

Csató Péter

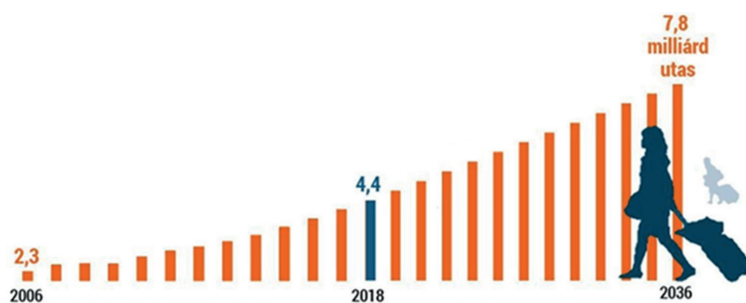
A szintetikus tüzelőanyagok alkalmazásának kérdései a repülésben

Az elmúlt években rendkívüli mennyiségű üvegházhatású gáz jutott a légkörbe, amelynek nem elhanyagolható része a repüléshez köthető. A jelenleg használt, az 1930-as éveket követően egyre csökkenő mennyiségben kitermelhető kőolaj kiváltására az egyik legígéretesebb alternatívának a szintetikus tüzelőanyagok különböző típusai tűnnek. „Drop-in” jellegük miatt főbb tulajdonságaik megegyeznek a hagyományos repülőgép-üzemanyagokkal, így kompatibilisek a legtöbb repülőgéptípussal. Azonban a szintetikus tüzelőanyagok előállítása sok esetben nehézkes vagy jóval költségesebb folyamattal jár, mint a hagyományos kerozin esetében. Számos terv született már e problémák megoldására, amelyek kivitelezése és új eljárások fejlesztése jelenleg is folyamatban van, figyelembe véve a hazánk által is vállalt 2030-as, valamint 2050-es határidővel a karbonsemleges, majd karbonmentes katonai és polgári légi közlekedés elérésének célját. E cikkben olyan szintetikus alternatív tüzelőanyagokat mutatok be, amelyek potenciálisan alkalmasak lehetnek a kerozin kiváltására. Célom, hogy képet adjak az eddig elért fontosabb eredményekről, és előrevetítsem a szintetikus tüzelőanyagok felhasználásának lehetséges jövőjét.

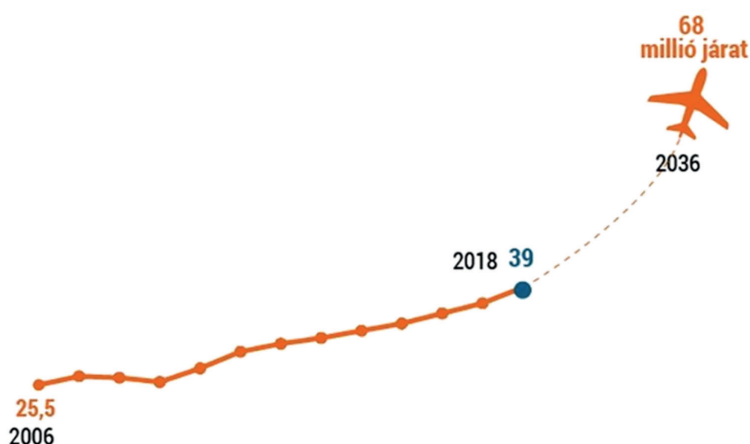
Kulcsszavak: SAF, szintetikus tüzelőanyag, Fischer–Tropsch-eljárás, károsanyag-kibocsátás, drop-in üzemanyagok

1. Bevezetés

A légi közlekedés globalizált világunk szerves részévé vált, összeköti az embereket és a vállalkozásokat akár kontinensek között is. Szerke a világon egyre növekvő igény van rá (1. ábra), ami együtt jár az ezt kiszolgáló légi járművek, illetve légi járatok számának (2. ábra), ezzel együtt azok tüzelőanyag-fogyasztásának növekedésével (3a. ábra).

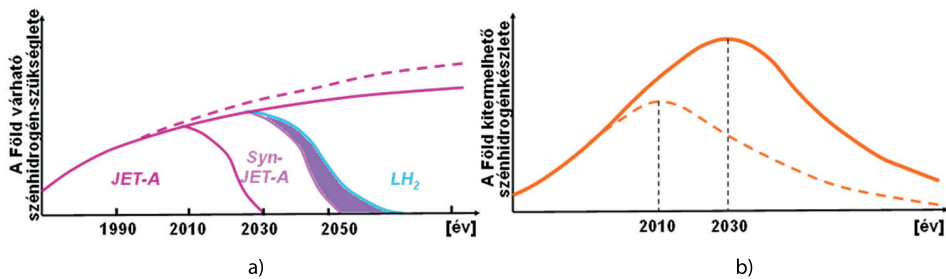


1. ábra
A légi utazást választók száma 2036-ig [1]



2. ábra
A légi utazások kiszolgálásához szükséges repülőgép-járatszám változása 2036-ig [2]

A repülőgépek működtetéséhez szükséges tüzelőanyag-igény folyamatosan növekszik (3a. ábra), azonban nem hagyható figyelmen kívül, hogy az előállításához szükséges, kitermelhető fosszilis nyersanyag mennyisége egy évtized múltán fokozatosan és véglegesen csökkenni kezd (3b. ábra), ezáltal – a fenntartani szükséges fejlődés érdekében – elengedhetetlen gondoskodni ennek megbízható pótlásáról, illetve kiváltásáról. Utóbbi azt jelenti, hogy amíg még van és működik a meglévő és a közeljövőben gyártott több tízezer, hagyományos belső égésű hajtómű (ez további 20–40 év!), addig más forrásból (például szintetikus úton) kell biztosítani ezek üzemanyag-ellátását. Ezt követően viszont meg kell találni a légi járművek levegőben való mozgatásához maradéktalanul alkalmas új erőgép(ek)et, és az ezek működtetéséhez szükséges mennyiségű, hosszú ideig gazdaságosan kitermelhető, illetve gyártható, előállítható új energiahordozó(ka)t. Utóbbiak széles körű, üzemszerű alkalmazása viszont csak a felsoroltak kitermelését, előállítását, szállítását, tárolását lehetővé tévő logisztikai hálózat kiépítését követően válik lehetségessé.



3. ábra

A légi közlekedés energiaigényének és a kitermelhető kőolaj mennyiségének változása a 21. században [3]

Mindez csak úgy valósítható meg, hogy a légi közlekedés egyre súlyosabb, káros környezeti hatásait nem hagyják figyelmen kívül, mivel a rendkívüli mértékben növekvő üzemanyag-fogyasztás jelentős mértékben hozzájárul a károsanyag-kibocsátáshoz és az éghajlatváltozáshoz. Az Európai Bizottság és a Holland Környezetvédelmi Ügynökség által 2022-ben kiadott EDGAR adatbázisa alapján az adott évben 37 857,58 millió t szén-dioxid került a légkörbe [4]. Azonban ebben a kimutatásban nem szerepelnek az egyéb, még erősebb üvegházhatású gázok, amelyek a repülőgép-üzemanyagok elégetése során szabadulnak fel, például nitrogén-oxidok, kén-dioxid és szén-monoxid, bár ezek jelentős hatással lehetnek a helyi levegő minőségére, és hozzájárulhatnak a szmog kialakulásához. A Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség (IATA) kimutatása alapján a légi közlekedés a globális szén-dioxid-kibocsátás körülbelül 2%-áért felelős.

Bár a Covid-19 miatt a légi közlekedés általi üzemanyag-fogyasztás az elmúlt években visszaesett, 2023-ban várhatóan visszatér a világjárvány előtti tendenciákhoz, így a következő években tovább fog növekedni. Ez jelentős kihívást jelent a légi közlekedési ágazat számára, amelynek egyensúlyt kell teremtenie a növekedés és a károsanyag-kibocsátás csökkentése között. Ennek érdekében különböző megoldási kísérletek láttak napvilágot, beleértve a nemzetközi egyezményeket, illetve technológiai fejlesztéseket. Az új meghajtási módszerek mellett egyre nagyobb figyelem irányul az alternatív tüzelőanyagok előállítására szolgáló progresszív eljárások kifejlesztésére és a repülésben való alkalmazásuk hatékonyabbá tételére. Napjainkban számos külföldi és nemzetközi szervezet egyre átfogóbban kutatja a repülőgépüzemanyag-előállítás alternatív módszereit azért, hogy ne csak a velük szemben támasztott fizikai-kémiai és hasznosítási követelményeknek való megfelelés, hanem ökológiai tulajdonságaik további javítása is lehetővé váljon.

A légi járművek károsanyag-kibocsátásának csökkentése szempontjából jelentős alternatívát jelentenek a szintetikus tüzelőanyagok (synfuels, más néven PtL, Power-to-Liquids), kerozinszerű „drop-in” üzemanyagok, amelyek kompatibilisek a legtöbb repülőgép hajtóművével, így azok jelentős átalakítása nélkül alkalmazhatók.

2. A szintetikus tüzelőanyagok fejlődése

A szintetikus tüzelőanyagok számos típusa és előállítási módja ismeretes, amelynek eredete 1902-re datálható és az indirekt cseppfolyósítási technológia megjelenésével köthető össze. Ekkor végezték el először sikeresen a szén-monoxid és szén-dioxid hidrogénezését, aminek eredményeként metán jött létre. Ez az esemény indította el a modern katalitikus hidrogénezés fejlesztését. Körülbelül tíz évvel később Fritz Haber ammóniát szintetizált katalitikus technikával, a korábbi légköri nyomáson végzett kísérletekkel ellentétben, magas hőmérsékletű és nagy nyomású környezetben. Ezután, a nagy nyomású katalitikus technológia gyorsan fejlődött. 1913-ban a német Badische Anilin und Soda Fabrik (BASF) cég szabadalmat szerzett a szén-monoxid nagy nyomású katalitikus hidrogénezésére. A BASF szabadalom érdekelte Franz Fischer professzort, a Vilmos Császár Kémiai Intézet (ma Max Planck Kémiai Intézet) professzorát, aki társával, Hans Tropschsal együtt elkezdte tanulmányozni a reakciólehetőségeket. Fischer 1923-ban publikálta első eredményeiket, amelyekben vasforgácsot használtak katalizátorként 400–450 °C-os reakciókörnyezetben, hogy a termékek széles skáláját állítsák elő, beleértve az alkoholokat, ketonokat és aldehideket, de üzemanyagot még nem. Szénhidrogén-olajat először csak 1925-ben sikerült kis cseppekben szintetizálniuk. 1931 után a Fischer és más tudósok által kifejlesztett technikával, normál nyomáson és 180–220 °C-os hőmérsékleten kobaltkatalizátort alkalmazva már hatékonyan lehetett üzemanyagokat előállítani [5].

Ez a folyamat azonban nem volt mentes a nehézségektől, mivel a nem kellően tiszta gáz a katalizátor szennyezéséhez vezetett. További munkára volt szükség a gáztisztítási eljárások fejlesztése érdekében. 1933-ban megépült az első működő, közvetett cseppfolyósító kísérleti üzem. 1937-re már hét normál nyomású reaktort állítottak fel Holtenben, Rauxelben, Wanne-Eickelben, Lutzendorfban, Moersben, Berghamenben és Schwarzheidében, amelyek közül az utóbbi volt a legnagyobb üzem, évi 180 000 t kapacitással, és az egyetlen, amely még 1945-ben is működött. Számos oka volt Németország dominanciájának a szintetikus üzemanyagok kutatásának és előállításának területén a második világháború előtti és alatti években. Ezek közül a fő szerepet a nem megfelelő üzemanyag-ellátás jelentette, ami az első világháború elvesztésében is szerepet játszott. Az állami és magánforrásokból finanszírozott német tudósok két fő technikát dolgoztak ki a szénátalakításra, az olajhiány problémájának leküzdésére a második világháború kitöréséig. E módszerek közül az első a Bergius-technika, amely porított szén hidrogénezésén alapult, míg a Fischer, Tropsch és Pichler által kidolgozott második módszer közvetetten állított elő üzemanyagot széngázosítással, majd szintetizálással. Ezeknek a technológiáknak a fejlesztése gyorsan haladt a német kutatóintézetek, egyetemek és vállalatok laboratóriumaiban.

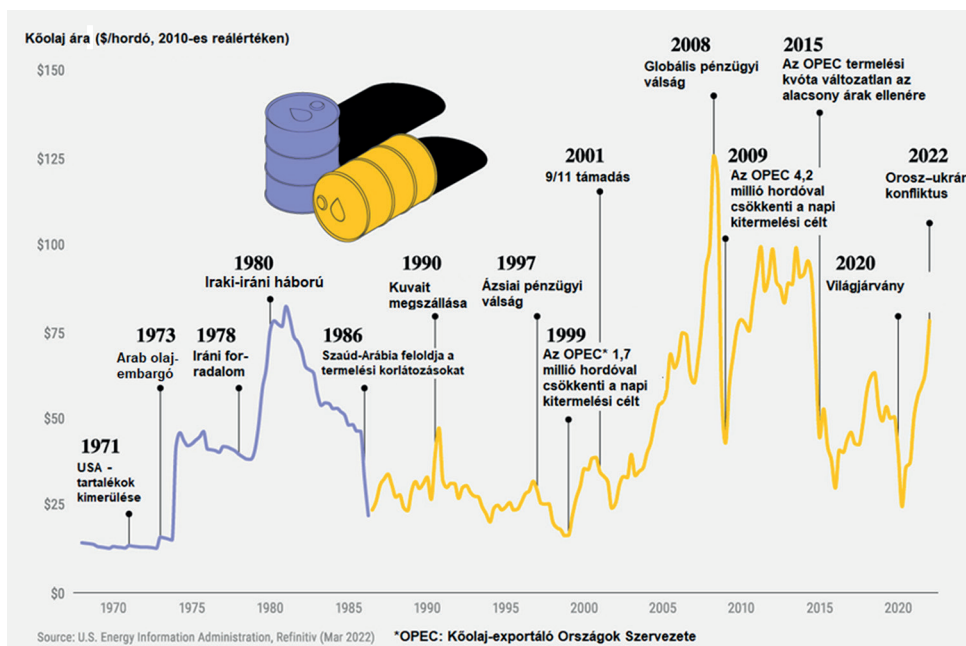
A két eljárás közül a Bergius-technika volt a fejlettebb, és sokkal nagyobb mértékben járult hozzá Németország folyékony üzemanyaggal való ellátásához, mint a Fischer–Tropsch-szintézis. A hidrogénezéssel kiváló minőségű repülőgép- és motorbenzint, míg a Fischer–Tropsch-szintézissel pedig dízel- és kenőolajat, valamint gyengébb minőségű benzint kaptak. A két eljárás valójában inkább egymás komplementere, semmint versenytársa volt, de mivel csak a hidrogénezéssel volt lehetséges jó minőségű benzint előállítani, az 1930-as évek végén és a háborús években sokkal nagyobb fejlődésen ment keresztül, mint a Fischer–Tropsch-szintézis. Az 1936-ban induló német négyéves terv keretében tíz Bergius-elven működő üzem létrehozására történt kezdeményezés 1,15 milliárd DM költséggel. A terv számos nehézségbe ütközött, többek között az acél-, munkaerő- és tökehiány egyre inkább gátolta a teljes

energiafüggetlenség megvalósítására irányuló terveket. A nehézségek ellenére 1939 szeptemberében a termelőkapacitás évi 1,467 millió t üzemanyag szintetizálását tette lehetővé, amelynek mintegy 84%-a közvetlen hidrogénezéssel történt. 1944 márciusára, a termelési csúcs elérésekor, a teljes kapacitás körülbelül évi 4,5 millió t-t tett ki. A repülőgépipüzemanyag-előállítás, amely 1944 elejére elérte az évi közel 2 millió t-t, szinte teljes egészében a közvetlen hidrogénező üzemekben történt. Ekkor a Luftwaffeban felhasznált tüzelőanyag megközelítőleg 92%-a szintetikus volt. Azonban a stratégiai bombázások miatt az üzemek nagy része megbénult, így az összkapacitásuk 1944 szeptemberére évi 360 000 t alá esett.

A németországi fejlesztések jelentős figyelmet kaptak az Egyesült Államokban. Bár szintetikus üzemanyagok iránt nem mutatkozott akkora érdeklődés, mint Németországban, de a kutatás az 1920-as években már megkezdődött, leginkább az olajpala-technológia területén. Hatékonyabb program azonban csak az 1940-es években indult. Az elemzők ekkor kezdték előrejelezni a hazai kőolajhiányt és az import növekvő szerepét az Egyesült Államok energiaellátásában. Később az USA erőfeszítéseit nagymértékben segítette a Németországban lefoglalt információ és eszközpark. 1944 végén a Belügyminisztérium Háborús Kőolajügyi Hivatala műszaki és tudományos önkénteseket kért, hogy csatlakozzanak a Szövetséges Erők előretolt egységeihez Németország ipari központjainak inváziója során. Sok esetben a bombázás annyira tönkretette a berendezéseket, hogy alig lehetett megmenteni, míg más esetben az Egyesült Államok hőcserélőket, nagynyomású befecskendező szivattyúkat és különféle speciális eszközöket szerzett meg és szállított az anyaországba. A német tudósok együttműködése hozzájárult a technológiatranszfer folyamatához. Több száz német tudóst alkalmaztak Franz Fischer vezetésével a megszerzett dokumentumok olvasására, fordítására és osztályozására. 1947-re az Egyesült Államok kőolaj iránti belső kereslete egyértelműen helyreállt, sőt jóval a várakozások fölé emelkedett. Időközben számos tanulmány készült, amely a szénátalakítás relatív költségeire vonatkozott. Az akkori gazdasági körülmények között az Országos Kőolajügyi Bizottság arra a következtetésre jutott, hogy a szintetikus üzemanyag fejlesztési programja csak a legsúlyosabb nemzetbiztonsági megfontolások esetén indokolt. Ennek elsődleges oka a Közel-Keleten és más régiókban található hatalmas olajtartalékok felfedezése volt, ami olcsóbbá tette az olajimportot a szintetikus üzemanyag hazai előállításához képest. Ezenkívül a szén cseppfolyósításának környezeti hatásai egyre nyilvánvalóbbá váltak, ami a levegő- és vízszennyezéssel kapcsolatos aggodalmakhoz vezetett. Ennek következtében 1954-ben bezárták az összes közvetett és közvetlen cseppfolyósító létesítményt, majd az 1970-es évek közepéig megszűnt minden jelentős nemzeti erőfeszítés a szintetikus üzemanyagok fejlesztésére Dél-Afrikán kívül. Bár ott a Ruhrchemie német cég már az 1930-as években szerződést kötött az Anglovaal céggel a Fischer–Tropsch-módszer alapján működő létesítmények létrehozásáról és szabadalmáról, az együttműködés az eszkalálódó világháború és annak következményei miatt nem valósulhatott meg. A háború után sok német tudós és mérnök elmenekült az országból, és a világ más részein, köztük Dél-Afrikában telepedett le. Az 1950-es években a palaolajkészletek kiürülése miatt üzemanyag-ellátás szempontjából kiszolgáltatott Dél-Afrika a növekvő energiaigény okán még kilátástalanabb helyzetbe került.

A dél-afrikai kormány is felismerte a szintetikus üzemanyag-technológiákban rejlő lehetőségeket, és megalapította a Dél-afrikai Szén-, Olaj- és Gázipari Társaságot (Sasol) az ipar fejlesztésére. A Sasol tudósai német technológiai alapokra támaszkodva hoztak létre szén cseppfolyósítására szolgáló, Fischer–Tropsch-eljárás alapján működő üzemeket, amelyek az ország szintetikusüzemanyag-iparának alapjául szolgáltak. A technológia jól illeszkedett

Dél-Afrika bőséges szénkészleteihez, és megbízható energiaforrást biztosított az ország számára. Idővel a Sasol kifejlesztette saját, egyedi megközelítését a Fischer–Tropsch-folyamathoz, ami végül a technológia kizárólagos tulajdonjogához vezetett, amelyet Synthol eljárásra neveztek át.



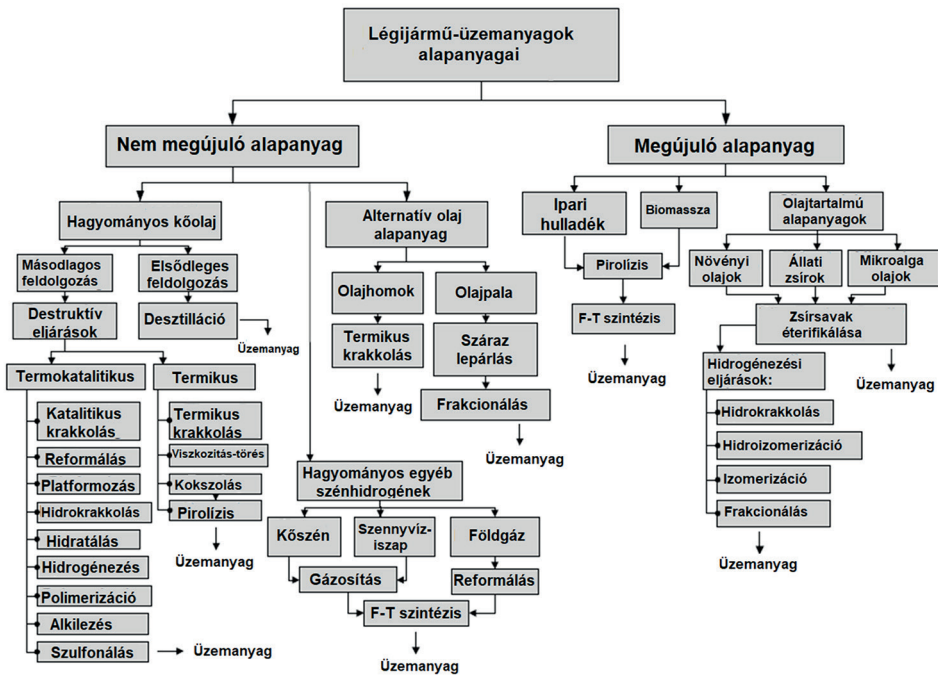
4. ábra
Világpolitikai események hatása a kőolaj piaci árára [7]

A gyártás 1955-ben indult meg, de a rendszer egésze csak 1960-ban működött kielégítően, ami már lehetővé tette a vállalat számára, hogy folyékony üzemanyagok széles skáláját állítsa elő, beleértve benzint, gázolajat és repülőgép-üzemanyagot (SPK – Synthetic Paraffinic Kerosene), amely már a gázturbinás hajtóművekben való felhasználásra is alkalmas volt. A Synthol-folyamat sikeréből adódóan a Sasol újabb létesítményeket hozott létre. Ezeket az üzemeket már sokkal nagyobb, több mint 50 000 hordó napi termelésre tervezték. A létesítmények megépítésére vonatkozó döntés az 1974-es olajembargó és az iráni export 1979-es leállítására, valamint az apartheid miatti embargók kedvezőtlen következményeinek elhárítására született [6]. A cég sikere a szintetikus üzemanyagok fejlesztésében hozzájárult ahhoz, hogy Dél-Afrika vezető szerepet töltsön be az alternatív energiaforrások létrehozásának területén, és hozzájárult az ország gazdasági növekedéséhez és fejlődéséhez is. Ezzel párhuzamosan a világ más, kőolajforrásokban szegény országaiban is megindult vagy újjáéledt a szintetikus üzemanyagok kutatás-fejlesztése. Ezt leginkább a fosszilis tüzelőanyagok környezeti hatásaival kapcsolatos növekvő aggodalom, az olaj világgpiaci árának ingadozása, valamint a külföldi olajkészletektől való függéssel összefüggő geopolitikai feszültségek okozták. Ahogyan az a 4. ábrán is látható, a 20. század utolsó negyedében a kőolaj ára nagymértékben ingadozott, ennek megfelelően a szintetikus tüzelőanyagok kereslete ezzel ellenkező változást mutatott. Ezzel párhuzamosan a technológia fejlődésével és a fenntartható repülőgép-üzemanyagok iránti

kereslet növekedésével a szintetikus kerozin előállítása gazdaságilag megvalósíthatóbbá és a repülőipar szereplői számára vonzóbbá vált.

3. Üzemanyagok előállításának lehetőségei

A 20. század végétől napjainkig számos fejlesztés és alternatív megoldás született repülőgép-tüzelőanyagok előállítására, amelyeket az 5. ábra foglal össze. Az elmúlt évtizedekben különféle megújuló erőforrások kutatására is sor került. Ezek fő előnye, hogy természetes eredetűek, nem képeznek többlet szén-dioxidot a légkörben, kevésbé károsak a környezetre, és könnyen lebomlanak.



5. ábra
A repülőgéptüzelőanyag-gyártás technológiáinak osztályozása a felhasznált alapanyag szerint [8]

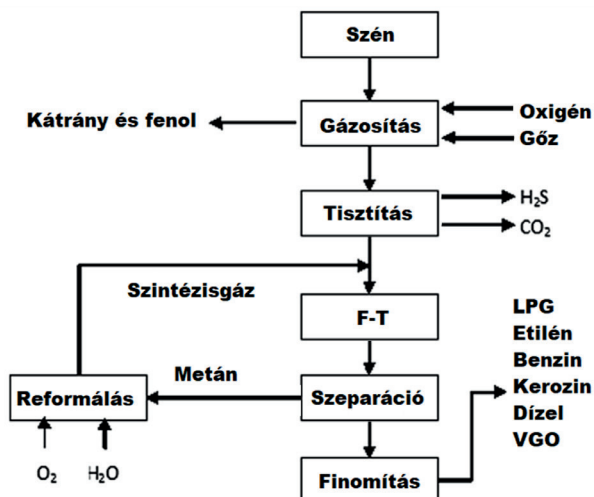
A felhasznált nyersanyag típusa szerint öt különböző tüzelőanyag-csoportot határozhatunk meg:

- hagyományos kőolajból származó (legfőképpen paraffinokat, izoparaffinokat, cikloparaffinokat és aromás vegyületeket tartalmaz);
- nem hagyományos olajból (olajhomok és olajpala) származó;
- szintetikus úton földgázból, szénből vagy szén és biomassza kombinációjából, Fischer-Tropsch-eljárással nyert;
- megújuló olajokból származó (biodizel, biokerozin, hidrogénezett növényi olaj – HVO);
- alkoholokból származó (At) – Alcohol to Jet) [8].

Ahogy az 5. ábrából látható, a jelenlegi technológiák nagy része továbbra is a különféle foszszilis tüzelőanyagok feldolgozására irányul, mint az olaj, szén, földgáz, olajpala és olajhomok. Azonban egyre nagyobb arányban állítják elő a megújuló alapanyagokból szintetikus úton létrehozott üzemanyagok különböző típusait. A bemutatott öt csoport átfogó vizsgálata túlmutat jelen munka keretein, ezért itt kizárólag a harmadik csoport elemzése történt meg. A Fischer–Tropsch-eljárás útján történő repülőgépjármű-üzemanyag előállítás nagy fokú finomításokon esett át az évek során, de lényege nem változott. Az alábbiakban a szintetikus tüzelőanyagok különböző típusai és a jelenleg legelterjedtebb előállítási technológiák jellemzői tekinthetők át vázlatosan.

A szintetikus tüzelőanyagoknak, alapanyaguktól függően, rendszerint három csoportját különböztetjük meg:

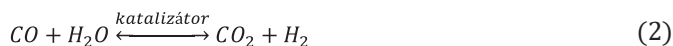
- *Ctl* (Coal to Liquid Fuel): szénalapú folyékony üzemanyag, amelynek előállítási folyamata általában két cseppfolyósítási módszerre osztható: direkt és indirekt. Ahogy a nevük is sugallja, a direkt eljárások a szénalapú szénhidrogéneket közvetlenül folyékony tüzelőanyaggá alakítják, míg az indirekt eljárások esetében a 6. ábrán látható módon a Fischer–Tropsch-eljárásban a kiindulási anyag az izzó szénen vízgőz átfűvásával nyert szintézisgáz:



6. ábra
Tipikus indirekt szén-cseppfolyósítási eljárás [10]

A folyamat során szén-monoxidból és hidrogénből álló gázkeverék keletkezik. Elméletileg ez a szintézisgáz 50 térfogat% szén-monoxidból és 50 térfogat% hidrogénből áll. Azért, hogy a Fischer–Tropsch-szintézishez optimális gázösszetételt kapjunk, tovább kell növelni a hidrogéntartalmát. Ezt úgy érik el, hogy 400–500 °C-ra hevített vízgőzzel elegyítve

KOH-tartalmú Fe_2O_3 -katalizátoron vezetik át. Ekkor a szintézisgázban levő szén-monoxid a vízgőzzel a következő egyenlet szerint reagál:



A kapott gázelegyből a szén-dioxidot vízzel nyomás alatt kimossák, és az így nyert hidrogént vízgázzal a kívánt arányban elegyítik. Ezt követi a gáz megtisztítása a nemkívánatos melléktermékektől, különösen a kén-dioxidtól és a szén-dioxidtól. A gáztisztítási eljárás kulcsfontosságú, mivel mind a kén-dioxid, mind a szén-dioxid gátolja a folyamat optimális teljesítményét. A megfelelő összetételű gázelegyet 10 bar nyomáson, 180 °C-on fém katalizátoron vezetik át. A Fischer–Tropsch-szintézisre alkalmas katalizátorok – főleg vas, kobalt, nikkell és ruténium – közül jelenleg egyedül a vasnak van ipari jelentősége. Az eljárás során különböző szénhidrogének keveréke keletkezik, amely a paraffin-szénhidrogének mellett telítetlen szénhidrogéneket is tartalmaz, amelyekből a szeparációs és finomítási folyamatok után üzemanyagok széles halmazát állítják elő, például benzint, dízelt vagy repülőgép-hajtóanyagot, fűtőgázt vagy cseppfolyósított petróleum gázt (LPG) és viaszokat. Az így kapott kénmentes tüzelőanyagok elégetése során kevesebb nitrogén-oxid kerül a légkörbe. Emellett a folyamatból elektromos energia és műtrágya is kinyerhető. Azonban a Ctl gyártási technológiája továbbra is az energiahatékonyság, a környezeti hatások és a gazdasági megvalósíthatóság bizonytalanságával néz szembe, hiszen az előállítási folyamatok vízfelhasználása és szén-dioxid-kibocsátása igen magas [3], [9].

- *GtL* (Gas to Liquid Fuel): olyan szintelen, szagtalan tüzelőanyag, amelynek alapanyaga a földgáz és egyéb gáz halmazállapotú szénhidrogének. A földgázt az egyik legtisztább és legnagyobb mennyiségben előforduló fosszilis tüzelőanyagként tartják számon, hiszen nem tartalmaz ként, nitrogént, aromás vegyületeket, mint a kőolajból előállított üzemanyagok, de szállítása négyszer drágább, mint a kőolajé. Mivel a 2000-es évek elején az olaj világgiazi ára emelkedett, a fosszilis tüzelőanyagok kimerülése és a környezetszennyezés miatt jelentős figyelem irányult az ebben a technológiában rejlő lehetőségekre is. A GtL eljárás kulcsfontosságú eleme a szintézisgáz létrehozása parciális oxidációval, majd ennek kémiai átalakítása hosszabb láncú szénhidrogénekké, amelyekből jellemzően tüzelőanyagok, mint például kerozin, cseppfolyósított kőolajgáz (LPG), közel nulla kéntartalmú benzin, magas cetánszámú dízel, illetve kenőanyagok és viaszok készülnek [11].
- *BtL* (Biomass to Liquid Fuel): biomassza alapú tüzelőanyag, amelynek nyersanyagát több lépésben termokémiai úton hozzák létre magas keményítő- és cellulóztartalmú növényekből, illetve hulladékból és algákból. A biomassza termelési és feldolgozási technológiái terén az elmúlt évtizedben jelentős előrelépés történt. Számos olyan eljárás jött létre, amely során a biomassza biológiai, fizikai és termikus átalakítás útján tüzelőanyaggá alakítható. Ezek közül a pirolízis, amelyet a Fischer–Tropsch-szintézis követ, az egyik legjobb lehetőség repülőgép-üzemanyagok előállítására. A biomasszából, különösen a keményfából származó üzemanyag maximális energiahatékonysága nagyobb, mint a szénből vagy földgázból előállított társaié (77%, 64%, illetve 68%). A biomassza elgázosítása azonban a hagyományos berendezésekben salakosodási és szennyeződési problémákat okozhat, mivel nátriumot, káliumot és egyéb alkálifémeket tartalmazhat [8].

Megállapítható, hogy a biomassza alapanyagként való alkalmazása kettős célt szolgál: a széndioxid-kibocsátásból eredő éghajlatváltozás lassítását és a hagyományos hajtóanyagoktól való függőség csökkentését (főleg a közlekedési szektorban). A BtL üzemanyagok csoportja az alapanyag eredete, származása, termőterülete alapján vagy az előállítási technológiai generációk szerint (első, második, harmadik, negyedik) kategorizálhatók. Az első generációs alapanyagok élelmezésre is alkalmas növényekből származnak, mint például a kukorica, burgonya vagy napraforgó. A magas cukor-, cellulóz- vagy keményítőtartalmú növényekből bioetanol, a magas olajtartalmú növényekből biodízel készül. A második generációs bioüzemanyagok kiindulópontját olyan növények és szerves hulladékok biztosítják, amelyek se emberi élelmezésre, se állati takarmányozásra nem megfelelőek, azonban a termesztés továbbra is olyan termőföldön történik, ahol erre alkalmas növények is megélnek. A harmadik generáció fő alapanyaga a különböző mikro- és makroalgák, amelyek általában génmódosításon esnek át annak érdekében, hogy minél ellenállóbbak legyenek és minél több olaj kitermelése legyen lehetséges belőlük. A negyedik generáció esetében már nem közvetlenül a biomasszából, hanem a génmódosított mikroalgák mellett élesztőgombák és cianobaktériumok által széndioxidból előállított anyagokból készül. Hosszú távon a BtL üzemanyagok bizonyos tekintetben prioritást élveznek más alternatívákhoz képest, mivel előállításuk technológiai szempontból a legkevésbé terheli a környezetet, azonban alapanyagainak elérhetősége korlátozott lehet, potenciálisan versenyhelyezettel járhat, és etikai kérdések is felmerülhetnek a termőföldek más célra való felhasználhatósága miatt [12].

4. Alternatív repülőgép-tüzelőanyagok szabályozási rendszere

Mivel a szintetikus üzemanyagok előállításának kezdettől fogva alapvető célja, annak dugattyús motorokban való alkalmazása volt, a gázturbinás hajtóművekben történő felhasználás merőben új problémákat vetett fel, ennél fogva a szintetikus kerozin fejlesztése csak jóval később vezetett eredményhez.

Ezeknek a tüzelőanyagoknak szigorú kritériumrendszernek kell megfelelniük, amelyek a kerozin kémiai, fizikai tulajdonságait szabályozzák a polgári és katonai repülés követelményeinek maradéktalan kielégítése érdekében. Ilyen követelmények például:

- magas energiasűrűségük legyen;
- kémiailag, halmazállapotukat tekintve stabilnak kell lenniük, nem léphetnek reakcióba a fedélzeti tüzelőanyag-rendszer elemeivel, berendezéseivel;
- alkalmasnak kell lenniük a repülőgép berendezéseinek, hajtóműve(inek), légkondicionáló rendszerének és hordfelületeinek a kívánt mértékű hűtésére;
- legyenek kompatibilisek a jelenleg alkalmazott repülőeszközökkel és azok kiszolgálásához szükséges infrastruktúrával, lehetőleg változtatás nélkül, vagy minimális átalakítással, korszerűsítéssel [3].

Egy hajtóanyag alkalmazhatóságát különböző nemzeti és nemzetközi szabványok határozzák meg. Ilyenek:

- katonai üzemeltetésben a NATO-szabványoknak való megfelelés;
- UK MOD Defence Standard (az Egyesült Királyság védelmi minisztériumi szabványa) 91-091 „AVTUR”;

- ASTM (Egyesült Államok szabványügyi testülete) D7566 Szabványos módszerek szintetikus szénhidrogén tartalmú repülőgép tüzelőanyagokhoz;
- ASTM D1655 Szabvány a repülésben használatos tüzelőanyagok specifikációiról;
- GOST (Oroszország és a FÁK szabványa) 10227 TS-1.

Ezek a specifikációk mind nagyon hasonlóak, mivel lényegében ugyanazt az anyagot írják le, azaz a kerozint. Például az ASTM D1655 és a Def Stan 91-91 szinte azonos követelményeket támaszt a Jet A-1-re: a körülbelül 30 vizsgálati kritérium közül csak két kisebb eltérés van a vizsgálati határértékekben (savasságszint és egy naftalintartalomhoz kapcsolódó kritérium). Az energiasűrűséggel, fagyás- és lobbanásponttal, összetétellel, illékonyasággal, viszkozitással, szennyeződés- és adalékanyag-tartalommal, valamint egyéb meghatározó tüzelőanyag-jellemzőkkel kapcsolatos összes követelmény azonos. A tüzelőanyagok megfelelő minőségét és specifikációit a repülőeszköz és a hajtómű típustanúsítványa, valamint a helyi előírások határozzák meg, bár a leggyakrabban a fentebb felsorolt szabványokat idézik [13]. Ez az egységes szabályozás kiemelten fontos, hiszen a globálisan érvényes üzemanyag-szabványoknak nem megfelelő tüzelőanyag-típusok felvetnék a kompatibilitás kérdését, és valószínűleg az ellátó infrastruktúra költséges megkettőződését tennék szükségessé. Ennélfogva ezeknek az új tüzelőanyagoknak a piacra lépéséhez 100%-os kompatibilitásra van szükség a meglévő típusokkal [8].

Az ASTM D1655 a hagyományos kőolajból származó tüzelőanyagokkal szemben támasztott követelményeket írja le, a D5766 pedig a szintetikus tüzelőanyagokkal és azok keverékével kapcsolatos előírásokat tartalmazza. Azonban jelenleg a D5766-os szabvány követelményeinek való maradéktalan megfelelés csak hagyományos kerozinnal való keveréssel érhető el. Amennyiben az alternatív tüzelőanyag tanúsítványt kap, attól kezdve ASTM D1655 repülőgép-üzemanyagnak tekintendő, így bekerülhet a hagyományos repülőgépüzemanyag-kezelő, -tároló és -elosztó hálózatba. Az első, hivatalosan is engedélyezett alternatíva az 50%-ban szintetikus kerozint tartalmazó „Félszintetikus” repülőgép-üzemanyag¹ volt, amelynek hitelesítése 1998-ban történt meg, de azóta számos típust elfogadtak [14].

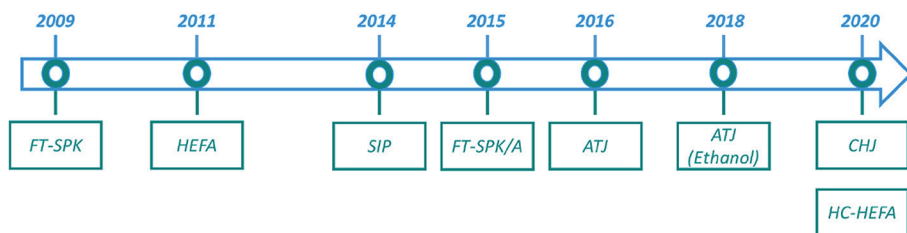
Az alternatív tüzelőanyagok csoportján belül kiemelt fontosságú a fenntartható tüzelőanyagok (SAF) létrehozása. A Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet (ICAO) különbséget tesz az alternatív repülőgép-üzemanyagok (AAF), valamint a SAF között. Az előbbieket kőolajtól eltérő forrásokból állítják elő (szén, földgáz, biomassa, hidrogénezett zsírok és olajok stb.). A SAF-ek pedig olyan AAF-ek, amelyek megfelelnek a fenntarthatósági kritériumoknak. Bár a SAF-nek nincs egységes, nemzetközileg elfogadott definíciója, a Szén-dioxid Kompenzáció és Kiegyenlítő Rendszer a Nemzetközi Repülésben (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation – CORSIA) keretében kísérletet tettek a fenntarthatósági kritériumok meghatározására, annak érdekében, hogy a nemzetközi légi közlekedésből származó üvegházhatású gázok kibocsátása a 2020. évi szintre csökkenthető és ott fixálható legyen [15].

A CORSIA meghatározásának értelmében azt a hajtóanyagot nevezhetjük SAF-nek, amely legalább 10%-os karbonlábnym-csökkenést ér el a fosszilis tüzelőanyagok 89 g CO₂ e/MJ-hoz képest [16].

Az alábbiakban a jelenleg elfogadott típusok olvashatók, a tanúsítványok kiadásának idővonalát pedig a 7. ábrán látható.

¹ Semi-Synthetic Jet Fuel, SSJF.

- A Fischer–Tropsch szintetikus paraffin kerozin (*FT-SPK*), amely a szén, földgáz vagy biomassa fentebb leírt eljárással történő feldolgozásával jön létre. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Fischer–Tropsch szintetikus aromás kerozin (*FT-SKA*), hasonlóan készül a FT-SPK-hoz, de a folyamat során alkilezett benzol hozzáadása történik. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Hidrogénezett észterekből és zsírsavakból előállított szintetikus paraffin kerozin (*HEFA-SPK*), amely a növényi olajok és az állati zsírok hidrogénnel történő redukálásával létrejövő szénhidrogén. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Hidrogénezett szénhidrogének (*HHC-SPK* vagy *HC-HEFA*). Ennek a típusnak az előállítási folyamata hasonló az előző típushoz, de bővül a megengedett alapanyagok csoportja a biológiai forrásokból előállított tiszta szénhidrogénekre, például a triterpéneket termelő *Botryococcus braunii* algafajból. Keverési határa legfeljebb 10%.
- A hidrogénezett fermentált cukorból származó szintetikus izoparaffin (*HFS-SIP*) különböző cukrok tiszta paraffin molekulákká alakításával állítható elő fermentációs eljárással. Keverési határa legfeljebb 10%.
- Az alkoholból előállított szintetikus paraffin kerozin (*ATJ-SPK*) jelenleg még csak az izobutanol és az etanol felhasználásával hozható létre. Keverési határa legfeljebb 50%.
- Katalitikus hidrotermolízissel előállított szintetikus kerozin (*CH-SK* vagy *CHJ*). Zsírsavak és észterek hidrotermikus átalakításával előállított, hidrogénnel kezelt szintetikus kerozin. Keverési határa legfeljebb 50% [17].



7. ábra
SAF-technológiák tanúsításának idővonalja [18]

5. Elért eredmények az alkalmazás területén

A már említett nemzetközi egyezmények által meghatározott szabályozási keretrendszernek való megfelelés érdekében több nagy légitársaság és repülőgépgyártó cég is törekszik az alternatív üzemanyagok minél nagyobb arányú integrálására és ezáltal az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére. Ezt úgy érik el, hogy olyan üzemanyag-előállító vállalatokkal (Velocys, Shell, Fulcrum BioEnergy) kötnek együttműködési szerződéseket és folytatnak közösen kísérleteket, amelyek az alternatív tüzelőanyagok kutatásában és fejlesztésében élen járnak. Ezeknek a kooperációknak az eredményeként számtalan kísérlet történt olyan üzemanyagok felhasználhatóságának tökéletesítésére, amelyek a későbbiekben potenciálisan

helyettesíthetik a Jet A és Jet A-1 típusú üzemanyagokat. Ezek közül néhány kiemelkedő eredményt említünk, a teljesség igénye nélkül.

2008 februárjában egy Airbus A340-es háromórás tesztrepülés során olyan tüzelőanyagot használt, amely 50%-ban tartalmazott GTL-t [19].

Azonban nemcsak a civil, hanem a katonai célú légi járművek üzemeltetésénél is egyre nagyobb szerepet töltenek be a szintetikus és a bioüzemanyagok egyaránt. 2007-ben az Amerikai Légierő B-52-es repülőgépével végzett tesztrepülést, amelynek során az eszköz kerozin és GTL 1:1 arányú keverékével üzemelt. Nagy előrelépést jelentett 2017-ben a GKN RM12 hajtóművel felszerelt JAS-39 Gripen vadászgép (8. ábra), amely 50%-os bioüzemanyag-keverékkel hajtott végre demonstrációs repülést. Ezáltal a GKN Aerospace a Saabbal és a Swedish Defense Material Administration-nel való együttműködése által a fenntartható katonai repülés úttörőjévé vált [20].



8. ábra
Bioüzemanyaggal hajtott JAS-39 Gripen [20]

A KLM Holland Királyi Légitársaság első fenntartható, szintetikus alapú kerozin felhasználásával üzemeltetett Boeing-737 típusú utasszállító járata 2021. január 22-én repült Amszterdamból Madridba. A gép üzemanyagtartályaiban 500 l volt a fenntartható hajtóanyagból [21].

A 2021 márciusával kezdődő projekt keretében egy éven belül három különböző típusú Airbus emelkedett a levegőbe HEFA-SPK típusú üzemanyag-keverék felhasználásával. Először egy Airbus A350 volt 2021 márciusában, majd egy A319neo, végül 2022 márciusában egy A380 [22]. Az Airbus a kereskedelmi repülőgépek mellett a Safran Makila 2 típusú hajtóműveket használó H225-ös helikopterekben is vizsgálta a hígítás nélküli SAF tüzelőanyag-rendszerre gyakorolt hatásait. A kísérletekben részt vevő légi járművek a 9. ábrán láthatók [23], [24].



9. ábra

SAF-el hajtott Airbus A350 (a), A319neo (b) [25], A380 (c) [22] utasszállító repülőgépek és H225 helikopter (d) [23]

2023. január 30-án az Emirates végrehajtotta mérföldkőnek számító bemutató repülését, amelynek során egy Boeing 777-300ER egyik GE90 típusú hajtóműve 100%-os SAF felhasználásával működött, míg a másik hagyományos kerozint használt. Ez lehetővé tette az üzemanyagok teljesítményének összehasonlítását [26].

6. Felmerülő problémák és lehetőségek

A Jet A és Jet A-1 üzemanyagok számos szénhidrogén egyedi keverékei, amelyeket csupán egyetlen kémiai képlettel nem lehet leírni. A gázturbinás hajtóműveket úgy tervezték, hogy a Jet A és Jet A-1 tulajdonságai kihasználásával működjenek a repülésbiztonság lehető legmagasabb szinten tartása mellett, a lehető legjobb teljesítménnyel. Mivel a jelenleg gyártás alatt lévő, illetve a közelmúltban készült repülőeszközök még évtizedekig üzemelni fognak, ezért egyelőre az alternatív tüzelőanyagokat kell ezek kiszolgálásához igazítani, tehát olyan hajtóanyagok létrehozására kell törekedni, amelyek önmagukban vagy keverve képesek kiváltani a kerozint. Az elégetésen kívül a tüzelőanyag a légi járművek bizonyos rendszereiben hőcserélő közegként funkcionál, illetve a munkafolyadék szerepét is ez tölti be. Bár az égés során a hajtóművekben lejátszódó folyamatokat évtizedek óta tanulmányozzák, továbbra is maradtak ismeretlen elemek. Például a nagy magasságon történő újragyújtás kritikus tényezői nem jellemezhetők jól: a porlasztás, az üzemanyag felületi feszültségének, viszkozitásának, sűrűségének, valamint a levegő hőmérsékletének és nyomásának kölcsönhatása; az üzemanyag nyomása és a molekulák összetétele is fontos szerepet játszik a teljes folyamat megértésében.

Sajnos a jelenleg alkalmazott repülőeszközök 100%-ban alternatív fenntartható tüzelőanyaggal való üzemeltetése még nem megoldott feladat. Ennek oka, többek között,

magas paraffintartalmuk, ezáltal magas dermedéspontjuk, illetve az aromás vegyületek hiánya miatt a repülőeszközök nitril tömitéseire gyakorolt károsító hatásai.

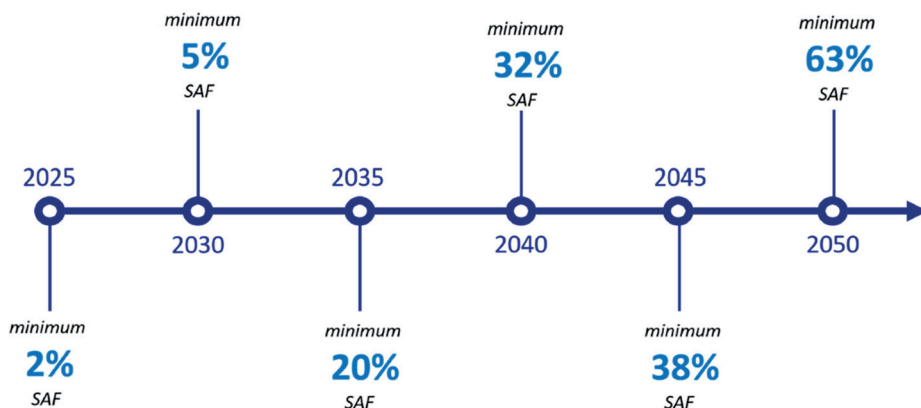
A kerozinnal való keverés nélkül, önmagában alkalmazható szintetikus gázturbinás hajtómű üzemanyagának létrehozására több megközelítés létezik:

- *A hagyományos tüzelőanyagok tulajdonságainak létrehozása egyetlen szintetikus üzemanyagban:* Ez a megoldás a fent említett okokból még nem alkalmazható.
- *A Jet A és A-1 tulajdonságainak létrehozása kevert szintetikus üzemanyagban:* Ez egy aromás és egy nem aromás szénhidrogéneket tartalmazó vegyület kombinálásával lenne kivitelezhető, akár több komponens felhasználása mellett.
- *Az aromás vegyületek helyettesítése vagy a rájuk vonatkozó követelmények csökkentése:* Amennyiben a tüzelőanyagban az aromásszénhidrogén-tartalom túl alacsony, az üzemanyagrendszer tömitései összezsugorodnak, és szivárgás alakul ki. Más vegyületek, például a cikloparaffinok is az aromás vegyületekhez hasonló hatást gyakorolnak a tömitésekre, így ez a lehetőség jelenleg értékelés alatt áll. A későbbiekben bizonyos kutatások azonosíthatnak más helyettesítő molekulákat.
- *Az aromás vegyületeket igénylő anyagok helyettesítése:* Ma már több modern hajtómű esetében megtörtént a nitril tömitések jobb minőségű, ilyen összetevőt nem igénylő, fluorocarbon és fluorszilikon tömitésekre való cseréje. Ennélfogva egy aromás vegyületek nélküli üzemanyag, amely megfelel a Jet A és Jet A-1 összes többi specifikációjának, megfontolandó alternatíva lehet a kompatibilis repülőeszközökben való alkalmazásra. Ez azonban nem lenne „drop-in” a régebbi típusú repülőeszközök esetében, és más jellegű megbízhatósági és repülésbiztonsági aggályokkal kellene szembenézni.
- *A tüzelőanyagokkal szemben támasztott követelmények újradefiniálása:* Lehetséges, hogy a Jet A/A-1 jelenlegi specifikációinak nem mindegyike szükséges a hajtómű és a repülőgép biztonságos működéséhez. Az egyre gyorsuló tempójú kutatás-fejlesztés miatt az új típusú tüzelőanyagok kifejlesztésének üteme és sokrétűsége indokoltta teheti az ASTM minősítési folyamatának és a követelményeknek a frekvenciátalibb felülvizsgálatát, ami hosszabb távon lehetővé tenné a repülőgép-tüzelőanyagok specifikációinak az előzőekben bemutatott lehetőségekhez szükséges módosítását [27].

Azonban nem szabad elfelejteni, hogy a szintetikus tüzelőanyagokra alkalmazott fenntarthatósági követelmények nem egyeznek meg teljesen azokkal a műszaki, biztonsági és teljesítményjellemzőkkel, amelyek az ASTM szabványok alapján a repülőeszközökben felhasználható tüzelőanyagokat minősítik. Tehát abból, hogy az üzemanyag 100%-ban szintetikus még nem következik, hogy 100%-ban fenntartható is. Bár a CORSIA meghatározása világszerte irányadónak tekinthető, egyes nemzetek vagy légitársaságok elkötelezhetik magukat a magasabb fenntarthatósági követelmények mellett.

Mivel a CORSIA szakpolitikai intézkedései nem biztos, hogy elegendők ahhoz, hogy a légitársaságokat SAF-ek alkalmazására ösztönözzék, így az Európai Bizottság közzétette az „Irány az 55%” intézkedéscsomagot, amely az uniós jogszabályok felülvizsgálatát és aktualizálását, valamint új kezdeményezések bevezetését célzó javaslatokat tartalmaz, és az uniós szakpolitikák összhangját hivatott biztosítani az Európai Tanács és az Európai Parlament által elfogadott éghajlat-politikai célokkal. Az intézkedéscsomag célja, hogy 2030-ra 55%-kal

csökkenjen az EU szén-dioxid-kibocsátása. Ez az első alkalom, hogy az EU kötelezővé teszi a SAF-ek alkalmazását az európai repülőtereken. Az üzemanyag-ellátók kötelesek lesznek gondoskodni arról, hogy az üzemeltetőknek szállított összes repülőgép-üzemanyag egy bizonyos százaléka SAF legyen. Az intézkedéscsomag szerint a megbízások 2025-ben 2%-os minimális mennyiséggel kezdődnek, majd ötéves időközönként növekednek, hogy végül 2050-re elérjék a 63%-os mennyiséget [18] (10. ábra).

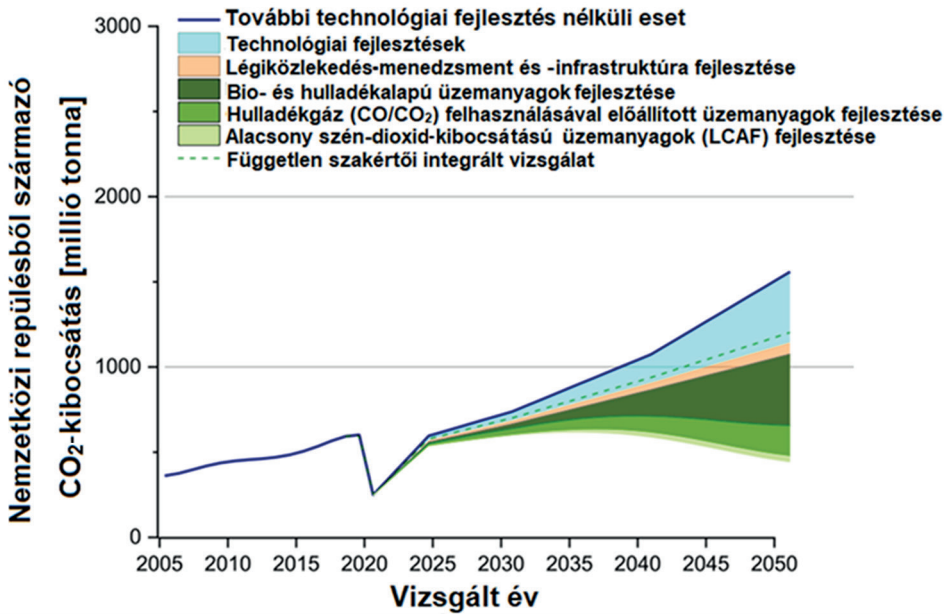


10. ábra

A SAF bevezetésének javasolt ütemezése a ReFuelEU Aviation rendelettervezet alapján [18]

Ezeket a törekvéseket is számításba véve az ICAO 2022-ben kiadott jelentésében több hosszú távú forgatókönyv megvalósíthatóságát tárgyalja a szén-dioxid-kibocsátás jelentős csökkentésének lehetőségeire, ideértve az ágazaton belüli intézkedéseket, innovatív technológiákat és új típusú üzemanyagokat. Ebben a jelentésben közzétett predikcióban látható a nemzetközi légi közlekedésből származó károsanyag-kibocsátás mértékének lehetséges változása egészen 2050-ig (11. ábra). Itt láthatók azoknak az elemzéseknek az eredményei, amelyek a jövőbeni bio- és hulladék alapú fenntartható repülőgép-üzemanyagok termelési potenciáljáról és előállításukhoz kapcsolódó hatásokról, valamint a fosszilis alapú, illetve alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátású repülőgép-üzemanyagokról adnak becsléseket.

Jelentős technológiai előrelépés nélkül a nemzetközi légi közlekedés szén-dioxid-kibocsátása 2050-ig várhatóan a jelenlegi szint többszörösére fog nőni. 2018-ban a nemzetközi légi közlekedés körülbelül 188 millió t üzemanyagot fogyasztott, ami 593 millió t szén-dioxid-kibocsátást eredményezett. 2050-re az üzemanyag-fogyasztás az előrejelzések szerint a 2018-as érték 1,9-2,6-szeresére nő. A legoptimistább üzemanyag-technológiai fejlesztéseket feltételezve a nemzetközi üzemanyag-hatékonyság várhatóan átlagosan évi 1,53%-kal javul. Ez azt jelzi, hogy az ICAO évi 2%-os tüzelőanyag-hatékonyság-javítási célkitűzése 2050-re valószínűleg nem teljesül. A repülőipar hosszabb távon, a légiközlekedés-menedzsment, a légijármű-technológia és az alternatív tüzelőanyagok fejlesztésével együttesen lehet képes megfékezni a légi közlekedésből származó nettó szén-dioxid-kibocsátás növekedését, ez azonban valószínűleg jelentős beruházásokat tesz szükségessé. Ezen túlmenően továbbra is magasak a jövőbeni légi közlekedés fenntarthatósági kérdéseivel kapcsolatos bizonytalanságok [28].



11. ábra

A nemzetközi légi közlekedés nettó CO₂-kibocsátása 2005–2050 között (3,16 kg CO₂/1 kg üzemanyag-elégetést alapul véve) [28]

7. Összefoglalás

Az elmúlt évtizedekben megindult több iparág dekarbonizálásának folyamata, így a repülőiparban is számos kutatás folyik a karbonsemlegességre való átmenet felgyorsítása érdekében. Ebben az átalakulásban kulcsfontosságú szerepet játszanak azok a fenntartható üzemanyagok, amelyek „drop-in” jellegük miatt előnyt élveznek más alternatívákkal szemben, hiszen kompatibilitásuk a jelenlegi repülőeszközökkel és infrastruktúrával lehetővé teszi az azonnali felhasználást. Bár a kőolaj alapú hagyományos üzemanyag-előállítás még mindig világszerte domináns technológia, de a kőolajforrások kimerülése és ehhez kapcsolódóan az üzemanyagárak ingadozása erős ösztönzést nyújtott a légitársaságok számára, hogy fontolóra vegyék az alternatív üzemanyagforrások alkalmazását. Ezek közül a legnagyobb potenciált a Fischer–Tropsch-eljárással, földgázból, szénből és biomasszából előállított tüzelőanyagok hordozzák magukban. Emellett több nemzetközileg elfogadott eljárással lehetséges kiváló minőségű szintetikus paraffin kerozin (SPK) előállítása megújuló alapanyagokból, mint például növényi olajok, állati zsírok, algák és hulladékok. Azonban a nemzetközi szabványokban meghatározott kritériumok miatt ezek egyelőre csak hagyományos tüzelőanyaggal való keverés mellett alkalmazhatók. Ennélfogva további lépések nélkül ez csupán átmeneti megoldás. A fenntartható légi közlekedés hosszú távú fejlődésének biztosítása érdekében a repülőiparnak törekednie kell a 100%-ban SAF alternatív tüzelőanyagok felhasználására és az ehhez szükséges technológiai

feltételek megteremtésére. A jelenlegi technológiai akadályok átlépésével és több alternatív meghajtási mód párhuzamos alkalmazásával hosszú távon lehetővé válhat a fosszilis függőség megszüntetése. Azonban ahhoz, hogy ez valósággá válhasson, elengedhetetlen a légi közlekedési ágazatban részt vevők és a politikai döntéshozók együttműködése.

Felhasznált irodalom

- [1] Óvári Gy., *Alternatív energiák a repülésben. Karbonsemleges vagy karbonmentes repülőtér?* GINOP AF KKT Referátum, Szolnok, Nemzeti Közzolgálati Egyetem, 2019.
- [2] Óvári Gy., Fehér K., „Repülőgépek elektromos meghajtása – szükségyszerűség kompromisszumokkal II. rész,” *Haditechnika*, 55. évf. 1. sz. pp. 15–19. 2021. Online: <https://doi.org/10.23713/HT.55.1.03>
- [3] Óvári Gy., Szegedi P., „Alternatív üzemanyagok alkalmazásának lehetőségei a repülésben,” *Repüléstudományi Közlemények*, 22. évf. 2. sz. pp. 29. 2010.
- [4] M. Crippa et al., *CO2 Emissions of All World Countries –2022 Report*. Luxembourg, Publications Office of the European Union, 2022.
- [5] A. N. Stranges, „The US Bureau of Mines's Synthetic Fuel Programme, 1920–1950s: German Connections and American Advances,” *Annals of Science*, 54. évf. 1. sz. pp. 29–68. 1997. Online: <https://doi.org/10.1080/00033799700200111>
- [6] P. Hilsenrath, „The Development of Synthetic Fuels in South Africa,” *Journal of Energy and Development*, 14. évf. 2. sz. pp. 269–284. 1989.
- [7] J. Ross, „Visualizing Historical Oil Prices (1968–2022)”. *Advisor Channel*, 2022. május. 4. Online: <https://advisor.visualcapitalist.com/historical-oil-prices>
- [8] S. Boichenko, O. Vovk, A. Yakovleva, „Overview of Innovative Technologies for Aviation Fuels Production,” *Chemistry and Chemical Technology*, 7. évf. 3. sz. pp. 305–312. 2013. Online: <https://doi.org/10.23939/chcht07.03.305>
- [9] Gál T., Ábrahám J., Némethné Dr. Sóvágó J., *Petrolkémiai technológiák*. Budapest, Miskolci Egyetem, 2011.
- [10] G. Liu, B. Yan, G. Chen, „Technical Review on Jet Fuel Production,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25. évf. pp. 59–70. 2013. Online: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.025>
- [11] O. L. Eliseev, „Gas-to-Liquid Technologies,” *Russian Journal of General Chemistry*, 79. évf. 11. sz. pp. 2509–2519. 2009. Online: <https://doi.org/10.1134/S1070363209110395>
- [12] Fehér K., Óvári G., „A mikroalgák felhasználási lehetőségei a biodízel üzemanyagok előállításában,” *Repüléstudományi Közlemények*, 29. évf. 2. sz. pp. 119–136. 2017.
- [13] E. P. Fedorov et al., „Standards Requirements for Domestic and Foreign Jet Fuels for Civil Aviation,” *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*, 40. évf. 4. sz. pp. 211–214. 2004. Online: <https://doi.org/10.1023/B:CAFO.0000041216.52513.ab>
- [14] M. Braun-Unkhoff et al., „About the Interaction between Composition and Performance of Alternative Jet Fuels,” *CEAS Aeronautical Journal*, 7. évf. 1. sz. pp. 83–94. 2016. Online: <https://doi.org/10.1007/s13272-015-0178-8>
- [15] C. Eulalia, S. Jaan, *Sustainable Aviation Fuels*. Belgium, European Parliamentary Research Service, 2020. Online: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659361/EPRS_BRI\(2020\)659361_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2020/659361/EPRS_BRI(2020)659361_EN.pdf)

- [16] M. Prussi et al., „CORSA: The First Internationally Adopted Approach to Calculate Life-cycle GHG Emissions for Aviation Fuels,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150. évf. p. 111398. 2021. Online: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111398>
- [17] J. Pechstein, A. Zschocke, „Blending of Synthetic Kerosene and Conventional Kerosene,” *BioKerosene: Status and Prospects*, pp. 665–686. 2018. Online: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53065-8_25
- [18] N. Detsios et al., „Recent Advances on Alternative Aviation Fuels/Pathways: A Critical Review,” *Energies*, 16. évf. 4. sz. p. 1904. 2023. Online: <https://doi.org/10.3390/en16041904>
- [19] Fehér K., „Alternatív tüzelőanyagok alkalmazása a repülésben,” *Műszaki Katonai Közlöny*, 28. évf. 2. sz. pp. 43–56. 2018.
- [20] GKN Aerospace, *GKN Aerospace continues jet engine biofuel testing*. 2020. június 26. Online: <https://www.gknaerospace.com/en/newsroom/news-releases/2020/gkn-aerospace-continues-jet-engine-biofuel-testing>
- [21] KLM, *World first in the Netherlands by KLM, Shell and Dutch ministry for Infrastructure and Water Management: first passenger flight performed with sustainable synthetic kerosene*. 2021. február 8. Online: <https://news.klm.com/world-first-in-the-netherlands-by-klm-shell-and-dutch-ministry-for-infrastructure-and-water-management-first-passenger-flight-performed-with-sustainable-synthetic-kerosene>
- [22] Airbus, *First A380 powered by 100% Sustainable Aviation Fuel takes to the skies*. 2022. március 28. Online: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2022-03-first-a380-powered-by-100-sustainable-aviation-fuel-takes-to-the>
- [23] Airbus, *First Airbus helicopter flight with 100% sustainable aviation fuel*. 2021. november 9. Online: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-11-first-airbus-helicopter-flight-with-100-sustainable-aviation-fuel>
- [24] ECLIF3 Study Resumes with 100% SAF Powering Both Engines of A350. *Travel News Asia*, 2021. november 3. Online: <https://www.travelnewsasia.com/newspics/2021/AirbusA350flightlab.jpg>
- [25] Kárpáti D., „Hígitás nélküli alternatív üzemanyaggal repült egy A319-es,” *AirPortal*, 2021. október 31. Online: <https://airportal.hu/higitas-nelkuli-alternativ-uzemanyaggal-repult-egy-a319-es/>
- [26] Emirates, *Emirates Successfully Tests Flying Boeing 777 Plane on Sustainable Jet Fuel*. 2023. január 31. Online: <https://www.emirates.com/media-centre/emirates-operates-milestone-demonstration-flight-powered-with-100-sustainable-aviation-fuel>
- [27] S. Kramer et al., „Perspectives on Fully Synthesized Sustainable Aviation Fuels: Direction and Opportunities,” *Frontiers in Energy Research*, 9. évf. p. 782823. 2022. Online: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.782823>
- [28] G. G. Fleming, I. de Lépinay, R. Schaufele, „Environmental Trends in Aviation to 2050,” in *Innovation for Green Transition ICAO Environmental Report*, pp. 24–31. 2022.

The Issues of Synthetic Fuel Use in Aviation

In recent years, an extraordinary amount of greenhouse gases have entered the atmosphere, a non-negligible part of it is related to aviation. Different types of synthetic fuels seem to be one of the most promising alternatives to replace the currently used crude oil, which has been produced since the 1930s. Due to their „drop-in” nature, their main properties are the same as conventional jet fuels, so they are compatible with most types of aircraft. However, the production of synthetic fuels in many cases involves a difficult or much more expensive process than in the case of traditional kerosene. Many plans have already been created to solve these problems. The implementation and the development of new procedures are currently underway, taking into account the goal of achieving carbon-neutral and then carbon-free military and civil aviation by the deadlines of 2030 and 2050. In this article, synthetic alternative fuels are presented, which could potentially be suitable for replacing kerosene. My aim is to present the most important results achieved so far and to predict the possible future of the use of synthetic fuels.

Keywords: SAF, synthetic fuel, Fischer-Tropsch process, emission of harmful gases, drop-in fuels

Csató Péter
doktori hallgató
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Műszaki Doktori Iskola

csato.peter@tud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

Péter Csató, MSc
PhD student
University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer
Training
Doctoral School of Military Engineering
csato.peter@tud.uni-nke.hu
orcid.org/0000-0002-9515-5376

A TKP2021-NVA-16 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

