányába téved, így kijelenthető, hogy a tengelyszimmetrikus kialakítás a feszültségek meghatározásához jól alkalmazható.



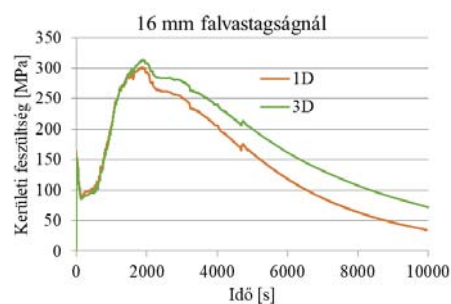
7. ábra Geometriai hatás vizsgálata a CW esetében

Ezzel ellentétben a peremnél lévő varratnál jelentős mértékben eltér a tengelyszimmetrikus és a 3D-s szimulációból származó eredmény. A szimuláció első 2000 másodpercében még együtt halad a két görbe, azonban a maximum elérését követően a kettő közötti különbség egyre nagyobb. Mivel a kettő között csak és kizárólag a geometria eltérő, ezáltal az egyszerűsítés ilyen formában nem alkalmazható, mivel a keletkező feszültségeket alul becsüli. Ehhez hasonlóan a 9. ábra a 10 000 másodpercnél lévő feszültségeloszlás jól szemlélteti a geometriai kialakításból származó eltéréseket.

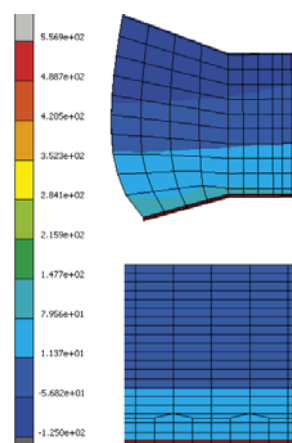
4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk az APAL projekt hármaskörében végzett feladatok egy töredékét részletezi, amelynek során meghatározásra került, hogy a termohidraulikai adatok milyen módon vehetők figyelembe tengelyszimmetrikus szimuláció során. Továbbá a reaktortartályon található két körvarrat esetében a 3D-s szimulációk bebizonyították, hogy a CW-nél a geometria egyszerűsítései nem befolyásolják nagy mértékben az eredményeket, azonban a FW-nél a geometria hatása számszerűsíthetően érvényesül, így ennek a tengelyszimmetrikus modellezéssel történő egyszerűsítése további vizsgálatokat igényel.

A projekt következő szakaszában az előzőekben bemutatott módszer segítségével meghatározott feszültség és hőmérséklet eloszlások kerülnek felhasználásra adott kialakítású repedéseknél keletkező feszültségintenzitási tényezők meghatározásához.



8. ábra Feszültségmező összehasonlítása



9. ábra Geometriai hatás vizsgálata a FW esetében

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott munka a NUGENIA által jóváhagyott APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock Analysis for Long-Term Operation) projekt részeként készült. Az APAL az Euratom 2019-2020-as kutatási és képzési programjából kapott támogatást a 945253 számú támogatási megállapodás keretében.

6. ACKNOWLEDGMENTS



The presented work has been performed as a part of APAL (Advanced Pressurized Thermal Shock Analysis for Long-Term Operation) project which was approved by NUGENIA. APAL has received funding from the Euratom research and training programme 2019 - 2020 under grant agreement No 945253.

7. IRODALOM

- [1] <https://relap53d.inl.gov/SitePages/Home.aspx> (Letöltés ideje: 2022.10.10.)
- [2] APAL. Deliverable No. 3.2 "Benchmark definition" (restricted)

A MI ÖRÖKSÉGÜNK: A VEGYIPARI GÉPÉSZ TANÁCS TEVÉKENYSÉGE A MISKOLCI EGYETEMEN

OUR HERITAGE: ACTIVITIES OF THE CHEMICAL MACHINERY COUNCIL AT THE UNIVERSITY OF MISKOLC

Patócs Ádám*, Hegyes Zsolt**

ABSTRACT

As the Management of Chemical Machinery Council, we are proudly present our organization on the 60th Jubilee Anniversary of the Department of Chemical Machinery.

TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A Vegyipari Gépezeti Tanács (VGT) 1979-ben alakult, az akkori Gépészmérnöki Kar első, diákok által szervezett öntevékeny csoportjaként. Éves rendszerességgel megrendezett Szakestélyeivel, valamint szakmai programjai segítségével hamar jelentős szerepet töltött be a vegyipari gépész hallgatók, valamint a szakmában dolgozók életében.

MŰKÖDÉSÜNK

Míg a Vegyipari Gépezeti Intézet Tanszék nagyobb üzemekbe (MOL Petrolkémia Zrt., Paksi Atomerőmű Zrt., BorsodChem Zrt stb.) irányuló szakmai kirándulásokkal, ipari igényeknek megfelelő tananyagfejlesztéssel, meghívott szakemberek órai előadásaival teszi lehetővé a vegyiparral kapcsolatos ismeretek és tapasztalatok elsajátítását, addig a Szaktanács segít a frissen szakosodott hallgatók, tanárok továbbá már végzett hallgatók közötti kapcsolatok kiépítésében, ezáltal egy szorosabb kötődés alakulhat ki a vegyipari gépészeti szakirány tagjai között, amely az Egyetem falain túl is el-kíséri a nálunk végzetteket.

Szakmai fejlődésünk érdekében, számos iparban dolgozó mérnökkel és céggel tartunk fent szakmai kapcsolatot, valamint ápolunk barátságot. Ennek segítségével szakmai napok keretén belül megpróbáljuk hallgatótársainkat a vállalatok minél jobb megismerésében támogatni és minél kedvezőbb állásajánlatok, ösztöndíjak megszerzését elősegíteni. Az említett célok elérése érdekében

iparban dolgozó vendégelőadók segítségével tesszük színesebbé a rendezvényeinket.

RENDEZVÉNYEINK

A téli vizsgaidőszak végén, a végzős hallgatók búcsúztatására és a Szaktanács tisztségeinek átadására évente Vegyipari Tisztségátadó Szakestélyt tartunk, amelyen minden vegyipari gépészt, kari oktatót, továbbá más karokon tanuló hallgatókat is szívesen látunk. A Szaktanáccsal párhuzamosan 1998-tól működik a Prizma Klub is, melyen a tanszéki dolgozók és jelenlegi, valamint a volt hallgatók vesznek részt, és amely során egy kötetlen beszélgetés keretein belül vitatják meg a Tanszék érintő témákat, továbbá mindenki megoszthatja tapasztalatait, egyetemi és gyakorlati élményeivel kapcsolatban. Az esemény egyik különlegessége, hogy a résztvevő személyeknél nem feltétel az egyetemi hagyományok szerinti megkeresztelkedés. A mindenkori Szaktanács tagok, a Tanszéki kollektíva és a Valéta Bizottság együttműködésének köszönhetően mind a mai napig fontos eseménynek számítanak a Szaktanács által szervezett programok. Minden évben két alkalommal kerül megrendezésre a Vegyipari Gépezeti Szakmai Napok, melynek

programjai szakmai előadásokat, csapatépítő rendezvényeket és hagyományos Szakestélyt is magában foglal. Karunk hallgatóit büszkeség tölti el, amikor az évről-évre megrendezett szakestélyeinken a legkülönbözőbb területeken dolgozó mérnökkel együtt ápolhatjuk az Alma Mater hagyományait. Egyedül álló programjaink közé tartozik az évente több alkalommal is megrendezésre kerülő Film Klub, célja, hogy az esetlegesen nem megkeresztel-

kedett hallgatók is közelebb kerülhessenek a hozzánk egy igazán kellemes filmzés keretein belül, ezzel is népszerűsítve a Szaktanácsot.



* A Vegyipari Gépezeti Tanács elnöke

** A Vegyipari Gépezeti Tanács pénztárosa

ÉGÉS- ÉS ROBBANÁSVESZÉLYES ANYAGOK VÁRHATÓ SZIVÁRGÁSAINAK ROBBANÁSVÉDELMI SZEMPONTÚ MEGKÖZELÍTÉSE NORMÁL ÜZEMI KÖRÜLMÉNYEK KÖZÖTT ATOMERŐMŰVEKNÉL

EXPLOSION PROTECTION APPROACH TO ANTICIPATED LEAKS OF COMBUSTIBLE AND EXPLOSIVE MATERIALS UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS IN NUCLEAR POWER PLANTS

Tugyi Levente, Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán**, Dr. Szepesi L. Gábor****

ABSTRACT

Nuclear power plants can play a vital role in the energy supply of a country or region. On the other hand, they also represent a major source of danger to human society if they do not comply with strict regulations during export and operation. The nuclear threat caused by a malfunction or human action can pose a serious problem for the population. The formation of potentially explosive hydrogen atmospheres in some parts of nuclear power plant technology units, assumed under normal operating conditions, cannot be avoided.

1. BEVEZETÉS

A nukleáris ipar kapcsán a társadalom először a radioaktív sugárzásból eredő veszélyekre gondol [1], [2]. Az atomerőműveknél azonban jelen vannak olyan veszélyes területek is, ahol a robbanásveszélyes légkör alakulhat ki akár olyan mennyiségben normál üzemi körülmények között, amely műszaki és szervezési intézkedéseket tesz szükségessé a munkavállalók biztonságának védelme érdekében. Ez a gyúlékony gázt tartalmazó légkörökre vonatkozik, és eltér a nukleáris vagy havária veszélyeitől. Atomerőművek esetében fokozott kockázatot jelent, hogy a hidrogén okozta potenciálisan robbanásveszélyes környezet képes kialakulni.

2. HIDRÓGÉN SZEREPE ATOMERŐMŰVEKNÉL

A hidrogén esetében a potenciálisan robbanásveszélyes térség a nyomottvízes reaktorok (PWR esetében az alábbi esetekben alakulhat ki:

- A szekunder kör berendezéscsoportjába tartozó generátorok hűtésére használják a gáznemű hidrogént, jelentős fajlagos hőkapacitása miatt
- Hidrogént a reaktor hűtőközegrendszerében (RCS) lévő oxigénkoncentráció csökkentésére is alkalmazzák.
- A fővízkörben a reaktor működése során is keletkezhet üzemi körülmények között hidrogén

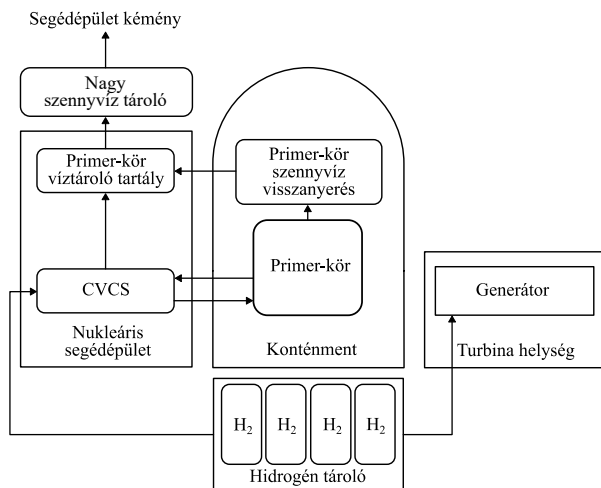
A hidrogén szivárgásának lehetősége több kibocsátó forrás esetén is megvalósulhat, mint például a csővezetékek és/vagy peremes kötéseknel, vagy az akkumulátorok üzemi és tároló helyiségeiben lévő szellőzőrendszerek meghibásodása során. A hidrogént a nukleáris épületeken kívül tárolják, jellemzően fekvőhengeres tartályokban, amelyeket közúti járművekből töltenek és közvetlenül a generátor hűtőrendszerébe, valamint az RCS-be kémiai és térfogatszabályozó rendszeren (CVCS) keresztül juttatják be a hűtőberendezésekbe, amelyet az 1. ábra szemléltet. A közúti jármű vagy tartálykocsi egy további veszélyforrást képez a lefejtési művelet során. Az elsődleges keletkező szennyvizet az atomerőmű reaktor- és segédépületeiben gyűjtik, a gáznemű hulladékokat pedig külön tárolják az erre a célra szolgáló tartályokban, mielőtt a légkörbe bocsátható állapotba hozzák és visszaengedik oda.. Ennek következtében az erőmű normál működése során a hidrogén cirkulációja a nukleáris segédépületben, a reaktorépületben és a turbinacsarnokban történik, külön erre a célra kialakított körökön keresztül [3]. A hidrogén koncentrációja ezekben a körfolyamatokban az üzemállapottól függ, de akár 100 %-ot megközelíthető is lehet, különösen a hidrogéntároló tartályokhoz közvetlenül csatlakozó csővezeték rendszerek esetében. Ezenkívül hidrogént állítanak elő az elektromos akkumulátorok is, amelyek az erőmű további különálló elektromos épületeiben találhatóak. Az akkumulátorok töltése során az akkumulátorok celláiban a töltőáram által végzett vízhidrolízis eredményeként gázok (oxigén

*doktorandusz, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

**egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

***egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

és hidrogén) keletkeznek. Ezenkívül hidrogén keletkezhet a tengervíz szivattyúállomásokon az elektroklorozás kezelése során is. Ezt az elektrokémiai eljárást nátrium-hipoklorit előállítására is használják, amelyet a szivattyúállomás hűtőrendszerébe fecskendeznek, továbbá csökkenti a biológiai mikroba kialakulását. Ez az eljárás csak a tengerparti helyszíneket érinti.



1. ábra: A hidrogén körforgását érintő fő rendszerek PWR reaktorok esetében [3]

3. ROBBANÁSI KOCKÁZAT ÉRTÉKELÉSE

A robbanás kockázat értékelése több lépésből áll [3]. Legelőször a hidrogén kiáramlási sebességének és a helyiségen belüli hidrogénfelhalmozódás lehetőségeinek vizsgálata. Ezt követően a kockázatcsökkentő eszközök hatékonyságának vizsgálata, amely atomerőműben a hidrogénrobbanás elleni két fő védelmet jelenti a szivárgás- és a szellőzőrendszerek automatikus elszigetelése, ahol a fő hidrogénvezetékek elzárószelvényekkel vannak felszerelve, és az I&C [4] automatikusan elküldi a lezárási parancsot, ha a helyiségben a hidrogénkoncentráció eléri egy bizonyos küszöbértéket. Végül a robbanás gyakoriságának számszerűsítése egyszerű eseményfák segítségével történik, figyelembe véve az esetlegesen hatékony (a törés nagyságától függő) védelmi rendszerek megbízhatóságát. A legfontosabb pont a szivárgás gyakoriságának értékelése a méret függvényében.

4. SZIVÁRGÁS PEREMES KÖTÉSEKNÉL

A peremes kötések (szelepen, karimán stb.) vagy közvetlenül a csövön keletkező szivárgás (lyuk) a helyiségben hidrogén felhalmozódásához vezet. Ebben az esetben a hidrogén áramlási sebessége a kibocsátási pontnál az MSZ EN 60079-10-1 [5] szabvány alapján két helyzetet kell figyelembe venni aszerint, hogy kritikus áramlás alatti vagy feletti esetről van szó. Ezt a

kritikus nyomás értéke határozza meg a rendszer belső nyomásnak a függvényében.

$$p_c = p_a \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (1)$$

ahol:

- p_a az atmoszférikus nyomás (Pa),
- γ az adiabatikus expanzió politrop indexe (-), mely a (2) egyenlettel határozható meg.

$$\gamma = \frac{M \cdot c_p}{M \cdot c_p - R} \quad (2)$$

Ahol

- M a moláris tömeg $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)$,
- c_p az állandó nyomás vett fajhő $\left(\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right)$,
- R az univerzális gázállandó $\left(8,314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right)$.

Kritikus áramlás alatti eset:

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \sqrt{\frac{M}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \cdot \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

Kritikus áramlás feletti eset:

$$W_g = C_d \cdot S \cdot p \sqrt{\frac{M}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (4)$$

a változók a következőket jelentik:

- C_d a kibocsátás együttható (-),
- S a lyuk keresztmetszete (m^2),
- p a berendezés belső nyomása (Pa),
- M a moláris tömeg $\left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \right)$,
- Z az összenyomhatósági tényező (-),
- T az anyag hőmérséklete (K),
- γ az adiabatikus expanzió politrop indexe (-), a (2) egyenlet alapján,
- p_a az atmoszférikus nyomás (Pa).

5. SZIVÁRGÁS AKKUMULÁTOROKNÁL

Az akkumulátorok helyiségeiben a hidrogéntermelés az akkumulátorok töltésének köszönhető. Két üzemmódot kell figyelembe venni: a lebegő töltés üzemmódot és az akkumulátorok töltését. Az úgynevezett csepptöltés üzemmódban az akkumulátor természetes önkisülését az önkisülési áramnál nagyobb tápfeszültségi árammal kompenzálják. Az akkumulátorok önkisülési árama időben változó (öregezési hatás), függ a hőmérséklettől és az

akkumulátor állapotától. Ennek következtében a lebegőáram nem állandó, hanem milliámpér/Ah nagyságrendben marad.

Az akkumulátorok használata alternatív tápforrás, vagy vészeseti tápellátást biztosít, amikor az elektromos áramkimaradás fennáll vagy egy időszakos teszt során. Az atomerőművi rendszereknél a hosszabb időt felölölő áramkimaradás jelentős problémával járhat.

A hidrogén felhalmozódása az épületben található akkumulátorhelyiségek állandó szellőztetésének meghibásodásából eredhet. Normál hőmérsékleti és nyomásviszonyok mellett, feltételezve, hogy az akkumulátorra adott teljes elektromos áramot hidrogéntermelésre használják (ami nagyon óvatos feltételezés).

A helyhez kötött akkumulátorok és akkumulátor telepek robbanásvédelmi térségbesorolását az MSZ EN IEC 62485-2:2018 szabvány [6] alapján lehet elvégezni, amely az ólomsavas, nikkel-kadmium (NiCd), nikkel-metál-hibrid (NiMH) és egyéb lúgos akkumulátorokra vonatkozó biztonsági előírásokat tartalmazza. A robbanóképes hidrogén gázközeg kialakulásának megelőzése érdekében mesterséges vagy természetes szellőzéssel kell gondoskodni a kilépő hidrogén megfelelő hígításáról (koncentráció csökkentés) és elvezetéséről. A minimális légáramlási térfogatáram kiszámítását a szabvány szerinti következő összefüggéssel határozható meg.

$$Q = 0,05 \cdot n \cdot I_{gas} \cdot C_{rt} \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

ahol:

- Q a szellőzési térfogatáram ($\frac{m^3}{óra}$),
- n a cellák száma (-),
- I_{gas} a kigázósító áramerősség (mA/Ah),
- C_{rt} a 10 órás kapacitás (Ah).

Az MSZ EN IEC 62485-2:2018 szabvány értelmében az akkumulátorok közvetlen közelében a robbanásveszélyes gázok hígulása nem mindig

biztosított, celláinak közvetlen környezetében, ezért a kilépő hidrogén gáz alsó robbanási határérték (ARH) alá történő hígulása nem biztosítható, ezért az akkumulátorok környezetében védőtávolságot szükséges meghatározni. A meghatározott védőtávolságon belül potenciális gyújtóforrások vagy forró felület, amely a 300°C maximális felületi hőmérsékletet meghaladja nem helyezhető el.

$$d = 28,8 \cdot \sqrt[3]{I_{gas}} \cdot \sqrt[3]{C_{rt}} \quad (6)$$

ahol:

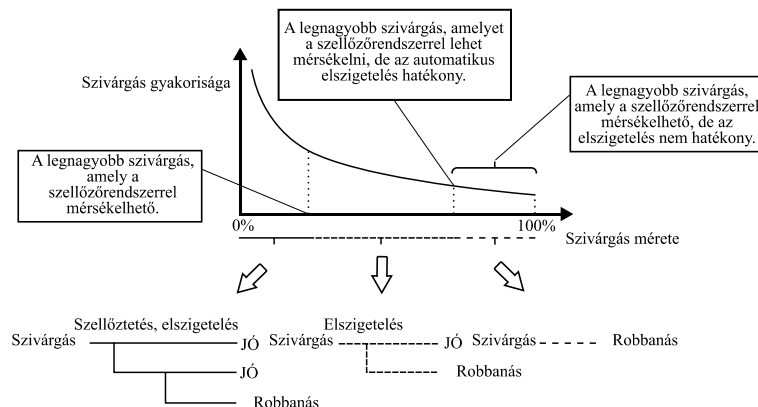
- d a védőtávolság (mm),

6. SZIVÁRGÁS SZIVATTYÚ ÁLLOMÁSOKNÁL

A tengervíz elektroklórozással történő kezelése a szivattyútelepeken a tengervíz elektrolíziséből áll: a vízmolekulák a katódon H₂- és OH- ionokra bomlanak, az anódon pedig a vizes Cl- ionok Cl₂ gázzá egyesülnek. Az eljárás által termelt hidrogén áramlási sebessége elérheti az óránkénti több köbmétert.

7. ROBBANÁS GYAKORISÁGÁNAK SZÁMSZERŰSÍTÉSE EGYSZERŰ ESEMÉNYFÁK SEGÍTSÉGÉVEL

A helyiségen belüli robbanási gyakoriság számszerűsítése eseményfák segítségével történhet, mely során a kiváltó esemény lehet a csővezeték szivárgás. Ez ilyen jellegű eseteknél a különböző kárelhárító rendszerek megbízhatóságát pedig klasszikus hibafák segítségével modellezhetőek. A nukleáris kiszolgáló létesítmények minden helyiségére három különböző típusú eseményfát lehet készíteni, a szivárgás áramlási sebességétől függően, melyet a 2. ábra mutat be.



2. ábra: Eseményfák a robbanási gyakoriság számszerűsítéséhez [3]

A legkisebb szivárgások esetén a robbanás elkerülése érdekében mind a légtelenítés, mind az automatikus elszigetelés figyelembe vehető. Ebben az esetben az alsó robbanási határértéktől magasabb koncentráció csak nagyon hosszú idő után alakulhat ki.

Ha a szivárgás kiáramlási mértéke jelentősebb, az elszívó rendszer nem lesz képes megakadályozni a robbanásveszélyt a lehetőségét. Bizonyos idő elteltével eléri az alsó robbanási határ értékét.

A legnagyobb szivárgásoknál az alsó robbanási határérték olyan gyorsan elérhető, hogy az automatikus leválasztás túl későn következik be a robbanás elkerülése érdekében. A valószínűségi elemzésnek a célja, hogy bemutassa azokat a helyzeteket, amikor a rendszer nem hatékony, ritkák előforduló esetek történnek és nem járnak jelentős következményekkel.

Természetesen adott atomerőműnél az egyedi jellemzőktől függően a szellőzőrendszer bármilyen méret esetén hatékony lehet. Egyes helyiségek esetében az elszigetelés bármilyen törésből adódó szivárgás esetén is hatékony lehet. Bizonyos különleges helyzetekben az automatikus leválasztás nem vehető figyelembe, például amikor az érintett hidrogénvezeték nincs felszerelve leválasztó szelepekkel vagy a helyiségben nincsen gázérzékelő a hidrogén gázra kalibrálva. Ezen szempontokat fel kell sorolni minden egyes nukleáris segédépület helyiségére vonatkozóan. A robbanás gyakoriságának számszerűsítése nemcsak az biztonsági rendszerek megbízhatóságától függ (amelyet a klasszikus hibafák segítségével értékelnek), hanem a kiváltó esemény, nevezetesen a szivárgás gyakoriságától is, amelyet minden törésből adódó szivárgás esetén meg kell határozni.

ÖSSZEFOGLALÁS

Atomerőművek esetében robbanásveszélyes léghő kialakulhat normál üzemi körülmények között, illetve üzemzavarok során. A fővízkörben a reaktor működése során kis mennyiségű hidrogén képes keletkezni, melyet a robbanásveszély megelőzése érdekében egy izzó fűtőtesten átvezetve elégetik. Számottevően a hidrogén megjelenését lehet vizsgálni a közúti járművek lefejtésénél, tárolásánál és generátorokhoz kapcsolódó csővezeték rendszereknél vagy az elektromos akkumulátorok helyiségében, továbbá hipotéziseket is lehet elemezni a szellőzés elvesztése esetén. Jellemzően meg kell kérdőjelezni azt a feltételezést, hogy a hidrogénfelszabadulás nem terjed át más helyiségekre, mint ahol a szivárgás található. A nukleáris segédépület különböző helyiségei általában a szellőzőrendszeren keresztül vannak összekötve. Ezt a hatást a jelen tanulmány nem veszi figyelembe, és nehéz eldönteni, hogy ez az egyszerűsített feltételezés konzervatív-e vagy sem. A hidrogénnek a szellőzőrendszerrel összekapcsolt helyiségekben történő hígításával elkerülhető a robbanásveszélyes közeg kialakulása,

másképpen azonban, ha a hidrogénszivárgás jelentős, az alsó robbanási határ több helyiségben is kialakulhat.

Ritkák azok a helyzetek, amikor az atomerőmű biztonsági rendszer nem elégséges és robbanás történhet, ami esetleg a következménye magkárosodáshoz lehet. A legfontosabb helyiségek esetében a meglévő kockázatértékeléseket ki lehet egészíteni például az erőmű hidrogénkockázattal szembeni értékeléssel, ha a védelmi rendszerekre vonatkozóan szellőztetés, hidrogén gázérzékelés stb. konkrét szabályokat vesznek figyelembe. Ezek lehetnek meghibásodási kritériumok. Az általános üzemeltetési szabályokat is figyelembe lehet venni néhány fokozottabb műszaki követelménnyel. A legfontosabb helyiségekre vonatkozó műszaki előírásokat, a szellőzőrendszer időszakos ellenőrzését és karbantartását stb. Üzemzavar, veszélyhelyzeti állapotok esetén különböző fizikai és vegyi folyamatok nagy mennyiségű hidrogén felszabadulással járhatnak, ezáltal a robbanásveszélyes megelőzésére a hermetikusan védett térben katalitikus elven működő hidrogén rekombinátorokat telepítenek.

IRODALOM

- [1] V. Saenko *et al.*, "The Chernobyl Accident and its Consequences," *Clinical Oncology*, vol. 23, no. 4, pp. 234–243, 2011, doi: 10.1016/j.clon.2011.01.502.
- [2] Y. Hatamura, S. Abe, M. Fuchigami, and N. Kasahara, Eds., "The 2011 Fukushima Nuclear Power Plant Accident," Boston: Woodhead Publishing, 2015, pp. 1–201. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100118-9.09987-3>.
- [3] J. Beaucourt, G. Georgescu, J. Beaucourt, G. Georgescu, M. Hydrogen, and L. Psa, "Modelling Hydrogen Explosion in Level 1 PSA To cite this version: HAL Id: hal-03164341 Modeling hydrogen explosion in level 1 PSA," 2021.
- [4] P. Singh and L. K. Singh, "Instrumentation and control systems design for nuclear power plant: An interview study with industry practitioners," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 53, no. 11, pp. 3694–3703, 2021, doi: 10.1016/j.net.2021.05.025.
- [5] MSZ EN 60079-10-1:2016 „Robbanóképes közegek. 10-1. rész: Térésbesorolás. Robbanóképes gázkeverék”.
- [6] MSZ EN IEC 62485-2:2018: „Akkumulátorok és akkumulátortelemek biztonsági előírásai. 2. rész: Helyhez kötött akkumulátorok (IEC 62485-2:2010)”.

CONTENTS

<i>1. Szilárd Szabó, Ferenc Schifter, Péter Bencs:</i> HISTORY OF DEPARTMENT OF FLUID AND HEAT ENGINEERING	7	<i>11. Viktória Mikáczó, Zoltán Siménfalvi:</i> INVESTIGATION OF THE MAXIMUM REDUCED PRESSURE OF VENTED EXPLOSIONS IN THE SCOPE OF EN 14994 AND NFPA 68 STANDARDS	52
<i>2. Prof. Dr. Zoltán Siménfalvi:</i> THE 60th ANNIVERSARY OF THE DEPARTMENT OF CHEMICAL MACHINERY	14	<i>12. Máté Petrik:</i> EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FINNED TUBE HEAT EXCHANGER STRUCTURES	56
<i>3. György Fábry, Sándor Verdes, Viktória Mikáczó:</i> THE FOUNDER PROFESSOR – DR. GYÖRGY FÁBRY	21	<i>13. Norbert Szaszák:</i> INDIRECT EVAPORATIVE AIR CONDITIONING SYSTEM WITH SOLAR ENERGY UTILIZATION – PRINCIPLE OF OPERATION AND A POSSIBLE IMPLEMENTATION	60
<i>4. Gerda Szendi, Péter Bencs:</i> NATURAL HOUSES	24	<i>14. L. Gábor Szepesi:</i> INVESTIGATION OF PRESSURE SWING IN CASE OF SUDDEN CLOSURE OF VALVE	64
<i>5. Betti Bolló, Szilárd Szabó, László Vanyorek:</i> NUMERICAL MODELING OF AN ELECTRIC REACTOR PRODUCING NANOPARTICLES	28	<i>15. Dr. Betti Bolló, Sándor Tollár:</i> ICING PROBLEMS OF WIND TURBINE BLADES, MODELLING OF ICING	68
<i>6. Dávid Faragó, Péter Bencs:</i> INVESTIGATION OF FLOW DOWNSTREAM OF AN ACTIVE TURBULENCE GENERATOR	32	<i>16. Sándor Tollár:</i> DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR THE INVESTIGATION OF AIRFOIL PROFILES PLACED IN FREE FLOW	72
<i>7. Béla Fodor:</i> ASPECTS AND METHODS OF NUMERICAL MESHING OF ROTATING EQUIPMENT	36	<i>17. Bernadett Spisák, Szabolcs Szávai:</i> FINITE ELEMENT ANALYSIS OF PRESSURIZED THERMAL SHOCK INDUCED STRESSES IN A REACTOR PRESSURE VESSEL	76
<i>8. Viktória Kállai, Zoltán Szamosi:</i> INVESTIGATION OF ABSORPTION OF CARBON-DIOXIDE IN WATER	40	<i>18. Ádám Patócs, Zsolt Hegyes:</i> OUR HERITAGE: ACTIVITIES OF THE CHEMICAL MACHINERY COUNCIL AT THE UNIVERSITY OF MISKOLC	80
<i>9. Gyula Krámer, Dr. Zoltán Siménfalvi, Dr. L. Gábor Szepesi:</i> NOVEL HEAT DRIVEN PUMP TO SUBSTITUTE THE ELECTRIC SOLUTION PUMP IN ABSORPTION HEAT PUMP	44	<i>19. Levente Tugyi, Prof. Dr. Zoltán Siménfalvi, Dr. L. Gábor Szepesi:</i> EXPLOSION PROTECTION APPROACH TO ANTICIPATED LEAKS OF COMBUSTIBLE AND EXPLOSIVE MATERIALS UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS IN NUCLEAR POWER PLANTS	81
<i>10. Dr. Viktória Mannheim:</i> INTEGRATION OF ENERGY AND LIFE CYCLE ASSESSMENT MODELS TO OPTIMIZE THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF PRODUCTION PROCESSES	48		

GÉP

INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám
President of Editorial Board

Vesza József
General Editor

Dr. Jármái Károly
Dr. Péter József
Dr. Szabó Szilárd
Deputy

Dr. Barkóczi István
Bányai Zoltán
Dr. Beke János
Dr. Bukoveczky György
Dr. Czitán Gábor
Dr. Danyi József
Dr. Gáti József
Dr. Horváth Sándor
Dr. Illés Béla
Dr. Kalmár Ferenc
Dr. Orbán Ferenc
Dr. Pálkás István
Dr. Patkó Gyula
Dr. Péter László
Dr. Penninger Antal
Dr. Szabó István
Dr. Szántó Jenő
Dr. Szűcs Edit
Dr. Tímár Imre
Dr. Tóth László

For the occasion of the 70th anniversary of the foundation of the Department of Fluid and Heat Engineering and the 60th anniversary of the foundation of the Department of Chemical Machinery at the Institute of Energy Engineering and Chemical Machinery of the Faculty of Mechanical Engineering and Informatics of the University of Miskolc



Peaceful uses of Nuclear Energy started in the same period as the notable anniversaries of the University.

Second generation nuclear power plants, developed in the 1960s on the basis of the first designs of the 1950s, were built in the 1970s and began their 30-year lifetime in the 1980s - including the four units of the Paks Nuclear Power Plant. The 1990s were a decade of increasing output and improving nuclear safety. In the first decade of the new millennium, we established the basis for extending the lifetime of the nuclear power plant units by 20 years, in 2014 the Parliament decided on the construction of new Paks units, and in the current decade we started to lay the foundations for extending the lifetime of the Paks units by an additional 20 years.

Each element of the life cycle of a Nuclear Power Plant requires a series of profound professional analyses and studies. All this is based on a thorough knowledge of the raw materials for the equipment and the improvement of the manufacturing technology. Without tensile testing of the test pieces irradiated in the casks, it would be impossible to determine the remaining lifetime of the reactors in the existing Paks Nuclear Power Plant. As we all know, the Paks reactor vessels were built to Russian specifications and applying Russian manufacturing technology by Czechs with Czech engineering precision. At the Paks site, the vessels and other equipment were then transferred and committed under the supervision of Hungarian engineers.

However, the Hungarian engineers could not go without the technical, chemical and metallurgical knowledge of the engineers and metallurgists trained in Miskolc. The knowledge acquired at the University of Miskolc transformed into useful experience in Paks, which is now indispensable in laying the foundations for the future. The University is an irreplaceable partner for the Nuclear Power Plant in the training of specialists, in the knowledge of the properties of raw materials and in the provision of professional advice in this field, in supporting future nuclear developments through basic research and technological development, and in the service of the Hungarian Energy Sector in general, and nuclear energy in particular.

This journey is not over as nuclear reactors continue to be used not only for power generation, but also for maritime transport, the establishment of a hydrogen economy, heat production and the development and production of microreactors for space exploration. These challenges require skilled engineers, experimental laboratories as scientific research bases - trusted partners in the field of nuclear energy. Such a dependable partner for Paks is the Department of Fluid and Heat Engineering and the Department of Chemical Machinery at the University of Miskolc.

As a professional and policy leader who has been working in the field of energy for almost 35 years and who was in charge of energy issues for two governmental terms, I wish all the respected members of the Departments a successful future and the professionals trained by you a successful career and outstanding professional achievements in the field of energy in Hungary and especially in the nuclear energy industry!

Budapest, 21 November 2022.

Pál Kovács
Vice President

Hungarian Energy and Public Utility Regulatory Authority

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: <http://www.gepujsag.hu> • Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP

(<https://eshop.posta.hu/storefront/>), via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

The published articles have been reviewed. • The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary



Az ExNB
Tanúsító Intézet és
a Miskolci Egyetem együttműködésével:



www.dustlab.eu

Kutató- és vizsgáló laboratórium porok, gázok,
gőzök, hibrid keverékek potenciális robbanási
tulajdonságainak vizsgálatára



FRESH
CORNER



Én a Fresh Cornerből
nyerem a lendületet.

Márkó Dózsa

A magyar labdarúgó-válogatott szövetségi kapitánya