

MIZIK TAMÁS

## A bioetanol-termelés gazdasági és fenntarthatósági vetületei

A folyamatosan növekvő energiaigény fenntartható módon történő biztosítása komoly kihívás az emberiség számára. A közlekedésben ennek egyik eszköze a bioetanol, amely jelenleg az egyetlen gazdaságosan előállítható üzemanyag a benzin kiváltására. A termelés döntő többségét adó első generációs technológiák mellett egyre komolyabb a nem első generációsak szerepe. A bioetanol-előállítás gazdasági és fenntarthatósági kérdéseinek szisztematikus szakirodalmi áttekin-téssel történő vizsgálata során az összesen 16 141 beazonosított cikkből 64 tanul-mányt elemeztünk részletesen. Általános az egyetértés abban, hogy az első gene-rációs termelés nem lehet hosszú távú megoldás, de a további generációknál még nem kiforrott a technológia, és gazdaságtalan a bioetanol előállítása. Ugyanakkor a hulladékok és melléktermékek használata egyaránt javítja a gazdaságosságukat és a fenntarthatóságukat. A termelési generációk között előrehaladva folyamatosan nő a környezeti és romlik a gazdasági teljesítmény. Alacsony kőolajárak mellett pusztán költségalapon a bioetanol-előállítás kizárólag a leghatékonyabb termelők-nél (Brazília, Egyesült Államok) versenyképes, így jelentős a továbbfeldolgozás és az értékesebb melléktermékek előállításának a szerepe. A fenntarthatóság szem-pontjából pedig alapvető a komplex megközelítés, amelynek ki kell terjednie leg-alább a környezeti, társadalmi és a gazdasági szempontokra.

Journal of Economic Literature (JEL) kód: Q16, Q56.

A Föld fosszilis energiaforrásai korlátozottak, mivel a kitermelésük nagysága jelen-tősen meghaladja az újratermelődésüket. Ráadásul a népesség bővülése és a gaz-dasági fejlődés tovább fokozza az energia iránti igényt. A közlekedésben is jelen-tős kihívás a nem megújuló kőolaj használatának kiváltása, amire rövid távon az úgynevezett első generációs bioüzemanyagok alkalmasak (Mizik [2022]). A hasz-nálatuk fenntarthatóságának az alapja egyrészt a termelésükhöz felhasznált nyers-anyagok megújuló természete, valamint az, hogy az üvegházhatású gázkibocsá-tásnak a kőolajhoz képest sokkal kedvezőbb a mérlege. Ez utóbbi magyarázata az, hogy elégetésük során csak az a szén-dioxid-mennyiség tud felszabadulni,

amit a növény a fejlődése során a levegőből megkötött. Már az első generációs bioüzemanyagoknál is számottevő lehet a csökkenés, azonban a további generációknál ez még nagyobb is lehet – alapvetően a termelés során elérhető negatív széndioxid-egyenleg miatt (*Alalwan és szerzőtársai* [2019]).

A fenntarthatóság értelmezése UN [1987] meghatározásával összhangban történik, vagyis a jelen igényeinek a kielégítése során figyelembe kell venni a következő generációk hasonló igényeit is. A dokumentum alapján a fenntarthatóság három – a környezeti, a gazdasági és a társadalmi – pilléren nyugszik. Az átláthatóság érdekében a bioüzemanyagok fenntarthatóságának számos tényezőt kell magában foglalnia, mint például az ételmisszer- és a takarmánycélú termeléssel zajló versenyt, a levegőminőséget, a föld- és vízhasználatot vagy az üvegházhatású gázok kibocsátásának a nagyságát (*Duić és szerzőtársai* [2015]). *Sikarwar és szerzőtársai* [2017] alapján a fenntartható üzemanyagok helyettesítő szerepének fő jellemzői a hozzájárulás az éghajlatváltozás mérsékléséhez (az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, a talajra és a vízre gyakorolt negatív hatások mérséklése), a költséghatékony termelés és a társadalmi előnyök növelése.

A bioetanol gazdasági vetületének mérése alapvetően a termelési költség és az eladási ár összehasonlításával lehetséges. Kiemelt fontosságú, hogy ez utóbbihoz hozzátartozzon a melléktermékek értékesítése is. Mindazonáltal a veszteséges termelés önmagában nem zárja ki a bioetanol előállítását, mivel ez egyrészt a technikai fejlődés révén a későbbiekben gazdaságossá váló termelést eredményezhet, másrészt környezeti előnyökkel jár együtt. Emellett a gazdasági hatások között figyelembe kell venni a munkahelyteremtést is.

A biodízel mellett a bioüzemanyagok másik fő fajtája a bioetanol, ez utóbbit jellemzően a hagyományos benzinbe keverik be. Általánosan elfogadott, hogy a technológia jelenlegi szintjén még a 10 százalékos bekeverés sem okoz problémát (*Singh–Walia* [2016]). Az ennél jelentősebb mértékű bekeverés már a motor egyes alkatrészeinek az átalakítását igényelheti. Másrészt a hidegindítási probléma miatt a bioetanol aránya általában kisebb 100 százaléknál. Ez idő szerint az előállítás fő alapanyagai a magas cukor- vagy keményítőtartalmú növényi nyersanyagok (gabonafélék, cukorrépa, cukornád stb.). A jelenlegi, első generációs bioetanol használatának további előnyei a magasabb oktánszám, valamint a tökéletesebb égésből adódó nagyobb hatékonyság, azonban nem szabad figyelmen kívül hagyni a benzinhoz képest alacsonyabb energiasűrűségét (annak 66 százaléka) vagy a hidegindítási problémát (*Alalwan és szerzőtársai* [2019]).

A tanulmány célja a fenntarthatósági és gazdasági dimenziók együttes elemzése révén bemutatni a két terület összefüggéseit, valamint ebben a kontextusban értékelni a bioetanol-generációkat. A tanulmány felépítése a következő. A bioetanol-ágazat főbb jellemzőinek – beleértve a bioetanol-generációkat, az előállítás költségeit és a legjelentősebb termelőket – áttekintését követően bemutatjuk a releváns tanulmányok kiválasztásának a módszertanát. A részletes tartalomelemzés alapján négy kategóriába soroltuk be a kiválasztott tanulmányokat: első generációs, integrált és kombinált, lignocellulóz-, illetve algaalapú technológiákat tárgyalók. Az utolsó fejezet a főbb eredményeket foglalja össze, és a kutatás alapján levont következtetéseket mutatja be.

## A bioetanol-ágazat főbb jellemzői

A bioetanol előállításának szempontjából meghatározó jelentőségű az alapanyag. Az alapanyagok és a termelési módszerek alapján négy generációt különböztethetünk meg (1. táblázat).

### 1. táblázat

Bioetanol-generációk

Generációk	Fő alapanyagok	Átalakítási eljárás	Szén-dioxid-mérleg
Első	ehető, keményítő- vagy cukortartalmú biomassza (például búza, kukorica, cukorrépa, cukornád)	fermentáció	pozitív
Második	nem ehető, lignocellulóz-alapú biomassza (például mezőgazdasági hulladék, különböző fű- és fafélék)	hidrolízis, majd fermentáció	alapvetően semleges
Harmadik	mikroorganizmusok (például mikroalgák)	hidrolízis, majd fermentáció	negatív
Negyedik	génmódosított mikroorganizmusok	hidrolízis, majd fermentáció	negatív

*Forrás:* saját szerkesztés Alalwan és szerzőtársai [2019] alapján.

Mindegyik generáció esetében számos előny fogalmazható meg, így például az esetleges túltermelés kezelése (első generáció), megújuló energia termelése (mind a négy generáció) vagy az üvegházhatású gázoknak a benzinhez képest alacsonyabb kibocsátása (szintén mind a négy generáció). Ugyanakkor nem lehet figyelmen kívül hagyni a hátrányaikat sem: az első generációnál a fenntarthatósági problémákat (bioetanol *versus* élelmiszer), a második generációnál a jelentős energia- és vízfelhasználást, a harmadik generációnál az energiaigényességet és a kedvezőtlen nitrogénmérleget, illetve a negyedik generációnál a drága és energiaigényes termelést (*Darda és szerzőtársai* [2019]).

A jelenleg széles körben használt technológiák esetében a bioetanol előállításának a legjelentősebb költségeleme a felhasznált nyersanyag. Például a kukoricaalapú etanol esetében az alapanyagköltség a teljes termelési költség átlagosan 58 százalékát teszi ki (száraz őrléses eljárást alkalmazó, reprezentatív iowai üzem) az elmúlt 15 év (2007–2021) adatai alapján (*CARD* [2021]). Emiatt fontos a minél nagyobb terméshozam, mivel annak révén lehet a bioetanol-termelés során a legjelentősebb költségmegtakarítást elérni. A 2. táblázat nyújt áttekintést a legjelentősebb bioetanol-termelő országokról.

A WTI nyersolaj ára 39,17 dollár/hordó volt 2020-ban (*EIA* [2021a]), ami literenként 0,25 dolláros kőolajárat jelent. Az Egyesült Államok adatai alapján 2020-ban a kőolaj ára a benzin előállítási költségének 43 százalékát tette ki (*EIA* [2021b]), amiből literenként 0,58 dolláros benzinár adódik. Mivel azonban az olajár/benzinár arány lényegében megegyezik a bioetanol benzinhez viszonyított energiatartalmának az arányával, így

## 2. táblázat

A legjelentősebb bioetanol-gyártók termelése és előállítási költségei, 2020

Országok	Termelés		Előállítási költségek	
	milliárd liter	piaci részarány (százalék)	dollár/liter	súlyozott dollár/liter*
Egyesült Államok	54,40	46,10	0,38	0,57
Brazília	30,60	25,93	0,35	0,53
Kína	10,59	8,98	0,56	0,84
Európai Unió	6,00	5,08	0,54	0,81
India	2,98	2,53	0,42	0,63

\* A súlyozás figyelembe veszi a bioetanol alacsonyabb energiatartalmát.

Forrás: saját összeállítás az IRS [2021] és az OECD [2022] adatai alapján.

a bioetanol súlyozatlan gyártási költségét közvetlenül is lehet a kőolaj árához hasonlítani. A 2. táblázat alapján látható, hogy Brazília a leghatékonyabb gyártó, ott a bioetanol előállítási költsége 9,43 százalékkal volt kisebb a benzinénél. Emellett még a legjelentősebb termelő (46,10 százalékos piaci részarány), az Egyesült Államok tudta a benzinnél olcsóbban előállítani a bioetanol, míg a táblázatban szereplő többi termelőnél a bioetanol ára kisebb-nagyobb mértékben meghaladta a benzinét. Ez azt jelenti, hogy támogatás, adójóváírás nélkül a bioetanol előállítása számukra veszteséges volt. A fenti értékekre két tényező gyakorol érdemi hatást: az olajár és a devizaárfolyam változása. Mindenképpen ki kell emelni, hogy az előbbi időközben jelentősen nőtt (a *Bloomberg* [2022] adatai alapján jelenleg hordónként 86,82 dollár), aminek következtében a fenti országok mindegyikében nyereségesé vált a bioetanol termelése. Másrészt az *OECD* [2022] adatbázisban az árak nemzeti valutában szerepelnek, így a táblázatbeli értékekre a dollár árfolyamának a változása is hatással van. 2020-ban a brazil reál és az indiai rúpia gyengült, míg az euró erősödött a dollárral szemben. Ennek alapján a brazil és indiai bioetanol dollárban kifejezett termelési költsége csökkent, míg az európaié nőtt. A kínai jüan árfolyama nem változott érdemben, így Kína esetében nem volt „árfolyamhatás”. Emellett az összehasonlítások során azt sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy a termeléshez szükséges nyersanyagok is eltérők, mivel Brazília cukornádat, Kína és az Egyesült Államok kukoricát, az EU gabonaféléket és cukorrépat, míg India főleg melaszt használ.

## A szakirodalmi áttekintés módszere

A megfelelő tudományos eredmények érdekében öt jelentős *online* adatbázist használtunk: Scopus, Web of Science, JSTOR, ProQuest és Science Direct. A kétlépcsős keresés során a „bioetanol” vagy „etanol”, „gazdasági” és „fenntarthatóság” kulcsszavakat először a legnagyobb találati számot adó adatbázisban, a Scopusban kerestük le. A keresés kiterjedt a címre, a kulcsszavakra és a tartalmi kivonatokra. A bioetanol és az etanol vagyilag használatának az az oka, hogy a szakirodalomban

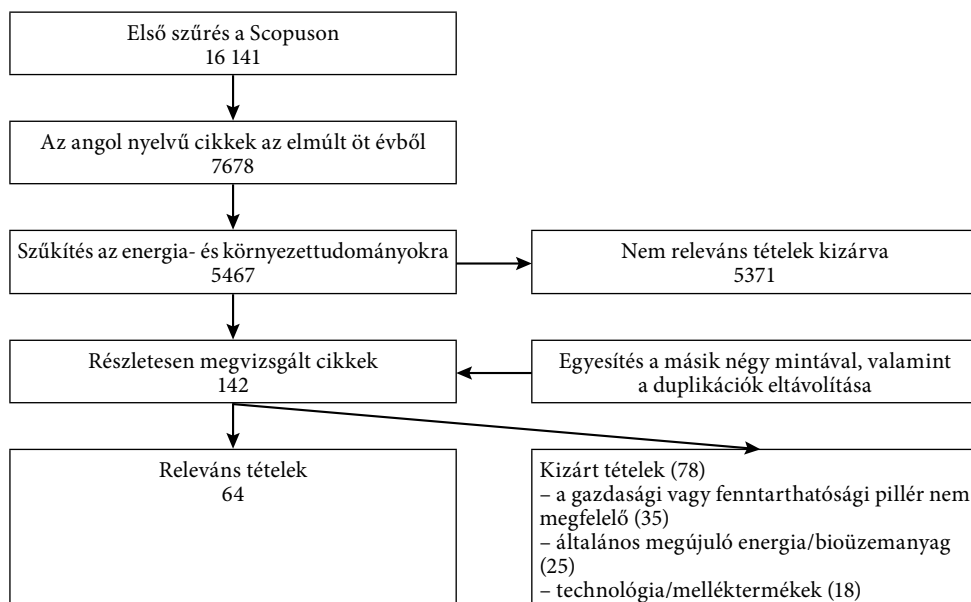
– szinonimaként használva – mindkét elnevezés előfordul. A kutatás célja olyan cikkek kiválasztása volt, amelyek gazdasági és fenntarthatósági kérdésekkel egyaránt foglalkoznak, nem pedig önmagukban elemzik a bioetanol-előállítást. Az első szűrés 16 141 cikket eredményezett a Scopus-adatbázisban. Ezért a találatokat leszűkítettük az elmúlt öt év (2017–2021 között) angol nyelvű tudományos cikkeire, aminek révén a tématerület legfrissebb kutatási eredményeit válogattuk ki. Ezzel a cikkek száma 7678-ra csökkent. Az energia- és környezettudomány szakterületek kiválasztása 5467 cikket eredményezett. A központi témától (gazdasági és fenntarthatósági összefüggések) való jelentős eltérés miatt a következő témájú cikkeket zártuk ki:

- alapanyag(ok) vagy melléktermék(ek) áll(nak) az elemzés középpontjában,
- a végső cél nem bioüzemanyag vagy bioetanol előállítása (hanem például áram, illetve biodízel),
- a bioetanol-előállítás technológiája,
- hiányzik a gazdasági vagy a fenntarthatósági pillérek valamelyike,
- üzemanyag/energia politika,
- biofinomító-technológia.

A második körben ez az al minta került összevonásra a másik négy mintával (JSTOR, ProQuest, Science Direct, Web of Science). A duplikációk eltávolítása után kapott, 142 cikkből álló mintát részletesen elemeztük. Kizártuk azokat a cikkeket, amelyek nem a központi témát (gazdaságosság és fenntarthatóság kapcsolata) elemezték, így 64 releváns tanulmány került a mintánkba (1. ábra).

### 1. ábra

A szakirodalom kiválasztásának mérföldkövei



Forrás: saját szerkesztés.

Az elemzett periódusban a kiválasztott cikkek száma évenként változott, de 2020-ban és 2017-ben publikálták a legtöbbet (17 és 14 tanulmány). A 2021-es évből viszont annak ellenére szerepel már 9 cikk, hogy január végén fejeződött be a leválogatás. A folyóiratok eloszlását illetően a *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (ötéves impaktfaktor:<sup>1</sup> 16,54) és a *Journal of Cleaner Production* (impaktfaktor: 9,67) volt a legfontosabb forrása a témához kapcsolódó cikkeknek, a 64-ből 23 ezekben jelent meg (impaktfaktor: 12, illetve 11). Ezt követi öt cikkel az *Energy* (impaktfaktor: 7,55), míg négy-négy cikk jelent meg az *Energy Conversion and Management* (impaktfaktor: 10,06) és az *Applied Energy* (impaktfaktor: 10,63) folyóiratokban, három pedig az *Energies*-ben (impaktfaktor: 3,41). A fennmaradó 25 cikk 20 különböző folyóiratban került publikálásra.

## Eredmények

A részletesen elemzett cikkeket négy kategóriába soroltuk: első generációs bioetanol, integrált/kombinált biofinomítóknál történő termelés, lignocellulóz-alapú termelés, valamint algaalapú bioetanol-előállítás. *Mat Aron és szerzőtársai* [2020] a bioüzemanyagok négy generációjának a fenntarthatóságát hasonlította össze. A tanulmány szerzői általában véve azt tapasztalták, hogy a gazdasági teljesítmény romlik, míg a környezeti teljesítmény javul az elsőtől a negyedik generáció felé haladva. A legfontosabb első generációs bioetanol-alapanyagok esetében a cukornád biztosítja az üvegházhatású gázok legnagyobb csökkentését (59–82 százalék), míg a kukoricaalapú bioetanol értéke a legalacsonyabb (20–50 százalék). Ezenkívül a cukornádalapú bioetanolé a legmagasabb energiahatékonyság (78–100 százalék) is. Ami az előállítási költségeket illeti, az első generációs bioetanolé literenként 0,49 dollár, a harmadik generáció esetében pedig literenként 0,44–8,76 dollár között változik. Azt azonban mindenképpen meg kell jegyezni, hogy jelenleg sehol sincs nagyüzemi méretű, nem első generációs bioetanol-termelés.

### *Első generációs bioetanol-elemzések*

Az első generációs bioetanolnál kiemelten fontos a gazdaságosan előállítható nyersanyag. *Eckert és szerzőtársai* [2018] egyes brazil régiók éghajlati előnyét hangsúlyozta, ami két-három aratást is lehetővé tesz évente, azonban döntő fontosságú a megfelelő logisztika, vagyis a bioüzemanyagot előállító üzemeknek a nyersanyag előállításához közeli elhelyezkedése. A decentralizált rendszerek jellemzően nagyobb gazdasági, környezeti, társadalmi és energiahatékonyságot képesek elérni. *Huang és szerzőtársai* [2020] elemzése alapján ráadásul a brazil bioetanol-ágazat

<sup>1</sup> Az ötéves impaktfaktor azt mutatja meg, hogy az elmúlt öt évben átlagosan hány hivatkozás történt az adott folyóiratban megjelent cikkekre. Ebben az esetben az itt megjelent cikkek ötéves átlagban 16,54 hivatkozást kaptak.

fejlődése nehezen adaptálható a többi feltörekvő gazdaság, például Kína esetében. A cukornádalapú bioetanol hosszú története, a támogató nemzeti szakpolitika, a rendelkezésre álló nagy földterület, a magas cukornádhozam, a gépesített, ezért költséghatékony cukornádtermelés, valamint a rugalmas üzemanyag-felhasználású gépjárművek magas részaránya a brazil modell egyedülálló elemei. A szerzők ugyanakkor kiemelték, hogy a kínai cukornádalapú bioetanol-termelés káros környezeti hatása Brazíliához képest kisebb, mivel elhanyagolható hatása van az erdőirtásra és az élelmiszer-ellátásra.

*Cardoso és szerzőtársai* [2017] a cukornádtermelési rendszereket elemezte a brazil közép-déli régióban. A szerzők a mérnöki közgazdaságtan (belső megtérülési ráta, nettó jelenérték és bioetanol-előállítási költség), az életciklus-elemzés és a társadalmi életciklusok elemzésének módszereit alkalmazták. Eredményeik szerint a gépesített cukornád-termelési rendszerek jobban teljesítettek gazdaságilag (magasabb belső megtérülési ráta és nettó jelenérték, valamint alacsonyabb előállítási költség) a kézi betakarítású forgatókönyvekhez képest. Környezetvédelmi szempontból a szalma hasznosítása volt a döntő, és az integrált szalmavisszanyerési rendszer biztosította a legkedvezőbb hatást. A társadalmi hatásokat munkahelyteremtéssel mérve – nem meglepő módon – a kézi betakarítási módszerek nagyobb foglalkoztatással párosulnak. A többkritériumos döntéselemzés (*multi-criteria decision analysis*) és az érzékenységvizsgálat alapján a gépesített forgatókönyveknek volt a legjobb összesített fenntarthatósági hatása.

*Manochio és szerzőtársai* [2017] összehasonlította a cukornád-, a kukorica- és a cukorrépa-alapú bioetanol-termelést. Hasonlóan más szerzők eredményeizhez, a cukornádalapú bioetanol teljesített minden szempontból a legjobban:

- 9,4-es energiamérleg,<sup>2</sup> ami sokkal nagyobb, mint a kukorica 1,2-es és a cukorrépa 1,6-es értéke,
- 69–89 százalékos megtakarítás a szén-dioxid-kibocsátásban, ami 30–38 százalék a kukorica és 35–56 százalék a cukorrépa esetében,
- gazdaságilag is a legjobb megoldás, mivel a literenkénti termelési költsége 0,24–0,42 dollár Brazíliában, míg a kukoricalapú amerikai bioetanol előállítása literenként 0,50–0,87 dollár, a cukorrépa-alapú uniós bioetanolé pedig literenként 0,46–0,77 dollár.

*Demafelis és szerzőtársai* [2020] négy bioetanol-termelési rendszer társadalmi-gazdasági és környezeti hatásait hasonlította össze, amelyek cukornádat és/vagy melaszt használnak. A társadalmi-gazdasági hatást a munkahelyteremtéssel mérték. Ebből a szempontból a kézi betakarítással működő kisüzem és az új bioetanolgyár kombinációjának lenne a legnagyobb foglalkoztatási hatása a Fülöp-szigeteken. Bár mind a négy termelési rendszer viszonylag nagy mértékben csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását (68,92–90,83 százalék), a legkedvezőbb opció a cukornád és a melasz együttes használata volt az utóbbi nagyobb arányával.

<sup>2</sup> Az energiamérleg a bioetanol felhasználásával kinyert energia és az előállításához felhasznált energia arányát mutatja meg. Ebből a szempontból alapvető az 1 feletti érték.

Yang és szerzőtársai [2018] a cukorcirkot mint lehetséges bioetanol-alapanyagot értékelték Kínában. A termeléstechnikai elemzési modell (*Production Technique Analysis Model*) alkalmazásával a cukorcirok nem bizonyult gazdaságilag megvalósíthatónak a drága átalakítási folyamat és biomassa logisztikai problémái miatt. Az üvegházhatású gázok kibocsátása északkelet-kínai mintaterületen volt a legkisebb (29,1 gramm szén-dioxid-egyenérték a szár kilogrammjaként).

Da Silva–Castañeda-Ayarza [2021] a brazil kukoricaalapú bioetanol-szektor vizsgáta politikai-gazdasági-társadalmi-technológiai-környezetvédelmi-jogi (*Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal, PESTEL*) elemzéssel. A szerzők gazdasági szempontból a rugalmas, többféle alapanyaggal (kukorica és cukornád) is működtethető üzemek mellett érveltek. Ez különösen fontos decembertől márciusig, amikor nincs cukornádtermesztés. Ráadásul a 2018/2019-es gazdasági évben a kukoricaalapú etanol haszonkulcsa meghaladta a cukornádalapú etanolét (23,9 százalék *versus* 19,41 százalék), alapvetően az olcsóbb alapanyag miatt. Ugyanakkor számos környezeti hiányosságot is beazonosítottak. A cukornádalapú bioetanolal összehasonlítva a kukoricaalapú előállítás energiamérlege rosszabb (1,9–2,3 *versus* 9), jóval nagyobb a vízfelhasználása (2600 liter víz egy liter etanol előállításához a mindössze 200 literhez képest), és kisebb mértékű az üvegházhatásúgáz-kibocsátás csökkenése (21 százalék *versus* 61 százalék). A kukoricaalapú etanolt a cukornádalapú termelés kiegészítőjeként és nem a versenytársaként azonosították.

Silva és szerzőtársai [2017] három különböző gyártási technológiát tesztelt, és megállapította, hogy a vízgőzzel fűtött visszaforráló használata jár a legnagyobb gazdasági és környezeti előnnyel. A víz újrafelhasználása jelentősen hozzájárult az első generációs, cukornádalapú bioetanol-termelés fenntarthatóságához Brazíliában. A környezeti előny fő forrása a 24 százalékkal kisebb vinsztermelés volt, bár a megújulási exergia indexe nem érte el az 1-et (0,97). A jövedelmezőséget tekintve a visszaforralós rendszerrel 115 millió dollár nettó árbevételt lehet elérni, ami 9 és 12 százalékkal nagyobb, mint a hagyományos, közvetlen gőzbefecskendezéses (*direct steam injection*) és a mechanikus, ismételt gőzsűrítéses (*mechanical vapour recompression*) lepárlásé.

Sharma–Strezov [2017] nyolc különböző típusú üzemanyag [B100, sűrített földgáz (CNG), dízel, E85, elektromos áram, benzin, hidrogén és cseppfolyósított földgáz (LPG)] gazdasági és környezeti hatásait elemezte Ausztráliában. A hidrogén, a CNG és az elektromos áram teljesített a legjobban környezeti szempontból, csupán a bioetanol környezeti hatásának a 3, 5 és 15 százalékat okozták. Gazdasági szempontból az LPG, a hidrogén és a CNG a legolcsóbbak, kilométerenként 0,27, 0,32, illetve 0,37 ausztrál dolláros költséggel. Összességében a hidrogén, a CNG és a dízel üzemanyag mutatta a legkisebb kombinált (környezeti + gazdasági) hatást, míg az E85 és a B100 a legnagyobbat. Az E85 fő hiányosságai a nyersanyag-előállítás során keletkező nitrátfelesleg és a magas vízigény, valamint a bioetanol-előállítás magas tőke- és működési költségei voltak. Ennek némileg ellentmond, hogy Chang és szerzőtársai [2017] szimulációja alapján a 85 százalék vesszősköles-alapú és 15 százalék benzint tartalmazó keveréknek volt a legalacsonyabb az üvegházhatásúgáz-kibocsátása a kukoricaalapú bioetanolhoz, a szójaalapú biodízelnél és a kukoricaalapú bioetanolból előállított biohidrogénhez viszonyítva. Ez a gyakorlatban azt



jelenti, hogy bioetanol és bioetanol között is jelentős különbség lehet attól függően, hogy milyen nyersanyagból kerül előállításra.

A bioetanol üzemenyancélú felhasználása során fontos a víztartalom csökkentése, ami egy nagyon energiaigényes folyamat. *Vargas-Bautista és szerzőtársai* [2017] egy napenergiával működő, kisméretű bioetanol–víz desztillációs üzem hő-, környezeti és gazdasági teljesítményét vizsgálta. A 95 tömegszázalékos bioetanol előállításához 5 és 10 tömegszázalékos etanolt használtak. A magas beruházási költségek miatt az üzem csak akkor lehet gazdaságilag megvalósítható, ha a beruházási költségek 75 százaléka külső forrásból fedezhető (kormányzati, magánfinanszírozás). Ez a forgatókönyv literenként 0,81 dolláros etanolárat eredményezett, míg az üvegházhatású gáz kibocsátásának csökkenése évi 13,05 tonna szén-dioxid lehet 180 négyzetméter területű napkollektor használatával. A szerzők által azonosított legfőbb akadályok a magas kezdeti beruházási költség és az alacsony bioetanolár voltak.

### *Bioetanol-termelés integrált és kombinált biofinomítóknban*

Az integrált és a kombinált biofinomító közötti leglényegesebb különbség a végtermékek számában van. Az integrált termelés során egy vagy több nyersanyagból állítanak elő legalább két fő terméket. Ezzel szemben a kombinált termelés jellemzője, hogy ugyanabban az üzemben párhuzamosan folyik az első és a második generációs bioetanol-termelés.

*De Souza és szerzőtársai* [2019] egy integrált, cukornádalapú bioetanol-húsmarha üzem gazdasági és környezeti megvalósíthatóságát tanulmányozta Brazíliában, a virtuális cukornád-biofinomító (*Virtual Sugarcane Biorefinery*) módszer alkalmazásával. Az integrált rendszer legfőbb előnye, hogy kisebb közvetett földhasználati változás (*Indirect Land Use Change, ILUC*) mellett növelhető a bioetanol-kibocsátás, valamint a hús kilogrammjára vetített károsanyag-kibocsátás is 14 százalékkal alacsonyabb. E rendszer további, szén-dioxid-kibocsátási egységből származó bevételt (*carbon credits revenue*) eredményezne a húsmarhatermelés számára. A bioetanol-gyártás esetében lineáris összefüggést találtak a termelés és a nettó jelenérték között, mivel a belső megtérülési ráta állandó (17,6 százalék) volt. A húsmarhatermelés gazdasági teljesítménye a takarmánytermelés nagyságától függ, mivel az a szarvasmarha-hízalás legjelentősebb költségeleme. Emiatt a legnagyobb bioetanol-termelés (évi 673 478 tonna) forgatókönyve lett a legjövödelmezőbb 178,18 millió dollár nettó jelenértékkel és 50,65 százalékos belső megtérülési rátával. A szén-dioxid-kibocsátási egységből származó bevételt is figyelembe véve ezek az értékek 252,14 millió dollárra és 62,75 százalékra emelkedtek. Az energia és a takarmány együttes termelése gazdasági és környezeti szempontból is életképes megoldásnak tűnik.

Japánban *Ouchida és szerzőtársai* [2019] egy integrált, a cukornád termelését és feldolgozását is magában foglaló modellt javasolt. A magas hozamú fajtavál történő selektív fermentáció használata 8,5 százalékkal, illetve 17,9 százalékkal növelné a nyerscukor és a bioetanol termelését. A folyamat gazdaságilag akkor megvalósítható, ha a bioetanol minimális eladási ára nem éri el a literenkénti 0,87 dollárt.

*Arshad és szerzőtársai* [2019] a cukorgyártás melléktermékeként képződő melasz mint bioetanol-alapanyag kilátásait elemezte Pakisztánban. A termelési költségek 2009 és 2014 között összességében növekvő tendenciát mutattak, az időszak végén elérték a literenkénti 0,48 dollárt. Ez szorosan összefüggött a nyersanyag árának alakulásával. Emellett a bioetanol-ipar pozitívan hatott a vidéki gazdaságra is (foglalkoztatás, infrastrukturális fejlesztések). Míg a cukornádalapú bioetanol szén-dioxid-kibocsátást csökkentő képessége megkérdőjelezhető, bár mindenképpen jobb, mint a benziné, de az energiamérlege kimagasló (7,47).

*Longati és szerzőtársai* [2020] integrált cukornád–szója biofinomítót javasolt, amely egyaránt nyújtana gazdasági és környezeti előnyöket. Az alapanyagok hasonló földrajzi koncentrációja megkönnyítené a logisztikát. A gyártás során a cukornádszalma felhasználható az áramtermeléshez, míg a bioetanol jó oldószer a szójaolaj kinyeréséhez. A kipréselt cukornád felhasználása a bioetanol előállításához még jobban csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását, mint önmagában a cukornádalapú bioetanol termelése. A fosszilis energia iránti kisebb igény és az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkenése növeli mindkét elsődleges termék (bioetanol és biodízel) termelésének a fenntarthatóságát.

*Silalertruksa–Gheewala* [2020] összehasonlította a meglévő cukor-, villamosenergia- és bioetanol-termelést egy új, cukor-villamos energia-politejsav rendszerrel Thaiföldön. Ez utóbbi növelné az átlagos termékértéket (83–220 dollár az 56 dollár helyett a feldolgozott cukornád egy tonnájára vetítve), ugyanakkor rosszabb környezeti teljesítményt nyújtana minden elemzett kategóriában. *Weber és szerzőtársai* [2020] olyan édesburgonya-hulladékon alapuló biofinomítót javasolt Brazíliában, amelyik bioetanolt és alkoholtartalmú italt képes előállítani. Az élelmiszerhulladék megfelelő kezelése számos előnnyel jár, beleértve az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkenését is. A szerzők öt forgatókönyvet elemeztek, ahol az egyetlen különbség a desztillált ital gyártásának részaránya volt (0, 20, 40, 60 és 80 százalék). Eredményeik alapján a 20 százalék bioetanolt és 80 százalék desztillált italt gyártó opciónak volt a legmagasabb a nettó jelenértéke (1,08 millió dollár egy napi 1000 literes termelési kapacitású üzemnél). Ez a beruházási és működési költségekkel összevetve 51 százalékos belső megtérülési rátát eredményez. Ennek a szélsőséges termelési megoszlásnak két oka van: az alkoholtartalmú italok magasabb egységértéke és a – hulladékanyag felhasználása ellenére is – viszonylag magas bioetanol-előállítási költségek.

*Ayodele és szerzőtársai* [2020] az első és második generációs termelés integrálását azért javasolta, mert ötvözi az első generációs termelés kiforrott technológiáját (magas termelékenység és bioetanol-hozam) a lignocellulóztartalmú biomassza rendelkezésre álló nagy mennyiségével és jobb környezeti teljesítményével. A kombinált biofinomítók enyhíthetik a második generációs termelés jelenleg sokkal magasabb beruházási és működési kockázatát, valamint jelentősen csökkenthetik az alapanyag-költségeket (alacsonyabb szállítási költség, mivel az egész növény felhasználható). A technológiát illetően megállapították, hogy az egyidejű cukrosítás és fermentálás (*simultaneous saccharification and fermentation*) növeli a bioetanol-hozamot, és csökkenti a termelési költséget a különválasztott hidrolízishez és fermentációhoz képest.

*Huang és szerzőtársai* [2020] rámutatott arra, hogy a cukornádalapú bioetanol-előállításához kapcsolódva a kipróbált cukornád felhasználása ígéretes lehetőség a nagy mennyiségű növényi maradvány és a bioetanol magas elméleti hozama, valamint az ingyenes szállítási és aprítási költségek miatt, ha a cukornádat ugyanabban az üzemben dolgozzák fel. Az előállítási költségeket tekintve a kínai bioetanol-gyártáshoz a melasz a legjobb alapanyag literenként 0,29 dolláros előállítási költséggel, amit a kukorica- és a lignocellulóz-alapú bioetanol követ (0,63 és 0,74 dollár literenként).

*Vasconcelos és szerzőtársai* [2020] műszaki-gazdasági elemzéssel vizsgált egy integrált (bioetanol és áram) cukornád-biofinomítót. A magas beruházási, valamint a termelési költségek miatt a második generációs termelés drágább volt mindegyik elemzett forgatókönyv esetén. Eredményeik alapján a magasabb hidrolízishozam – ezáltal a magasabb bioetanol-termelés – nem mindig a legjobb megoldás a második generációs termelés gazdasági életképességének a növelésére. Általánosságban véve az alapanyagok és az input vegyi anyagok költsége a leginkább befolyásoló tényezők.

*Elias és szerzőtársai* [2021] a retro műszaki-gazdasági-környezeti elemzés (*Retro-Techno-Economic-Environmental Analysis*) segítségével értékelt a kombinált, első és második generációs cukornádalapú biofinomítót. A bioetanol minimális eladási ára az első generációs termelés esetén literenként 0,44 dollár volt, míg a kombinált technológia alkalmazásával literenként 0,50 dollár. Ennek az az oka, hogy a második generációs bioetanol előállításának nagyobbak a beruházási és működési költségei. Általában véve a kombinált biofinomító gazdaságilag megvalósítható, és környezeti szempontból kifejezetten jobb eredményt nyújt (különösen a földfelszíni ökotoxicitás esetében) a hagyományos termeléshez képest.

*Chandra és szerzőtársai* [2017] a melasz- és a cukornádlé-alapú bioetanol gazdasági és környezeti hatásait elemezte a Fidzsi-szigeteken. Mindkettőt gazdasági és környezeti szempontból is előnyösnek találta. A melasz helyben történő felhasználása a jelenlegi export helyett évi 3,6 millió dollár pótlólagos bevételt generálna, és 22 730 tonnával csökkenne a szén-dioxid-kibocsátás, nem beszélve a munkahelyteremtésről. Bár a cukornádlé-alapú bioetanol hasonló pozitív hatásokat eredményezne, de a lepárlóüzemek telepítése nagyon tökeigényes folyamat.

*Wang és szerzőtársai* [2020] kidolgozott egy multiregionális input-output alapú, hibrid életciklus-elemzési modellt a kukorica- és a kukoricaszalma-alapú bioetanol-előállítás társadalmi, gazdasági és környezeti hatásainak az elemzésére. A szerzők megállapították, hogy Kínában a bioetanol-gyártásnak jobb a gazdasági és a környezeti teljesítménye, de az alacsonyabb foglalkoztatottság miatt rosszabb a társadalmi teljesítménye a benzinéhez képest. Ezt az összehasonlítást elvégezték a bioetanol-termelés két generációjának a szintjén is, ami alapján az első generációs technológia jobb gazdasági és társadalmi, de rosszabb környezeti teljesítményt nyújtott a második generációhoz képest. Ezek az eredmények teljesen összhangban vannak *Ayodele és szerzőtársai* [2020] eredményeivel.

*O'Brien és szerzőtársai* [2020] a száraz gabonatörköly (*Distillers Dried Grains with Solubles, DDGS*) további feldolgozását javasolta bioszénné, úgynevezett karbonizált szilárd tüzelőanyaggá (*carbonized solid fuel*). Szimulációja alapján ez a hagyományos első generációs bioetanol-üzemhez képest magasabb nyereséget és az üvegházhatású

gázok kibocsátásának jelentősebb megtakarítását eredményezné. Évente 358 250 tonna kukorica feldolgozásával az éves nyereség 5,22 millióról 185,83 millió dollárra nőne, míg a szén-dioxid-kibocsátás körülbelül 24 százalékkal csökkenne (évi 127 884 tonnáról 97 225 tonnára) a földgáz bioszénnel történő kiváltása miatt. A javasolt termelési rendszer magas profitja talán kérdéses, azonban a nyeresége tonnánként 188 dolláros bioszénárnál megegyezik a hagyományosával, viszont a jelenlegi piaci ára meghaladja a tonnánkénti 2600 dolláros értéket.

*Kesharwani és szerzőtársai* [2019] a diverzifikált és a központosított alapanyag-beszerzés hatásait vizsgálta a kukoricaalapú bioetanol-gyártás kapcsán. A központosított stratégia gazdaságilag jobbnak bizonyult (27,39 százalékkal alacsonyabb egységköltség) Missouriban, amely egy alapanyagban gazdag terület, valamint a kukoricaszár-alapú termelés felülmúlta a kukoricaalapút az olcsóbb alapanyag miatt. Az első generációs bioetanol-termeléshez képest azonban a második generációs rosszabb környezeti teljesítményt (24,42 százalékkal magasabb egységkibocsátást) eredményezett a biomassza jelentősebb előfeldolgozási igénye miatt.

*Li és szerzőtársai* [2020] szintén egy integrált biofinomítót elemzett Missouriban. Ennek érdekében a biomassza és a kukorica együttes fermentálását (*co-fermentation*) javasolta. Eredményei alapján a kukoricaalapú bioetanol mutatta a legjobb gazdasági és környezeti teljesítményt, gallononkénti 2,02 dolláros előállítási költséggel és 7,77 gallononkénti szén-dioxid-kibocsátással. Ezek az értékek 82,00 százalékkal és 121,37 százalékkal voltak alacsonyabbak, mint a legrosszabbul teljesítő, kukoricaszárból előállított bioetanolé. Az előbbi fő okai az alacsonyabb alapanyagár (+) és az alacsonyabb bioetanol-hozam (–) voltak. Ezért a cellulózra alapozott termelés teljesítményének a növelésére a legígéretesebb lehetőség a bioetanol-hozam növelését célzó technológiai fejlesztés. Az együttes fermentálási folyamat gazdasági és környezeti értékei az első és a második generációs termelés értékei között voltak.

*Padi-Chimphango* [2020] az életciklus-fenntarthatósági elemzést alkalmazta a maniókahulladék esetében. Ez a környezeti, a költség- és a társadalmi életcikluselemzések értékeinek az összegzése, ezért ez a fenntarthatóság mindhárom pillérét tartalmazza. A szerzők hat különböző biofinomítót hasonlítottak össze. Az eredmények alapvetően attól függtek, hogy melyik részdimenzió (környezeti, gazdasági és társadalmi) volt hangsúlyosabb. Összességében a kapcsolt hő- és villamosenergia-üzem érte el a legmagasabb fenntarthatósági értéket, megelőzve a másik öt biofinomítót, amelyek mindegyike termelt bioetanol is.

*Kaenchan és szerzőtársai* [2019] egy rekurzív, dinamikus általános egyensúlyi modell (*recursive dynamic computable general equilibrium model*) segítségével elemezte a manióka- és a melaszalapú bioetanol-termelés társadalmi-gazdasági és környezeti hatásait Brazíliában. Társadalmi-gazdasági szempontból a nagyobb bioetanol-termelésnek és az alapanyag-termelés magasabb hatékonyságának volt a legnagyobb hatása. Bár a benzin és a bioetanol közötti nagyobb árkülönbség növeli a bioetanol-előállítás gazdasági teljesítményét, ezt azonban nem a benzin adójának a növelésével, hanem a bioetanolra kivetett jövedéki adó csökkentésével kell elérni. A környezeti oldal szempontjából figyelembe kell venni a nagyobb öntözésivíz-igényt és az alacsonyabb károsanyag-kibocsátást.

*Haputta és szerzőtársai* [2020] általános egyensúlyi modellezést és életciklushatás-elemzést használt a thaiföldi bioetanol-termelés bővítése (+10,1 százalék maniókás és +5,7 százalék melaszalapú) fenntarthatóságának elemzéséhez. Számításai szerint ez nagyságrendileg 2 milliárd dollár nettó hasznot jelentene a társadalom számára a 2016–2026 közötti időszakban. Ezt az összeget az alapanyag-termelés nagyobb hatékonysága 2,8 milliárd dollárra növelhetné, míg a benzin kiváltásának nettó környezeti haszna körülbelül 100 millió dollár lenne. *Kaenchan és szerzőtársai* [2019] eredményeivel ellentétben nem tudtak pozitív összefüggést kimutatni a benzin és a bioetanol-keverék közötti nagyobb árkülönbőség és a bioetanol-termelés bővülése között.

*Mandegari és szerzőtársai* [2018] nyolc különböző – cukorgyárak mellé telepített – biofinomító forgatókönyvének gazdasági, környezeti és energetikai hatásait elemezte. A kipréselt cukornád alapanyagként történő felhasználása mellett a tejsav előállításával lett a nettó jelenérték a legmagasabb, míg a bioetanol termelése csak jelentős, 39 százalékos ártámogatás mellett lehetne pénzügyileg működőképes. Ezt a forgatókönyvet a tejsav és a bioetanol együttes termelése követte. A környezeti előnyök azonban a fő terméktől (bioetanol, tejsav, metanol és bioetanol-tejsav) és a felhasznált energia típusától (kipréselt cukornád vagy szén) függetlenül minden esetben jelentkeztek.

*Carpio és szerzőtársai* [2021] a nettó jelenérték és a globális felmelegedési potenciál (*Global Warming Potential*) alkalmazásával elemezte egy integrált biofinomító gazdasági és környezeti hatásait. A kettő között egyértelmű inverz kapcsolat mutatott ki, vagyis az alacsonyabb enzim- és szilárdanyag-felhasználás alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátást, de alacsonyabb bioetanol-hozamot is eredményez. Az optimalizált integrált biofinomító képes lenne több bioetanol előállítására, azonban ennek a nagyságát 13 százalékkal kell tartani, különben a folyamat gazdaságilag veszteségesé válik. Ezen a karbonkredit bevezetése javíthatna, például 15,77 dolláros ár mellett 20 százalékkal több bioetanol előállítására lenne lehetőség. A karbonkredit használata tehát Brazíliában közvetlen kapcsolatot teremtené a környezeti és a gazdasági hatékonyság között.

*Demichelis és szerzőtársai* [2020] három biomassza-kategóriában alkalmazott technikai, gazdasági és környezeti értékelést: cukoralapú (cukornád), keményítőalapú (burgonya) és lignocellulóz-alapú (rizsszalma, szarvasmarhatrágya, a települési szilárd hulladék szerves része). Eredményei alapján az összes biofinomító működése nyereséges volt. Nem meglepő, hogy a cukornádalapú termelés nettó jelenértéke volt a legmagasabb (0,85 millió dollár), amelyet a települési szilárd hulladék szerves része követett (0,39 millió dollár). Az előbbinél volt a legmagasabb a beruházásarányos megtérülés, a burgonyaalapú bioetanol-termelés a második, míg a települési szilárd hulladék szerves részén alapuló volt a harmadik (15,7, 15,6 és 10,1 százalék). A cukornádra épülő bioetanol-előállítás jó gazdasági teljesítményét a magasabb bioetanol-hozam és a kiforrottabb technológia magyarázza. Ugyanakkor ennek a biomasszáknak a használata nyújtotta az egyik legrosszabb környezeti teljesítményt, míg a szarvasmarhatrágyából és a települési szilárd hulladék szerves részéből történő előállítás eredményezte a legjelentősebb környezeti megtakarítást.

*Lignocellulóz-alapú bioetanol-elemzések*

Az első generációs bioetanol-termeléshez mindössze néhány alapanyagot használnak fel (főleg cukornád, kukorica, cukorrépa), míg a kombinált biofinomítók jellemzően az ezek felhasználása során keletkező hulladékkal dolgoznak a minél költségghatékonyabb termelés érdekében. A lignocellulóz-alapú bioetanol-termelés kapcsán ki kell emelni, hogy az alapanyagok sokfélesége nem teszi lehetővé egyforma biomassza-alapú erőművek létesítését, azokat mindig „testre kell szabni” (*Sikarwar és szerzőtársai* [2017]). *Manochio és szerzőtársai* [2017] a „hulladékból energia” megközelítést javasolta, hangsúlyozva, hogy az erre a célra telepített, különböző integrált biofinomítókat mindig egyedileg kell értékelni. A létesítés mellett azonban az alkalmazott technológia legalább ennyire fontos. *Kristianto–Zhu* [2017] életciklus-elemzést és műszaki-gazdasági optimalizálást alkalmazott a rizsszalmaalapú bioetanolgyártási folyamat egészére (a bölcsőtől a sírig) Indonéziában. Kedvezőbb gazdasági, környezeti és társadalmi hatások érhetők el, ha optimalizálják az ellátási lánc különböző szakaszait (termelés, logisztika, gőzturbina).

*Carpio–De Souza* [2017] összefoglalta a lignocellulóz-alapú bioetanol-termelés előnyeit és hátrányait. A fő előnyök között szerepelt az alacsony földhasználati hatás, az alacsony alapanyagköltség és szén-dioxid-kibocsátás, valamint a rugalmas, integrált termelés. A legjelentősebb hátrányok közé pedig a technológia fejletlenségét, valamint az előkezelés és a hidrolízis magas költségeit (nyersanyagok és enzimek) sorolták a szerzők. *Hassan és szerzőtársai* [2019] a termék alapú biofinomítást javasolta a lignocellulózra épülő biofinomítók széles körű elterjedéséhez az Európai Unió ambíciós klímaváltozási és fenntartható fejlődési céljainak elérése érdekében. A maradványok és hulladékok felhasználásával a környezeti előnyök még nagyobbak, mivel a hulladékgazdálkodás hozzáadódik az üvegházhatású gáz kibocsátásának mérsékléséhez és a szén-dioxid-szennyezés csökkentéséhez. Gazdasági szempontból a biomasszák széles skáláját használó, nagyobb értékű végtermékeket előállító kombinált termelés a leglényegesebb a költségghatékonyaság szempontjából.

*Gonzalez–Contreras és szerzőtársai* [2021] 24 második generációs bioetanol-termelési konfigurációt hasonlított össze. A szerzők a globális intenzitási kritériumot alkalmazták, amely egyesíti a gazdasági, energetikai és környezeti szempontokat. Ennek alapján a legjobb megoldás egy klasszikus második generációs bioetanol-üzem, hígított savas előkezeléssel, desztillációval a bioetanol elválasztására/tisztítására, szennyvízkezeléssel, kapcsolt energiatermeléssel és a hőintegrálás elemzésének a segítségével. Ennek az opciónak a legfontosabb paraméterei a következők voltak: globális intenzitási kritérium literenként 0,387, energiamegtérülés literenként 1,26, és a termelési egységköltség literenként 0,47 dollár. A pozitív környezeti hatások mellett az előállítás költsége versenyképes lenne a jelenlegi első generációs technológiákkal (vö. 2. táblázat).

Hasonlóan *Padi–Chimphango* [2020] munkájához, *Nieder–Heitmann és szerzőtársai* [2019] is az életciklus-fenntarthatósági elemzést alkalmazta. A szerzők hat különböző, cukornád-lignocellulózon alapuló biofinomítót hasonlítottak össze, és egyértelmű fordított kapcsolatot találtak a környezeti és a műszaki-gazdasági

teljesítmény között. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a jobb környezeti teljesítmény elérése többletköltséggel jár, és fordítva. Eredményeik szerint a legmegfelelőbb forgatókönyv a bioenergia-önellátó borostyánkősav és polihidroxibutiráttal biofinomító, ahol ennek a fordított irányú kapcsolatnak a hatása elhanyagolható mértékű volt. Ez a biofinomító nyújtotta a második legjobb pénzügyi és környezeti teljesítményt, valamint a – munkahelyteremtésben mért – legjobb társadalmi teljesítményt. Mivel a cukornád termesztése számos negatív környezeti hatásért felelős, ezért fontos a hatékonyabb műtrágya-felhasználás és az optimalizált szállítás. Ezenkívül a kapcsolt hő- és villamos energia alkalmazása a biofinomítóknál elengedhetetlen a termelés szénlábnyomának a csökkentéséhez.

*Vikash és szerzőtársai* [2018] a kiperéselt cukornádon és a cukornádhulladékon alapuló bioetanol-termelést elemezte egy indiai cukorgyárban. A bioetanol literenkénti legalacsonyabb előállítási ára nagyjából 1 dollár volt, ami 31,25 százalékkal magasabb, mint a kormányzati célár. Ez az ár ráadásul nem tartalmazza az alapanyagköltséget, a termelési profitot és az elosztás költségeit. A cellulóz-alapú bioetanol előállítása tehát jelenleg még nem jövedelmező, míg környezeti szempontból a legjobb opció a cukornádhulladék gazdaságon belüli hasznosítása. Mindez – a kisebb műtrágya-felhasználás révén – 82 százalékkal csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását.

*Palma-Rojas és szerzőtársai* [2017] hibrid életciklus-elemzéssel vizsgálta meg a brazil kiperéseltcukornád-alapú bioetanol-termelést. A szén-dioxid-kibocsátás szempontjából jól teljesített, azonban a teljes életciklus-értékelés alkalmazása elengedhetetlen a reális eredményhez. A gazdasági hatásokat a munkahelyteremtéssel és a jövedelem növekedésével mérték. Mivel sok bioetanol-üzem található a vidéki területeken, ezért gazdasági szempontból különösen fontosak.

*Da Silva és szerzőtársai* [2018] összehasonlító elemzése alapján a lucfenyő bizonnyult a legolcsóbb második generációs nyersanyagnak. Ha figyelembe vesszük a felhasználható összes cukor (cellulóz és hemicellulóz) mennyiségét, akkor viszont az eukaliptuszfából a legolcsóbb a bioetanol előállítása. Az elméleti bioetanol-hozammal számolva ez literenként mindössze 13,76 dollárcentet eredményezne. Habár a nyárfa elméleti bioetanol-hozama a legmagasabb a kilenc elemzett nyersanyag közül, azonban egyúttal az egyik legdrágább is, ami a végtermék árát jelentősen megnöveli. A szerzők még a kukoricaszárat emelték ki, mivel relatíve olcsó, és ráadásul széles körben elérhető, így elméletileg 14,35 dollárcentbe kerülne egy liter bioetanol előállítása. A gazdasági érték és a környezeti hatás együttes elemzésével (*combined economic value and environmental impact analysis*) megállapították, hogy a cellulózalapú bioetanolnál az elnyelésre kerülő szén-dioxid meghaladja a termelés során kibocsátottat. Kiemelésre érdemes, hogy az alacsonyabb bioetanol-hozam környezeti hatása kedvezőbbnek bizonyult, mivel a termeléshez kapcsolódóan sokkal kevesebb szén-dioxid keletkezett.

*Campbell és szerzőtársai* [2018] megvizsgálta a nyárfaalapú második generációs bioetanol-ipar lehetőségeit Kanadában. Ez a magas nyersanyag-, tőke- és működési költségek miatt gazdaságilag még nem megvalósítható, illetve a hagyományos bioetanolal összehasonlítva nagyobb (1,81-szor nagyobb) támogatást igényelne. A cellulózalapú bioetanol előállítási költsége az Egyesült Államokban literenként

1,98 dollár, míg Kanadában a magasabb tőkeköltés miatt ennél is több. Ugyanakkor a második generációs bioetanol használatával az üvegházhatású gázok kibocsátása jelentősen, körülbelül 40–130 százalékkal lenne csökkenthető. A szerzők többségének véleményével ellentétben az első és második generációs bioetanol együttes gyártása nem reális lehetőség Kanada számára a jelenlegi alacsony termelési intenzitás miatt.

*Galanopoulos és szerzőtársai* [2020] a vegyes egész értékű lineáris programozással (*mixed-integer linear programming*) és a gazdasági érték és a környezeti hatás elemzésével (*economic value and environmental impact analysis*) vizsgált egy gabonaszalmával működő biofinomítót, amely bioetanol, etil-levulinátot és villamos energiát állít elő. Az eredményei alapján négy, a szalmatermelő területek közelébe telepített biofinomító lenne az optimális megoldás, amely gazdasági és környezeti előnyökkel egyaránt járna. *Ghosh és szerzőtársai* [2017] szerint a rizs- és búzaszalmán alapuló, kizárólag biokémiai úton történő előkezelést alkalmazó módszer a legígéretesebb lehetőség a cellulózalapú bioüzemanyag előállítására. Jelenleg azonban még nincs környezetbarát és költséghatékony lignocellulóz-lebontási módszer, így a második generációs bioüzemanyag-termelés nem lehet fenntartható. *Cheng és szerzőtársai* [2020] szintén a búzaszalma hasznosítási lehetőségeit vizsgálta. Életciklus-összehasonlító elemzés alapján az áramtermelési célú közvetlen elégetés, a bioetanol-gyártás és a takarmány-előállítás közül a bioetanol-gyártás környezeti teljesítménye lett a legjobb. A legjelentősebb gazdasági hasznot azonban a takarmánycélú felhasználás nyújtotta, ami tonnánként 160,24 dollár volt, szemben a bioetanol-termelés tonnánkénti 121,37 dolláros értékével. *Soam és szerzőtársai* [2018] az indiai, rizsszalmán alapuló bioetanol környezeti és gazdasági kérdéseit vizsgálta életciklus-elemzéssel. Ennek keretében a szerzők a hagyományos előkezelést négy különböző, módosított előkezelési forgatókönyvvel hasonlították össze. Eredményeik alapján az extrakcióhoz áztatóközegként a csak vizet használó módosított előkezelés összteljesítménye volt a legjobb. Ennek a lúgmentes áztatóközeg volt a fő oka a környezeti oldalon, míg az alacsonyabb enzimmennyiség és a viszonylag magas hozam (242 liter bioetanol 1 tonna száraz biomasszából) a gazdasági oldalon. Emellett ez az opció eredményezte a legalacsonyabb bioetanol-eladási árat (literenként 0,70 dollár).

*Sadhukhan és szerzőtársai* [2019] 32 különböző bioetanol-alapanyagot elemezt Mexikóban. Ennek során számszerűsítette a környezeti hatást (fenntarthatóság) és gazdasági hatásként a minimális bioetanol-eladási árat. Az előbbi környezeti előnyök és a környezeti költségek különbsége, míg az utóbbi figyelembe veszi az éves beruházási tőkeköltés, az éves működési költségeket és a lignocellulóz-alapanyagok költségét. A szerzők *Da Silva és szerzőtársai* [2018] eredményeivel ellentétben megállapították, hogy a kukoricaszár környezeti hatása negatív az alacsony lignintartalma miatt, ami nem teszi lehetővé a fosszilis energiaforrások nagyfokú helyettesítését. Eredményeik alapján a rizshéj, a fűrészpor, az árpahéj, a fenyőfa és a kávépép nyújtják a legnagyobb környezeti előnyöket. Ez a lista azonban alig fedett át a gazdasági listával, mivel például a kávépépnek a legnagyobb a minimális bioetanol-eladási ára. Ezenkívül azt is ki kell emelni, hogy a 32 elemzett alapanyag egyike sem nyújtott az Egyesült Államokból importált bioetanol



gallononkénti 1,5 dolláros áránál alacsonyabb minimális eladási árat. Ez azt jelenti, hogy jelenleg egyik elemzett nyersanyag sem lehet nyereséges a bioetanol-importtal szemben. Pusztán gazdasági szempontból a búzaszalma (gallononként 2,05 dollár), a kaucsukfa (gallononként 2,07 dollár) és az égerfa (gallononként 2,07 dollár) teljesítettek a legjobban.

*Khounani és szerzőtársai* [2019] műszaki-gazdasági módszerrel elemezte a pórsáfrányalapú bioetanol-termelést. A szerzők szerint ebből a növényből literenkénti 0,43 és 0,67 dolláros eladási áron lehetne bioetanol előállítani a biokatalizátorként használt mikroorganizmustól függően. A különféle melléktermékek (biodízel, biogáz, glicerin, szilárd növényi hulladék és nátrium-szulfát) értékesítése tovább növelné a jövedelmezőséget. A lignocellulóz-tartalmú pórsáfrány használata fenntarthatóbb, mint az első generációs alapanyagokkal történő termelés. Az érzékenységi vizsgálat alapján a diszkontráta és a pórsáfránymag ára a legfontosabb változók.

*Wang és szerzőtársai* [2019] a vízijácint használatát értékelte lehetséges nyersanyagként. A hulladéklerakáshoz képest a vízijácint-alapú bioetanol-termelés gazdasági és környezeti szempontból is jobb, mivel 2,64 százalékkal nagyobb a nettó jelenértéke, és csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását is. Meg kell jegyezni, hogy bár az előállítási költsége literenként 1,24 dollár, de a vízminőség-javítás értékét is a bevételek közé kellene számolni. Önmagában a bioetanol előállítása nem jövedelmező, de a környezeti előnyök alátámaszthatják az állami támogatást.

*Amid és szerzőtársai* [2021] ipari méretű, melaszalapú bioetanol-termelési rendszert elemzett három mutató (exergiai, exergogazdasági és exergokörnyezeti) segítségével. Az exergiaelemzés az exergia általános kérdéseivel foglalkozik, és az inputoknak és outputoknak nemcsak a mennyiségét, hanem a minőségét is figyelembe veszi. Jelen esetben ez eléggé kedvezőtlen. A szerzők által azonosított fő probléma a termelési folyamat alacsony energiamérlege, mivel az előállított energia mindössze 35,9 százalékát tette ki a felhasznált energiának. Ennek a fő oka a jelentős exergiavesztés. Az exergogazdasági elemzés számszerűsíti az összes költséget, míg az exergokörnyezeti elemzés a környezeti hatásokat foglalja össze. Ezek egyike sem mutatott azonban ígéretes képet. Az exergiavesztés jelentősen megnövelte az exergogazdasági költségeket, míg a bioetanol gyártása során felhasznált jelentős mennyiségű földgáz elégetésének komoly negatív környezeti hatása van. Az eredmények egyben megmutatták a megoldási irányokat is. A veszteségek mérséklése növelné a termelés exergiai és exergogazdasági értékét, míg a földgáznak valamilyen megújuló energiával történő kiváltása kedvezőbb exergokörnyezeti értéket eredményezne.

*Duarte és szerzőtársai* [2021] a kávétermelés maradványainak (szár, pép és nyálka) felhasználásával három különböző nagyságú kolumbiai bioetanol-üzem gazdasági, környezeti és társadalmi hatásait elemezte. Sikerült kimutatni a méretgazdaságosságot, mivel a legnagyobb termelési kapacitású üzemnek volt a legalacsonyabb becsült literenkénti előállítási költsége (0,608 dollár) és szén-dioxid-kibocsátása (1296 kg/szén-dioxid-egyenérték a bioetanol literjére vetítve). Mivel az előállítási költség alacsonyabb, mint az átlagos bioetanolár, a kávétermelés maradványai ígéretes alternatívának tűnnek. Az érzékenységvizsgálat alapján a cellulózalapú bioetanol előállítási költségére a nyersanyag árának van messze a legjelentősebb hatása.

*Berazneva és szerzőtársai* [2021] hibrid termo- és biokémiai üzemet javasolt, amely bioetanolt és bioszént állít elő kukoricamaradványokból. Az öt kenyai kísérleti üzem közül csak a legolcsóbb alapanyagot használó nettó jelenértéke volt pozitív, de a belső megtérülési rátája alacsonyabb volt, mint ami egy ilyen magas kockázatú beruházástól elvárt. A szerzők hangsúlyozták a létesítmény körülmények elhelyezésének a fontosságát is, mivel az nagy hatással van a működtetés pénzügyi és környezeti teljesítményére. A jövedelmezőség az alapanyagköltségre és a végtermékek árára volt a legérzékenyebb, ezért fontosak az ezekhez kapcsolódó kormányzati támogatások (például inputtámogatás, garantált bioetanolár). Ezenkívül figyelembe kell venni a nem pénzügyi előnyöket is, például az éghajlatváltozás mérséklését.

*Safarian–Unnthorsson* [2018] a települési szerves hulladékokon alapuló bioetanol fenntarthatóságát elemezte Izlandon. Háromfajta hulladékot (papír és karton, faanyag és fa, kerti hulladék) hasonlított össze, mindegyiket négy előkezelési módszerrel feldolgozva. A papír- és kartonalapú bioetanolok bizonyultak fenntarthatósági szempontból a legjobbnak, a következők miatt:

- a legalacsonyabb termelési költség, különösen gőzzel történő bontás esetén (literenként 1,3 dollár);
- a legnagyobb output/input energia arány (majdnem 3), mivel ehhez a folyamat-hoz csak (kis mennyiségű) víz szükséges;
- a legkisebb szén-dioxid-kibocsátás (880 kilogramm szén-dioxid-egyenérték/1000 kilogramm bioetanol); valamint
- a legkisebb vízfelhasználás (tonnánként 2,98 köbméter).

*Sikarwar és szerzőtársai* [2017] szerint a szintézisgázból előállított bioüzemanyagok komoly lehetőségeket kínálnak, azonban velük kapcsolatban még számos kérdés – például technológiai problémák, a magas termelési költségek vagy a támogató kormányzati politika – vár megoldásra. A nem első generációs bioüzemanyagokat jelenleg nem lehet költséghatékony módon előállítani, de vannak olyan ígéretes technológiák, amelyekkel ez a jövőben elérhető lesz, mint például a különböző biomassza-gázosítási technológiák.

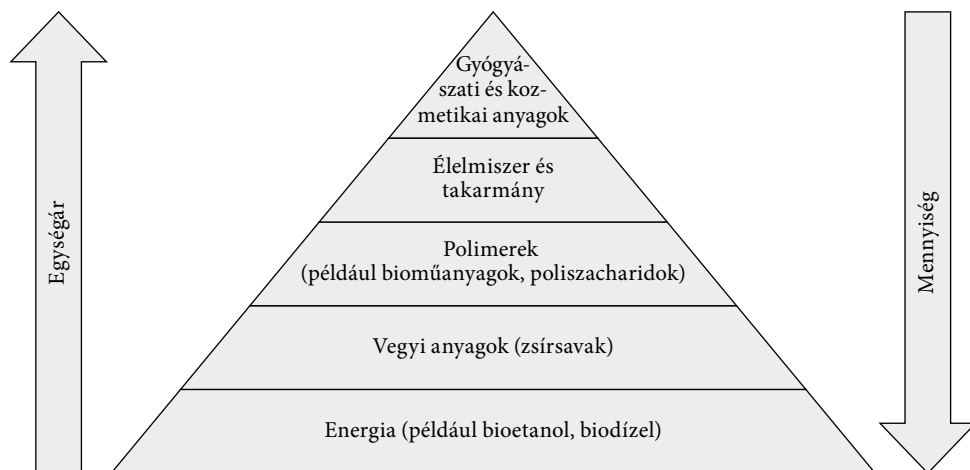
### *Algaalapú bioetanol-termelés*

A harmadik és negyedik generációs bioetanol-termelésben egyaránt fontos szerepük van a mikroalgáknak, amelyek a termeléshez mindössze napfényt, szén-dioxidot és vizet igényelnek.

*Kumar és szerzőtársai* [2021] bemutatta a jelenlegi algaalapú bioüzemanyag-termelés fő gazdasági kihívását: a termelés jelentős része alacsonyabb értékű (például a bioetanol), míg csak a kisebb hányadának van nagyobb értéke (például élelmiszer vagy kozmetikum). Az algából előállítható termékek piramisstruktúráját szemlélteti a 2. ábra. Ami a környezeti kérdéseket illeti, az algára épülő biofinomító révén csökken a szén-dioxid-kibocsátás, azonban a termelési folyamat szárítási része fosszilis energiára támaszkodik, ami komoly negatív hatással van a globális felmelegedésre.

## 2. ábra

Az algaalapú termékek piramisstruktúrája



Forrás: Kumar és szerzőtársai [2021].

Chia és szerzőtársai [2018] kutatása alapján az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkenésével és a szén-dioxid megkötésével mérve az algaalapú bioüzemanyagok környezetbarátabbak, mint a fosszilis tüzelőanyagok. Az algaalapú biogáz termelése azonban gazdaságilag előnyösebb, mint a bioetanolé, mert az előbbihez a biomassza teljes mennyiségét fel lehet használni, míg az utóbbihoz csak a szénhidrátokat. A magas alapanyagköltség a drága algaalapú bioetanol-előállítás egyik fő oka.

Kumar és szerzőtársai [2021] rámutatott, hogy kizárólag a biofinomítókkal lehet hatékonyan előállítani a bioüzemanyagokat, mivel a komplex termelési folyamat lehetőséget nyújt különféle megújuló termékek előállítására (bioetanol, biodízel, bioolaj stb.). Az algaalapú biomassza fenntartható és gazdaságilag életképes termelési lehetőségeket kínál. A szerzők ugyanakkor azt is hangsúlyozták, hogy a gazdaságos, iparszerű termelés elindítása még egy ideig kihívást fog jelenteni.

Ogbonna-Nwoba [2021] a mikroalga-alapú bioüzemanyagok előállításához bioalapú ülepítőszerkeket javasolt. A szerzők megállapították, hogy ezek a fenntartható és környezetbarát mikroalga-alapú biomassza-előállítás ígéretes eszközei a nyereséges bioüzemanyag-termelés érdekében. Mindazonáltal még mindig sok akadály van a nagyüzemi mikroalga-alapú bioüzemanyag-előállításnak.

Saad és szerzőtársai [2019] áttekintést ad az algaalapú bioüzemanyagokról, különös tekintettel a nagyüzemi termelésre. Az általánosan elfogadott környezeti előnyök fokozhatók például szennyvíz felhasználásával, áramtermeléssel vagy biotrágya előállításával. A szennyvíz azonban különböző szennyeződésekkel tartalmazhat, illetve a szennyvíztisztító telepek általában távol vannak az algatermelő helyszínektől. Az algaalapú bioüzemanyagok előállítása a magas beruházási és működési költségek miatt drága. Emellett jelenleg az energiamérlegük csak 0,13–0,71 közötti, míg a kívánatos küszöbérték 3 lenne.

*Shuba–Kifle* [2018] összefoglalta a mikroalga-alapú bioüzemanyagok előállításának főbb problémáit, valamint azok lehetséges megoldásait. A jelenleg használt két algatenyésztési rendszer a nyitott tavas és a fotobio-reaktoros. Előbbi alacsonyabb tőke- és működési költségei miatt sokkal gyakoribb (90 százalék feletti részarány), azonban a hőmérséklet szabályozása és a vízgazdálkodás nehézségekbe ütközik, a termelési folyamat pedig nagyobb mennyiségű tápanyagot igényel. A fotobio-reaktorok könnyebb, biztonságosabb és rugalmasabb gyártást tesznek lehetővé, azonban legalább 100-szor drágábbak, mint a nyitott tavas rendszerek. A szerzők a tápanyagok szintjén a szennyvíz és a füstgázok alkalmazását javasolták. A kedvezőbb tulajdonságú fajok nemesítéssel vagy genetikai módosítással válhatnak alkalmasabbá például a hőmérséklethez, a víztelenítéshez vagy az alacsony bioetanol-hozamhoz kapcsolódó problémák enyhítésére. Az értékes melléktermékek és a forradalmian új fotobio-reaktorok a költségcsökkentés kulcsfontosságú eszközei.

*Barsanti–Gualtieri* [2018] a mikroalgák gazdasági és energetikai fenntarthatóságát elemezte. Más szerzőkkel összhangban a szerzők a mikroalga-alapú bioüzemanyagokat egyik dimenzióban sem találták fenntarthatónak, még a rendelkezésre álló legjobb helyszín és technológia alkalmazásával sem (például trópusi helyszín, tökéletes technológia). Az előállítási költség továbbra is magas a fosszilis riválishoz képest, míg a nettóenergia-arány 1 alatt van. Jelenleg a mikroalga-alapú bioüzemanyagokat csak melléktermékként érdemes előállítani, a magas értékű főtermékek pedig kompenzálhatják a nettó energia alacsony arányát.

*Bibi és szerzőtársai* [2017] a különböző algaalapú bioetanol-előállítási technológiákat (különböző termesztés, betakarítás, extrakció és tömegtermelés) hasonlították össze. Meghatározták az algaalapú bioetanol fő környezeti előnyeit és gazdasági akadályait. Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése és az édesvizek védelme egyértelműen mellette szólnak, különösen, ha a termeléshez szennyvizet használnak. A gazdasági akadályok azonban jelentősek, és alapvetően a (jelenleg) drága termelésből származnak, beleértve a tőkeköltséget, az inputokat, az alacsony termelékenységet és az értékes melléktermékek hiányát. A rövid távú pénzügyi ösztönzők egyike lehet a szennyvíz-kibocsátási egységek (*waste water treatment credits*) használata.

*Klein és szerzőtársai* [2018] intelligens logisztikai hálózatokkal működő, integrált mikroalgaüzemek létesítését javasolta. A gyártási folyamat során a légköri széndioxid is felhasználható, azonban a nagy sűrűségű mikroalga-kultúrák további széndioxidot igényelnek, például az első generációs bioetanolgyárak füstgázait. Ez az oka annak, hogy a brazil cukornádalmok tökéletes jelöltek az integrációhoz, mivel a bioetanol fermentációja és a vinasz anaerob lebontása során egyaránt széndioxid szabadul fel. A termelés másik fő inputja a víz, ezért a szennyvíz felhasználása környezetvédelmi és gazdasági szempontból is előnyös. A mikroalga-alapú termelés érdemi növelése azonban több támogatást és pénzügyi forrást igényel.

*Dasan és szerzőtársai* [2019] a mikroalga-alapú biodízel előállítására koncentrált, ahol a visszamaradó biomasszát alakították át bioetanolá. Ez a melléktermék részét képezte az energia-, a széndioxid- és a gazdasági/költség-életciklus-elemzéseknek. Ezen dimenziók egyikében sem bizonyult életképesnek a technológia, alapvetően a biomassza-szárítás és a lipidkivonás nagy energiaigénye miatt. A bioetanol

előállítására ráadásul mindezt negatívan befolyásolta. Az energia- és szén-dioxid-egyenlege is negatív volt, miközben a termelési költsége csaknem 30-szorosa volt a fosszilis üzemanyagénak. Ezek az eredmények azonban rámutattak a jövőbeli kutatási és fejlesztési irányokra: a fosszilis energiaforrások megújuló energiával történő helyettesítése a gyártási folyamat során, magasabb termelékenyséű algafajok használatával, valamint költséghatékonyabb technológiák kifejlesztése.

## Összefoglalás és következtetések

A folyamatosan növekvő energiaigény fenntartható kielégítése komoly kihívás az emberiség számára. A közlekedésben ennek egyik eszköze a bioetanol, amely jelenleg az egyetlen gazdaságosan előállítható üzemanyag a benzin kiváltására. A legjelentősebb termelő az Egyesült Államok és Brazília, ketten együtt az össztermelés 74 százalékát adják. Az alacsony olajár mellett azonban még a leghatékonyabb termelők sem mindig versenyképesek, ezért a bioetanol előállításához állami ösztönzőkre van szükség (kötelező bekeverési arány, adókedvezmény stb.).

Az elemzéshez a leválogatott, gazdasági és fenntarthatósági szempontokat ötvöző szakkikket négy kategóriába soroltuk be: első generációs bioetanol, integrált/kombinált biofinomítóban történő termelés, lignocellulóz-alapú termelés, valamint algaalapú bioetanol-előállítás. A kategóriák a nyersanyag(ok) és a végtermék(ek) alapján térnek el:

- az első generációs technológia esetében a nyersanyagok étkezési célra is felhasználhatók, és a fő termék a bioetanol;
- az integrált biofinomítóban egynél több nyersanyagot használnak, és a bioetanol mellett legalább még egy fő terméket állítanak elő (például cukrot vagy elektromos áramot); a kombinált termelésnél az üzemben belül párhuzamosan folyik az első és a második generációs bioetanol termelése (például a kukorica és a szárának felhasználása);
- a lignocellulóz-alapú termelés során alapvetően nem ehető nyersanyagokat használnak fel (nagy cellulóztartalmú növények/hulladék);
- az algaalapú termelés a különböző mikro- és makroalgák felhasználásával zajlik.

Az első generációs bioetanol esetében megegyezik a szakirodalom értékítélete: minden szempontból (energiamérleg, üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése, előállítási költség) a cukornád a legjobb alapanyag. A legsikeresebb, brazil modellnek azonban annyi egyedi eleme van (például magas bekeverési arány, magas cukornádhozam akár évi két aratással), hogy ezt máshol nem lehet ebben a formában átültetni a gyakorlatba. Azt is ki kell emelni azonban, hogy a foglalkoztatottság szempontjából a kézi betakarítás előnyösebb a gépinél. A technológia vonatkozásában kiemelt jelentőségű az energiaszükséglet kiváltása minél nagyobb mértékben megújuló energiával.

Az integrált termelés szempontjából a legjobban szintén a cukornádalapú rendszer teljesített, amikor ugyanazon üzemben bioetanol és cukor együttes termelése folyik. A működés jövedelmezősége ráadásul egyenes arányban nő a termelés nagyságával. Ugyanakkor ígéretes lehetőség olyan komplementer nyersanyagok

használata, amelyek a termelés több fázisában is használhatók, például a bioetanol oldószerként vagy a hulladék energiatermelésre. A kombinált biofinomítók használata csökkenti a második generációs termelés jelenleg sokkal magasabb beruházási és működési kockázatát, valamint az alapanyagköltséget is az alacsonyabb szállítási költségen keresztül. Az első generációs termelés melléktermékeinek (melasz, szárított gabonatörköly) továbbfeldolgozása sok lehetőséget rejt magában. A technológia szempontjából az egyidejű cukrosítás és fermentálás révén lehet elérni a legjobb eredményt, azonban a jövőre nézve a legfontosabb a bioetanol hozamának a növelése. Fontos kiemelni, hogy a fenntarthatóság különböző dimenziói között általában ellentétes irányú a kapcsolat, vagyis például a jobb gazdasági teljesítmény jellemzően rosszabb környezetit eredményez.

A lignocellulóz-alapú bioetanol számos előnnyel jár (például alacsony földhasználati hatás és szén-dioxid-kibocsátás), azonban komoly hátrányai is vannak (például a technológia fejletlensége, valamint az előkezelés és a hidrolízis magas költsége). A szakirodalomban egyetértés mutatkozik abban is, hogy a második generációs bioetanol használatával az üvegházhatásúgáz-kibocsátásban jelentősebb csökkentés érhető el az első generációhoz képest. Ráadásul a különféle maradványok és hulladékok felhasználásával a környezeti előnyök növelhetők. Fontos azt is kiemelni, hogy az alapanyagok sokfélesége miatt nem lehet két egyforma üzemet építeni, azt mindig egyedileg kell megtervezni. Az átváltás itt is megfigyelhető volt, az egyik fenntarthatósági dimenzióban történő elmozdulás egy másikban ellentétes hatást váltott ki. Gazdaságilag a második generációs termelés jelenleg nem versenyképes az első generációval.

Az algaalapú bioüzemanyag-termeléssel tovább növelhetők a környezeti előnyök, azonban ezzel párhuzamosan a termelési költségek is jelentősen megugranak. Az előbbit beárnyékolja a szárítási folyamat jelentős energiaigénye, ami jelenleg ráadásul fosszilis energiára támaszkodik. Továbbá a termelés jelentős része (például a bioetanol) relatíve olcsó, és csak a kisebb hányada értékes (például a kozmetikumok). Emiatt a bioüzemanyagok termelése jelenleg csak melléktermékként képzelhető el. A gazdaságos, iparszerű termelés várhatóan még hosszú ideig nem lesz megvalósítható. Ennek érdekében a következő lehetőségek ígéretesek: a szennyvíz és a füstgázok alkalmazása, kedvezőbb tulajdonságú fajok használata (nemesítés vagy genetikai módosítás) például a víztelenítéshez vagy az alacsony etanolhozamhoz kapcsolódó problémák enyhítésére.

A 3. táblázat a bioetanol gazdasági és fenntarthatósági szempontú elemzésének leglényegesebb elemeit foglalja össze. A részletesen áttekintett szakirodalom alapján levonható néhány általános következtetés:

- az első generációs termelés számos probléma miatt nem lehet végleges megoldás, de jelenleg az egyetlen, amely a benzin kiváltására használható;
- a nem első generációs bioetanol-termelés jelenleg gazdaságtalan, ösztönzéséhez erős kormányzati támogatásra van szükség, de a környezeti teljesítmény a generációk számának növekedésével arányosan javul;
- a nem első generációs termelés esetében a hulladékok és melléktermékek használata egyaránt javíthatja a gazdaságosságot és fenntarthatóságot – ebből a szempontból felértékelődik a logisztika szerepe;

## 3. táblázat

A szakirodalmi feldolgozás összefoglalása

	Első generációs technológia	Integrált/kombinált biofinomító	Lignocellulóz-alapú termelés	Algaalapú bioetanol
Fő alapanyagok	cukornád, kukorica	cukornád, kukorica	fafélék, papír, különféle hulladék	algák
Előállítási költség (dollar/liter)	≈ 0,4	≈ 0,5	≈ 0,7–2	≈ 10–20
Legfontosabb termékek	bioetanol	bioetanol, illetve cukor és villamos energia	bioetanol	vegyi anyagok, élelmiszer, kozmetikum
Legfontosabb melléktermékek	melasz, szárított gabonatorrköly	alkohol, bioszén, lignin	lignin, gázok, szilárd növényi hulladék	bioetanol
Az üvegházhatású gázok és a szén-dioxid kibocsátásának csökkentése (százalék)	≈ 30–90	az első és a második generációs közötti	≈ 40–130	akár negatív egyenleg

*Forrás:* saját összeállítás.

– kizárólag a komplex fenntarthatósági elemzések adhatnak megfelelő eredményt, amelyek legalább a környezeti, gazdasági és társadalmi pilléreket tartalmazzák.

A kapott eredmények további kutatási irányokat is kijelölnek, mint például a bioetanol-termelés más vetületeinek (például társadalmi vagy politikai) elemzése. Emellett érdekes lenne a kapott négy kategória mindegyikének a részletesebb elemzése is. Végezetül a jelen elemzés során kizárt témákat – például az alapanyag(ok) és/vagy a melléktermék(ek), a termelés technológiája vagy az üzemanyag/energia politika – is érdemes lenne külön megvizsgálni.

*Hivatkozások*

- ALALWAN, H. A.–ALMINSHID, A. H.–ALJAAFARI, H. A. [2019]: Promising evolution of bio-fuel generations. Subject review. *Renewable Energy Focus*, Vol. 28. 127–139. o. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.12.006>.
- AMID, S.–AGHBASHLO, M.–TABATABAEI, M.–KARIMI, K.–NIZAMI, A. S.–REHAN, M.–HOSSEINZADEH-BANDBAFHA, H.–SOUFIYAN, M. M.–PENG, W.–LAM, S. S. [2021]: Exergetic, exergoeconomic, and exergoenvironmental aspects of an industrial-scale molasses-based ethanol production plant. *Energy Conversion and Management*, Vol. 227. 113637. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113637>.

- ARSHAD, M.–ABBAS, M.–IQBAL, M. [2019]: Ethanol production from molasses: Environmental and socioeconomic prospects in Pakistan: Feasibility and economic analysis. *Environmental Technology & Innovation*, Vol. 14. 100317. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100317>.
- AYODELE, B. V.–ALSAFFAR, M. A.–MUSTAPA, S. I. [2020]: An overview of integration opportunities for sustainable bioethanol production from first-and second-generation sugar-based feedstocks. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 245. 118857. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118857>.
- BARSANTI, L.–GUALTIERI, P. [2018]: Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable? *Algal Research*, Vol. 31. 107–115. o. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.02.001>.
- BERAZNEVA, J.–WOOLF, D.–LEE, D. R. [2021]: Local lignocellulosic biofuel and biochar co-production in Sub-Saharan Africa: The role of feedstock provision in economic viability. *Energy Economics*, Vol. 93. 105031. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2020.105031>.
- BIBI, R.–AHMAD, Z.–IMRAN, M.–HUSSAIN, S.–DITTA, A.–MAHMOOD, S.–KHALID, A. [2017]: Algal bioethanol production technology: a trend towards sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 71. 976–985. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.126>.
- BLOOMBERG [2022]: Markets Energy. <https://www.bloomberg.com/energy>.
- CAMPBELL, H.–RUDE, J.–LUCKERT, M.–TAHERIPOUR, F. [2018]: Prospects for second-generation ethanol in Canada: An analysis of economy-wide impacts. *Canadian Public Policy*, Vol. 44. No. 3. 259–271. o. <https://doi.org/10.3138/cpp.2017-047>.
- CARD [2021]: Historical Ethanol Operating Margins. Iowa State University, Center for Agricultural and Rural Development (CARD), Ames, Iowa, [https://www.card.iastate.edu/research/biorenewables/tools/hist\\_eth\\_gm.aspx](https://www.card.iastate.edu/research/biorenewables/tools/hist_eth_gm.aspx).
- CARDOSO, T. F.–WATANABE, M. D.–SOUZA, A.–CHAGAS, M. F.–CAVALETT, O.–MORAIS, E. R.–NOGUEIRA, L. A. H.–REGIS, M.–LEAL, L. V.–BRAUNBECK, O. A.–LUIS, A. B.–CORTEZ BONOMI, A. [2017]: Economic, environmental, and social impacts of different sugarcane production systems. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, Vol. 12. No. 1. 68–82. o. <https://doi.org/10.1002/bbb.1829>.
- CARPIO, L. G. T.–DE SOUZA, F. S. [2017]: Optimal allocation of sugarcane bagasse for producing bioelectricity and second generation ethanol in Brazil: scenarios of cost reductions. *Renewable Energy*, Vol. 111. 771–780. o. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.015>.
- CARPIO, R. R.–DE CARVALHO MIYOSHI, S.–ELIAS, A. M.–FURLAN, F. F.–DE CAMPOS GIORDANO, R.–SECCHI, A. R. [2021]: Multi-objective optimization of a 1G-2G biorefinery: A tool towards economic and environmental viability. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 284. 125431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125431>.
- CHANDRA, V. V.–HEMSTOCK, S. L.–N'YEURT, A. D. R.–SURROOP, D. [2017]: Environmental and economic study for a prospective ethanol industry in Fiji. *Progress in Industrial Ecology, An International Journal*, Vol. 11. No. 2. 146–163. o. <https://doi.org/10.1504/pie.2017.10009839>.
- CHANG, W. R.–HWANG, J. J.–WU, W. [2017]: Environmental impact and sustainability study on biofuels for transportation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67. 277–288. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.020>.
- CHENG, G.–ZHAO, Y.–PAN, S.–WANG, X.–DONG, C. [2020]: A comparative life cycle analysis of wheat straw utilization modes in China. *Energy*, Vol. 194. 116914. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116914>.



- CHIA, S. R.–ONG, H. C.–CHEW, K. W.–SHOW, P. L.–PHANG, S. M.–LING, T. C.–NAGARAJAN, D.–LEE, D.-J.–CHANG, J. S. [2018]: Sustainable approaches for algae utilisation in bio-energy production. *Renewable Energy*, Vol. 129. 838–852. o. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.001>.
- DA SILVA, A. L.–CASTAÑEDA-AYARZA, J. A. [2021]: Macro-environment analysis of the corn ethanol fuel development in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 135. 110387. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110387>.
- DA SILVA, A. R. G.–ERRICO, M.–RONG, B. G. [2018]: Systematic procedure and framework for synthesis and evaluation of bioethanol production processes from lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology Reports*, Vol. 4. 29–39. o. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.08.015>.
- DARDA, S.–PAPALAS, T.–ZABANIOTOU, A. [2019]: Biofuels journey in Europe: currently the way to low carbon economy sustainability is still a challenge. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 208. 575–588. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.147>.
- DASAN, Y. K.–LAM, M. K.–YUSUP, S.–LIM, J. W.–LEE, K. T. [2019]: Life cycle evaluation of microalgae biofuels production: Effect of cultivation system on energy, carbon emission and cost balance analysis. *Science of the Total Environment*, Vol. 688. 112–128. o. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.181>.
- DE SOUZA, N. R. D.–FRACAROLLI, J. A.–JUNQUEIRA, T. L.–CHAGAS, M. F.–CARDOSO, T. F.–WATANABE, M. D.–CAVALETT, O.–FILHO, S. P. V.–DALE, B. E.–BONOMI, A.–CORTEZ, L. A. B. [2019]: Sugarcane ethanol and beef cattle integration in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, Vol. 120. 448–457. o. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.12.012>.
- DEMAFELIS, R.–MOVILLON, J.–PREDO, C.–MALIGALIG, D.–ELEAZAR, P. J.–TONGKOMAGADIA, B. [2020]: Socio-economic and Environmental Impacts of Bioethanol Production from Sugarcane (*Saccharum officinarum*) and Molasses in the Philippines. *Journal of Environmental Science and Management*, Vol. 23. No. 1. 96–110. o. [https://doi.org/10.47125/jesam/2020\\_1/10](https://doi.org/10.47125/jesam/2020_1/10).
- DEMICHELI, F.–LAGHEZZA, M.–CHIAPPERO, M.–FIORE, S. [2020]: Technical, economic and environmental assessment of bioethanol biorefinery from waste biomass. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 277. 124111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124111>.
- DUARTE, A.–URIBE, J. C.–SARACHE, W.–CALDERÓN, A. [2021]: Economic, environmental, and social assessment of bioethanol production using multiple coffee crop residues. *Energy*, Vol. 216. 119170. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119170>.
- DUÍĆ, N.–URBANIEC, K.–HUISINGH, D. [2015]: Components and structures of the pillars of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 88. 1–12. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.030>.
- ECKERT, C. T.–FRIGO, E. P.–ALBRECHT, L. P.–ALBRECHT, A. J. P.–CHRIST, D.–SANTOS, W. G.–BERKEMBROCK, E.–EGEWARTH, V. A. [2018]: Maize ethanol production in Brazil: characteristics and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82. 3907–3912. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.082>.
- EIA [2021a]: Short-term Energy Outlook. U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/outlooks/steo/report/prices.php>.
- EIA [2021b]: Gasoline explained. Factors affecting gasoline prices. U.S. Energy Information Administration. <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/factors-affecting-gasoline-prices.php>.
- ELIAS, A. M.–LONGATI, A. A.–DE CAMPOS GIORDANO, R.–FURLAN, F. F. [2021]: Retro-techno-economic-environmental analysis improves the operation efficiency of 1G-2G bioethanol

- and bioelectricity facilities. *Applied Energy*, Vol. 282. 116133. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116133>.
- GALANOPOULOS, C.–GIULIANO, A.–BARLETTA, D.–ZONDERVAN, E. [2020]: An integrated methodology for the economic and environmental assessment of a biorefinery supply chain. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 160. 199–215. o. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.05.016>.
- GHOSH, S.–CHOWDHURY, R.–BHATTACHARYA, P. [2017]: Sustainability of cereal straws for the fermentative production of second generation biofuels: A review of the efficiency and economics of biochemical pretreatment processes. *Applied Energy*, Vol. 198. 284–298. o. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.091>.
- GONZALEZ-CONTRERAS, M.–LUGO-MENDEZ, H.–SALES-CRUZ, M.–LOPEZ-ARENAS, T. [2021]: Synthesis, design and evaluation of intensified lignocellulosic biorefineries. Case study: Ethanol production. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, Vol. 159. 108220. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108220>.
- HAPUTTA, P.–PUTTANAPONG, N.–SILALERTRUKSA, T.–BANGVIWAT, A.–PRAPASONGSA, T.–GHEEWALA, S. H. [2020]: Sustainability analysis of bioethanol promotion in Thailand using a cost-benefit approach. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 251. 119756. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119756>.
- HASSAN, S. S.–WILLIAMS, G. A.–JAISWAL, A. K. [2019]: Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: Drivers, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 101. 590–599. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.041>.
- HUANG, J.–KHAN, M. T.–PERECIN, D.–COELHO, S. T.–ZHANG, M. [2020]: Sugarcane for bioethanol production: Potential of bagasse in Chinese perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 133. 110296. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110296>.
- IRS [2021]: Yearly Average Currency Exchange Rates. United States Department of the Treasury, Internal Revenue Service, Washington, <https://www.irs.gov/individuals/international-taxpayers/yearly-average-currency-exchange-rates>.
- KAENCHAN, P.–PUTTANAPONG, N.–BOWONTHUMRONGCHAI, T.–LIMSKUL, K.–GHEEWALA, S. H. [2019]: Macroeconomic modeling for assessing sustainability of bioethanol production in Thailand. *Energy Policy*, Vol. 127. 361–373. o. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.026>.
- KESHARWANI, R.–SUN, Z.–DAGLI, C.–XIONG, H. [2019]: Moving second generation biofuel manufacturing forward: Investigating economic viability and environmental sustainability considering two strategies for supply chain restructuring. *Applied Energy*, Vol. 242. 1467–1496. o. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.098>.
- KHOUNANI, Z.–NAZEMI, F.–SHAFIEL, M.–AGHBASHLO, M.–TABATABAEI, M. [2019]: Techno-economic aspects of a safflower-based biorefinery plant co-producing bioethanol and biodiesel. *Energy Conversion and Management*, Vol. 201. 112184. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112184>.
- KLEIN, B. C.–BONOMI, A.–MACIEL FILHO, R. [2018]: Integration of microalgae production with industrial biofuel facilities: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82. 1376–1392. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.063>.
- KRISTIANO, Y.–ZHU, L. [2017]: Techno-economic optimization of ethanol synthesis from rice-straw supply chains. *Energy*, Vol. 141. 2164–2176. o. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.077>.
- KUMAR, B. R.–MATHIMANI, T.–SUDHAKAR, M. P.–RAJENDRAN, K.–NIZAMI, A. S.–BRINDHADEVI, K.–PUGAZHENDHI, A. [2021]: A state of the art review on the cultivation of

- algae for energy and other valuable products: Application, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 138. 110649. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110649>.
- LI, Y.–KESHARWANI, R.–SUN, Z.–QIN, R.–DAGLI, C.–ZHANG, M.–WANG, D. [2020]: Economic viability and environmental impact investigation for the biofuel supply chain using co-fermentation technology. *Applied Energy*, Vol. 259. 114235. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114235>.
- LONGATI, A. A.–BATISTA, G.–CRUZ, A. J. G. [2020]: Brazilian integrated sugarcane-soybean biorefinery: trends and opportunities. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Vol. 26. 100400. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100400>.
- MANDEGARI, M.–FARZAD, S.–GÖRGENS, J. F. [2018]: A new insight into sugarcane biorefineries with fossil fuel co-combustion: Techno-economic analysis and life cycle assessment. *Energy Conversion and Management*, Vol. 165. 76–91. o. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.057>.
- MANOCHIO, C.–ANDRADE, B. R.–RODRIGUEZ, R. P.–MORAES, B. S. [2017]: Ethanol from biomass: A comparative overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 80. 743–755. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.063>.
- MAT ARON, N. S.–KHOO, K. S.–CHEW, K. W.–SHOW, P. L.–CHEN, W. H.–NGUYEN, T. H. P. [2020]: Sustainability of the four generations of biofuels – A review. *International Journal of Energy Research*, Vol. 44. No. 12. 9266–9282. o. <https://doi.org/10.1002/er.5557>.
- MÍZIK TAMÁS [2022]: Sustainable Fuels in Private Transportation – Present and Future Potential. Megjelent: *Di Blasio, G.–Agarwal, A. K.–Belgiorno, G.–Shukla, P. C.* (szerk.): *Clean Fuels for Mobility*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., Szingapúr, 9–26. o. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8747-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8747-1_2).
- NIEDER-HEITMANN, M.–HAIGH, K. F.–GÖRGENS, J. F. [2019]: Life cycle assessment and multi-criteria analysis of sugarcane biorefinery scenarios: Finding a sustainable solution for the South African sugar industry. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 239. 118039. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118039>.
- O'BRIEN, S.–KOZIEL, J. A.–BANIK, C.–BIAŁOWIEC, A. [2020]: Synergy of Thermochemical Treatment of Dried Distillers Grains with Solubles with Bioethanol Production for Increased Sustainability and Profitability. *Energies*, Vol. 13. No. 17. 4528. o. <https://doi.org/10.3390/en13174528>.
- OECD [2022]: *Agricultural Outlook, 2021–2030*. OECD.Stat, <https://stats.oecd.org/#>.
- OGBONNA, C. N.–NWOBA, E. G. [2021]: Bio-based flocculants for sustainable harvesting of microalgae for biofuel production. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 139. 110690. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110690>.
- OUCHIDA, K.–FUKUSHIMA, Y.–OHARA, S.–SUGIMOTO, A.–HATTORI, T.–TERAJIMA, Y.–OKUBO, T.–KIKUCHI, Y. [2019]: Integrated sugarcane farming and sugar milling with selective fermentation: A simulation-based approach. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 236. 117521. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.352>.
- PADI, R. K.–CHIMPHANGO, A. [2020]: Comparative sustainability assessments for integrated cassava starch wastes biorefineries. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 290. 125171. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125171>.
- PALMA-ROJAS, S.–CALDEIRA-PIRES, A.–NOGUEIRA, J. M. [2017]: Environmental and economic hybrid life cycle assessment of bagasse-derived ethanol produced in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22. No. 3. 317–327. o. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0892-9>.

- SAAD, M. G.–DOSOKY, N. S.–ZOROMBA, M. S.–SHAFIK, H. M. [2019]: Algal biofuels: Current status and key challenges. *Energies*, Vol. 12. No. 10. 1920. o. <https://doi.org/10.3390/en12101920>.
- SADHUKHAN, J.–MARTINEZ-HERNANDEZ, E.–AMEZCUA-ALLIERI, M. A.–ABURTO, J. [2019]: Economic and environmental impact evaluation of various biomass feedstock for bioethanol production and correlations to lignocellulosic composition. *Bioresource Technology Reports*, Vol. 7. 100230. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100230>.
- SAFARIAN, S.–UNNTHORSSON, R. [2018]: An assessment of the sustainability of lignocellulosic bioethanol production from wastes in Iceland. *Energies*, Vol. 11. No. 6. 1493. o. <https://doi.org/10.3390/en11061493>.
- SHARMA, A.–STREZOV, V. [2017]: Life cycle environmental and economic impact assessment of alternative transport fuels and power-train technologies. *Energy*, Vol. 133. 1132–1141. o. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.160>.
- SHUBA, E. S.–KIFLE, D. [2018]: Microalgae to biofuels: ‘Promising’ alternative and renewable energy, review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81. 743–755. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.042>.
- SIKARWAR, V. S.–ZHAO, M.–FENNELL, P. S.–SHAH, N.–ANTHONY, E. J. [2017]: Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 61. 189–248. o. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.04.001>.
- SILALERTRUKSA, T.–GHEEWALA, S. H. [2020]: Competitive use of sugarcane for food, fuel, and biochemical through the environmental and economic factors. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 25. No. 7. 1343–1355. o. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01664-0>.
- SILVA, W. C.–ARAÚJO, E. C. C.–CALMANOVICI, C. E.–BERNARDO, A.–GIULIETTI, M. [2017]: Environmental assessment of a standard distillery using aspen plus: Simulation and renewability analysis. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 162. 1442–1454. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.106>.
- SINGH, R. S.–WALIA, A. K. [2016]: Biofuels: historical perspectives and public opinions. Meg-jelent: *Singh, R. S.–Pandey, A.–Gnansounou, E.* (szerk.): *Biofuels*. CRC Press, Boca Raton, FL, 21–42. o. <https://doi.org/10.1201/9781315370743>.
- SOAM, S.–KAPOOR, M.–KUMAR, R.–GUPTA, R. P.–PURI, S. K.–RAMAKUMAR, S. S. V. [2018]: Life cycle assessment and life cycle costing of conventional and modified dilute acid pretreatment for fuel ethanol production from rice straw in India. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 197. 732–741. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.204>.
- UN [1987]: Report of the world commission on environment and development: Our common future. United Nations, Oslo, <https://digitallibrary.un.org/record/139811>.
- VARGAS-BAUTISTA, J. P.–GARCÍA-CUÉLLAR, A. J.–PÉREZ-GARCÍA, S. L.–RIVERA-SOLORIO, C. I. [2017]: Transient simulation of a solar heating system for a small-scale ethanol-water distillation plant: thermal, environmental and economic performance. *Energy Conversion and Management*, Vol. 134. 347–360. o. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.041>.
- VASCONCELOS, M. H.–MENDES, F. M.–RAMOS, L.–DIAS, M. O. S.–BONOMI, A.–JESUS, C. D. F.–WATANABE, M. D. B.–JUNQUEIRA, T. L.–MILAGRES, A. M. F.–FERRAZ, A.–DOS SANTOS, J. C. [2020]: Techno-economic assessment of bioenergy and biofuel production in integrated sugarcane biorefinery: Identification of technological bottlenecks and economic feasibility of dilute acid pretreatment. *Energy*, Vol. 199. 117422. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117422>.

- VIKASH, P. V.–MANDADE, P. V.–SHASTRI, Y. [2018]: Assessment of bagasse and trash utilization for ethanol production: A case study in India. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, Vol. 37. No. 6. 2165–2174. o. <https://doi.org/10.1002/ep.12900>.
- WANG, C.–MALIK, A.–WANG, Y.–CHANG, Y.–LENZEN, M.–ZHOU, D.–PANG, M.–HUANG, Q. [2020]: The social, economic, and environmental implications of biomass ethanol production in China: A multi-regional input-output-based hybrid LCA model. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 249. 119326. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119326>.
- WANG, Z.–ZHENG, F.–XUE, S. [2019]: The economic feasibility of the valorization of water hyacinth for bioethanol production. *Sustainability*, Vol. 11. No. 3. 905. o. <https://doi.org/10.3390/su11030905>.
- WEBER, C. T.–TRIERWEILER, L. F.–TRIERWEILER, J. O. [2020]: Food waste biorefinery advocating circular economy: Bioethanol and distilled beverage from sweet potato. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 268. 121788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121788>.
- YANG, X.–LI, M.–LIU, H.–REN, L.–XIE, G. [2018]: Technical feasibility and comprehensive sustainability assessment of sweet sorghum for bioethanol production in China. *Sustainability*, Vol. 10. No. 3. 731. o. <https://doi.org/10.3390/su10030731>.

## Kedves Szerzőink!

Az MTA Könyvtár és Információs Központtal együttműködve cikkeinket ellátjuk a CrossRef-nél regisztrált DOI-azonosítóval. Ezért kérjük, hogy a *Hivatkozásokban* tüntessék fel a művek DOI-azonosítóját (természetesen sokszor előfordul, hogy nincs ilyen). A DOI a következő linkre kattintva kereshető meg: <http://search.crossref.org>.

Például:

BOLDRIN, M.–MONTES, A. [2005]: The intergenerational state. Education and pensions. *Review of Economic Studies*, Vol. 72. No. 3. 651–664. o.

A hivatkozott tételt bemásoljuk a keresőmezőbe, a találati listából pedig kiválasztjuk a megfelelő tételnél lévő hivatkozást, és beszurjuk a hivatkozás végére: BOLDRIN, M.–MONTES, A. [2005]: The intergenerational state. Education and pensions. *Review of Economic Studies*, Vol. 72. No. 3. 651–664. o. <https://doi.org/10.1111/j.1467-937x.2005.00346.x>.

Ne feledkezzenek meg a beszúrt hivatkozás hiperhivatkozásként való megjelenéséről a kéziratban!

A CrossRef-nél regisztrált DOI növeli a cikkek láthatóságát, könnyíti az adott, kapott hivatkozások összeszámlálását!