



- [8] L. Szalay, Z. Tóth, R. Borbás: Teaching of experimental design skills, Chem. Educ. Res. Pract., 2021, 22, 1054–1073.
- [9] J. R. Baird, Metacognition, purposeful inquiry and conceptual change, in: Hegarty-Hazel E. (ed.), The student laboratory and the science curriculum. London: Routledge, 1990, 183–200.
- [10] Riedel M., Füzesi I., Rózsahegy M., Wajand J.: Tanítható-e a kísérlettervezés az iskolákban? Magyar Kémikusok Lapja, (2021) 198–205.
- [11] Az MTA–ELTE Kutatásalapú Kémia tanítás Kutatócsoport „Megvalósítható kutatásalapú kémia tanítás” projektje során készült oktatási segédanyagok, <http://ttomc.elte.hu/publications/90>
- [12] Az MTA Közoktatás-fejlesztési Kutatási Programja: <https://mta.hu/kozoktatasi-fejlesztési-kutatasi-program/kuldetes-111385>
- [13] J. H. Cothron, R. N. Giese, R. J. Rezba, Students and Research: Practical Strategies for Science Classrooms and Competitions. 3rd edition, Kendall/Hunt Publishing Company. Dubuque, IA, 2000.
- [14] L. Chen, S. Xiao, Perceptions, challenges and coping strategies of science teachers in teaching socioscientific issues: A systematic review. Educational Research Review (2021) 100377.
- [15] M. del Mar López-Fernández, F. González-García, A. J. Franco-Mariscal, How Can Socio-scientific Issues Help Develop Critical Thinking in Chemistry Education? A Reflection on the Problem of Plastics. J. Chem. Educ. (2022) 99 (10), 3435–3442.
- [16] J. J. Klemes, Y. V. Fan, P. Jiang, Peng, Plastics: friends or foes? The circularity and plastic waste footprint. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects (2021) 1549–1565.
- [17] R. P. MacDonald, A. N. Pattison, S. E. Cornell, A. K. Elgersma, S. N. Greidanus, S. N. Visser, M. Hoffman, P. G. Mahaffy, An Interactive Planetary Boundaries Systems Thinking Learning Tool to Integrate Sustainability into the Chemistry Curriculum. J. Chem. Educ. (2022) 99 (10), 3530–3539.
- [18] Az MTA–ELTE Kutatásalapú Kémia tanítás Kutatócsoport „Kutatásalapú kémia tanítás és rendszerszemléletű gondolkodás” projektje során készült oktatási segédanyagok, <https://ttomc.elte.hu/publications/92>
- [29] Nemzeti alaptanterv 2020, 5/2020. (I. 31.) Korm. rendelet, Magyar Közlöny 17. sz. 2020. január. 31.
- [20] A 2020-as NAT-hoz illeszkedő tartalmi szabályozók https://www.oktatas.hu/koznevelas/kerettantervek/2020_nat
- [21] Az ELTE TTK Természettudományos Oktatásmódszertani Centrum honlapjának galériái: Természettudományos Oktatásmódszertani Centrum (elte.hu)
- [22] B. S. Bloom, M. D. Engelhart, E. J. Furst, W. H. Hill, D. R. Krathwohl, (1956), Taxonomy of Educational Objectives: Part I, Cognitive Domain; McKay: New York, 1956.
- [23] L. Szalay, Z. Tóth, R. Borbás, I. Füzesi: Scaffolding of experimental design skills, Chem. Educ. Res. Pract., (2023), 24, 599–623.
- [24] L. Szalay, Z. Tóth, R. Borbás, I. Füzesi: Progress In Developing Experimental Design Skills, Journal of Turkish Science Education, (2024) (in press)
- [25] OECD, PISA 2015 Technical Report. 2017, Chapter 18, Computer-based tests, 369–374.
- [26] Tanári kérdőív: <https://forms.gle/bpDPxEujb7SfXUwbA>
- [27] Hallgatói kérdőív: <https://forms.gle/LDVD8AQcBNUbdUgC9>
(Az internetes források utolsó látogatása: 2024. július 9.)

Hancsók Jenő – Hőke Ferenc

■ Pannon Egyetem, Bio-, Környezet- és Vegyészmérnöki Kutató-Fejlesztő Központ,

MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézeti Tanszék

hancsok.jeno@mk.uni-pannon.hu

Nagy kihívás a légi szállítás dekarbonizációja

Első rész. A cseppfolyós sugárhajtómű-üzemanyagok jellemzői

A fenntarthatóság területén egyre szélesebb nyilvánosság értesül az utóbbi 5–10 évben tudományos igényességgel is megfogalmazott bizonytalanság többirányú megközelítéséről, ami egyre nagyobb érdeklődést váltott, illetve vált ki. Ennek alapvető okai közé tartozik az energia- és nyersanyagkészletek végelessége, a világ népességének növekedése, a lakosság túlfogyasztása, az egyértelmű környezetszennyezés, valamint a jól érzékelhető éghajlat- és időjárás-változás. Ugyanakkor minden szempontból kielégítő megoldások még nem állnak rendelkezésre. Ennek ellenére vannak olyan törekvések, kezdeményezések és intézkedések, amelyek célja például környezetünk természetes adottságainak megóvása. Ezeknek a mértéke azonban jelentősen eltér a világ különböző térségeiben. Az egyik fontos környezetvédelmi lépés a légkör károsanyag-koncentrációjának, elsősorban az üvegházhatású gázok (ÜHG), különösen például a szén-dioxid mennyiségének jelentős csökkentése. Régóta közismert a CO₂ káros környezeti hatása. Ennek ellenére az utóbbi kb. egy évszázadban a CO₂-kibocsátás nagysága kb. 8-szorosára növekedett, és a gáz koncentrációja a levegőben már elérte a 415 ppm (v/v) értéket. Természetesen az említett CO₂-csökkentést csak rendszerszemléletben és kompromisszumokkal (várhatóan olykor esetleg önmegtartóztatással) stb., valamint világméretű összefogással lehet megvalósítani. A világgazdaság meghatározó terüle-

tei között vannak olyanok, ahol a CO₂-kibocsátás jelentős mértékű csökkentése nem, vagy csak részben valósítható meg rövid és középtávon. Ilyen például az acélipar, az üvegyipar, a cementgyártás, a légi közlekedés/szállítás, a vízi szállítás, a közúti áruszállítás.

A légi közlekedés/szállítás szükségessége, jelentősége

A fenntarthatóság egyik alappillére a kis energiafelhasználású, környezetbarát, gazdaságosan és világméretben megvalósítható mobilitás (élőlények, élettelen tárgyak mozgása, mozgatása szárazföldön, vízen, légtérben különböző tárgyi eszközök – pl. járművek – segítségével). Ezek közül a légi közlekedés/szállítás kiemelkedő előnyei a következők:

- szabad légtér rendelkezésre állása
- a repülőgépek működtetéséhez szükséges üzemanyagok *szervezett rendelkezésre állása* térben és időben a világ valamennyi térségében (pl. kőolajipari vállalatok, légitársaságok)
- nagy távolságok megtétele rövid idő alatt
- viszonylag nagy tömegű anyagok mozgatása
- az emberiség létét és jólétét (pl. kényelem, időtakarékosság/szabadidő-biztosítás) szolgáló mobilitás „elegáns” megvalósítása



- a kb. 1500 kilométernél hosszabb repüléseknek nincs megfelelő alternatív szállítási módja (ezek okozzák a légi közlekedés károsanyag-kibocsátásának körülbelül 80%-át)
 - sürgősségi szállítás (pl. beültetésre váró emberi szervek, orvostechnikai, gyógyászati, egészségügyi anyagok stb.)
 - életmentési és katasztrófaelhárítási feladatok rövid idő alatti megoldása [pl. a speciális szakértők (orvos, hegyi, vízi, légi mentő) gyors helyszínre juttatása]
 - bizalmas kezelést igénylő anyagok gyors eljuttatása a felhasználási helyre
 - könnyen romló termékek kellő időben történő célba juttatása
 - a jelenlegi sugárhajtóművekkel szerelt repülőgépek teljes utazótömege folyamatosan csökken a repülési idő alatt az üzemanyag felhasználása miatt
 - magas színvonalú honvédelem kiszolgálása stb.
- [A sugárhajtómű olyan reaktív hajtású erőgép, amely a hatás-ellenhatás törvényének elvén működik (Newton III. törvénye). A repülőgép mozgatásához szükséges tolóerőt úgy állítja elő a hajtómű, hogy a munkaközegének energiaátalakítása során keletkező gázt (vagy folyadékot) az átalakító térhez kapcsolt fúvócsőből nagy sebességű sugárként áramoltatja ki, melynek hajtóerejével ellentétes értelmű erő (erőlökés, tolóerő) képződik. Mivel a sugárhajtóműben jön létre a hajtómű munkaközegébe bevezetett energia átalakítása mozgási energiává, valamint a mozgáshoz a tolóerő is itt képződik (a kiáramló gázok reakcióerejeként), ezért a sugárhajtómű a motor és a hajtóberendezés kombinációja. A gázturbinában folyamatos égés valósul meg a dugattyús belső égésű motorokétól eltérően!]

Természetesen már ezen a helyen is szólni kell a légi közlekedés/szállítás főbb hátrányairól is:

- jelentős mennyiségű és nagy értékű a nyersanyagok/alapanyagok felhasználása,
- nagy tőkeigényű beruházás,
- jelentős helyigény a szárazföldön és a légtérben,
- jelentős zajkibocsátás,
- nagyméretű kiszolgáló létesítmények,
- költséges navigációs műszaki megoldások alkalmazása,
- nagy mennyiségű üzemanyag (a kőolajipari termékek 8–10%-át teszi ki) és egyéb anyagok (pl. kenőanyagok) előállítási igénye és felhasználása; egy légitársaság *üzemanyag-költsége a teljes kiadások kb. 30%-áig is terjedhet*,
- viszonylag nagy mértékű környezetszennyezés a repülés teljes életciklusú megvalósulása során [például az üzemanyag égéstermékei (5–6% CO₂, 2% vízgőz/jégkristályréteg/pehelyfelhő, 0,03% NO_x, szulfátrészecskék, el nem égett szénhidrogének, egyéb nitrogénvegyületek, korom), gumikopadék, aszfaltkopadék, kondicionáló folyadék: jegesedésgátló]. (Fontos megjegyezni, hogy a légi forgalom során keletkező más égéstermékek környezetkárosító hatását kb. kétszeres értékűnek becsülik a CO₂-éhez viszonyítva, tehát rendszeres szemléletű kezelésre van szükség!)

A légi közlekedés/szállítás a világ antropogén szén-dioxid-kibocsátásának kb. 2,7%-át okozza. Ez az érték 2050-re 3%-ra is emelkedhet. A CO₂-kibocsátás abszolút értékben kb. 905 millió tonna volt 2019-ben [1].

A légi közlekedés/szállítás károsanyag-kibocsátásának csökkenése nagy és rendszeres szemléletű kihívás, ami magában foglalja – többek között – a következőket:

- a repülőgépek és hajtóművek továbbfejlesztése, hatékonyságuk növelése (pl.: az új repülőgépvázak és korszerűbb hajtó-

művek kifejlesztése, valamint alkalmazása kb. 70–80%-kal javította a repülés hatékonyságát, hajtóanyag/ülés egységben; a hajtóanyag-fogyasztás 40–45%-kal csökkent 1965 és 2010 között) [2] (az ezeken a területeken még elérhető további hatékonyságnövekedés várhatóan nem lesz elég az elvárt CO₂-kibocsátáscsökkentés eléréséhez)

- új meghajtási módok (pl.: elektromos, hidrogén, hibrid) bevezetése
- a forgalom szervezés-/irányítás és -szabályozás, -korszerűsítés, járatok terhelhetőségének kihasználása kb. 54%-kal csökkentette a CO₂-kibocsátás/utaskilométer értékét 1990 óta 2018-ig [2]
- a hagyományos kőolaj-eredetű sugárhajtómű-üzemanyagok teljes élelciklusú károsanyag-kibocsátásának csökkentése
- kisebb „szénlábnnyommal” rendelkező üzemanyagok (SAF: Sustainable Aviation Fuels) kifejlesztése és alkalmazása stb.

Általános vélemény, hogy a felsoroltak közül rövid és középtávon (2040–2050) kiemelkedő szerep vár a hagyományos sugárhajtómű-üzemanyagok (olykor röviden: JET-ek) előállítási technológiáinak fejlesztésére/korszerűsítésére és a megújuló cseppfolyós hajtóanyagok korszerű előállítási eljárásainak kidolgozására és alkalmazására. Ennek előfeltétele azonban a cseppfolyós üzemanyagokat alkotó vegyületek (vegyületcsoportok) szerkezete és analitikai, valamint alkalmazási tulajdonsági közötti összefüggéseknek az ismerteknél részletesebb feltárása és figyelembevétele. Ehhez viszont feltétlenül ismerni kell a sugárhajtómű-üzemanyagok részletes minőségi követelményeit is. Kétrészes közleményünk első cikkének további részében ez utóbbi két területet tárgyaljuk.

A repülőgép-turbinák (közismerten sugárhajtóművek) számításba vehető hajtóanyagai közül ebben a kétrészes közleményben a *cseppfolyós halmazállapotúakat*, és ezeken belül is a szénhidrogén-összetevőket (vegyületeket) tartalmazókat tárgyaljuk. Ennek oka alapvetően az, hogy a repülőgép-turbinák régóta (kb. 1945-től, tehát közel 80 éve) bevált *cseppfolyós állapotú sugárhajtómű-üzemanyagai a különböző szerkezetű szénhidrogén-elegyek (forráspont-tartomány: kb. 100 és 300 °C között)*, és jelenleg is ezeket alkalmazzák a világon meglévő repülőgép-állomány közvetlen energiaforrásaként. (Ezeket döntő részarányban, >99,5%-ban kőolajból állítják elő, tehát származtatott energiaforrások). A sugárhajtómű-üzemanyagok végső minőségének beállítására adalékokat is alkalmaznak, amelyek általában nem csak szénből és hidrogénből álló vegyületek. [Adalékoknak nevezzük azokat a természetes és/vagy szintetikus anyagokat, amelyeket a termékhez nagyon kis mennyiségben (pl. 2–500 mg/kg) hozzáadva javítják azok már meglévő tulajdonságát (tulajdonságait), illetőleg azoknak új tulajdonságot(ka)t kölcsönöznek.]

A légi közlekedés/szállítás – több nagyon fontos előnye miatt – a világon az évek során folyamatosan növekedett, kivéve a világválságok időszakát [3]. Ez a tendencia várható a jövőben is. Például a légi utasszállítás esetén a különböző előrejelzések 2,4–3,7%/év átlagos növekedést jósolnak [4]. 2023-ban kb. 720 · 10⁹ utaskilométer/hónap értékű volt az utasforgalom, míg az átlagos teherszállítás (áruszállítás és postai küldemények mennyisége) kb. 20,5 · 10⁹ t-megtett km/hó volt. Az előbbi érték már elérte a Covid-19 előtti megfelelő adatokat, míg az utóbbi még kb. 10%-kal elmarad azokétól.

Az előzőeknek megfelelően a világon felhasznált sugárhajtómű-üzemanyagok mennyisége (**I. táblázat**) növekedett. Értéke a világon 1990 és 2019 között kb. 235 · 10⁶ tonna kőolaj-egyenérték/évről kb. 360 · 10⁶ toe/évre változott. A becslések szerint értéke



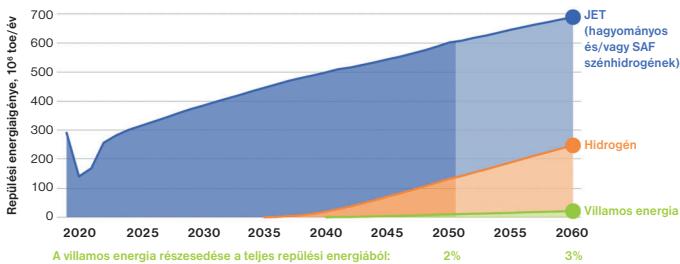
2040-ben elérheti akár az $560 \cdot 10^6$ toe/évet, míg 2050-ben a kb. $700\text{--}800 \cdot 10^6$ toe/évet is [5]. A legnagyobb mértékű növekedés Kínában és Ázsia többi részén várható. Az USA-ban 2019-ben kb. $80 \cdot 10^6$ tonna volt a sugárhajtómű-üzemanyag felhasználása, míg Európában kb. $50 \cdot 10^6$ t/év (2020).

1. táblázat. Sugárhajtómű-üzemanyagok tényleges és várható felhasználása a világon

Év	Felhasznált mennyiség, 10^6 toe/év
1990	235
2005	300
2009	250
2019	360
2020	225
2023	340
2040	560
2050	700–800

Természetesen a fosszilis (kőolaj-) eredetű JET-ek már említett nagyon káros környezeti hatása miatt az utóbbi kb. 15–20 évben a világ fejlett régióiban jelentős K+F tevékenység indult a *megújuló forrásokból történő előállításra*. A fő cél a kőolaj-eredetű JET-ek *jobb minőségű komponenseinek (nyílt láncú paraffinok/alkánok és cikloparaffinok)*, illetve azok elegyeinek előállítása megújuló nyers- és alapanyagforrásokból anyag- és energiatakarékos, környezetbarát és gazdaságos módon. Ennek előfeltétele tehát olyan megújuló nyers- és alapanyagforrások felismerése, amelyek a Földön általánosan és nagy mennyiségben rendelkezésre állnak az elvárt minőségben, illetve természetűek, kinyerhetőek stb. Ezt követően ki kell választani azokat a fizikai, kémiai és biológiai módszereket (pl. szintézis/előállítási utakat), amelyekkel ezekből kiváló minőségű, az érvényes szabványok előírásait mindenben kielégítő minőségű sugárhajtómű-üzemanyagok állíthatók elő. Érthető módon ezen *megújuló hajtóanyagok* teljes életciklusú károsanyag-kibocsátása lényegesen (kb. 65–90%-kal) kisebb, mint a kőolajalapú keroziné. Ezeket fenntartható repülési üzemanyagoknak (SAF) nevezik. (Előállításukat és repülőgép-turbinák hajtóanyagaként való alkalmazhatóságukat a kétrészes közlemény második cikkében ismertetjük.)

Nagyon intenzív kutatómunka folyik a hidrogén és az elektromos meghajtású repülőgépek kifejlesztésére és alkalmazásba vételére. Ennek ellenére a különböző eredetű sugárhajtómű-üzemanyagok igényének (felhasználásának) tényleges és várható ala-



1. ábra. A különböző eredetű sugárhajtómű-üzemanyagok igényének tényleges és várható alakulása a világon (az ábra saját módosítás és szerkesztés [2] alapján)

kulása csak lassú átmenetet tükröz ezek irányába (1. ábra) [2]. Ez különösen érvényes a nagy távolságú légi szállítás/közlekedés esetén.

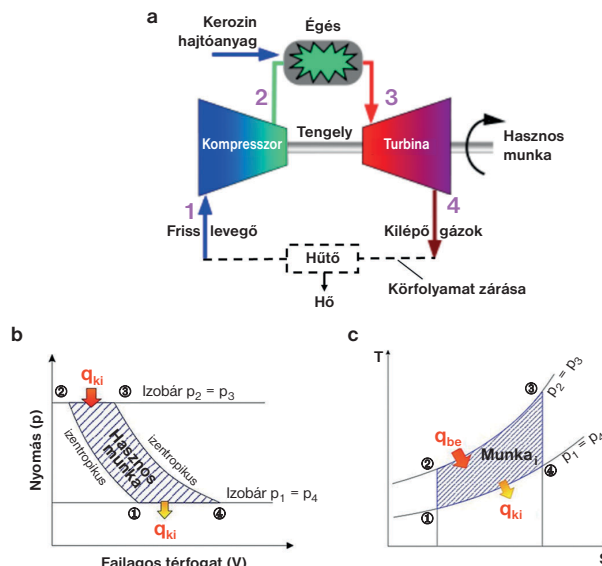
Az 1. ábra jól tükrözi, hogy a hidrogén üzemanyag elterjedése kb. 2035 után, míg az elektromos meghajtásé kb. 2045 után várható, és az előrejelzések alapján kezdetben gyakorlatilag csak a rövid távolságú járatok esetén.

A cseppfolyós sugárhajtómű-üzemanyagok minőségi követelményei

A kőolaj-finomítói termékek közül a sugárhajtómű-üzemanyagok minőségbiztosítási rendszere kiemelkedően a legszigorúbb és legköltségesebb a motorhajtóanyagok közül a teljes értéklánc mentén. Ez vonatkozik a forgalomba hozatali engedélyeztetésre is. Ennek fő oka alapvetően a széles körű és nagyfokú biztonságtechnikai követelményeknek tudható be, amelyek a légi szállítás/közlekedés egyedi jellegéből erednek.

A jelenlegi sugárhajtóművek (cseppfolyós) hajtóanyagival szemben támasztott főbb általános követelmények:

- *Alkalmasság energiaátadásra a repülőgép-turbinák (akár extrém) működési feltételei között (ki kell elégíteniük a Brayton–Joule termodinamikai körfolyamatot (2. ábra) [6].*



2. ábra. A Brayton–Joule-folyamat (nyitott) mechanikus megvalósítása (a), valamint a hozzá tartozó P–V (b) és T–S diagram (c) [6]

A Brayton–Joule-folyamatban – gázturbinák esetében ugyanúgy, mint a dugattyús motoroknál – három fő egység vesz részt: gázkompresszor, égő(égető)kamra, expanziós turbina. A valóságos körfolyamat a következő: 1–2: adiabatikus állapotváltozás → kompresszió; 2–3: izobár állapotváltozás → hőbevitel; 3–4: adiabatikus állapotváltozás → expanzió; 4–1: izobár állapotváltozás → hőleadás. A folyamat zárását jelölő, szaggatott vonalas rész a nyitott rendszerben hiányzik, mivel abban folyamatosan hideg gázt szívhatnak be és komprimálnak.

A valóságban sem a kompresszió, sem az expanzió nem lehet izentropikus (állandó entrópia), ezért a kompresszorban és az expanziós gépben fellépő veszteségek csökkentik a hatásfokot. A teljesítmény növelésének legegyszerűbb módja a kompresszióviszony fokozása.

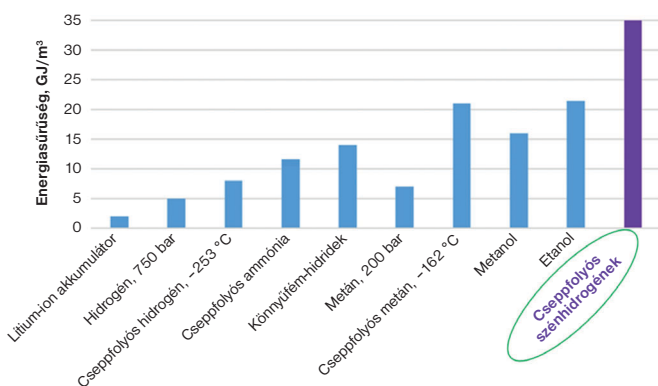
A gázturbinás repülőgépek üzemanyagainak teljesítményét



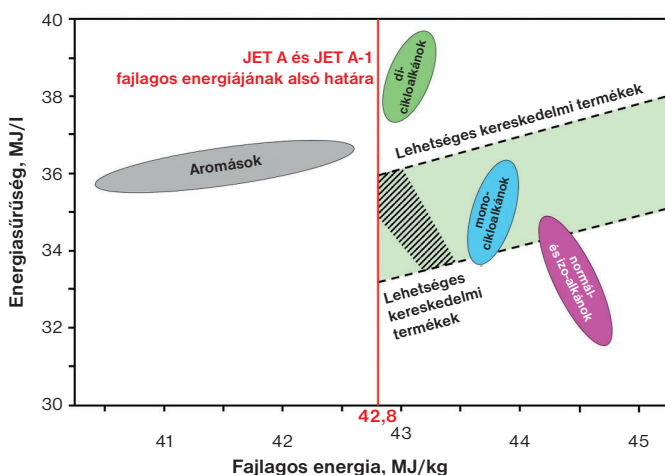
az határozza meg, hogy az üzemanyag milyen mértékben képes „kiszolgálni” a gázturbina Brayton–Joule-ciklusát.

- Nagy energiataralom (nagy energiasűrűség és fajlagos energiataralom; **3. és 4. ábra**) [7, 8].

Az energiasűrűség és a fajlagos energia az úgynevezett *teljesítménytulajdonságok* közé tartoznak. Idesorolják még például az alacsony kristályosodási pontot, a károsanyag-kibocsátást (tisztá égést), a hőstabilitást (üzemanyag-lebomlás és/vagy kokszképződés hő hatására). Ezek együtt meghatározzák a hasznos teher tömegét (tömeg-tartományát), a hajtóanyag főbb minőségi követelményeinek határértékeit, a szállítási távolság határait és a repülési ciklus hatékonyságát.



3. ábra. Különböző motorhajtóanyagok energiasűrűsége [7]



4. ábra. Szénhidrogéncsoportok/elegyeik energiasűrűsége és fajlagos energiája (az ábra saját módosítás és szerkesztés [8] alapján)

- Az *üzemanyagok alkalmazhatósági* („működőképességi”) korlátainak jellemzésére szolgáló minősítő jellemzők (pl. a már említett kristályosodási pont, hőstabilitás) értékeinek kielégítése. (Ezek ismerete rendkívül fontos a hajtóművek speciális üzemelési feltételei között.)
- Környezetbarátság (lehetőleg „zéró” eredőjű károsanyag-kibocsátás a teljes életciklus alatt).
- Ne legyen veszélyes (pl. ne legyen mérgező, robbanásveszélyes, könnyen bomló).
- Gazdaságos és fenntartható előállíthatóság
 - nyers- és alapanyagok rendelkezésre állása hosszú távon, illetve korlátlanul,
 - előállíthatóság alapanyag- és energiatakarékos, környezetbarát és gazdaságos módon,
 - versenyképes ár (jövedéki adóval együtt!),

- rendelkezésre állás *térben és időben* az elvárt mennyiségben és minőségben (ellátási lánc, infrastruktúra megléte).
- Fejlett biztonságtechnika rendelkezésre állása a felhasználáshoz [a logisztikai rendszerben (szállítás, tárolás stb.)].
- *Azonnali felhasználhatóság* [hajtómű- és infrastruktúra-kompatibilitás, „drop in”, azaz teljes egyenértékűség a hagyományos repülőgép-turbina üzemanyaggal; azonnal felhasználható a meglévő infrastruktúrában és hajtóműben azok megváltoztatása nélkül üzemanyagként; szükség esetén más eredetű (jelenleg csak kőolaj-eredetű) kerozinnal keverve], hosszú időtartamon (több évtizeden) át stb. (Az ezen előírásoknak nem megfelelő hajtóanyagok részére kiegészítő/új infrastruktúrát kell kialakítani, illetve kiépíteni.)

A cseppfolyós sugárhajtómű-üzemanyagoknak az előzőekben bemutatott általános jellemzőkön kívül – mint már arra utaltunk – még számos, nagyon speciális minőségi előírást is ki kell elégíteniük [9]. Ezek – a teljesség igénye nélkül – a következők:

- jó égési tulajdonságok (pl. cetánszám)
- nagy izo- és cikloparaffin-tartalom (nagy hidrogéntartalmú szénhidrogének)
- égéstermékai ne, vagy csak a lehető legkisebb mértékben szennyezzék a környezetet, lehetőleg zéró károsanyag-kibocsátás a teljes életciklus alatt
- a lehető legkisebb aromástartalom (csak a szerkezeti anyagok/tömítések kifogástalan feladatellátása érdekében szükséges részarány)
- hő- és kémiai ellenállóképesség (jó hő- és tárolási stabilitás),
- olefinmentesség
- kis kéntartalom
- alacsony kristályosodási pont
- megfelelő viszkozitás alacsony hőmérsékleten (–20/–40 °C)
- kellő illékonyosság
- megfelelő forráspont-tartomány (forráspontgörbe-lefutás)
- vízmentesség
- halogénmentesség
- fémmentesség
- mechanikai szennyezéstől mentesség
- jó vezetőképesség
- adalékolthatóság (adalékoldó képesség/összeférhetőség adalékokkal)
- jó adalékérzékenység
- ne legyen mérgező
- ne okozzon korróziót
- elegyíthetőség különböző eredetű keverőkomponensekkel
- könnyű, veszélytelen kezelhetőség
- hozzájárulás a kis zajszint biztosításához
- elfogadható bekerülési költség (kis önköltség) stb.

A sugárhajtómű-üzemanyagok fontosabb minőségi előírásai

Annak a megítélésére, hogy a sugárhajtómű-üzemanyagok megfelelnek-e az előzőekben részletesen bemutatott általános és speciális követelményeknek, különböző anyagi jellemzők megfelelő határértékei szolgálnak.

A sugárhajtómű-üzemanyagok minőségét, beleértve az alkalmazható keverőkomponenseket és adalékokat az egyes országok szabványai rögzítik. (Az Európai Unióban nincs egységesen kötelező szabvány sugárhajtómű-üzemanyagok minőségi előírására, mint például a motorbenzinekre és a dízelgázolajokra.)



A jelenlegi sugárhajtóművekben döntő részarányban (>99,5%) alkalmazott kőolaj-eredetű hajtóanyagok fontosabb speciális minőségi követelményeit például az amerikai ASTM D1655-23 szabványban („Standard Specification for Aviation Turbine Fuels”) írják elő, amely általánosan elfogadott, és más nemzeti szabványok jelentős részének alapját képezi. A különböző országok termékszabványainak előírásai alapján általánosan elfogadott az a megállapítás, hogy csak néhány tulajdonság értékében van eltérés, de azok mértéke is kicsi.

Szabványban előírt minőségi jellemzők

A következőkben megadott egyes számértékek a vonatkozó nemzetközi szakirodalomban is megtalálhatóak.

Fajlagos energia, legalább 42,8 MJ/kg; a fajlagos energiát a hajtóanyag egy molekulájában lévő hidrogén- és szénatomok aránya jelentős mértékben befolyásolja. (A nagyobb H/C atomarány nagyobb fajlagos energiát jelent, mert kisebb a kötési erő/„feszültség”). Nagy fajlagos energiájú hajtóanyagból kevesebb kell ugyanazon távolság megtételéhez, így kisebb lesz a felszálló tömeg, ami kritikus tényező.

Sűrűség, 775–840 kg/m³; a folyadéksűrűség alapvetően befolyásolja az energiasűrűséget. Nagyobb mértékű változásának hatására az energiasűrűség csak kisebb mértékben változik, azaz adott szűk sűrűségi tartományban alig változik.

Kinematikai viszkozitás (–20 °C), legfeljebb 8,0 mm²/s; szivattyúzhatóság alacsony hőmérsékleten.

Kristályosodáspont, legfeljebb –40 °C (JET A) és –47 °C (JET A-1); az üzemanyag nem képezhet kristályokat repülés közben az adott magasságon (dugulásveszély!). Hosszú távú repülés során kiemelten fontos jellemző az optimális repülési profil (útirány), magasság stb. kihasználása szempontjából.

Forráspont-tartomány (kezdő forráspont: megadandó, 10 ftf % átdesztillál: max 205 °C-ig, végforráspont: max. 300 °C); a forráspontgörbe megfelelő lefutása biztosítja a kellő illékonytságot.

Lobbanáspont, legalább 38 °C; biztonságtechnikai előírás, pl. kezelés, tárolás során.

Hőstabilitás; fontos a motorban és az üzemanyag-befecskendezőben a magasabb hőmérséklet fenntartása érdekében

Aromástartalom, legfeljebb 25 v/v%; tömítések duzzadásának biztosítása, viszonylag jó kenőképesség, nagy energiasűrűség, de kisebb fajlagos energia és jelentős koromképződés.

Összes kéntartalom, legfeljebb 0,30 m/m%; hozzájárulás a kenőképesség biztosításához. Hátrány: részecskékibocsátás, savas eső képződésének lehetősége, korrózió előidézése stb.

Nem kormozó lángmagasság, legalább 25 mm; tiszta égés (és részben az aromástartalom) jellemzője. A korom és a részecskék csak kismértékű keletkezése jelentősen csökkentheti a karbantartási költségeket (pl. lerakódások elkerülése, szerkezeti anyagok megóvása a kopástól).

Rézlemez-korrózió, 1. osztály; korróziós kockázatokra jellemző minősítési adat.

Összes savasság, legfeljebb 0,10 mg KOH/g; szerkezeti anyagokkal való összeférhetőségre és a korróziós kockázatokra utal.

Szennyeződések (gyantatartalom, részecskeszám/méret); áramlási, kiválási, kiülepedési és elektromos vezetőképességi problémák elkerülése.

Elektromos vezetőképesség (20 °C), 50–600 pS/m; sztatikus felöltődés megakadályozása adalékolással.

A fentiekben ismertetett, szabványokban is előírt minőségi előírásokon kívül még van néhány egyéb tulajdonság, ami a sugárhajtómű-üzemanyagok fontos jellemzőjének tekinthető. Ilyenek például a következők: energiasűrűség (energiatartalom a hajtóanyag térfogatára vonatkoztatva; lásd sűrűség), gyulladási hajlam és égési jellemzők (pl. cetánszám), felületi feszültség (hajtóanyag-eloszlás az égéstérben), károsanyag-kibocsátás (CO, CO₂, részecske, korom) stb.

Az előzőekben felsorolt tulajdonságok között természetesen vannak alapvetően fontos és meghatározó jellegűek, továbbá kiegészítőnek tűnő, de nagyon kritikus tulajdonságok is. Különösen az utóbbiak biztosítása érdekében a különböző technológiákkal előállított sugárhajtómű-üzemanyagok esetében szükség van alacsony szintű adalékolásra (adalékanyag fogalmát lásd előbb) is. A különböző hatású *adalékanyagok* a következők [9]: oxidációgátlók, fémdeaktivátorok, jegesedésgátlók, vezetőképesség-javítók, biocidok (mikrobiológiai fertőzőttséggátlók), szivárgásjelzők, korróziós inhibitorok, kenőképesség-javítók, az üzemanyagellátó rendszerben esetlegesen kiváló víz hatásainak kezelésére szolgáló adalék. Az említett adalékok szerkezeti képletét vagy a gyártó vállalat által megadott, a kereskedelmi forgalomban használt, ténylegesen bejegyzett márkanévét szigorúan előírják. Ehhez hasonlóan megadják az adalékok alkalmazási koncentrációtartományait is, ami általában 1 mg/kg-tól (mg/l-től), néhány 10, esetleg 100 mg/kg (mg/l) értékig terjed.

Az előzőekben bemutatott tulajdonságok általában szigorúbbak és kevésbé változtathatóak (finomhangolhatóak), mint a szárazföldi vagy a tengeri szállítás esetén, mert egyértelműen nagyobbak a biztonságtechnikai követelmények, sokkal nagyobbak a repülőgépek és a hajtóművek bekerülési költségei, továbbá széles körűek és fokozottabbak az üzemanyagokkal szemben támasztott teljesítménykövetelmények. Ezenkívül a vizsgálati körülmények is erősen szabályozottak, kis hibahatárokkal.

A sugárhajtómű-üzemanyagok minőségi előírásai – a motorbenzinnel és a dízelgázolajokkal ellentétben – nem változnak éghajlatonként, évszakonként vagy földrajzi helyenként. Annak érdekében, hogy az alkalmazandó hajtóanyag megfeleljen az előírásnak, a keverést, a minőségbiztosítást és -ellenőrzést először a kőolaj-finomítókban végzik.

A JET ellátási lánc is eltér a motorbenzintől és a dízelgázolajokétól. A repülőtereken nagy mennyiségű JET-nek kell rendelkezésre állnia. Általában csővezetéken vagy uszályon/kisebb hajón érkezik a JET a terminálokra, majd onnan a repülőterekre vagy közvetlenül az utóbbiakra. A légitársaságok több szállítótól is vásárolnak JET-et, így repülőgépeik számára az adott repülőtéren mindig van megfelelő minőségű hajtóanyag.

Az USA-ban előírják a repülőgépturbina-üzemanyagok minősítésének és jóváhagyásának lépéseit az ASTM D 4054 (2019b) szabványban. Ebben részletesen megadják az említett üzemanyagok és adalékok értékelésének és jóváhagyásának folyamatát is.

A sugárhajtómű-üzemanyagok összetevői és minőségi jellemzői közötti kapcsolatrendszer

A sugárhajtómű-üzemanyagokra vonatkozó minőségi jellemzők fentiekben közölt határértékeit a hajtóanyagot alkotó vegyületek, illetve vegyületcsoportok kémiai szerkezete és részaránya határozza meg.

A napjainkban kereskedelmi forgalomba hozott kerozinokat (sugárhajtómű-üzemanyagokat) – az előzőekben már részleteztük alapján – gyakorlatilag csak kőolajból állítják elő [2]. Ezek a hajtóanyagok nem tartalmaznak nitrogén- és oxigéntartalmú



2. táblázat. A sugárhajtómű-üzemanyag tulajdonságai és a vegyületcsoportok molekulaszervezetének kapcsolatrendszere

Megnevezés	n-alkánok	Izoalkánok, kevés elágazással	Izoalkánok, több elágazással	Egygyűrűs cikloalkánok	Kétgyűrűs cikloalkánok*	Aromások
Fajlagos energia	++	++	++	+	0	-
Hidrogén/szén atomarány	++	++	++	+	+	-
Sűrűség	-	-	-	+	++	+
Energiasűrűség	-	-	-	+	++	++
Hőstabilitás	+	+	+	+	+	0
Származtatott cetánszám	++	+	-	+	0	-
Koromképződés	++	++	++	+	+	--
Általános károsanyag-kibocsátás	++	+	0	0	-	--
Kristályosodáspont	-	+/-	+	+	+	+
Viszkozitás alacsony hőmérsékleten	-	+	++	0	0	-
Nemkormozó lángmagasság	++	+	0	+	0	--
Gyantatartalom	++	++	++	+	+	-
Kenőképeség	+	0	-	+	+	+
Tömítések duzzasztása**	-	-	-	0	0	++
Tömítések duzzasztása***	+	+	+	+	+	nem értelmezhető
Gőznyomás égési hatékonyság	0	+	++	0	-	-
lobbanáspont szempontjából	0	-	--	0/+	+	+
Adalékoldó hatás	0	0	-	+	++	++
Mérgező hatás	0/-	0/-	0/-	-	-	--

(Hatás: ++: erős pozitív; +: pozitív; 0: nem egyértelmű; -: negatív; --: erősen negatív)

* legalább 2 közös szénatomuk van, ** ≥ 10% aromástartalmú JET, *** aromásmentes JET

vegyületeket (kivéve az adalékokat), olefin- és fémmentesek. Kéntartalmuk legfeljebb 3000 mg/kg (vegyület formájában). A szénhidrogének szénatomszáma 7–18, általában 8–15 (egy átlagos molekula 11–12 szénatomot tartalmaz). Fő alkotóik körülbelül részarányai: 18–40% izoparaffin, 15–25% normál paraffin, 15–30% egygyűrűs paraffin, 1–15% kétgyűrűs paraffin, 11–20% (alkil)-aromás szénhidrogén.

A jó minőségű cseppfolyós sugárhajtómű-üzemanyagok kifejlesztéséhez elkerülhetetlenül fontos a velük szemben támasztott általános és speciális követelmények, továbbá a hozzájuk rendelhető egyes konkrét tulajdonságok (pl. fajlagos energia, hőstabilitás, kristályosodáspont) és az azokat biztosító, illetve azok változását befolyásoló vegyületcsoportok (pl. izoparaffinok, cikloparaffinok) és fontosabb (domináns) egyedi alkotóik kémiai szerkezete közötti összefüggések részletes ismerete is. Ezek közül a legfontosabbakat a 2. táblázatban foglaltuk össze. A táblázat adatai jól érzékeltetik, hogy a normál és az izoparaffinok (összegképletük: C_nH_{2n+2} , ahol n a szénatomszám) rendelkeznek a legtöbb előnyös tulajdonsággal. Ezek esetleges hiányosságait viszont a cikloparaffinok (általános összegképlet: $C_nH_{2(n-k)+2}$, ahol n a szénatomszám, k a gyűrűk száma) jól kiegészíthetik.

A 2. táblázat alapján összességében az is megállapítható, hogy az aromások hatása a legkedvezőtlenebb a JET-ek tárgyalt tulajdonságaira. Így például a kezdeti koromképződés és a részecskekibocsátás legjelentősebb forrásai. A földközeli és a magas légköri részecskekibocsátás a légközlekedés egyik legnagyobb környezetkárosító hatása. Ugyanakkor a kőolaj-eredetű sugárhajtómű-üzemanyagokban az aromás szénhidrogének je-

lenléte okozza a tömítések duzzadását, ami a JET üzemanyag fel-tétlenül szükséges tulajdonsága. (Megjegyzés: már vannak nagyon biztató eredmények az aromások cikloalkánokkal való helyettesítésére! Sőt a legújabb kutatások szerint azok a tömítések, amelyek korábban nem érintkeztek aromástartalmú üzemanyaggal, azok is megfelelő duzzadási hajlammal rendelkezhetnek aromásmentes JET-ek esetében is.)

Köszönetnyilvánítás. A közlemény az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott GINOP-2.3.2-152016-00053 projekt, „Stratégiai Műhelyek Kiválósága” [„Molekulaszervezetében nagy hidrogéntartalmú, cseppfolyós üzemanyagok kifejlesztése (hozzájárulás a fenntartható mobilitáshoz)”] és a TKP2021-NKTA-21 számú projekt keretében a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2021. évi Tématerületi Kiválóság Program finanszírozásában készült.

IRODALOM

- [1] Statista; Carbon dioxide emissions from commercial aviation worldwide from 2004 to 2022, letöltve: 2024.05.30.
- [2] WAYPOINT 2050: An air transport action group project, második kiadás, 2021.
- [3] IATA: Air Cargo Market Analysis, 2023. + IATA: Air Passenger Market Analysis, 2023. + korábbi IATA-adatok.
- [4] ICCT: Polishing my crystal ball: airline traffic in 2050, 2022.
- [5] Thunder Said Energy (the research consultancy for energy technologies): Jet fuel demand: by region and forecasts to 2050?, 2023.
- [6] Bahman Zohuri: Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation, Springer Cham, Chapter 6, September 2017, DOI: 10.1007/978-3-319-29835-1_6
- [7] Advanced alternative liquid fuels: For climate protection in the global raw materials change, ProcessNet, 2018.
- [8] Shane Kosir, Robert Stachler, Joshua Heyne, Francesca Hauck: High-performance jet fuel optimization and uncertainty analysis, Fuel (2020) 281, 118718. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118718>
- [9] Srivastava, S. P., Hancsók, J.: Fuels and Fuel-Additives, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014. (ISBN: 978-0-470-90186-1, 376 oldal)