



Hancsók Jenő – Hóke 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

Második rész. A korszerű, cseppfolyós szénhidrogén-alapú sugárhajtómű-üzemanyagok főbb előállítási lehetőségei

1. Fosszilis energiaforrások

Szeptemberben indított sorozatunk második részében a repülőgép-turbinák számításba vehető hajtóanyagai közül a *cseppfolyós halmazállapotúakat*, ezeken belül is a szénhidrogének tartalmazóak előállítási lehetőségeit tárgyaljuk. Ebben a lapszám-ban a fosszilis, a következőben a megújuló forrásokat vesszük számba.

A cseppfolyós sugárhajtómű-üzemanyagok főbb előnyei a következők:

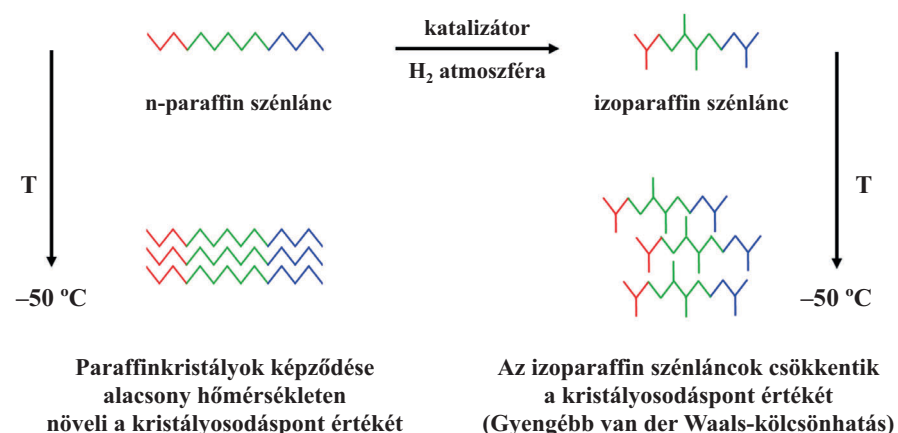
- nagy energiasűrűség és fajlagos energiatartalom;
- átfogó biztonságtechnikai rendszer megléte a légiközlekedés/szállítás teljes értékláncára (valamennyi elemére);
- a teljes logisztikai rendszer [tárolás, szállítás (csővezeték-hálózat, tartálykocsik, uszályok), biztonságtechnika megléte, tapasztalt személyzet...] rendelkezésre állása;
- az ilyen hajtóanyagok hozzáférhetősége a szükséges mennyiségben és az elvárt minőségben az egész világon *szervezett módon* (alapvetően fosszilis nyersanyagokból);
- bevált tárolás a jelenlegi repülőgépeken;
- repüléstechnikai előnyök (például a hajtóanyag folyamatos felhasználása miatt állandóan csökken a repülőgép össztömege; ez nagyobb távolságok megtételekor akár 100–150 tonna is lehet; a hajtóanyag összeférhetősége az alkalmazott szerkezeti anyagokkal, beleértve a tömítéseket is; a repülőgépek jelenlegi üzemanyag-ellátó rendszereinek alkalmazhatósága...) stb.

Az előző cikkben már bemutattuk az egyes szénhidrogéncsoportok (izo-, normál-, cikloparaffinok és aromások) alapvető előnyeit és hátrányait sugárhajtómű-

Szénatom-szám	Vegyület	Forráspont, °C	Energiatartalom		Fagyáspont, °C
			MJ/dm ³ (energia sűrűség)	MJ/kg (fajlagos energia)	
C ₁₂	n-hexil-benzol	258	32,8	39,5	–42
	n-hexil ciklohexán	254	36,5	45,0	–52
	n-dodekán	264	33,2	44,1	–10
	4-metil-undekán	205	33,2	44,1	–68
C ₁₃	n-heptil-benzol	262	33,4	39,7	–40
	n-heptil-ciklohexán	260	36,6	44,9	–47
	n-tridekán	268	33,6	44,1	–6
	3-metil-dodekán	213	33,5	44,1	–60
C ₁₄	n-oktil-benzol	284	33,9	39,8	–39
	n-oktil-ciklohexán	280	35,5	43,5	–20
	n-tetradekán	279	33,8	44,1	6
	5-metil-tetradekán	222	33,8	44,1	–51

A táblázat saját módosítás [1] alapján.

1. táblázat. Sugárhajtómű-üzemanyagok néhány komponensének főbb jellemzői



1. ábra. Normál- és izoparaffin-molekulák elrendeződése alacsony hőmérsékleten (példa)

üzemanyagként való felhasználáskor. Fizikai és kémiai, valamint alkalmazási tulajdonságaik összehasonlítása alapján megállapítottuk, hogy az elvárt forráspont-tar-

tományba eső (megfelelő szénatomszámú) izoparaffinok a legjobb minőségű keverőkomponensek (összetevők). Ezek valamivel kisebb energiasűrűségének kompenzá-



lására a kőolaj-eredetű üzemanyag kellő részarányban alkil-cikloparaffinokat is tartalmaz. Az aromás szénhidrogének tulajdonképpen csak a tömítések duzzadását segítik elő, és némileg hozzájárulnak a kenőképeség biztosításához is.

Ki kell emelni a közel azonos energiasűrűségű és fajlagos energiájú normál- és izoparaffinok alacsony hőmérsékletű folyási tulajdonságainak (pl.: kristályosodási pont) jelentős mértékű különbségeit is (**1. táblázat**) [1]. Ezeket az egyes molekulaszervezetek (egyenes, illetve elágazó láncú szénhidrogének) közötti eltérő nagyságú van der Waals-erők okozzák. Az izoparaffin szénláncok között gyengébb a van der Waals-kölcsönhatás, ezért az egyedi molekulák könnyebben elmozdulhatnak, és így nem képeznek nagyobb méretű paraffinkristályokat (**1. ábra**).

Cseppfolyós repülőgépturbina-üzemanyagok előállítása

A cseppfolyós sugárhajtómű-üzemanyagokat különböző eredetű és eltérő összetételű, a repülőgép-turbinák működési feltételei között energiájuk átadására alkalmas, nagy energiasűrűségű és nagy fajlagos energiájú *szénhidrogén-keverőkomponens* áramok megfelelő arányú elegyítésével és az így nyert szénhidrogénelegyebe nagy hatékonyságú adalékanyagok (lásd előző cikk is) bekeverésével állítják elő. Ez utóbbi célja az elvárt minőség végső beállítása, illetve finomhangolása.

A szénhidrogén-alapú sugárhajtómű-üzemanyagok (JET-ek) elterjedésének és máig gyakorlatilag kizárólagos alkalmazásának okait már ismertettük. Ezeket több mint fél évszázadon át, 1999-ig kizárólag a különböző eredetű és így eltérő összetételű kőolajokból állították elő, és még napjainkban is 99,5%-nál nagyobb részarányban ez a fosszilis energiahordozó a nyersanyagforrás. Mivel alkalmazásuk hosszú éveken keresztül bevált, ezért a sugárhajtómű-üzemanyagok jellemző forrásponttartományát és szénhidrogén-összetételét egy átlagos kőolaj összetételéből kiindulva becsülték, illetve határozták meg. A petróleum(kerozin)-frakció szénhidrogéncsoportmegoszlása alapján megállapították, hogy a normál- és izoparaffinokat, egy- és kétgyűrűs cikloparaffinokat, valamint aromás szénhidrogéneket tartalmaz.

Természetesen különböző okokból (pl. kőolajembargó, kőolajtól való függőség csökkentése, környezetvédelem) már régóta végeznek kutató-fejlesztő tevékenységet alternatív eredetű sugárhajtómű-üzem-

anyagok felismerésére, előállítására és alkalmazásba vételére. Egyedi vegyületek sokaságát és azok nagyszámú elegyeit is kipróbálták a légiközlekedés-/szállítás különleges és nagy igénybevételű, szigorú feltételei között. Mégis máig a sugárhajtóművek első számú közvetlen energiaforrásai továbbra is a számos szempont szerint rendszerszemléletben kiválasztott cseppfolyós állapotú szénhidrogének elegyei. Ezek alapján érthető és egyértelmű, hogy az alternatív (nem kőolaj-) eredetű sugárhajtómű-üzemanyagok kutató-fejlesztő tevékenységének fő céljai a következők voltak:

- új alapanyagok forrásainak feltárása;
- ezek megfelelő átalakítási lehetőségeinek felismerése; továbbá
- olyan anyag- és energiatakarékos, környezetbarát, gazdaságos eljárások kidolgozása, amelyek szénhidrogéntermékei kiváló minőségű sugárhajtómű-üzemanyagok, illetőleg annak keverőkomponensei.

Az említett fő célok jelenleg sem változtak.

Szintetikus JET-keverőkomponenseket (SBC; Synthetic Blend Component) először 1999-ben Dél-Afrikában használtak fel, amelyeket szénalapú szintézisgázból kiinduló Fischer-Tropsch-szintézissel (CtL; cseppfolyós termékek szénből) állítottak elő. Tíz évvel később (2009-ben) már a földgázból vagy biomaszból előállított szintézisgáz-alapanyagú Fischer-Tropsch-szintézis (GtL, illetve BtL; cseppfolyós termékek földgázból, illetőleg biomaszból) egyik célterméke a szintetikus sugárhajtómű-üzemanyag volt. Időközben természetesen kidolgoztak más alapanyagokból, például természetes/hulladék zsírsavak-

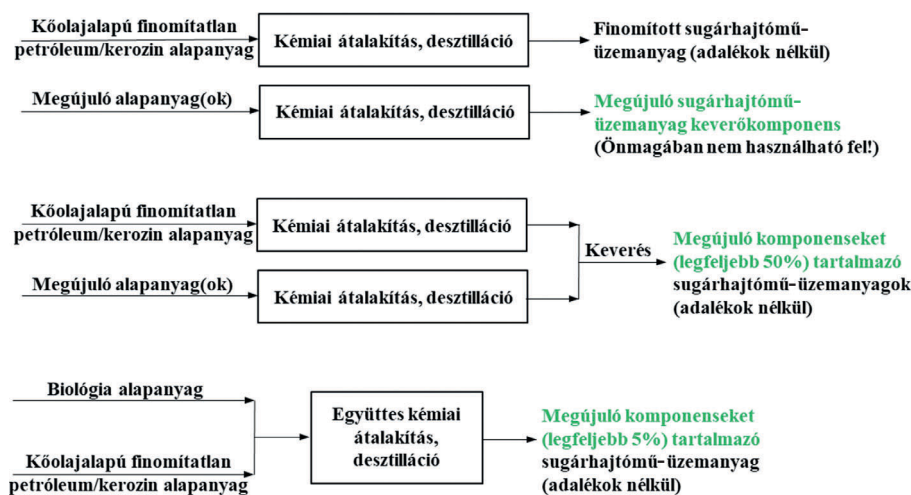
ból/zsírsavszármazékokból kiinduló különböző kémiai reakcióutakat alkalmazó speciális eljárásokat (pl. hidrogénezés és szelektív izomerizáció/hidrokrakkolás vagy katalitikus hidrotermolízis) is ugyancsak JET-forrásponttartományú szintetikus szénhidrogén-komponensek előállítására.

Az előzőeknek megfelelően a sugárhajtómű-üzemanyagok gyártásakor mind a kőolajból, mind pedig az alternatív forrásokból származó alapanyagokból az említett, legjobb tulajdonságú szénhidrogén-(vegyület-) csoportok (elsősorban az izoparaffinok) nagy részarányára törekednek. Természetesen a különböző (pl. polgári vagy hadászati) célú repülési felhasználás igényeinek kielégítésére a forrásponttartomány az elvárásoknak megfelelően változhat, olykor akár 100 °C alatti értékektől egészen 300 °C-ig.

A megfelelő összetételű hulladék- és megújuló alapanyagforrások korlátozott rendelkezésre állása és gazdaságossági okok miatt a szintetikus (pl.: megújuló) szénhidrogén-komponenseket tartalmazó JET-ek előállítására kidolgoztak olyan eljárásokat is, amelyekben ezt a terméket kőolaj-, illetve alternatív/megújuló eredetű kiindulási anyagok célirányos arányú összekeverésével kapott alapanyagelegyek *együttes katalitikus átalakításával* állítják elő. (Ezt „co-processing”-nek nevezik.)

Az előzőeket összefoglalva a cseppfolyós, szénhidrogén-alapú sugárhajtómű-üzemanyagokat vagy fosszilis (elsősorban kőolaj), vagy alternatív/megújuló nyersanyag(ok)ból, vagy az előző két forrásból származó anyagok elegyeiből lehet előállítani (**2. ábra**).

2. ábra. Csak fosszilis vagy csak megújuló eredetű vagy legfeljebb 5–50% részarányban megújuló komponenseket is tartalmazó sugárhajtómű-üzemanyagok előállítási lehetőségeinek példái



Biológia alapanyag: pl. természetes/hulladék zsírsavak/zsírsav-észterek, zsírsav-gliceridek vagy biomasza alapú szintézisgázt felhasználó Fischer-Tropsch szintézis elsődleges kerozin (petróleum) frakciója



A nem kőolaj-eredetű megújuló (bio-) szénhidrogénelegyeket *önmagukban* jelenleg nem szabad sugárhajtómű-üzemanyagként felhasználni, csak keverőkomponensként, 5–50% részarányban (ASTM D7566-23b). A következőkben nagyon röviden ezeket az előállítási lehetőségeket foglaljuk össze. Ezek mindegyikét nagyszámú közleményben tárgyalják, tehát egyenként is egy-egy teljes cikk témáját képezhetik.

Sugárhajtómű-üzemanyagok előállítása fosszilis energiaforrásokból

A légiközlekedésben/-szállításban alkalmazott sugárhajtómű-üzemanyagokat – mint már említettük – felhasználásuk kezdete óta gyakorlatilag kőolajalapon állítják elő. A nem kőolaj-eredetű, alternatív JET-eket először szintén fosszilis eredetű energiahordozókból, kezdetben szénalapon, majd földgázból nyert szintézisgázból gyártották a Fischer–Tropsch-szintézis széles körű kutató-fejlesztő tevékenységének egyik fő eredményeként. A megújuló alapanyagokból történő előállítás és kísérleti felhasználás 2009-ben kezdődött. Megjegyezzük, hogy ezen hajtóanyagok közül jelenleg elsősorban a természetes/hulladék-eredetű zsírsavakból/zsírsavszármazékokból speciális hidrogénezéssel előállított, döntő részarányban izo- és normálpáráffinok elegyeit tartalmazó termékek felelnek meg leginkább a nagyszámú követelménynek, beleértve a gazdaságosságot is.

Sugárhajtómű-üzemanyagok előállítása kőolajból

A sugárhajtómű-üzemanyagokat alapvetően két fő módon állítják elő a kőolajból: atmoszférikus desztillációval nyert petróleum(kerozin-) frakció katalitikus hidrogénezésével (heteroatom-eltávolítással), valamint a nehéz kőolajpárlatok hidrokrakolásával. Ezeknek az üzemeknek a helyét szemlélteti a **3. ábra** a kőolajfeldolgozás folyamatában. Az ábra egy korszerű kőolaj-finomító blokkvázlata [2], feltüntetünk rajta néhány megújuló forrásból származó alapanyag- és termékáramot is.

A kőolajokból *atmoszférikus desztillációval* nyert petróleumok kén-, nitrogén- és oxigéntartalmú vegyületeket is tartalmaznak. A szénhidrogéncsoportok és egyedi alkotóik, valamint a heteroatom(S, N, O)-tartalmú vegyületek mennyisége és megoszlása a finomítatlan petróleum/kerozin-frakciókban alapvetően a kőolaj eredetétől függ. Természetesen ezek minőségi tu-

lajdonságai (kémiai, fizikai és alkalmazási jellemzői) eltérőek a sugárhajtómű-üzemanyag szempontjából. Ezért az elvárt összetételű és tulajdonságú származtatott energiaforrás (JET/kerozin) előállítására szükséges a kőolaj atmoszférikus desztillációjával előállított elsődleges termék, a petróleum/kerozinfrakció minőségjavítása. Erre szolgáló eljárás a *katalitikus hidrogénező heteroatom-eltávolítás* (közismert néven *kéntelenítés*). Ennek során párhuzamos és egymást követő reakciókban végbemeget az alapanyag kén-, nitrogén- és oxigéntartalmú vegyületeiből a heteroatomok eltávolítása, továbbá a kétgyűrűs aromások részleges hidrogénezése is. A lejátszódó reakciók mértéke az alkalmazott katalitikus rendszertől [alapanyag-összetétel, reaktor és annak belső szerkezete, katalizátor(ok), műveleti paraméterek (pl. hőmérséklet, nyomás, folyadékterhelés, H₂/alapanyag arány)] függ. Jellemző műveleti paraméterek: 260–340 °C; nyomás: 25–45 bar; folyadékterhelés: 2–4 m³/m³óra; H₂/alapanyag térfogatarány: 150–300 Nm³/m³. A termék a finomított petróleum (a finomított kerozin), amit hajtóanyagként „röviden” csak kerozinnek neveznek. E termékek kén tartalma < 10–50 mg/kg, többgyűrűs aromástartalma: ≤ 2 v/v%, kristályosodási pontja: ≤ –40 °C és ≤ –47 °C, nem kormozó lángmagassága: > 25 mm.

A korszerű kőolajfinomítóknál a kiváló minőségű JET-frakció előállításának másik lehetősége a nehézpárlatok hidrokrakolása. A katalitikus átalakítást (heteroatom-eltávolítást, aromáshidrogénezést, krakolást, izomerizációt, stabilizáló hidrogénezést stb.) 380–450 °C; 120–180 bar; 1200–1600 Nm³/m³ H₂/alapanyag arány és 1,2–2,5 m³/m³h folyadékterhelés alkalmazása mellett több különböző összetételű, így eltérő fő funkciójú katalizátorrétegeket tartalmazó katalitikus rendszerben végzik. A nagy izoparaffin-tartalmú JET-frakciót a cseppfolyós termékelegyből desztillációval választják el. A kerozinfrakció mennyisége kb. 20–35% az eljárás céljától függően. Minősége megfelel az adalékolás előtti követelményeknek.

A kőolajból az előzőekben ismertetett, két különböző előállítási móddal nyert sugárhajtómű-üzemanyag termékek adott esetben egymással is keverhetők, és – adalékolás után – minden szempontból megfelelnek az érvényes szabvány(ok) által előírt minőségi követelményeknek.

A **3. ábrán** feltüntetettük a megújuló forrásból származó alapanyagok kőolajfino-

mítói felhasználásának néhány példáját is. Így az ún. „zöld hidrogén” [megújuló (nap-, szél-, vízenergia stb. felhasználásával előállított) elektromos árammal végzett víz-elektrolízis terméke] alkalmazásának lehetőségét is.

A korszerű kőolajfinomítóknál vagy azok közelében egyre inkább elterjedőben van a megújuló hidrogén előállítása víz-elektrolízisével. Magyarországon például a MOL-csoport Dunai Finomítójában néhány hónapja adtak át egy 1600 t/év kapacitású „zöld hidrogént” előállító üzemet. Ennek eredményeként évente kb. 25 000 tonnával csökken a Dunai Finomító CO₂-kibocsátása. Tehát molekulaalkotóként az ilyen hidrogént tartalmazó termékek bizonyos mértékben már megújulóak is.

A **3. ábra** szintén tartalmazza a megújuló alapanyagok és a különböző finomítatlan kőolajfrakciók(-párlatok) együttes átalakításának néhány lehetőségét is – például finomítatlan petróleum- vagy gázolajfrakcióból és megújuló alapanyag-összetevőkből kiindulva (beleértve a hulladék-eredetűeket is).

Nagy jelentősége miatt ezen a helyen is kiemeljük a MOL Nyrt. Dunai finomítójában üzemelő technológiai sort, ami finomítatlan gázolaj és természetes/hulladék zsírsavak/zsírsav-észterek alapanyagelegyeiből nagy hidrogéntartalmú, bioparaffint is tartalmazó dízelgázolajok előállítására is alkalmas. Ehhez a dízelgázolaj-keverőben még biodízelt (zsírsav-metil-észterek elegyét) és adalékokat kevernek. A végtermék dízelgázolaj minősége kielégíti a korszerű szabványok (pl. MSZ EN 590:2022 és az ASTM D 975-23) előírásait is. Ezzel a MOL Nyrt. és a Pannon Egyetem által kifejlesztett változattal előállított dízelgázolajat a MOL 2022 óta forgalmazza töltőállomásain.

(www.youtube.com/watch?v=8RGRbe3xhZM)

A **3. ábrán** ezenkívül feltüntetettük a különböző megújuló alapanyagokat átalakító eljárások értékes kísérőtermékeinek minőségjavítási lehetőségeit is (pl. megújuló C5–C6 frakció izomerizáló minőségjavítása) [3].

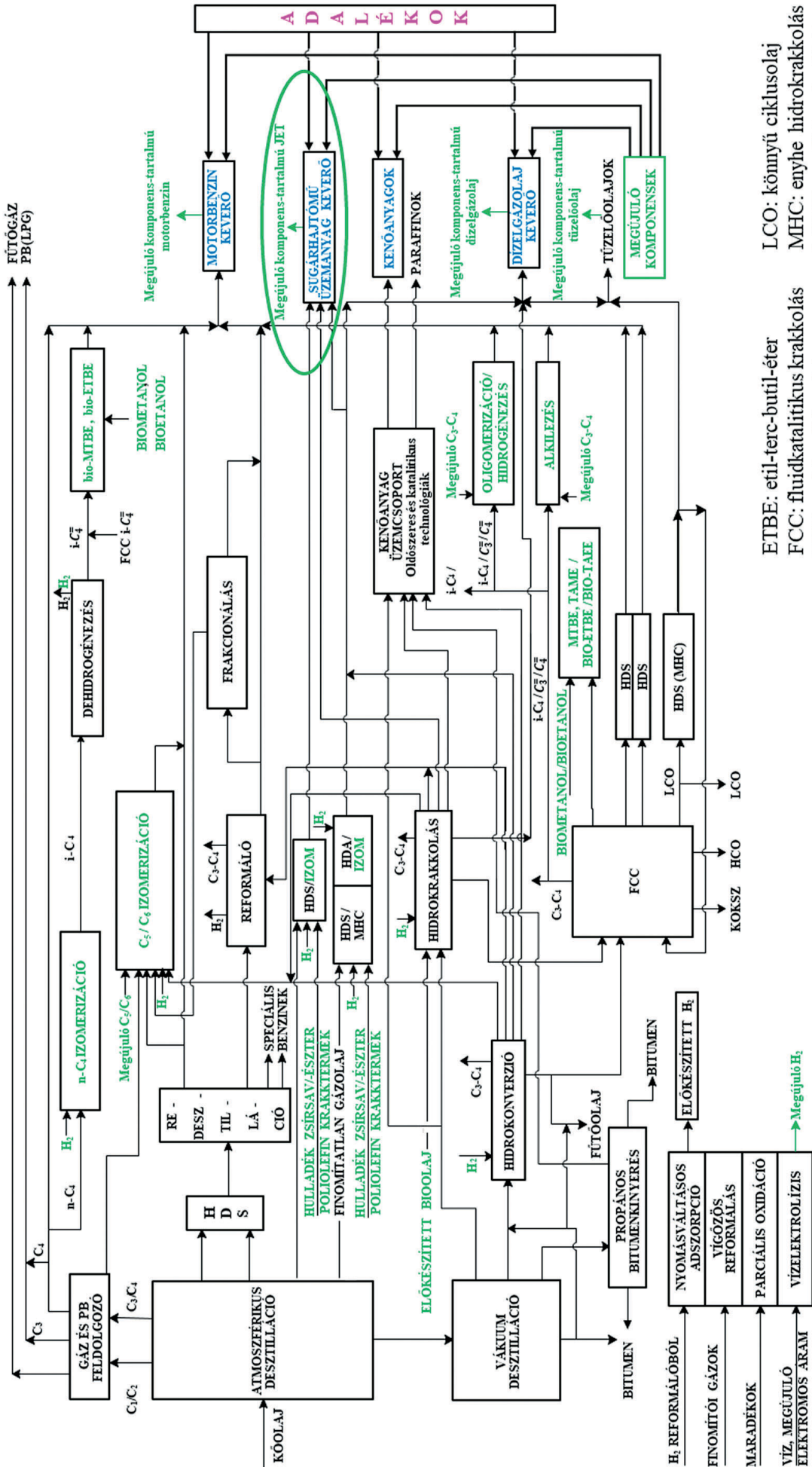
Természetesen lehetőség van a más vállalatoktól vásárolt megújuló termékkomponensek kellő részarányban való felhasználására is – esetleges rövid idejű átmeneti tárolás után – a meglévő termékkeverőben.

Sugárhajtómű-üzemanyagok (előállítása) fosszilis eredetű alternatív energiaforrásokból

Az előzőekben már utaltunk arra, hogy az első nem kőolaj-eredetű (alternatív) su-

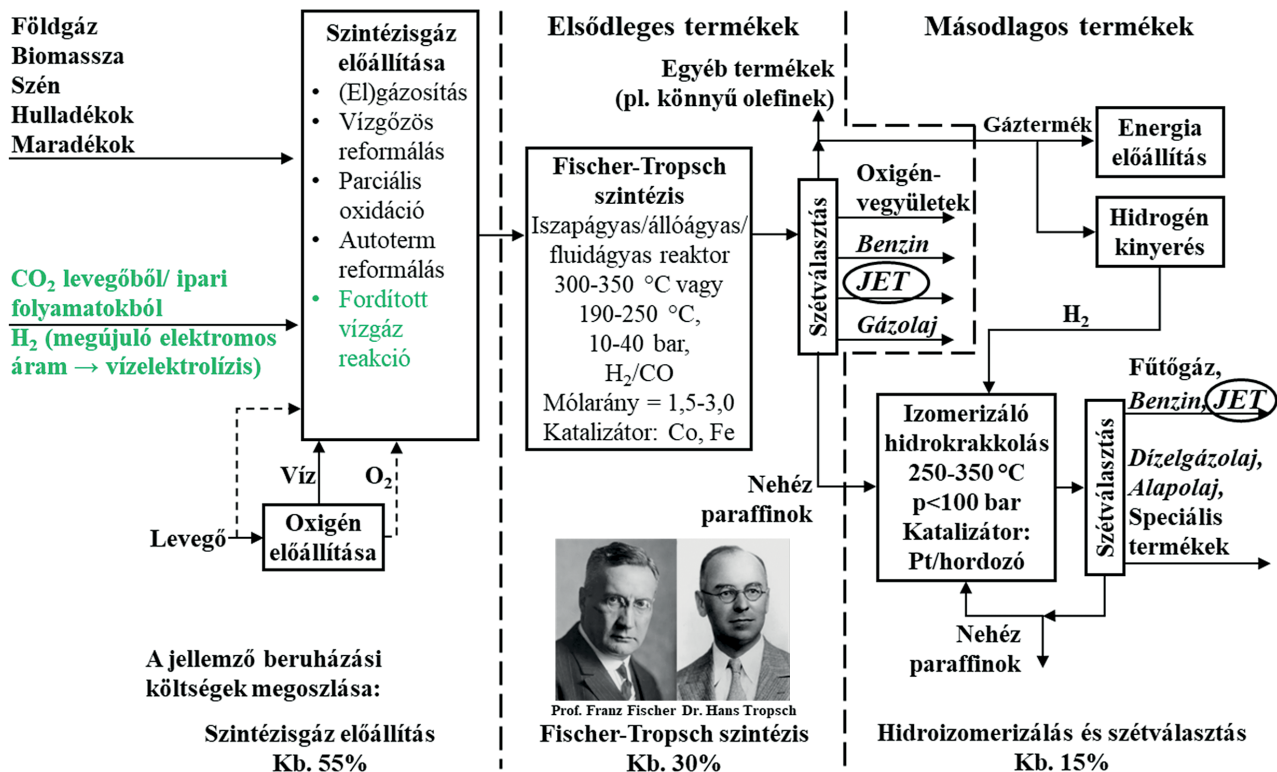


3. ábra. Megújuló komponensek tartalmazó termékek előállítására is alkalmas korszerű kőolaj-finomító blokkvázlata



LCO: könnyű ciklusolaj
MHC: enyhe hidrokrakkolás
MTBE: metil-terc-butil-éter
TAAE: terc-amil-éter
TAME: terc-amil-metil-éter

ETBE: etil-terc-butil-éter
FCC: fluidkatalitikus krakkolás
HCO: nehéz ciklusolaj
HDA: aromások hidrogénezése
HDS: hidrogénező kéntelenítés



4. ábra. Kerozinfrakciók általános előállítási lehetőségei fosszilis és megújuló szintézisgázból Fischer-Tropsch-szintézissel (az ábra saját továbbfejlesztés és szerkesztés [4] alapján)

gárhajtómű-üzemanyagot szénből állítottak elő. Ennek első lépése a szintézisgáz előállítása szén (el)gázosításával, majd a gázelegy átalakítása Fischer-Tropsch-szintézissel elsősorban cseppfolyós termékek-ké, többek között keroziná (CtL: Coal to Liquid eljárások). Környezeti és gazdaságossági okok miatt azonban egyre jobban elterjedt a földgáz (metán) vízgőzös bontásával előállított szintézisgázt feldolgozó Fischer-Tropsch-szintézis (GtL: Gas to Liquid eljárás). Ebben a folyamatban egy elsődleges és minőségjavított, valamint egy másodlagos, a Fischer-Tropsch-szintézisben keletkező nehézparaffinok („wax”) izomerizáló hidrokrakkolásával nyert kerozinfrakciót állítottak elő (4. ábra) [4].

Adalékolást követően ezek minőségi jellemzői megfelelnek a szabvány (ASTM D7566:23b) előírásainak. [A 4. ábrán a szén és földgáz nyersanyagok kívül feltüntetettük a más (például megújuló) nyersanyagokat, illetve alapanyagokat is.]

Köszönetnyilvánítás. A közlemény az Európai Regionális Fejlesztési Alap által támogatott GINOP-2.3.2-152016-00053 projekt, „Stratégiai Műhelyek Kiválósága” [„Molekulaszerkezetében 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 támogatásá-

val, a 2021. évi Tématerületi Kiválóság Program finanszírozásában készült.

IRODALOM

- [1] Hancsók, J., Varga, Z., Holló, A., Keresztury, L., Varga, G.: „Fuels with high hydrogen content in their molecular structures”, Istanbul 22nd World Petroleum Congress (Block: B2, Refining, Transportation and Petrochemistry; Forum title: F11 Products of the future), 2017, július 09–13., ppt: 18 slide.
- [2] Hancsók, J.: „Gasoline Fuels for Spark Internal Combustion Engines”, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016, DOI: 10.1002/0471238961.0701191508150308.a01.pub3, 62.
- [3] Hancsók, J., Kasza, T., Visnyei O.: „Isomerization of n-C5/C6 bioparaffins to gasoline components with high octane number”, Energies, 2020, 13(7), 1672, DOI:10.3390/en13071672
- [4] Srivastava, S. P., Hancsók, J.: „Fuels and Fuel-Additives”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014, ISBN: 978-0-470-90186-1, 376.

Kevesebb kondenzcsík

Az Airbus kísérlete szerint egy kizárólag fenntartható repülőgép-üzemanyagot (SAF) használó A350-900-as a szokásosnál jelentősen kevesebb koromrészecskét bocsátott ki, a kondenzcsíkot alkotó jégrészecskék száma pedig még nagyobb mértékben csökkent.

Az európai repülőgépgyártó az alternatív üzemanyagok éghajlatra gyakorolt hatásának vizsgálatát célzó, ECLIF3 nevű programjában egy Rolls-Royce Trent XWB-84-es hajtóművekkel felszerelt Airbus A350-900-as repülés közbeni kibocsátását tesztelte.

A széles törzsű utasszállító egyik prototípusát egy szenzorokkal felszerelt Dassault Falcon 20-as követte a Földközi-tenger felett, Korzikától és Szardíniától nyugatra, és a kondenzcsíkokat hagyományos és fenntartható üzemanyagokkal felváltva vizsgálták.

Kizárólag fenntartható repülőgép-üzemanyag használata esetén a koromrészecskék kibocsátása 35 százalékkal csökkent, a jégrészecskék száma pedig még nagyobb mértékben, 56 százalékkal mérséklődött az elégetett üzemanyag tömegére vetítve, a hagyományos Jet A-1 kerozin használatához viszonyítva.

A tanulmány megállapította, hogy a kísérletnél használt, a Neste által biztosított, hidrogénnel feldolgozott észterekből és zsírsavakból előállított HEFA-SPK szintetikus kerozin alacsonyabb kéntartalmának tudható be a kedvezőbb értékek.

(<https://airport.hu/kevesbe-okoz-kondenzcsikot-a-fenntarthato-uzemanyag/>)