

Alternatív üzemanyagok összehasonlító élelciklus-elemzése

Írta:

Mecséri Botond Ákos

(III. éves gépészmérnök B.Sc. hallgató, gépjármű technológia szakirány)

Konzulens:

Németh Péter

(tudományos segédmunkatárs, tudományos titkár)

Absztrakt

A közlekedési szektor és az energiaipar fokozatos és folyamatos dekarbonizációja érdekében elengedhetetlen a különböző helyzetekben a legmegfelelőbb alternatív energiahordozók azonosítása és kiértékelése, miközben a hidrogénalapú gazdaság fejlődését, a hagyományos fosszilis tüzelőanyagok életképes versenytársaként kell előrelendíteni. Dolgozatomban hat alternatív üzemanyag - hidrogén (H_2), sűrített földgáz (CNG), metanol, etanol, Fischer-Tropsch (FT) benzin és FT dízel - életciklus-elemzését (LCA) mutatom be, összehasonlítva azok széndioxid-intenzitását, funkcionális egységként megajoule-t (MJ) használva. Három referencia-üzemanyagot vettem viszonyítási alapként az összehasonlítás során – hagyományos benzin, gázolaj és villamosenergia. A kibocsátásokat két scenárió alapján elemeztem: az egyik a 2024-es jelenlegi előállítási eljárások megoszlását, a másik pedig a 2050-re prognosztizált technológiai arányokat veszi figyelembe, hogy értékelhető legyen az egyes üzemanyagok rövid- és hosszú távú potenciálja is. Az eredményül kapott adatok alapján a 2024-es helyzetben a legtöbb alternatív üzemanyag környezeti hatása hasonló vagy rosszabb a referenciaértékeknél, kivéve a CNG-t és az etanolt, amelyek ígéretes rövidtávú opciók lehetnek. A jövőbeli scenárióban abszolút legfenntarthatóbb opció a villamosenergia lesz, emellett a vizsgált alternatívák közül a hidrogén és a FT üzemanyagok mutatják a legalacsonyabb nettó és bruttó kibocsátást teljes életciklusuk során. Az e-üzemanyagok – e-metán vagy másnéven szintetikus földgáz (SNG), e-metanol és FT üzemanyagok – előállítási költsége és hatékonysága szorosan összefügg a hidrogén termelésének optimalizáltságával, ami mindkét terület párhuzamos fejlesztésének szükségességét jelzi.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	5
2.	Üzemanyagok	6
2.1.	Hidrogén (H_2)	6
2.1.1.	Szürke hidrogén (gőz-metán reformálás)	8
2.1.2.	Barna hidrogén (szén gázosítás)	9
2.1.3.	Kék hidrogén	10
2.1.4.	Biohidrogén	11
2.1.5.	Szintetikus hidrogén (PEM víz elektrolízis)	12
2.2.	Sűrített metán (CNG)	13
2.2.1.	Földgáz sűrítés	14
2.2.2.	Biometán (RNG)	14
2.2.3.	Szintetikus metán (SNG)	15
2.3.	Metanol (CH_3OH)	17
2.3.1.	Szürke metanol (földgáz reformálás)	18
2.3.2.	Barna metanol (szén gázosítás)	19
2.3.3.	Biometanol	19
2.3.4.	Szintetikus metanol (e-metanol)	20
2.4.	Etanol	21
2.4.1.	Kukorica	22
2.4.2.	Cukornád	23
2.4.3.	Faalapú erdei maradványok	23
2.4.4.	Kukoricatörmelék és egyéb szerves hulladék	24
2.5.	Fischer-Tropsch üzemanyagok	24
2.6.	Potenciál az energiasűrűségben	27

3. LCA és/vagy WTW	28
4. GREET modell.....	29
5. Saját vizsgálat.....	30
5.1. Vizsgálati paraméterek	30
5.2. Számítási részeredmények (WTP és PTW)	32
5.3. Számítási végeredmények (WTW LCA).....	36
6. Konklúzió és tervek.....	39
Ábrajegyzék	40
Irodalomjegyzék.....	41

1. Bevezetés

A fosszilis energiahordozók napjainkban megosztó témaként jelennek meg a közéletben, viszont fontos szakszerűen megvizsgálni a témát, hogy milyen alternatívákkal lehetne helyettesíteni a jelenlegi konvencionális üzemanyagokat. Személygépjárművek meghajtásának zöldebbé tételéhez számos törekvés kötődik (Net Zero Koalíció, ENSZ). Az autóipari cégek nagy része már megkezdte a nagyobb szintű átállást hibrid- és teljes villamosmeghajtásokra, emellett a hidrogén-üzemanyagcellás járművek gyártása is elkezdődött az elmúlt években. Dolgozatomban összehasonlítom a következő üzemanyagokat: hidrogén, sűrített földgáz (metán), metanol, etanol, Fischer-Tropsch (FT) benzin és dízel; viszonyítási alap a konvencionális benzin, gázolaj és villamos energia lesz. Az egyes üzemanyagokkal kapcsolatos hajtásrendszerek fő tulajdonságait és maguk a tüzelőanyagok termelési folyamatait egymás után ismertetem, majd két scenárió elemzését mutatom be, a jelenlegi és az előre jelzett termelési arányokon alapuló, GREET modell segítségével kiszámított eredményeket. A meglévő kutatásokból származó adatokat felhasználva validálom a modelltől számolt értékeket, emellett szintén szakirodalom alapján megadok szemléletes hozamarányokat, mivel bemeneti és kimeneti anyagok nincsenek részletesen leírva a modellben. Az összehasonlítások az egyes tüzelőanyagok karbonintenzitására (angolul carbonintensity, CI) fognak fókuszálni, amelynek mértékét az üzemanyagok teljes életciklusa (nyersanyag, előállítás és felhasználás) során kibocsátott szén-dioxid mennyisége határozza meg, az üzemanyagból kinyerhető energiával arányosan, megajoule-onként kifejezve ($[CI] = \text{gCO}_2/\text{MJ}$). Részletesen bemutatom a vizsgálat során felvett rendszerhatárokat, amin belül folyik az összehasonlítás, magát a vizsgálat módszerét, a teljes életciklus-elemzést (life-cycle assessment, LCA) és az általam használt modellt. Majd minden szükséges ismeret leírását követően összevetem a saját eredményeimet, amelyekből levonhatók a következtetések, és amelyek alapján kiválaszthatók a rövid- és hosszú távon optimális scenáriók, valamint további kutatási javaslatokat is teszek a témával kapcsolatosan.

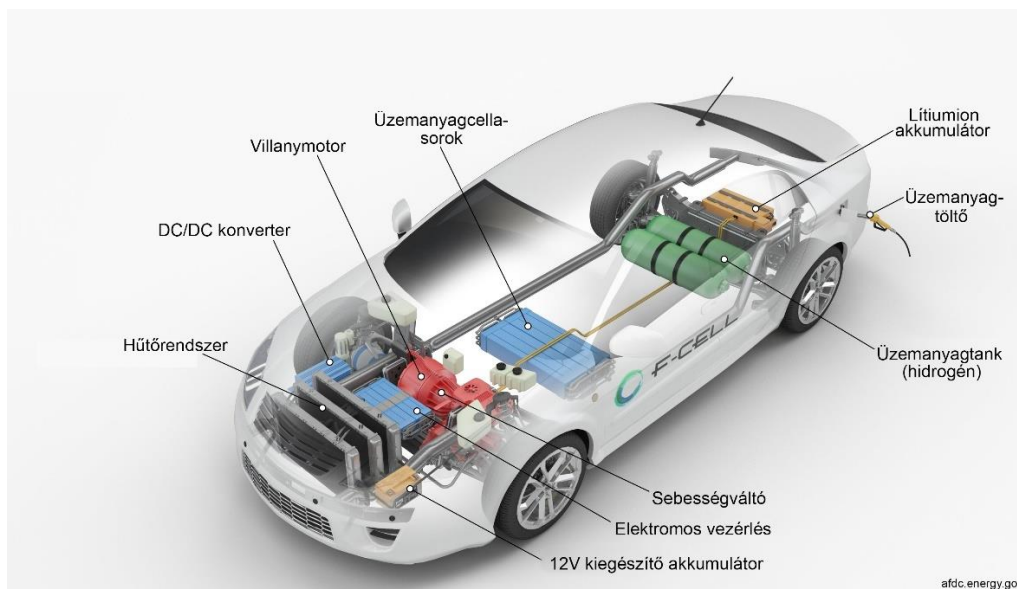
2. Üzemanyagok

A bemutatott üzemanyagok CO₂ kibocsátása szoros kapcsolatban áll az előállítás során felhasznált nyersanyagokkal, ezért színnel nevezik meg a különböző eljárás során kapott termékeket, így lesz tehát a szén alapú termék barna, a földgáz szürke, a fosszilis CO₂ megkötő rendszerrel kék és a megújuló pedig zöld (ezen kívül még léteznek hasonló megnevezések, de munkámban ezek jelennek meg). Ezentúl még érdemes egyértelművé tenni, hogy a szerves alapanyagokból készült energiahordozók kapják meg a „bio” prefixumot, és a szintetikus, elektromos áram segítségével gyártottakat, pedig „e-üzemanyag”-nak nevezik a szakirodalomban. Ezek az üzemanyagok a különböző előállítási módszerek és a megújuló energiával való integráció révén kulcsfontosságú előrelépést jelentenek a tisztább közlekedési megoldások keresésében. A nagymértékű bevezetésük előtt azonban továbbra is olyan kihívások állnak, mint a költségek, az infrastruktúra és az életciklus során keletkező kibocsátások, amelyekkel foglalkozni kell ahhoz, hogy teljes mértékben kihasználhassák a bennük rejlő potenciált. Üzemanyagoként röviden bemutatom a hajtáslánc alapvető működési elvét. Előállítási eljárásuként pedig ismertetek egy leegyszerűsített, lépésekre bontott leírást, valamint szakirodalomból karbonintenzitást és üzemanyaghozamot (a karbonintenzitás nagy mértékű különbsége esetében megmagyarázom a két vizsgálat közti különbségét). Az irodalomkutató megnevezítette az, hogy legtöbb karbonintenzitás adat a GREET modellből (esetleg egy régebbi verzióból) származott - ez is mutatja viszont a modell legitimitását a fenntarthatósági kutatásokban - emiatt olyan adatokkal egészítettem ki modellem, amelyek másfajta adatbázisokból vagy vizsgálatokból vannak.

2.1. Hidrogén (H₂)

Hidrogén, mint üzemanyag nemrég kezdett el igazán terjedni, főként Japánban, Dél-Koreában, Kínában, Németországban és Kaliforniában. Sok szempont alapján előnyös energiaforrás, leggyakoribb és legegyszerűbb elem, emellett gravimetrikus energiasűrűsége kimagaslóan nagy, viszont ezzel ellentétben használata során pár komplikációba ütközünk. Tárolása nagy kihívást jelent, a hidrogén gáz volumetrikus energiasűrűsége 700 bar-os nyomáson is hatod akkora, mint a benziné. A magasnyomású állapot érdekében fejlett biztonsági rendszerrel tervezik meg a hidrogén tartállyal rendelkező autókat. A jelenleg legelterjedtebb hajtástípus – az egyetlen típus, amelyet jelenleg szériában forgalmaznak a világon – az üzemanyagcellás elektromos meghajtás. Emellett a gyártók elkezdtek hidrogén

alapú belsőégésű hajtásrendszereket is tesztelni bizonyos felhasználási körülmények között (pl. tehergépjárművek). A tüzelőanyagcellás járműben a magasnyomáson tárolt hidrogén eljut a tüzelőanyagcellák egyikébe, ahol egy elektrokémiai reakcióban vesz részt a levegőből származó oxigénnel. A cellákban található egy anód, egy katód, egy katalizátor és egy protoncsere membrán, itt a hidrogénmolekulák közti kötés a katalizátor hatására meggyengülnek, ezáltal felbomlanak elektronokra és protonokra (H^+). A protonok képesek átjutni a membránon, miközben az elektronok rákényszerülnek a külső áramkörön tovább haladni, ezzel elektromos áramlást létrehozva. A jármű villanymotorral rendelkezik, amelyet hidrogén bontásával keletkező áram hajt, általában fel van szerelve egy akkumulátorral is, amely tárolni tudja a túltermelés vagy rekuperáció (regeneratív fékezés) során keletkező villamos energiát, tranziens munkapontokban kiegészítő energiaforrásként funkcionál, a felsorolt alkatrészek elhelyezkedése látható az **1. ábrán**. A felhasználási folyamat során a karbon emisszió nulla, mivel a keletkezett melléktermék vízgőz, mely üvegházhatású gáznak számít, de a szakirodalom nem veszi általában figyelembe elenyésző hatása miatt összevetve a CO_2 -al. A jármű működése hasonló az elektromos autókhoz, viszont üzemanyag feltöltésének ideje a benzin-gázolajos járművékével egyezik meg. A hidrogén előállításának 5 különböző formáját vettem figyelembe a vizsgálat során [1].



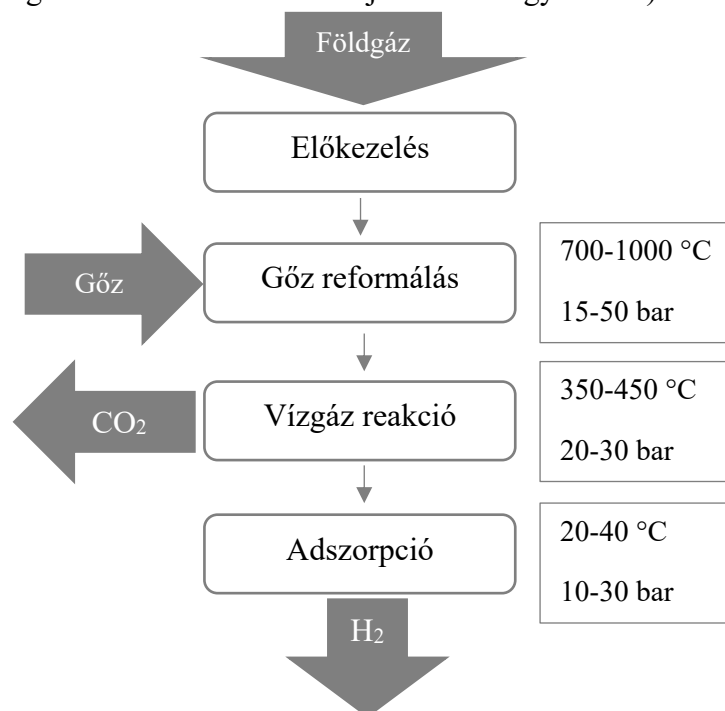
1. ábra Hidrogén üzemanyagcellás személygépjármű fő hajtásrendszer elemei ([2], saját fordítás)

2.1.1. Szürke hidrogén (gőz-metán reformálás)

A legelterjedtebb technológia hidrogénelőállításra. A folyamat során a metánban rejlő kémiai energia alakul át hidrogénné, 7 kg szén-dioxid keletkezik 1 kg előállított hidrogén mellett. 4 szakaszból áll a folyamat, először eltávolításra kerül a földgázban lévő kén, hogy megelőzhető legyen bármilyen kén-oxid keletkezése, amely káros a környezetre és szennyezi a katalizátort az előállítás során [3]. Ezután a reformálás során két reakció játszódik le:



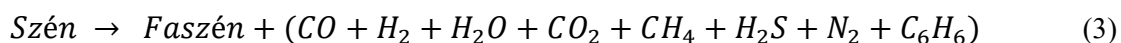
Először endotermikus folyamaton keresztül létrejön hidrogén gáz és szén-monoxid, amely vízgáz-reakció során átalakul szén-dioxiddá és hidrogénné. Az első reakció után létrejött gázelegyet a magas hőmérséklet után lehűtik és utána vesz részt a második reakcióban. A szintetikus gázelegy, amely elhagyja ezt a szakaszt tartalmaz hidrogént, szén-monoxidot (átalakítatlan) szén-dioxidot, vizet és földgázt, amely nem reagált az átalakító fázisban. Ezután adszorpció során kivonjuk a hidrogént a rendszerből. Az előállítás fontos lépéseit mutatja be a **2. ábra**. Szakirodalom szerint 1 kg hidrogéngázhoz nagyjából 3 kg földgáz reformálása szükséges [4], amely átlagosan 114,4 gCO_{2e}/MJ karbonintenzitású [5] (a kibocsátás csak a nyersanyagok felhasználásából és a gyártási folyamatból került számításba a választott szakirodalmakban, még nem lesz beleszámítva a járművek fogyasztása).



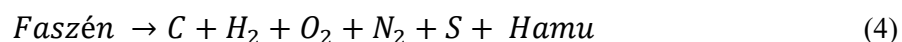
2. ábra Szürke hidrogén előállításának folyamata

2.1.2. Barna hidrogén (szén gázosítás)

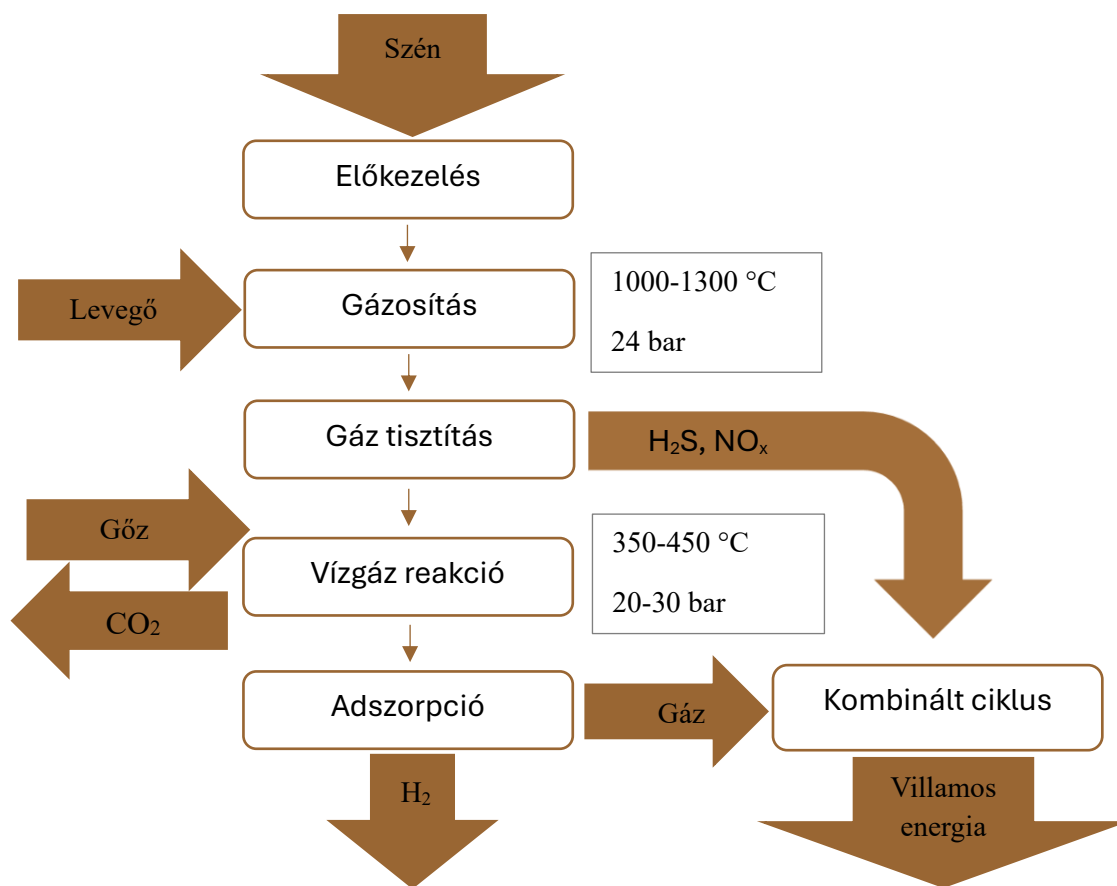
A szenet hasznosító procedúrák már nincsenek annyira elterjedve fűtési szempontból, viszont az energiaiparban és a vegyiparban megszokott eljárásnak számít még, energiatermelésen kívül különböző üzemanyagok is előállíthatóak belőle, mint a hidrogén, ammónia és a metanol. Egy modern példa a szén gázosító rendszerekre az integrált szénelgázosításos kombinált ciklusú (integrated gasification combined cycle IGCC) hőerőmű [3]. Ennek a rendszernek a részei: szén gázosító, vízgáz-reaktor, hidrogén megkötő egység, szintézisgáz égéstér, gázturbina, gőzgenerátor és a Rankine-ciklus tér. Napjainkig fejlesztik működésüket Amerikában, Japánban és Kínában. A folyamat azzal kezdődik, hogy pirolízis alá veszik a szenet, ami során reagál a rá irányított megfelelő mennyiségű gőzzel (oxigén és levegő jelenlétében) és szétbomlik. A kiegyensúlyozatlan pirolízis reakció a következőképpen írható le:



Ezután a faszén szétbomlik és annak képződményeként a következő reakciók mennek végbe:



Az utolsó reakció már ismert (2), a szintézisgáz részeként a szén-monoxidot a külön egységben ismételt vízgőz injektálásával reakcióba hozzák. Az említett reakciót követően a hidrogén kivonásra kerül a gázelegyből. Az IGCC rendszer leegyszerűsített működését bemutatja a **3. ábra**. 1 kg hidrogén 6-10 kg szénből állítható elő [6], a folyamat átlagosan 246,1 gCO_{2e}/MJ karbonintenzitású [5].



3. ábra Barna hidrogén (IGCC rendszer) előállításának folyamata

2.1.3. Kék hidrogén (Fosszilis technológiák szén-dioxid leválasztó és tároló rendszerrel)

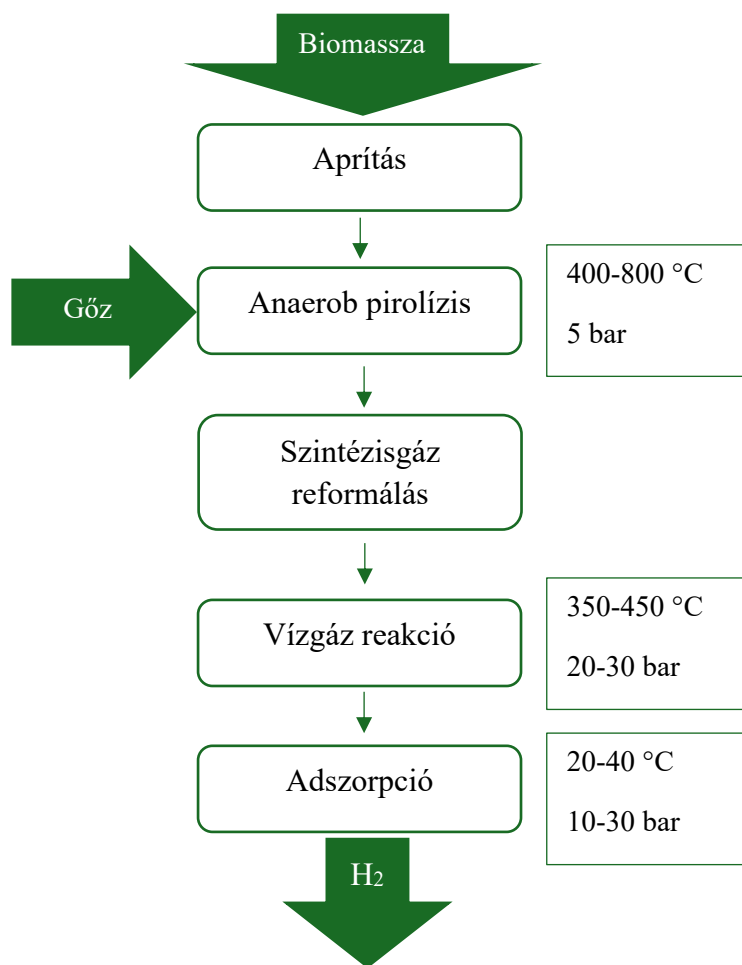
Egy környezetkímélőbb megoldás az előzőleg bemutatott technológiákkal szimultán használható szén-dioxid megkötő és tároló rendszer (carbon capture and storage, CCS). Jelenlegi kibocsátások 0,1%-át választják le ilyen rendszerekkel, amely számszerűen körülbelül 45 megatonna CO₂-t jelent. 3 fajta megkötő technológia létezik jelenleg, ezek közül a legelterjedtebb eljárás az égés-utáni leválasztás, valójában csak a torokgázból kerül kivonásra az egyébként levegőbe kerülő szén-dioxid, amelyet egy folyadék (etanol-amin, dietanol-amin oldat általában) segítségével lehet elérni, amelynek nagy az affinitása a CO₂-vel szemben [7]. Ez az eljárás nem igényel nagy átalakítást a már régóta működtetett erőművek esetében sem, ezért is ez az egyik legelterjedtebb alternatíva, viszont ezentúl megjegyzendő, hogy a torokgázban kis arányban van CO₂, amely minél kisebb arányban van jelen, annál több energiát igényel a CO₂ kiválasztása. A másik két megkötő technológia már nagyobb átalakításokat igényelne a teljes rendszerekben, viszont kevésbé energiaigényesek. Az egyik az úgy nevezett „oxiüzemanyag” (oxyfuel) eljárás, amely annyit változtat a rendszerben, hogy égés során levegő helyett tiszta oxigént használnak oxidálószerként, ezáltal sokkal sűrűbb CO₂ áramlást

kapunk. A másik eljárás az égés-előtti kivonás, ahol lényegében a fosszilis tüzelőanyagból szénmentes üzemanyagot képezünk (pl.: hidrogént) az égési szakasz előtt, ezután is majdnem tiszta CO₂ áramláshoz jutunk. Miközben ennek az eljárásnak is kisebb az energiaigénye, más erőmű kialakítást igényel (pl.: IGCC) a megszokottnál.

Az általam vizsgált módszer az égés-utáni leválasztás, amely a földgáz reformálás és szén gázosítás technológiák esetében a vízgáz reakció szakaszában kerül megkötésre. A leválasztás után a szén-dioxid szuperkritikus állapotban elszállításra kerül hajón, teherautóban vagy csővezetéken keresztül, mivel az erőműveknél nincs kihelyezett CO₂ tároló [7]. Tárolóként tesztelés után sikeresnek nyilvánultak kimerült olaj és földgázmezők, valamint sósvíztartó rétegek, emellett még tesztelés alatt vannak bányászhatatlan szénbányák és a mélyóceáni területek. Gőz reformálás és szén elgázosítás CCS rendszerrel felszerelve átlagosan, rendre 46,6 gCO_{2e}/MJ és 72,5 gCO_{2e}/MJ karbonintenzitással jár [5] (ebben az esetben a GREET modell nagyobb CO₂ megkötési aránnyal számít, ezért nagyobbak az itt említett értékek).

2.1.4. Biohidrogén

Többféle eljárás alkalmazható biomasszák (általában fa, mezőgazdasági hulladék vagy egyéb természetes anyag) tekintetében, ezeket bővebben a 2.4. fejezetben fogom kifejteni. Előkezelésként a használt biomasszát megfelelő méretűre aprítják és ha szükséges nedvesítik. Az elterjedt módszer a neve biomassza pirolízis, ahol 500-700°C-on oxigénmentes környezetben szintézisgázt (H₂ és CO elegy) képzünk, az elegyen kívül más szénhidrogének is képződnek, ezért a megszokott ipari eljárást tekintve kell tenni egy extra lépést, amellyel növelik a szintézisgáz koncentrációt, katalizátorok segítségével. A vízgáz-reakció végrehajtása után kivonják és sűrítik a termelt hidrogén gázt [8]. Az eljárást szemlélteti az egyszerűsített **4. ábra**, nagyjából mindegyik biohidrogén előállítási módszer hasonlóan történik. A biomassza pirolízis 25-65 gramm hidrogén terméket tud biztosítani 1 kg nyersanyagból (biomassza gőz reformálással vagy biomassza gázosítással esetében is hasonló átalakulási arányt ír a szakirodalom, az említett eljárásokkal nagyjából 75 gramm a kapott termék [9]), viszont emellett CO₂ és kátrány is képződik, katalizátora gyakori cserét igényel és a reaktor fenntartása költséges. A karbonintenzitás ennél az eljárásnál átlagosan 177,9 gCO_{2e}/MJ [5] (itt a szakirodalomban nagyon nagy szórás miatt magas az érték).



4. ábra Biohidrogén előállításának folyamata

2.1.5. Szintetikus hidrogén (PEM víz elektrolízis)

A 2.1. fejezet elején említett protoncsere membrános üzemanyagcellához hasonlóan működő előállítási forma zéró karbon emisszióval jár. Első lépésben nagy feszültségű egyenáram segítségével egy elektrolizáló cellában (tartalmaz: elektrolit oldatot/olvadékot, két elektródát) szétbomlik a víz az anódon:



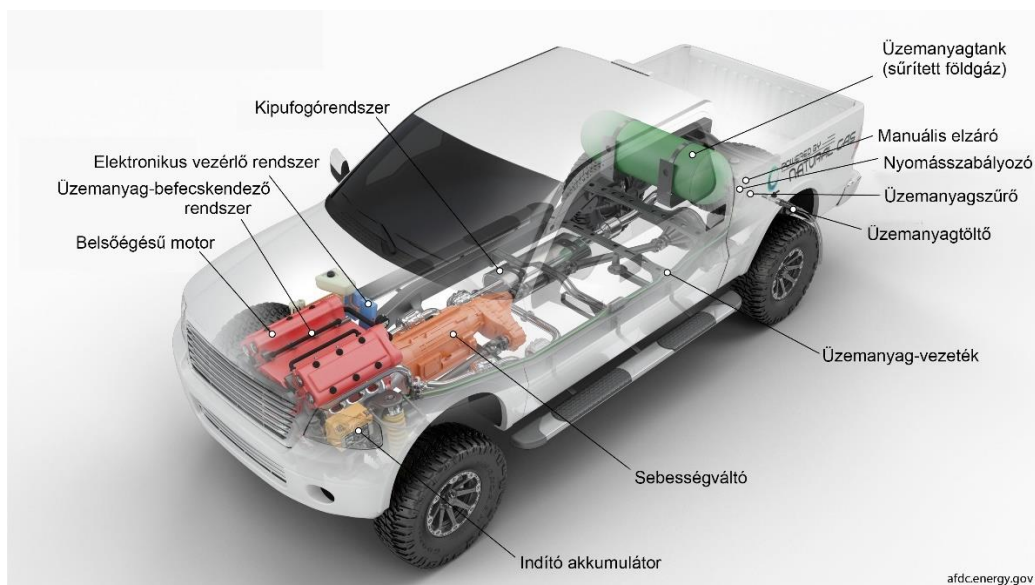
Oxigén képződik melléktermékként, az elektronok egy külső áramkörön továbbfolynak, ezzel is biztosítva az áramot a folyamat számára. A protonok (H^+) átjutnak a membránon a katódhoz. Ezután az átjutott protonok reagálnak a külső áramkörön lévő elektronokkal, ezzel hidrogén molekulákat alkotva [10].



A katódnál akkumulálódott hidrogéngázt ezután elvezetik egy gáztárolóba és sűrítik. 1 kg-nyi hidrogén képzéséhez 550 MJ-nyi villamosenergia szükséges [11], amely, ha megújuló forrásból származik, akkor 23,1 gCO_{2e}/MJ karbonintenzitással jár [5].

2.2. Sűrített metán (CNG)

A sűrített földgáz (angolul: compressed natural gas, rövidítve: CNG), mint tüzelőanyag, igazán egyszerű és hatékony alternatíva, mivel működése igazán hasonló a benzinmeghajtású járművékéhez. Könnyen előállítható fosszilis forrásból és optimális üzemi tulajdonságokkal rendelkezik. Túlnyomó részt az eredeti gázelegy metánt tartalmaz, emellett kis mennyiségben etánt, propánt, butánt, szén-dioxidot, nitrogént, hidrogén-szulfidot és vízgőzt. Semmilyen utólagos adalékanyagra nincs szükség, amelynek segítenie kellene a megfelelő égést vagy működést, mivel tisztán ég és kevesebb szennyezőanyaggal megy végbe a folyamat, mivel nem tartalmaz ólmot vagy benzolt. Magasabb sűrítési arány alatt is működőképes, kopogásmentes égést tud biztosítani, ezáltal magas az oktánszáma (120+). Viszont hátránya, hogy 200-250 bar-os nyomáson szükséges tárolni volumetrikus energiasűrűsége miatt, ezen a nyomáson is majdnem negyedakkora az értéke ($u_{\text{CNG}}=9$ MJ/l), mint a benziné ($u_{\text{benzin}}=32$ MJ/l). Gázvezetéseken keresztül magas nyomáson nyomásszabályzó segítségével jut el a szikragyújtású belsőégésű motorig, a gáznyomás lecsökken injektálást megelőzően, miután áthaladt a gázfilteren, ami megakadályozza, hogy bármilyen szennyeződés eltömítse a rendszert. Szívócsőben keveredik a levegővel, majd a motor dugattyúja összesűríti az elegyet, ezután pedig a gyújtógyertya begyújtja, amely hirtelen expanziót eredményez, ezáltal tovább hajtva a ciklikus folyamatot. A jármű biztonságos működése érdekében el van látva nyomáscsökkentő szelepekkel, automata elzárókkal, túlfolyó szelepekkel, hőmérséklet és nyomásszenzorokkal, emellett maga az üzemanyag tank is kifejezetten nagy szilárdságú anyagból van gyártva (pl.: acél, szénszálas és más kompozit anyagok), és számos mechanikai teszten keresztül megy a végleges gyártás előtt (a felsoroltak mind láthatóak az **5. ábrán**). Összegezve, a tárolást és rendszeren belüli szállítást leszámítva megegyező a működése a benzines és gázolajos hajtásokkal, emellett hasonlóan pár percig tart feltölteni az üzemanyag tankot is. A gázhajtású autókat drágább megvásárolni, viszont karbantartásuk olcsóbb, mint a hagyományos autóké [12]. A CNG esetében 3 különböző előállítási eljárást vettem figyelembe.



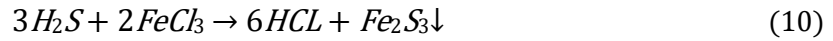
5. ábra CNG személygépjármű fő hajtásrendszer elemei ([13], saját fordítás)

2.2.1. Földgáz sűrítés

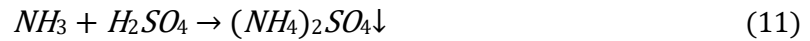
Az első eljárás az energiahordozó nevéből adódik, földgáztárolókból kinyert gázt a felszínre hozva megszűrjük, kivonódnak belőle a nehéz szénhidrogének, a kénes vegyületek, a szén-dioxid és a vízgőz, majd ezután a térfogata 1%-ra lesz sűrítve 200-250 bar-os nyomáson, ezáltal könnyebben felhasználható és sűrűbb is energetikailag. Adalékanyag hozzáadása nem szükséges a CNG esetében a metán kiváló kémiai tulajdonságai miatt, viszont mivel egy színtelen és szagtalan gárról van szó, a könnyű észrevehetőség érdekében kis mennyiségű szagosítóval keverik, ami ezesetben a kellemetlen szagú etántiol. Maga az előállítási folyamat egyszerű, kis mennyiségű befektetett energiát vesz igénybe - nagyjából 93,96 MJ-nyi energia szükséges 1 m³ földgáz sűrítéséhez [14] - viszont a felhasznált nyersanyag fosszilis és használata során még így is jelentős kibocsátással rendelkezik, bár kevesebbel, mint a viszonyítási alapok [15].

2.2.2. Biometán (RNG)

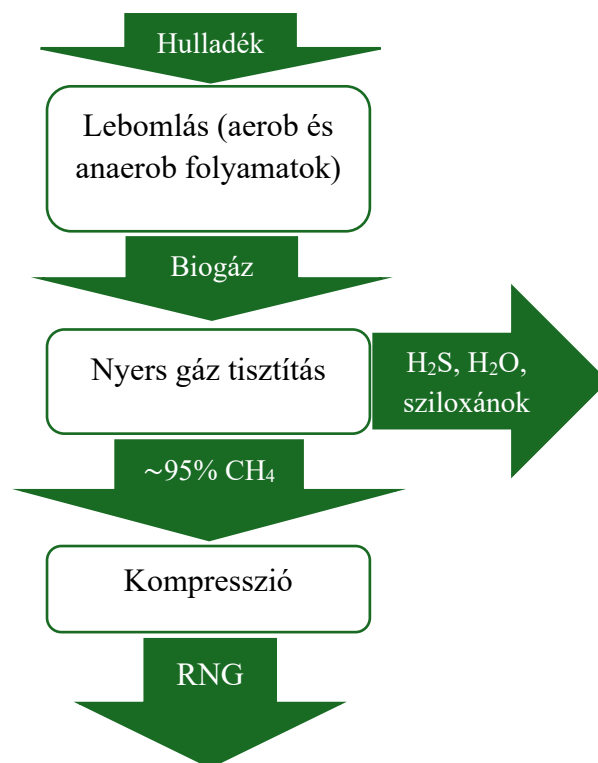
A felhasznált kiindulási anyag ebben az esetben a szeméttELEPI hulladék, ami egy négy fázisos bomlási folyamatban vesz részt, ahhoz, hogy megfelelő metán koncentrációjú biogázt kapjunk [16]. A fő különbség az korábban említett, földből nyert elegyváltozattól, hogy a biogáz sokkal nagyobb arányban tartalmaz szén-dioxidot, hidrogén-szulfidot és ammóniát is, ez esetben a szűrőfolyamatok nagyobb fontosságúak. Számos eljárás alkalmazható a 3 anyag eltávolítására, hidrogén-szulfid esetében a legolcsóbb és legelterjedtebb eljárás szulfid lecsapódást okoz az alábbi reakció során:



A gázból fém sók válnak ki, ezáltal a szulfid könnyen eltávolítható lesz. Ez az eljárás még a biogáz elvezetése előtt a lebomlás mellett szokott végbemenni. Az ammóniát savas mosóoldat segítségével, a biogáz elvezetése után, kénsavval szokták kivonni, e reakció során is lecsapódó só keletkezik [17]:



Leggyakoribb szén-dioxid kivonó eljárás a fizikai abszorpció. Az elvezetett szűrendő elegy vízben vezetődik át 6-10 bar-os nyomás alatt, mivel metán kevésbé oldható vízben, ezért megtartja gáz halmazállapotát, miközben a CO₂ feloldódik a közegben. Az oldatlan elegyet elkülönítik a víztől, a kapott gáz már 80-90% arányban tartalmaz metánt, ezt követően további vízgőz elvonás után összesűrítik a bio-CNG-t (vagy más néven RNG-t, angolul rövidített renewable natural gas) tárolásra megfelelően, ahogyan ezt mutatja is az **6.ábra**. 1 m³-nyi biometán előállításához 3-5 kg-nyi hulladék bomlasztása szükséges [18].



6. ábra RNG előállításának folyamata

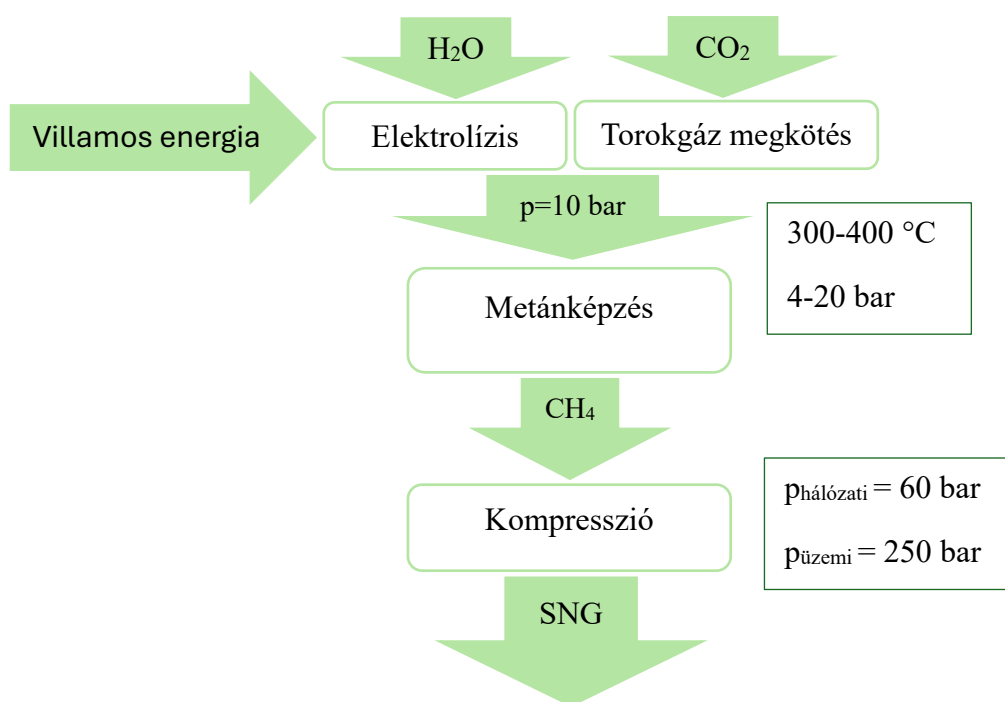
2.2.3. Szintetikus metán (SNG)

Szintetikus előállítási eljárás két kiindulási anyaga a víz és a torokgázból kivont szén-dioxid. A vizet elektrolízis során hidrogénre és oxigénre bomlik 10 bar-os nyomás alatt, külön cellákban, folyékony alkáli elektrolitban. Ezután a két anyag, az említett nyomáson tartva egy

csőreaktorban, szervesetlen katalizátor jelenlétében (nikkel), magas hőmérsékleten (300-400°C), magas nyomáson (4-20 bar) metánképződést visz végbe (a bekövetkezendő exoterm reakciót Sabatier-reakciónak is nevezik):



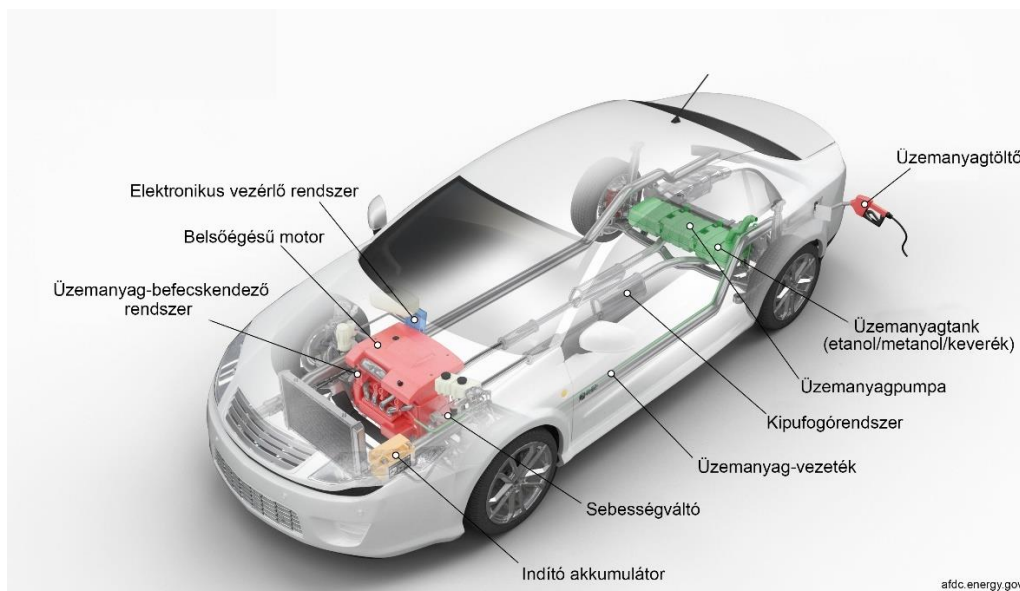
A reakció lejátszódása után a gáz 60 bar-os nyomásra lesz összesűrítve, hogy megfeleljen a szállítási hálózat feltételeinek (ha ilyenre szükség van). Ezentúl töltőállomásokra szállítva a már említett 250 bar-os nyomásra lesz a metán összesűrítve, ez látható a **7.ábrán** is. A felvázolt eljárás során az energetikai hatékonyság (elektrolízis energia CH₄ alakítása) 54%-os [19]. Több ipari eljárásban is kezd elterjedté válni a szintézisgázból vagy szén-dioxidból való metángyártás, ezáltal is csökkentik a karbon kibocsátásokat világszerte. 1 m³ SNG előállításához nagyjából 71 MJ-nyi villamos energia szükséges [20], valamint 181,1 gCO_{2e}/MJ karbonintenzitású maga az előállítási eljárás [21] (ismét sokkal nagyobb CO₂ megkötési aránnyal számol a GREET, biogáz és cement gyárból van a CO₂ nyersanyag, ezért is sokszoros az érték).



7. ábra SNG előállításának folyamata

2.3. Metanol (CH_3OH)

Metanol is, az előzőekhez hasonlóan, egy egyszerű felépítésű vegyület, sokoldalú felhasználhatósága mellett kifejezetten jó üzemanyagként funkcionál. Tisztán égő, sokféle eljárással előállítható, erősen különböző kibocsátásúak az összevetett folyamatok. Magas oktánszáma miatt sokszor használják motorteljesítmény és -hatékonyság növeléséhez. Égés során alacsonyabb részecsk kibocsátást (CO_2 és NO_x) biztosít, mint a hagyományos üzemanyagok. A folyadék volumetrikus energiasűrűsége feleakkora, mint a benziné ($u_{\text{MeOH}}=16,8 \text{ MJ/l}$), emiatt ugyanannak a távnak a megtételéhez, többszöri újratöltésre vagy nagyobb üzemanyag tartályra lesz szükség, viszont már említve jobb hatékonysága miatt pedig kicsi előnyt élvez a fogyasztásban ($\eta_{\text{benzin}}=25\text{-}30\%$ $\eta_{\text{MeOH}}=35\text{-}40\%$). Emellett a folyadék korrozív alumíniummal és rézzel szemben, ami miatt a hajtásrendszerben számos átalakítást kell végrehajtani (üzemanyagrendszerben főként, flexibilis üzemanyag hajtású jármű bemutatása látható a **8. ábrán**). Felhasználását tekintve üzemanyagkeverékként jelenik meg a piacon M85 néven (85% metanol, 15% benzin), különböző keverési arányok, valamint más alternatív és szénhidrogénes tüzelőanyagokkal való elegyét érdemes vizsgálni a jövőben, optimális működés tekintetében. Általánosan 4 vizsgált előállítási technológia sorra: földgázból, szénből, biomasszából és elektrolízis segítségével.



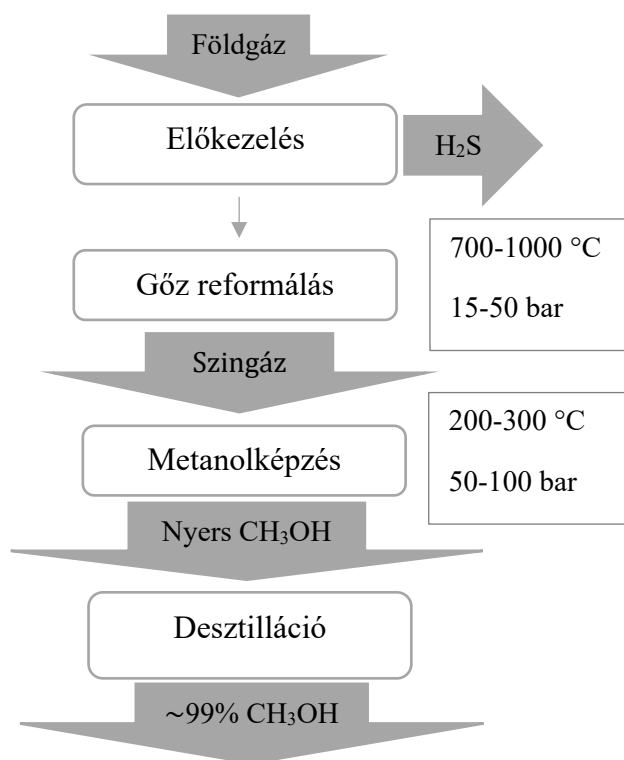
8. ábra Rugalmas üzemanyag-felhasználású személygépjármű fő hajtásrendszerelemei ([22], saját fordítás)

2.3.1. Szürke metanol (földgáz reformálás)

Először az eljárás során előkezelik, szintézisgázt képeznek gőz segítségével. 50-100 bar-os nyomáson 200-300 °C-on végzik a szintézist, reformálást és kondicionálást követően. Az alacsony nyomású szintézis során rezer, cink-oxidot és alumínium-oxidot használnak katalizátorként, 3 különböző reaktoron belül ciklikus rendszer van kialakítva a reagálatlan szintézis gáz számára. Következő 2 reakcióból nyerhető ki a kívánt metanol üzemanyag:



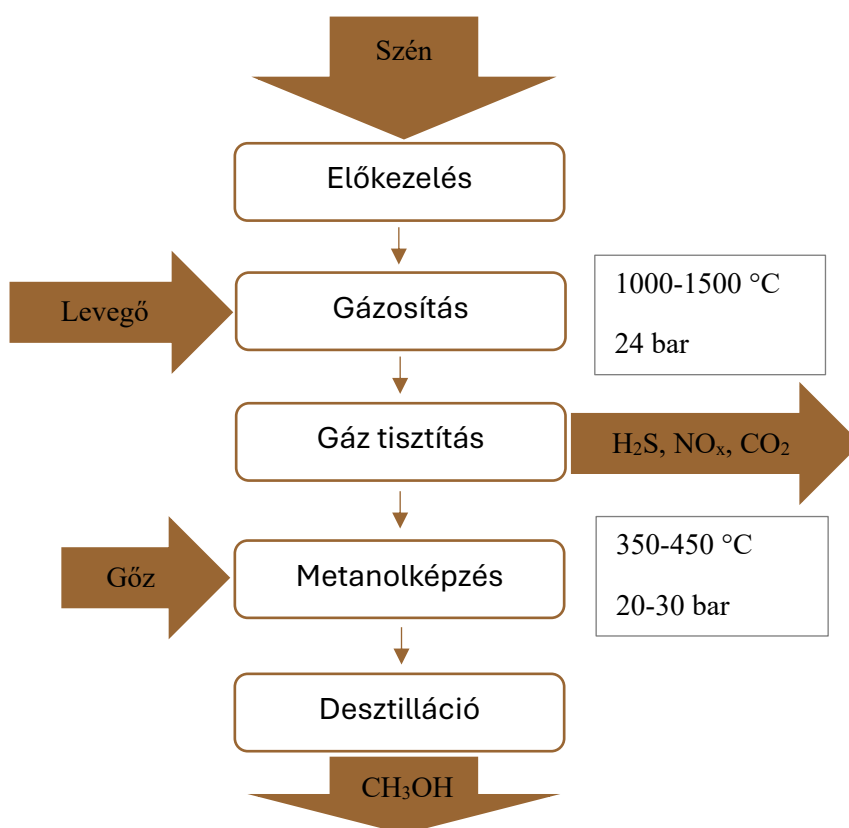
A nyers metanol folyamból desztilláció után kapjuk meg a végső terméket, ahogy a sematikus **9.ábra** is illusztrálja [23]. A földgáz alapú eljárás csekély 18,3 gCO₂/MJ-nyi kibocsátással fog rendelkezni [24], emellett 1 m³ földgázból 1,38 liter metanol képezhető [25].



9. ábra Szürke metanol előállításának folyamata

2.3.2. Barna metanol (szén gázosítás)

A szén kiindulási anyag gázosításon megy keresztül, 1000-1500 °C-on reagál az oxigénnel, ezáltal szintézisgáz képződik. Szűrőssel és vízgáz reakció segítségével eltávolítódik az elegyben lévő kátrány, ammónia és egyéb szennyeződések. Kapott tisztított elegy egy szintézisreaktorban katalitikus reakcióban vesz részt (réz alapú katalizátor jelenlétében), pontosan ugyanazok a reakciók folynak le, mint az eggyel korábbi eljárásban. Előző szintézishez hasonlóan ciklizálva van a rendszer a reaktornál, hogy a reagálatlan gáz újrahasznosítva legyen. Desztillációt követően megkapjuk az üzemanyagot (**10.ábra**) [26]. Az átalakítási arány 2:1-hez szén gázosítás esetében [27], karbonintenzitása 230 gCO_{2e}/MJ [28].

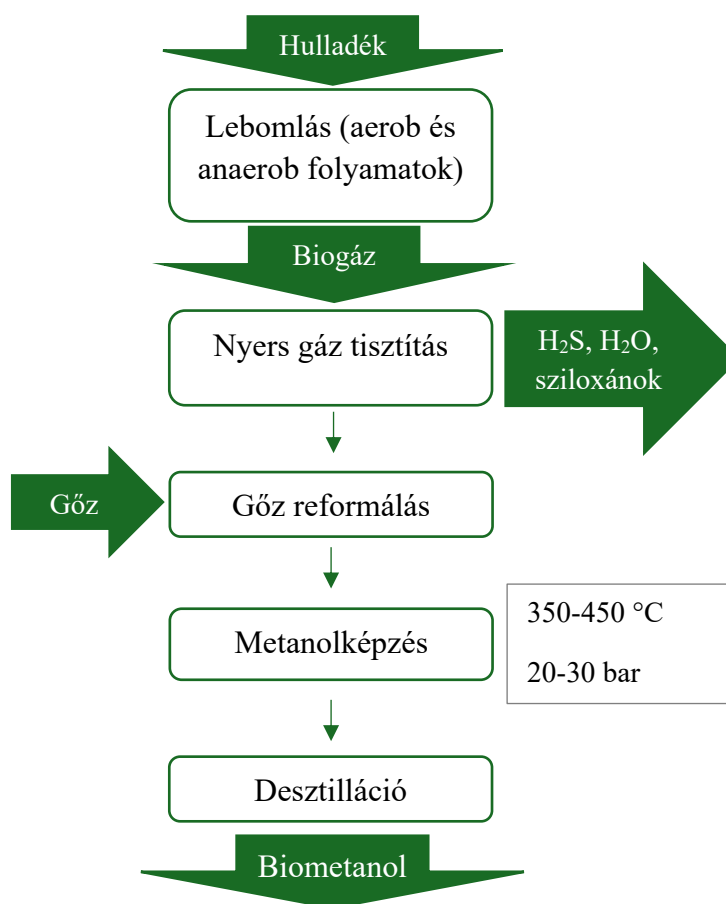


10. ábra Barna metanol előállításának folyamata

2.3.3. Biometanol

A 2.2.2.-höz teljesen hasonló kezdetű az eljárás. Aerob és anaerob reakciók segítségével szintézisgázt nyerünk ki a szemétteleni hulladékból, amely tisztításon és gőz reformáláson megy keresztül. Ezt követően az előző két technológiából ismert katalitikus reakciókból nyerjük ki a biometanolt (**11.ábra**) [16], [29]. Az átalakítási arány szerint 3,6 kg szemétteleni gázból

állítható elő 1 kg biometanol [30]. Többfajta bioeljárás van projekt fázisban, főként még a gőz reformálós technológia a legelterjedtebb, viszont létezik már száraz reformálós és membrános előállítási módszer is, amik sokkal kevésbé karbonintenzívek, a reformálás 96,7 gCO_{2e}/MJ kibocsátással jár [30].

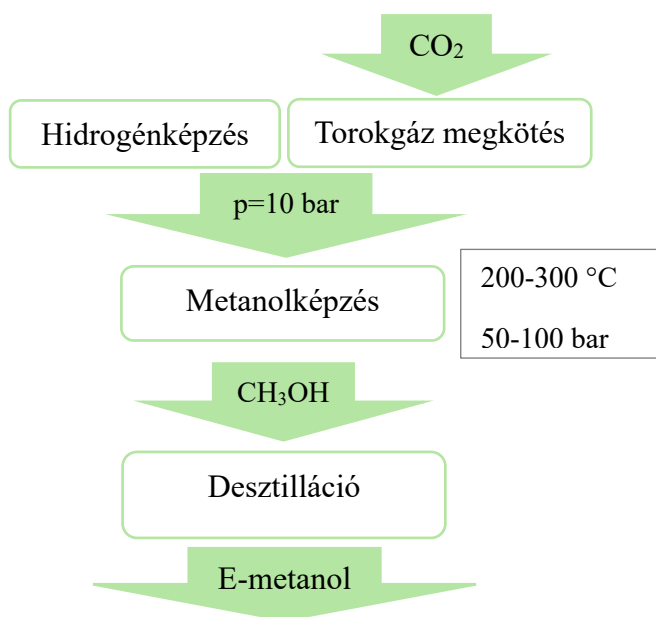


11. ábra Biometanol előállításának folyamata

2.3.4. Szintetikus metanol (e-metanol)

A 2.1-es fejezetben ismertetett eljárásokból nyert hidrogén és a 2.1.3.-asban lévő megkötő technológiával leválasztott CO₂ lesz a második fajta zöld metanol előállítási folyamatának megújuló kiindulási anyagai. A két gáz 3:1 arányban (H₂:CO₂) keverve katalitikus reakcióban ((15)-ös egyenletben ismertetett reakció) vesznek részt, magas hőmérsékleten és középmagas nyomás alatt. Desztillációt követően megkapjuk az előállítani kívánt e-metanolt (12. ábra) [31]. Jelenlegi arányokat tekintve 0,2%-ban állítják elő elektrolízises és bioeljárással a metanolt, mint üzemanyagot. Aggodalomra ad okot a víz

elektrolízisének energiasűrűsége, az e-metanol jövőjének megközelítéséhez az elektrolízis hatékonyságának növelésére, a megújuló energiaforrások infrastruktúrájának bővítésére és az előállítási költségek csökkentését célzó ösztönző előírások megteremtésére kell összpontosítanunk, biztosítva, hogy a metanol életképes és fenntartható üzemanyaggá váljon. Karbonintenzitása teljesen megújuló forrásból 10 gCO_{2e}/MJ-nál is kisebb [28].



12. ábra Szintetikus metanol előállításának folyamata

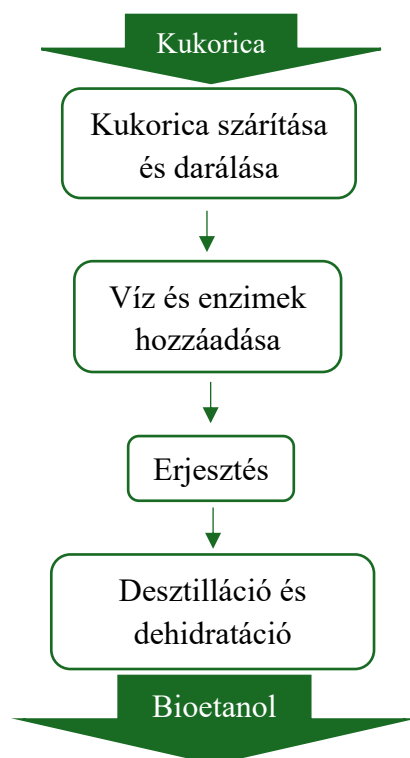
2.4. Etanol

Az energiahordozók között már elterjedtek számító etil-alkohol szinte minden mai töltőállomáson megtalálható, mivel keverékként jelen van az E10-es benzinben (10%-os volumetrikus arányban). Növeli az égés hatékonyságát a motorban, nagyobb oktánszámából adódóan csökkenti a kopogásos égést, ezáltal csökkenti a szén-monoxid és egyéb szénhidrogének kibocsátását is. Főként természetes nyersanyagot felhasználva állítják elő így üzemanyagciklusa során is környezetkímélőbb, leginkább lebomló szerves anyagokból állítják elő, e mentén is segíteni lehet az országokban lévő mezőgazdasági szektort. Rugalmas üzemeltetésű motorral rendelkező járművek esetében akár nagyobb arányban is hasznosítható az etanol, ennek köszönhetően terjedt el például Amerikában az E85-ös üzemanyagkeverék, a már említett előnyök mellett maga az üzemanyag ára is alacsonyabb a hagyományos benzinénél, viszont visszalépés érzékelhető üzemanyagfogyasztásban, mivel a benzin volumetrikus energiasűrűsége másfélszer nagyobb az etanolénál ($u_{\text{EtOH}}=21 \text{ MJ/l}$). Elsőként

bemutatott eljárások nem rendelkeznek számottevően nagy kibocsátási különbséggel a viszonyítási alapokhoz képest, ezért nem lett még vezető energiahordozó a gyártást vezető országokban sem (USA, Brazília). A két legfőbb felhasznált nyersanyag a cukornád és a kukorica, ezeknek az eljárásoknak optimalizálása és melléktermék kezelésének köszönhetően egyre költséghatékonyabb, de emellett van még kettő - bár hatékonyságukat tekintve még fejlesztésre váró – zöldebb eljárás, a szerves hulladékot és a lignocellulóz anyagokat felhasználó technológia [32].

2.4.1. Kukorica

Első generációs bioüzemanyag előállítások közé tartozik a - keményítő alapú - kukoricából előállított, üzemanyag minőségű etil-alkohol, első generáció fő jellemzője, hogy a felhasznált alapanyag ehető és az élelmiszeriparban felhasználható cikk. A takarmányt elsősorban learatják, összegyűjtik és elszállítják. Tárolás során fontos lépés kiszárítani a kukoricát, ezt követően pedig bedarálják, amit majd összekevernek vízzel és alfa-amiláz enzimekkel, amik segítenek a keményítőt emelt hőmérsékleten (85-95 °C) egyszerűbb cukrokká alakítani. Ezt követően specifikus élesztőgombák vagy baktériumok (pl: *Saccharomyces cerevisiae*) segítségével történik az erjesztési folyamat. Az etanolt desztillációval választják el az erjesztési keverékből, amelyet általában dehidratálás követ a szükséges üzemanyag minőségű etanol-koncentráció elérése érdekében. A folyamatból visszamaradó szilárd és folyékony hulladékokat energetikai hasznosítás vagy melléktermékként való felhasználás céljából kezelik vagy újrahasznosítják [32]. Körülbelül 7 kg kukoricából állítható elő 1 liter bioetanol [33]. Az eljárás fő lépései szinte megegyeznek akármilyen alapanyaggal is történik az előállítás, ezért a **13. ábra** jól bemutatja általánosan a bioetanol előállítási menetét. Mai bioetanol előállítás 60%-át a kukoricából való kinyerés biztosítja. A kukoricaalapú bioetanol a kukorica termesztéséhez, betakarításához és feldolgozásához szükséges magas energiafelhasználás miatt nem lényegesen környezetkímélőbb, mint a hagyományos üzemanyagok. A műtrágyák és növényvédő szerek használata, valamint az energiaigényes desztillációs és szállítási szakaszok gyakran jelentős üvegházhatású gázkibocsátáshoz vezetnek. Emellett a földhasználat és az élelmiszer-növényekkel való versengés csökkentheti a környezeti előnyöket, így a nettó szénlábnyom hasonló, vagy csak alig alacsonyabb, mint a hagyományos fosszilis tüzelőanyagoké.



13. ábra Bioetanol (kukoricából) előállításának folyamata

2.4.2. Cukornád

A cukornádból történő első generációs bioetanolgyártás a cukornádszár összezúzásával kezdődik, hogy kivonják belőle a cukorban gazdag levet. Ezt a levet *Saccharomyces cerevisiae* élesztővel erjesztik, hogy etanolt állítsanak elő. A visszamaradó bagasztot (rostos maradékot) általában hő- és villamosenergia-termelés céljából elégetik. Az erjesztett keveréket lepárlásnak vetik alá az etanol kivonása érdekében (melléktermékként cefrét kapunk). Az üzemanyag minőségű etanol előállítása érdekében egy dehidratálási folyamat során eltávolítják a maradék vizet, így vízmentes etanol keletkezik [34]. 12,5 kg-nyi cukornádból állítható elő 1 liternyi bioetanol [35]. Jelenlegi arányok szerint a bioetanolgyártás 40% százalékát a cukornádból való előállítás biztosítja.

2.4.3. Faalapú erdei maradványok

Az előző metódusok során cukor- és keményítőalapú biomasszából készítettek glükózt, szacharózt és fruktózt, amiből az ismertetett élesztőgomba segítségével képződött etanol. Cellulóz eljárás esetében lignocellulóz-alapú mezőgazdasági anyagmaradványokat használnak nyersanyagként, ezek az anyagok például az aratás után visszamaradt kukoricatörmelék, vagy egyéb növénymaradványok. Mivel az eljárás során már nem az élelmiszeriparban használt növényeket alakítjuk át, hanem szerves hulladékot, ezért az előállítás ennek a szintjét második

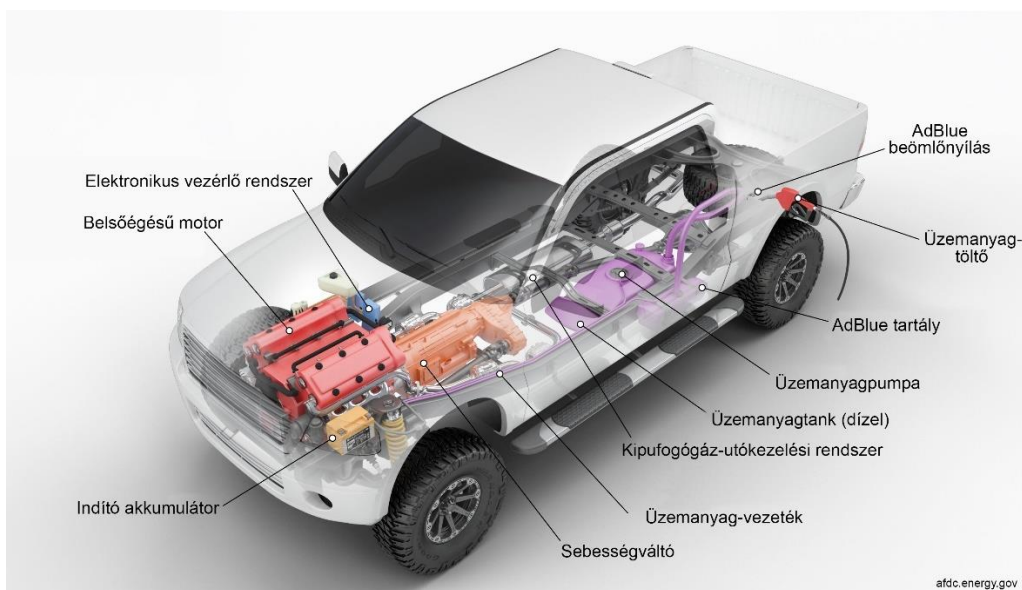
generációs bioetanol gyártásnak nevezzük [36]. Mezőgazdasági maradványok etanolhozama körülbelül hasonló, 2,08 kg faalapú maradványból előállítható 1 liter etanol [37]. Teljesen hasonló az eljárás négy fő lépése, előkezelés, enzimatis hidrolízis, erjesztés és desztilláció, az első kettő esetében van különbség, mivel a lignocellulózt nehezebb lebontani, mint a cellulózt. Előkezelés során lúgos vagy savas anyagokkal teszik tovább bonthatóvá, ezután pedig enzimekkel (celluláz vagy hemicelluláz) is lehetővé teszik az erjesztést [32], [38].

2.4.4. Kukoricatörmelék és egyéb szerves hulladék

Az etanol (szintén második generációs) előállítása kukoricatörmelékből és szerves hulladékból az alapanyagok előkészítésével kezdődik. A törmeléket és a hulladékot összezúzzák kis méretűre, a keményítőhöz 4 liter vizet és árpamalátát adnak, megfőzik, és enzimeket használnak a zselésítéshez és a cseppfolyósításhoz. A cellulózt kénsavval kezelik és melegítik, hogy a rostokat cukorra bontják. Szűrés és a cukoroldat semlegesítése után a keményítő- és cellulózmaradékot *Saccharomyces cerevisiae* élesztővel erjesztik. Az erjesztett keveréket ezután desztillálják, hogy üzemanyag minőségű etanolt tudjanak kinyerni [36], [39], [40]. Nem-élelmiszernövényi forrásból eredő eljárások, nincsenek napjainkban elterjedve, viszont a világon felgyülemelő nagy mennyiségű szerves hulladékokat felhasználva, környezetkímélő eljárási módszer lehet a jövőre tekintve.

2.5. Fischer-Tropsch üzemanyagok

Német Franz Fischer és Hans Tropsch által feltalált szintézis-folyamat segítségével létrehozható szén, földgáz, biomassa vagy akár elektromos áram segítségével rengeteg fajta szénhidrogén termék. Ezekbe beletartoznak az energiahordozók is, mint a dízel (dízelhajtású jármű működési elemeit bemutatja az **14. ábra**), benzin és kerozin. A FT eljárást emelik ki, mint a legjobb módszert a kiváló minőségű, kén- és nitrogénmentes dízelüzemanyag előállítására [41] (Shell által forgalmazott V-power diesel is FT szintézisből van előállítva), amelyet a szigorú üzemanyag-szabványokkal rendelkező régiókban előnyben részesítenek. Az előző üzemanyagokhoz képest az FT üzemanyagokat (főleg a benzint) nagyon kicsi arányban gyártják világszinten, mivel a dolgozat fő célja az előremutatás, ezért ebben az esetben nem fogom számításba venni a fosszilis forrásokat, csak az elektromos előállítási formát, amit be is mutatok.

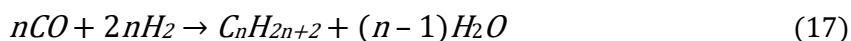
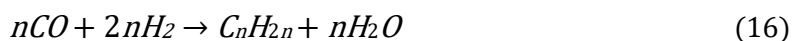
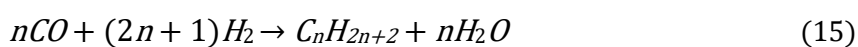


14. ábra Dízel személygépjármű fő hajtásrendszer elemei ([42], saját fordítás)

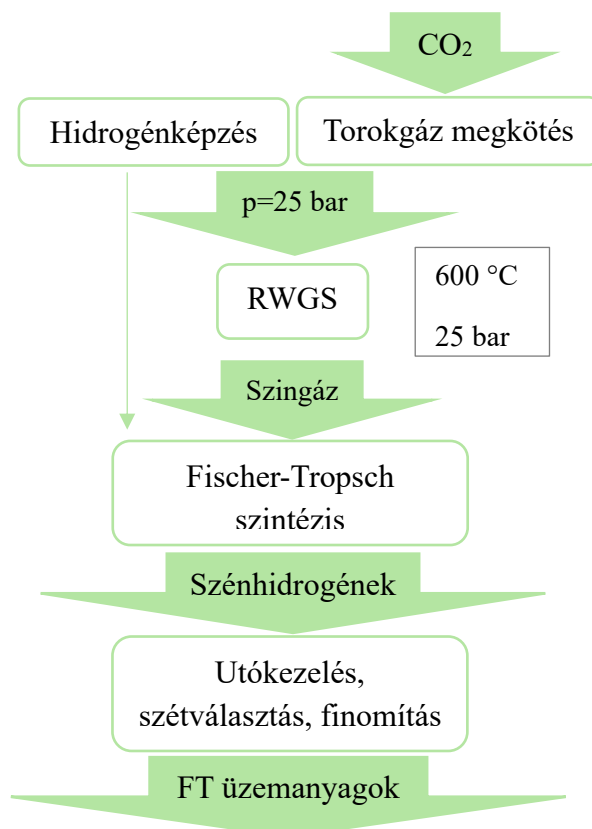
A FT e-üzemanyag két alapanyaga a hidrogén és a szén-dioxid. A számítások során a hidrogén forrása meg fog egyezni a jelenlegi és a jövőre vett hidrogén előállítási arányokkal, így tehát a beszélhetünk szürke, barna, kék és zöld hidrogénről, mint nyersanyag. Emellett megkötő rendszerek segítségével jutunk szén-dioxidhoz, ezek egy helyre szállítása után az eljárás a következőképpen halad: először 25 bar-os nyomásra sűrítik mindkét anyagot, mivel a hasznosított reakciók csak ezen a nyomáson mennek végbe tisztán [43]. A reakció – a már korábban bemutatott folyamat ellentéte - a fordított víz-gáz reakció (RWGS, reverse water-gas shift), ami emelt nyomás mellett, magas hőmérsékleten (600 °C-on) megy végbe, bárium-cirkonát alapú katalizátor jelenlétében, szintézisgáz előállítása céljából:



Ezután a megfelelő molarányban kapott gázelegy reagál, a már korábban, külön sűrített hidrogénnel egy kobalt- vagy vasalapú katalizátor felszínén. Ezeken az anyagokon megy végbe maga az nevezetes szintézis, amely során metántól kezdve a viaszszerű, hosszú láncú szénhidrogénekig számos különféle termék keletkezhet. A következő reakciók történnek a szintézis során [44]:



A folyékony szénhidrogéneket viaszra (20-nál nagyobb szénatomszámú nehezebb szénhidrogének) és könnyebb szénhidrogénekre (főként 5-20 karbonszám közt) választják el. A viaszt hidrokrakkolással könnyebb szénhidrogénekké alakítják. A könnyebb szénhidrogéneket ezután desztillációval folyékony termékekre (benzin, nafta, repülőgép-üzemanyag és dízel) finomítják. A többi reakcióterületről származó összes éghető maradékot egy kazánban elégetik, hogy energiát termeljenek egy gőzturbina segítségével (**15. ábra**) [43], [44].



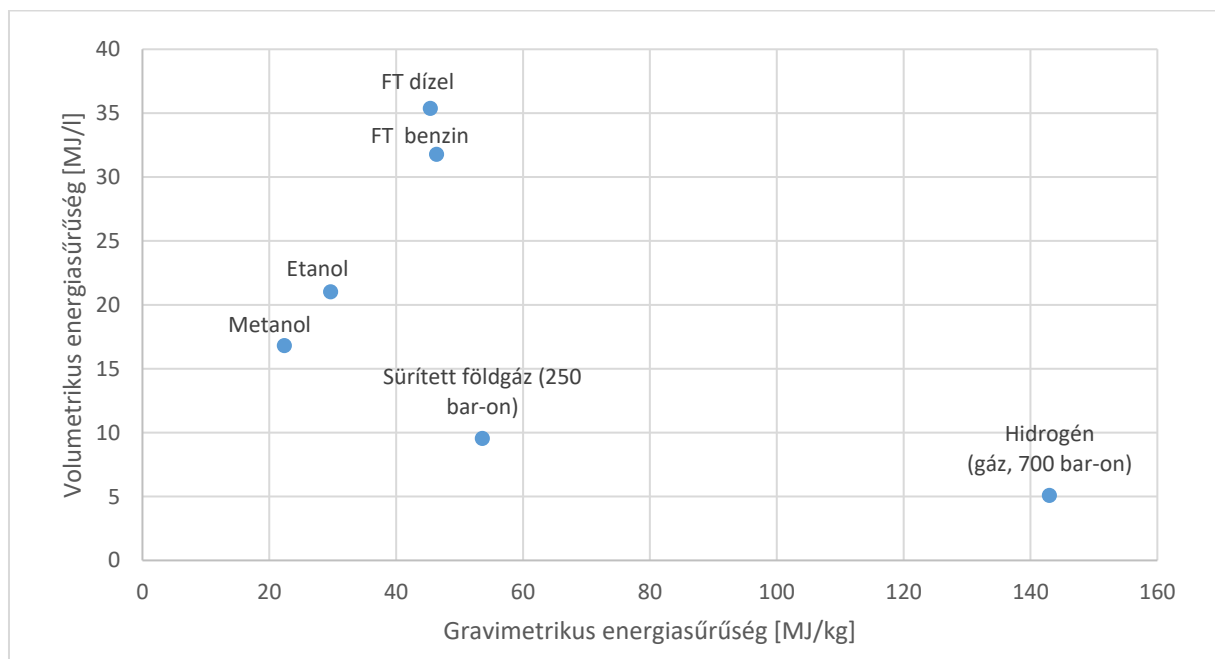
15. ábra Fischer-Tropsch üzemanyagok előállításának folyamata

Számos kihívással szemben áll a technológia, mielőtt versenyképes tudna lenni a jelenlegi kőolajból előállított üzemanyagokkal szemben. A FT üzemanyagok versenyképességének javítása érdekében elengedhetetlen a megújuló energiaforrásokon alapuló, olcsó hidrogén-előállítási technológiák fejlesztése és alkalmazása, mivel a FT üzemanyagok előállítási költsége erős kapcsolatban van a hidrogénével. Magának a FT eljárásnak is a hatékonyságát szükséges kutatni, hidrogén és szén-dioxid újrahasznosítási arányok javításával, valamint az FT reakció konverziós arányának növelésével. A CO₂ árának csökkentése érdekében célszerű olyan ipari folyamatokból származó CO₂-t felhasználni, amelyeknél a CO₂-leválasztás költsége alacsony, mint például az etanol-, ammónia- vagy cementgyárakból, mivel ezek esetében nem igényelnek leválasztási folyamatot, és csak a

hőcserélő és a sűrítés költségeit kell figyelembe venni. Emellett fontos alternatív szintézisutakat is vizsgálni, mivel a korábban szóba került üzemanyagokat kivétel nélkül elő lehet állítani FT szintézis során, ezért akár párhuzamosan több termék előállítását is lehetne hatékonyan biztosítani [45].

2.6. Potenciál az energiasűrűségben

A fő említendő különbség az üzemanyagok közt az a kétfajta energiasűrűség, amelyek összehasonlításával már levonható egy előzetes konklúzió az energiahordozókkal kapcsolatban. A Fischer-Tropsch benzin és a dízel egy megszokottabb opciót jelent, mivel energiasűrűségük egybevágó hagyományos társaikéhoz, emiatt ők rendelkeznek a legmagasabb volumetrikus energiasűrűséggel a vizsgált tüzelőanyagok közül. A metanol és az etanol rendre fele vagy kétharmad akkora volumetrikus energiasűrűséggel rendelkeznek, mint a konvencionális viszonyítási alapok, de ilyen különbséggel még alkalmazhatóak belsőégésű motorokban, ugyanúgy, mint a sűrített földgáz is, amely akkora értékkel rendelkezik (**16. ábra**).



16. ábra Alternatív üzemanyagok volumetrikus és gravimetrikus energiasűrűségének összehasonlítása

Az ábrából leolvasható, hogy bár a hidrogén (még 700 bar-os nyomáson is) heted akkora volumetrikus energiasűrűséggel rendelkezik, mint a FT dízel, amely miatt a hagyományos belső égésű motorokban való széleskörű felhasználását nagymértékben korlátozza, viszont ő rendelkezik a legnagyobb gravimetrikus energiasűrűséggel. Ezért különösen vonzóvá teszi olyan alkalmazásokban, ahol a súly kritikus tényező, például a légi közlekedésben és a

nehézgépjárműveknél. A továbbfejlesztett tárolási megoldások, például a szilárd halmazállapotú hidrogéntárolás és a folyékony szerves hidrogénhordozók (LOHC) kutatása a hidrogén alacsony térfogatsűrűségével és a nagynyomású tárolás szükségességével kapcsolatos jelenlegi kihívások megoldását célozza.

3. LCA és/vagy WTW

Két fontos fogalmat kell megemlítenem, amelyek alapján végeztem a vizsgálatot az előbb felsorolt üzemanyagokról. Mindkettő elemzésmódszert előszeretettel használják a környezettudomány, a fenntarthatósági tanulmányok és mérnöki tudományok területén.

Az életciklus-elemzés (LCA, life cycle assessment) egy olyan eszköz, melynek segítségével fel lehet mérni egy termék vagy szolgáltatás teljes élete során jelentkező lehetséges környezeti hatásokat, a nyersanyag-beszerzéstől a gyártáson, a felhasználáson át a hulladékkezelésig. Az LCA átfogó értékelés, amely a természeti környezet, az emberi egészség és az erőforrások minden aspektusát figyelembe veszi. Számos alkalmazásban használják: termék- és folyamattervezés, marketing vagy politikaalkotás. Négy fő fázisból áll az LCA [46], [47].

1. Cél és hatókörmeghatározás: A tanulmány elvégzésének okai, a tervezett alkalmazás és a célközönség meghatározása. Ez a fázis meghatározza, hogy az LCA-t hogyan hajtják végre, és leírja a vizsgálat rendszerhatárait, valamint meghatározza a funkcionális egységet, ami referenciapontként szolgál és lehetővé teszi a különböző rendszerek, termékek vagy scenáriók konzisztens összehasonlítását.
2. Életciklus-leltár (LCI, life cycle inventory): A termék rendszerébe belépő és onnan kilépő anyag- és energiaáramok összegyűjtése és feldolgozása. A rendszerhatárok meghatározása azért fontos az LCI-ben, mert nem lehet minden folyamatot figyelembe venni. Az ISO szabvány és a különböző nemzeti és nemzetközi iránymutatások azt javasolják, hogy a többféle célú folyamatok hatásainak allokálása (elosztása) ahol lehetőség van rá, kerülendő. Az LCI elvégzéséhez sok adatra van szükség, amelynek összegyűjtése az LCA egyik legmunkaigényesebb szakasza lehet. Számos adatbázist fejlesztettek ki az elmúlt évtizedekben az LCI megkönnyítése érdekében. Vizsgálatom során a GREET modell-ben lévő adatok alapján dolgoztam.
3. Életciklus-hatáselemzés (LCIA, life cycle impact assessment): Az LCIA a leltár eredményeit számos kiválasztott hatáskategóriába konvertálja és néha tovább modellezi azokat az LCIA „védelmi területeibe”. Ezek a területek általában az emberi egészséget,

a természeti környezetet és a természeti erőforrásokat jelentik. A hatásértékelés lehet közép- vagy végpont-értékelés. A végpont-értékelés a védelmi területek szintjén alkalmaz indikátorokat, míg a középpont-indikátorok a kibocsátás és a végpont között vannak meghatározva.

4. Értelmezés: Az előző fázisok eredményeinek értékelése a cél és a hatókör tekintetében, következtetések és ajánlások megfogalmazása céljából.

A kúttól a keréig (WTW, well-to-wheel) elemzéstípus a közlekedési üzemanyagok és járművek energia- és éghajlatváltozásra gyakorolt hatásának számszerűsítésére szolgáló, nem szabványosított módszer. A WTW elemzés két részre osztható: a kúttól a tartályig (energiaszolgáltatás, well to tank, WTT) és a tartálytól a keréig (járműhajtás, tank to wheel TTW) elemzésre [48]. Mivel a dolgozatomban kifejezetten az energiahordozókat vizsgálom, ezért kijelenthető, hogy a jármű WTW elemzése során az üzemanyagok teljes élet ciklus elemzését végzem. Tartálytól keréig szakaszban viszont személygépjárművek hajtáshatékonysága volt feltételezve.

4. GREET modell

A GREET-modell (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies) az Argonne National Laboratory által kifejlesztett átfogó eszköz a különböző üzemanyagok és járműtechnológiák energia- és környezeti hatásainak értékelésére. Elsődleges célja a különböző üzemanyag- és járműrendszerek előállításához, forgalmazásához és használatához kapcsolódó életciklus-kibocsátások és energiafelhasználás értékelése. A GREET-et széles körben használják a politikai döntéshozók, a kutatók és az iparágak az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentését célzó energiastratégiákkal és technológiákkal kapcsolatos döntésekhez. A modell két fő komponenset tartalmaz:

1. Üzemanyagciklus-elemzés (WTW, GREET 1): Ez az üzemanyag-kitermeléstől vagy alapanyag-előállítástól az üzemanyag járművekben történő végső felhasználásáig tartó szakaszokat elemzi. Az elemzésnek ez a része kritikus fontosságú a megújuló és fosszilis tüzelőanyag-alternatívák, például a hidrogén, a bioüzemanyagok és a földgáz értékeléséhez.
2. Járműciklus-elemzés (GREET 2): Ez a komponens a járműgyártáshoz, -üzemeltetéshez és -használathoz kapcsolódó kibocsátásokat és energiafelhasználást értékeli.

A GREET modell lehetővé teszi a hagyományos üzemanyagok és az alternatív üzemanyagok összehasonlítását a különböző gyártási útvonalakon, figyelembe véve a gyártási technológia és az energiaforrások változásait. Több kibocsátási kategóriát tartalmaz, mint például CO₂, metán, Global Warming Potential (GWP), részecskék és egyéb.

A modellből minden bemutatott üzemanyagelőállítási típusra MJ-onkénti kibocsátást kigyűjtöttem megfelelő paramétereket figyelembevéve (egyedül a fosszilis tüzelőanyagok esetében tudtam csak az amerikai adatokat felhasználni, mint paraméter, ezáltal még előnybe is helyeződik a viszonyítási alap az USA kőolaj készletei miatt). Tehát ebben az elemzésben a funkcionális egység a MJ, mivel egy üzemanyag életciklusát vizsgálom, nem a megtett kilométer a fontos ez esetben, hanem a kinyerhető energia, adott hatékonysággal számolva.

5. Saját vizsgálat

5.1. Vizsgálati paraméterek

A GREET modellbe különböző kiindulási adatokat kell megadni, amelyek segítségével sokféle scenáriót lehet vizsgálni. Előállítások kapcsán 100%-ig központi üzemekben voltak az üzemanyagok előállítva. A CCS CO₂ megkötési aránya minden esetben 92%-os. Biohidrogén nyersanyaga a nyárfa és a vesszős köles. Bio-CNG és a biometanol esetében a forrás 100%-ig szerves hulladéktelepi-gáz. Az összes e-üzemanyag előállítása során szükséges hidrogén forrása megegyezik a vizsgált időszak (jelen/jövőbeli) előállítási aránnyal, CO₂ pedig 100%-ban égés-utáni megkötés segítségével lesz leválasztva, viszont a SNG esetében (ami szintén e-üzemanyag) csak zöld hidrogénnel kalkuláltam, mivel értelmetlen lenne fosszilis földgázból szintetikus földgázt képezni.

Az **1. és 2. táblázat** különböző aktuális jelentésekből és jövőbeli előrejelzésekből állítottam össze, CNG, metanol és etanol esetében nagyon kevés adat volt az előrejelzések kapcsán, ezért például feltételeztem, hogy etanol szempontjából megfelelőbb fejlődési pálya lenne bioeljárásokra fókuszálni, mivel ott számos törekvés és fejlesztési lehetőség van [49], [50], [51], [52], [53]. Az üzemanyagokra vonatkozó fejezetben részletezett termelési technológiák felhasználási arányait foglalják magukba, üzemanyagokként csoportosítva, valamint még tartalmazza Európa villamosenergia-termelés 2024-es és 2050-es összetételét (2050-es összetétel esetében is megpróbáltam az előrejelzésekből a maximum arányokkal számolni, ezáltal legrosszabb esettel számolok).

1. táblázat: 2024-es előállítási arányok

H ₂	Földgáz	Szén	Fosszilis+CCS	Olaj	Elektrolízis
	62,5%	21%	0,6%	16%	0,10%

CNG	Földgáz
	100%

MeOH	Földgáz	Szén
	65%	35%

EtOH	Kukorica	Cukornád
	60%	40%

FT benzin	Fosszilis	Fosszilis+CCS	Elektrolízis
	83,3%	16,6%	0,1%

FT dízel	Fosszilis	Fosszilis+CCS	Elektrolízis
	83,3%	16,6%	0,1%

EU e-mix	
Olaj	1,6%
Földgáz	19,6%
Szén	15,8%
Nukleáris	21,9%
Biomassza	4,4%
Megújuló	36,7%

2. táblázat: 2050-es előállítási arányok

H ₂	Földgáz	Szén	Fosszilis+CCS	Biomassza	Elektrolízis
	9,96%	5%	28,96%	3%	52,95%

CNG	Földgáz	Biomassza	Szintetikus
	60%	30%	10%

MeOH	Földgáz	Szén	Fosszilis+CCS	Biomassza	Szintetikus
	15%	5%	40%	15%	25%

EtOH	Kukorica	Cukornád	Erdei maradv.	Cellulóz
	20%	25%	15%	40%

FT benzin	Fosszilis	Fosszilis+CCS	Elektrolízis
	15%	29%	56%

FT dízel	Fosszilis	Fosszilis+CCS	Elektrolízis
	15%	29%	56%

EU e-mix	
Olaj	1%
Földgáz	16%
Szén	1%
Nukleáris	25%
Biomassza	5%
Megújuló	52%

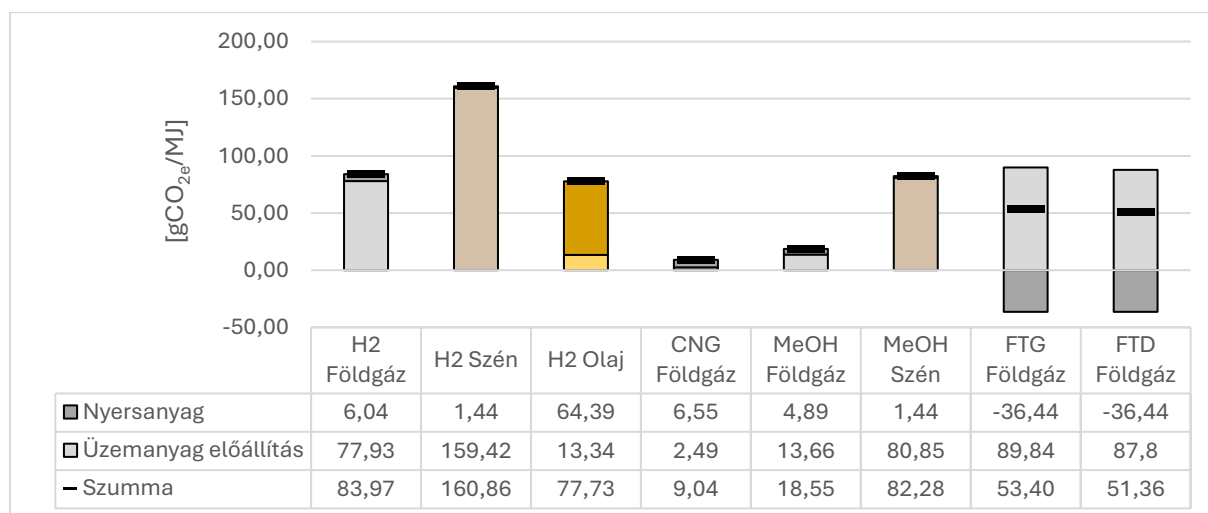
Ésszerűen elvárható, hogy a motorok hatékonysága 2050 felé haladva minden motortípusnál tovább javuljon, nem csak a benzinmotoroknál. A technológiai fejlődés, a szigorúbb kibocsátási előírások és a szén-dioxid-kibocsátás csökkentésére irányuló globális törekvések mind-mind a motorok tervezésében és üzemanyag-felhasználásában bekövetkező innovációkat ösztönzik. Ezeknek a fejlesztéseknek a mértéke azonban ebben a vizsgálatban elhanyagolható, mivel a kibocsátást felhasznált MJ-onként veszem figyelembe, ismételten fontos kijelentenem, hogy az üzemanyagok életciklusát vizsgálom. MJ funkcionális egységgel a hajtások hatékonyságát nem kell számításba vennem, ezzel ellentétben, ha km lenne a funkcionális egység akkor tenne különbséget a hajtáshatékonyság.

Ahogy már az üzemanyag fejezetben is szó volt róla a metanol, az etanol és a FT benzin keverékként lesz felhasználva, mint üzemanyag a gyakorlatban, ezért a keverék gyártásának kibocsátását veszem számításba a végső eredménynek. Metanol és etanol esetében ez 15% benzint jelent, valamint a szintetikus benzin esetében ez 10% bioetanol (jelenben és jövőben az éppen adott előállítási arány a meghatározó az etanol számára is).

5.2. Számítási részeredmények (WTP és PTW)

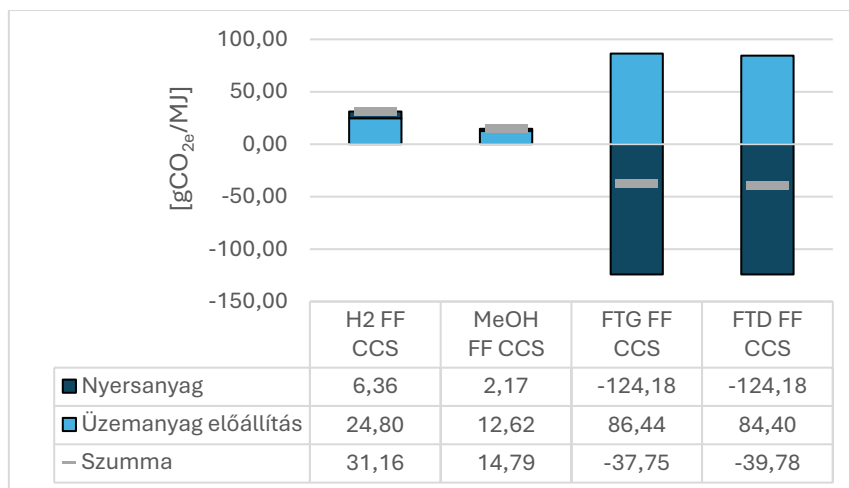
A GREET modell segítségével egyszerű módon hozzá lehet jutni a kibocsátási adatokhoz, ez jóval megrövidíti a kutatási procedúrát, mivel nem kell saját LCI-t felállítani egyesével minden előállítási útvonalhoz, majd egyesével kalkulálni a szén-dioxid kibocsátást minden szakaszban. A GREET leosztja különböző szakaszokra a folyamatot és a végén egy végleges kibocsátást kiszámol, dolgozatomban a 2023-as Excel modellt használtam. Részeredményként megemlítendő az előállítási procedúrák well-to-pump (WTP) kibocsátásai,

mivel felhasználási pump-to-wheel (PTW) szakaszban már az előállítási forma nem okoz értékkülönbséget. WTP kibocsátásokat 4 részcsoportha osztottam: fosszilis (**17. ábra**), fosszilis+CCS (**18. ábra**), bio- (**19. ábra**) és e-üzemanyagok (**20. ábra**). Valamint a PTW fázis kibocsátásainak összehasonlítását a **21. ábra** mutatja be.



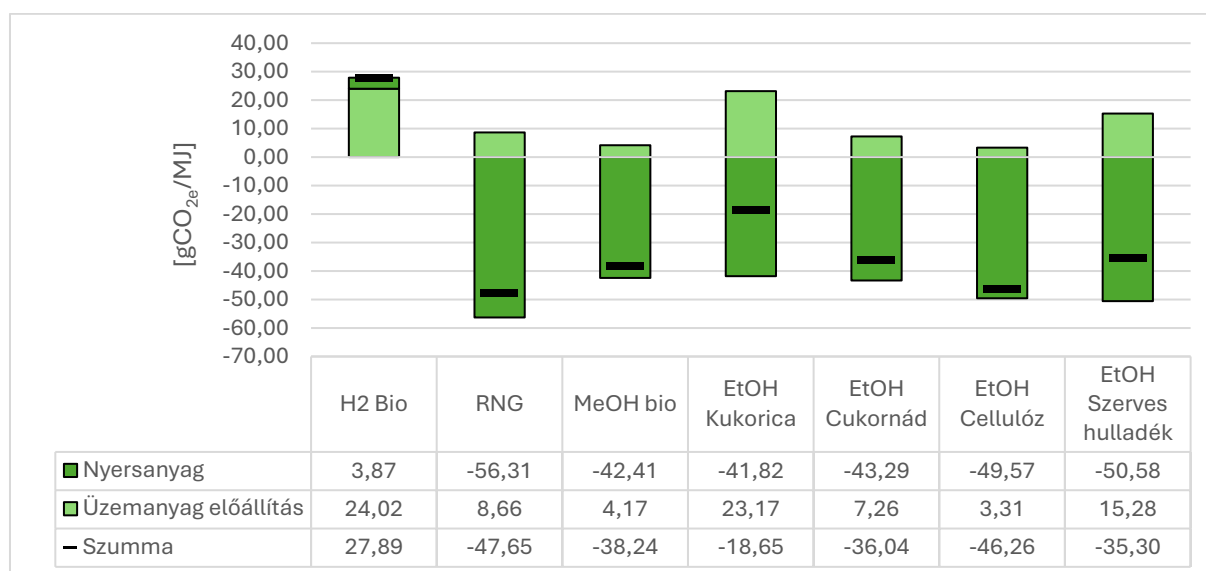
17. ábra Fosszilis energiahordozóból előállított alternatív üzemanyagok CO₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban

Az adatok alapján látható, hogy maga az alapanyag kinyerése nem igényel nagy mennyiségű károsanyag-kibocsátást (kivéve az olajalapú hidrogéngyártást, itt a hidrogénképzés mellékfolyamat ezért számítja bele a GREET a nyersanyag szakaszba a kibocsátás nagy részét, mivel csak a kiválasztás jelenti az előállítási fázist), viszont az előállítási procedura annál inkább, ez alól kivételt élvez a metanol és a sűrített földgáz, mivel a földgázt csak összesűríteni kell megfelelő szállítható és üzemi állapotra, a metanol pedig kémiai tulajdonsága miatt előnyös, mivel az előállítási reakció során a szintézisgázból a szén-monoxid közvetlen beépül a metanolba.

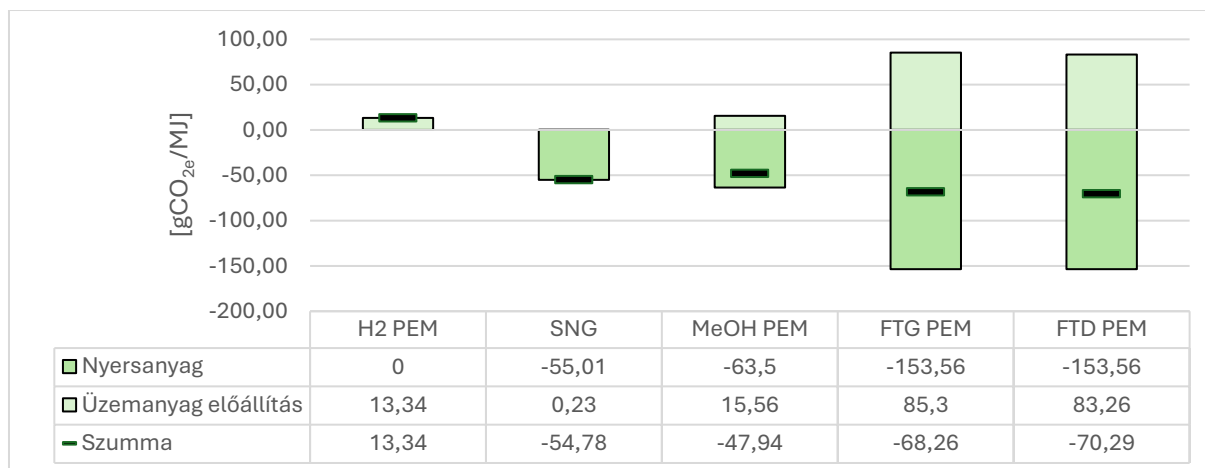


18. ábra Fosszilis energiahordozóból, szén-dioxid leválasztó- és tárolórendszerrel ellátott technológiából előállított alternatív üzemanyagok CO₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban

Hidrogén esetében az előállítási kibocsátások csökkentenek nagymértékben, ugyanez a Fischer-Tropsch üzemanyagoknál pedig a nyersanyag fázisba számít bele (mivel szintézisgáz egyik alapanyagának - a hidrogén - előállítása során is még több CO₂ kötődik meg). Metanol+CCS esetében túlnyomórészt szénből való előállítással számítottam, mivel ahogyan már említettem, minél kisebb a szén-dioxid árama egy kéménynek annál inkább energiaigényesebb az eljárás, ezért az eredeti szénből való előállításhoz képest hatod akkora az előállítási kibocsátás.

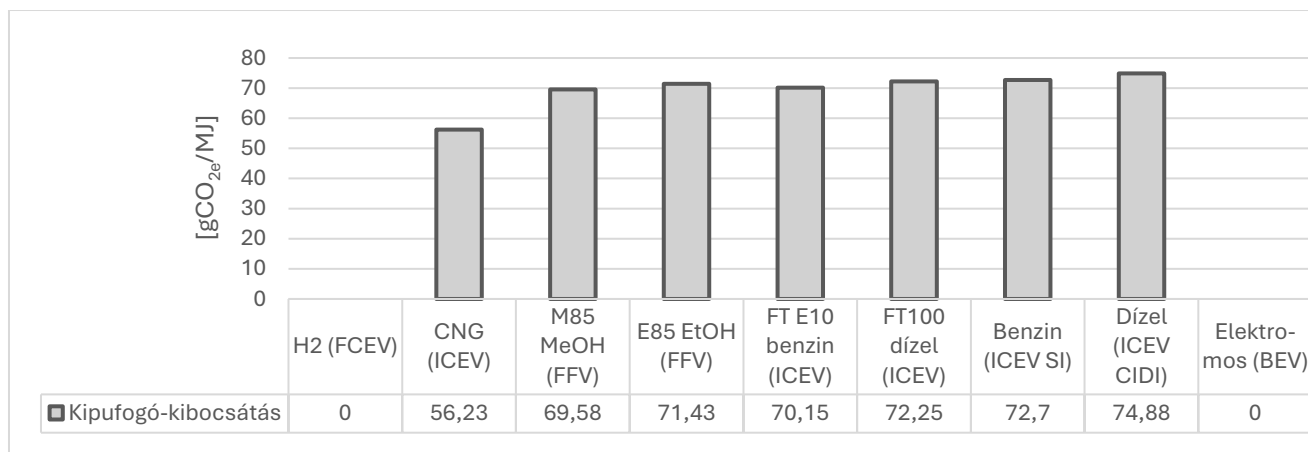


19. ábra Szerves nyersanyagokból előállított alternatív üzemanyagok CO₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban



20. ábra Protoncserélő membrános elektrolízissel előállított alternatív üzemanyagok CO₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban

Mindkét megközelítés - akár a bioalapú alapanyagok természetes szénciklusára támaszkodva, akár az elektrokémiai folyamatokban megújuló energiát használva - jelentősen alacsonyabb CO₂-kibocsátáshoz járul hozzá a hagyományos fosszilis tüzelőanyag-előállítási módokhoz képest. Protoncserélő membrános elektrolízis esetében nyersanyag fázisban azért jelenik meg ekkora negatív érték, mivel a hidrogén előállítása alapból nettó nulla kibocsátással jár, és a felhasznált szén-dioxid pedig torokgázból van kivonva, ezáltal csökken az átfogó emisszió. Bioeljárások esetében a felhasznált növényeket tekintjük nyersanyagnak, ezért a növények CO₂ megkötése okoz negatív kibillenést a nyersanyag szakaszban. Előállítási eljárások esetében csak a szintetikus üzemanyagok kiemelendők, mivel akármilyen forrásból is vannak előállítva ez a folyamat kifejezetten káros a környezetre nézve, működésének optimalizálása, szén-dioxid áramok ciklizálása a jövőre tekintettel elengedhetetlen. Még így is majdnem az összes kék és zöld hidrogénes eljárás összértékben negatív értéket ad, ezzel összesen több CO₂-ot vonnak ki az eljárások a környezetből, mint amennyit kibocsátanak a két szakasz során.

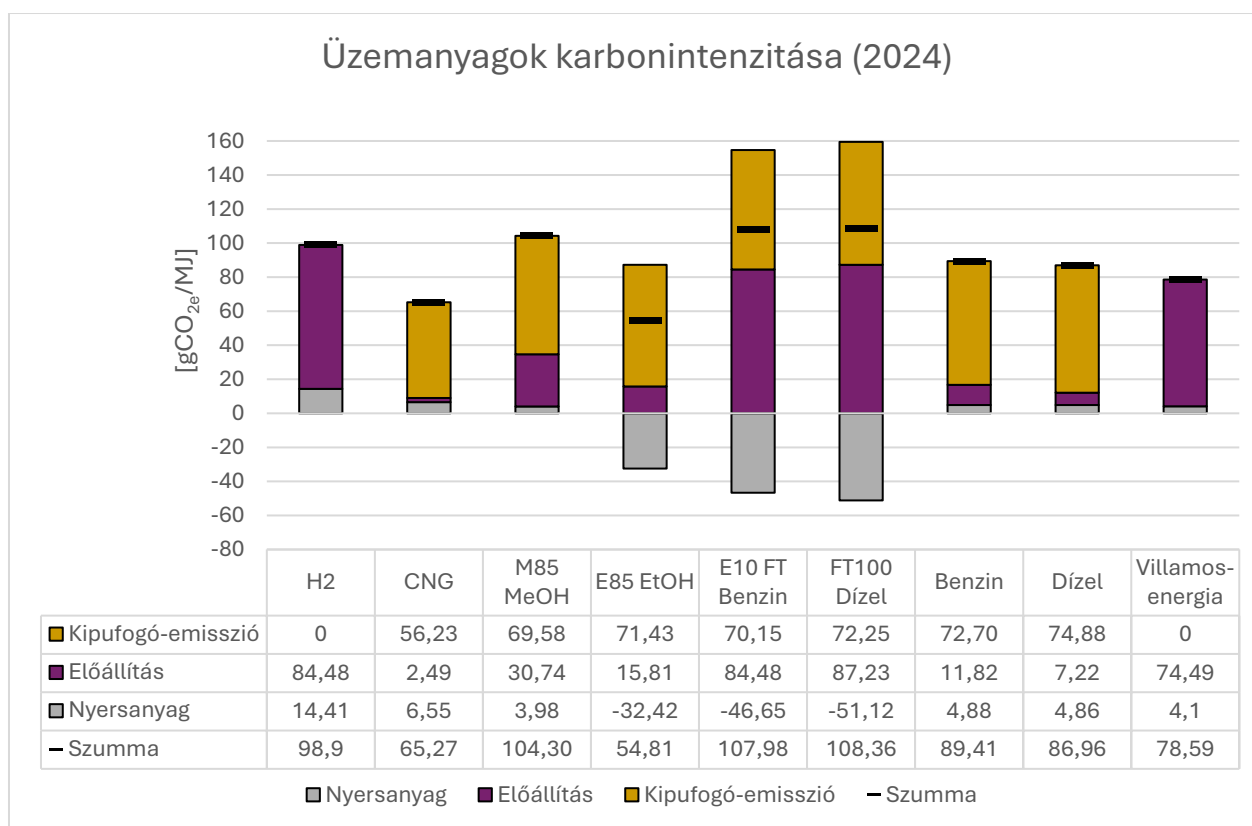


21. ábra Alternatív hajtású személygépjárművek kipufogó-kibocsátásának összehasonlítása

Az 2. fejezetben már említettem, hogy a CNG (2.2.), az M85 (2.3.) és az E85 (2.4.) üzemanyagok tisztább égést biztosítanak, ez szignifikáns csökkenést a CNG esetében mutat, mivel a metán esetében van igazán nagy hidrogén-szén arány. A szintetikus benzin és dízel, mivel kémiai felépítésükben megegyeznek a hagyományos tüzelőanyagokkal, ezért majdnem egybevágó eredményeket kapunk. Üzemanyagcellás és akkumulátoros elektromos autó esetében nincs kipufogógáz, villanymotoros meghajtásúak.

5.3. Számítási végeredmények (WTW LCA)

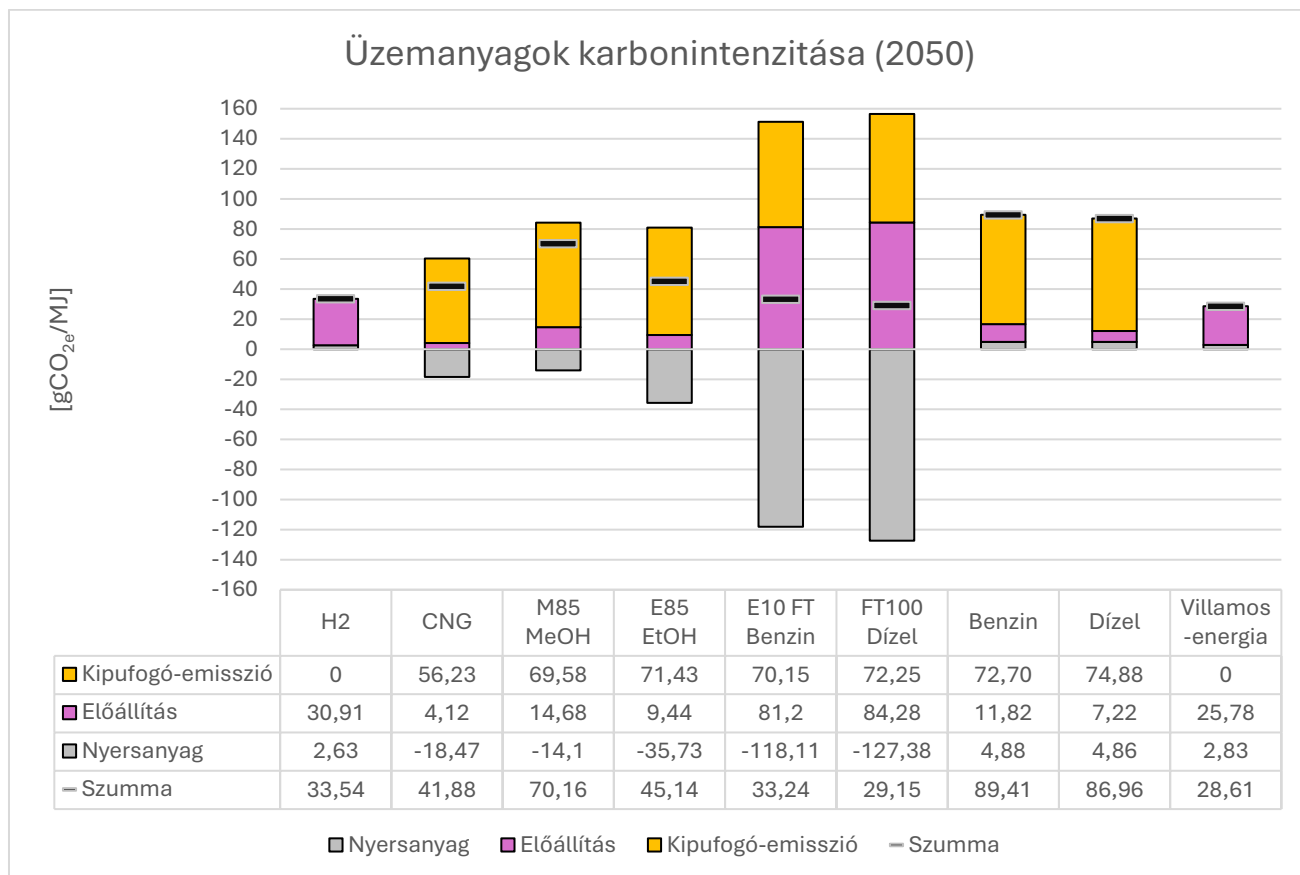
Az üzemanyagok teljes életciklusába tehát beletartozott a nyersanyag kinyerése, szállítása, a gyártási eljárás és a használat közben történő elégetés is, a kibocsátási adatokat a fejezet elején bemutatott előállítási arányok alapján számoltam ki, így meghatározva az egyes üzemanyagok átlagos kibocsátását. 2024-es és 2050-es végeredményeket bemutatja a **22. és 23. ábra.**



22. ábra Alternatív üzemanyagok karbonintenzitásának összehasonlítása hagyományos üzemanyagokéval napjainkban (2024-es adatok alapján)

Tisztán látható volt már a részeredményekből is, hogy a sűrített földgáz napjainkban elterjedt előállítási formája nagyon kicsi, a bioetanolé pedig negatív irányba billentette előállítás során a karbonintenzitást. Ez a két energiahordozó rendelkezik a legfenntarthatóbb életciklussal jelenleg. A CNG-nek lett így a legjobb nettó, az etanolnak pedig a legjobb bruttó eredménye, mivel a kukorica és cukornád termesztése során, amely nyersanyagként szolgál, nagy mennyiségű CO₂-ot köt meg élete során. Érdemes megjegyezni, hogy a többi alternatíva karbonintenzívebb, mint a 3 viszonyítási alap, hidrogén esetében az előállítás miatt (mivel főként földgázból és szénből képzik) nyúl túl az érték, metanol esetében a kipufogó kibocsátás nagyságrendileg megegyezik a benzinével és dízelével, viszont szén alapú előállítás mértéke miatt a jóval karbonintenzívebb, mint a hagyományos üzemanyagok. FT üzemanyagok lettek a legmagasabb szén-dioxid-terhelésűek, mivel a gyártási folyamatok körülbelül annyi kibocsátással járnak, mint amelyet a hidrogén életciklusa során tapasztalunk (a hidrogén kibocsátási értéke a nyersanyag fázisban jelenik meg, az, hogy a FT benzin előállítási értéke megegyezik a hidrogénével pusztán véletlen egybeesés) és ehhez még hozzáadódik a fosszilis üzemanyagoktól megszokott közvetlen kibocsátás, a végértéket nem képes mérsékelni a másik

alapanyag (szén-dioxid) megkötése, tehát több, mint 20 gCO_{2e}/MJ-al nagyobb emisszióval járnak, mint a tradicionális energiaforrások.



23. ábra Alternatív üzemanyagok karbonintenzitásának összehasonlítása hagyományos üzemanyagokéval a jövőben (2050-re prognosztizált adatok alapján)

Jövőbeli esetben már sokkal kisebb végeredményeket láthatunk az alternatívák esetében. Legtöbb terhelést okozó üzemanyag a metanol lesz, mivel közvetlen kibocsátása mellett, nem képes akkora CO₂ mennyiséget megkötni nyersanyag fázisban, hogy versenyképes legyen a többi energiahordozóval. Sorban utána a CNG és E85 már jóval nagyobb mennyiségű CO₂-t tud kiválasztani (CNG előállítása emellett kifejezetten környezetkímélő lesz, ahogyan a másodgenerációs bioetanol is), mivel biotechnológiáik sokkal kedvezőbbek, fele akkora végértékkel rendelkeznek, mint a fosszilis viszonyítási alapok. Itt is szintén két fajta ideális opció lesz, legkevesebb valós kibocsátása a hidrogénnek lesz, legkisebb teljesértékű szénterhelése pedig a FT üzemanyagoknak, mindhárom optimális alternatíva nagyjából harmadakkora végértékkel rendelkezik, mint az eredeti fosszilis üzemanyagok. FT benzin és dízel esetében viszont megemlítendő, hogy az összes valóban kibocsátott CO₂ mennyiség nagyon nagy a többi tüzelőanyaghoz viszonyítva, bár feltehetőleg a CCS (vagy CCU, szén-dioxid leválasztás és használat) csökkentheti a kibocsátást, az FT-folyamatokba való integrálása

nem mindig megvalósítható vagy hatékony. Az FT-folyamat konstans CO₂-kibocsátással jár, és ennek a kibocsátás valós idejű, termelési léptékben történő lekötése továbbra is kihívást, és további energiaigényt jelent. Ezentúl a hidrogén nagyságrendileg hasonló eredményekkel rendelkezik, ezért kiváló választás lehet a jövőben. Szintén nem kifejejtendő, hogy átfogóan a legkisebb kibocsátással a villamosenergia rendelkezik, mint üzemanyag.

6. Konklúzió és tervek

Dolgozatom során megállapítottam, hogy milyen környezeti hatásokkal jár most és nagyjából milyenekkel fog járni a jövőben az alternatív üzemanyagok életciklusa. Végeredményképpen kijelenthető, hogy optimális rövidtávú potenciállal a CNG és a bioetanol keverék rendelkezik, mindkettőnek az előállítás egyszerűségében rejlik az alacsony karbonintenzitás, mivel főként sűrítésről és erjesztésről van szó a két energiahordozó esetében. Hosszútávú potenciállal az eredmények alapján a hidrogén, a villamosenergia és a FT üzemanyagok rendelkeznek. A hidrogén- és villamoshajtások alacsony tényleges kibocsátásuk miatt indokoltá teszik ezek párhuzamos és összehangolt fejlesztését, hiszen alapvetően hasonló megoldásokként szolgálhatnak a fenntartható közlekedésben. Mindkét technológia továbbfejlesztése lehetőséget nyújt a fosszilis energiahordozóktól való fokozatos függetlenedésre, és hozzájárulhat a globális szén-dioxid-kibocsátás csökkentéséhez, emellett a FT eljárás fejlesztése pedig új távlatokat nyithat alternatív szénhidrogén termelési útvonalakra is.

Munkám során ismeretet szereztem az energiaipar számos eljárásának alapvető működéséről és átfogó kutatást végeztem a témán belül, jövőre nézve tervezem bővíteni az összehasonlítást, hogy ne csak üzemanyagok életciklusára vonatkozzon a vizsgálat, hanem járművek teljes életciklusára is egyben. Ezentúl szeretnék jobban részletekbemenőbb szimulációkkal is foglalkozni alapkutatáson belül (műszaki-gazdasági analízis), valamint alkalmazott kutatással is hasonló témában.

Ábrajegyzék

1. ábra Hidrogén üzemanyagcellás személygépjármű fő hajtásrendszer elemei ([2], saját fordítás)	7
2. ábra Szürke hidrogén előállításának folyamata	8
3. ábra Barna hidrogén (IGCC rendszer) előállításának folyamata	10
4. ábra Biohidrogén előállításának folyamata	12
5. ábra CNG személygépjármű fő hajtásrendszer elemei ([13], saját fordítás).....	14
6. ábra RNG előállításának folyamata	15
7. ábra SNG előállításának folyamata	16
8. ábra Rugalmas üzemanyag-felhasználású személygépjármű fő hajtásrendszer elemei ([22], saját fordítás)	17
9. ábra Szürke metanol előállításának folyamata	18
10. ábra Barna metanol előállításának folyamata.....	19
11. ábra Biometanol előállításának folyamata	20
12. ábra Szintetikus metanol előállításának folyamata.....	21
13. ábra Bioetanol (kukoricából) előállításának folyamata.....	23
14. ábra Dízel személygépjármű fő hajtásrendszer elemei ([42], saját fordítás)	25
15. ábra Fischer-Tropsch üzemanyagok előállításának folyamata	26
16. ábra Alternatív üzemanyagok volumetrikus és gravimetrikus energiasűrűségének összehasonlítása	27
17. ábra Fosszilis energiahordozóból előállított alternatív üzemanyagok CO ₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban	33
18. ábra Fosszilis energiahordozóból, szén-dioxid leválasztó- és tárolórendszerrel ellátott technológiából előállított alternatív üzemanyagok CO ₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban	34
19. ábra Szerves nyersanyagokból előállított alternatív üzemanyagok CO ₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban	34
20. ábra Protoncserélő membrános elektrolízissel előállított alternatív üzemanyagok CO ₂ kibocsátása nyersanyag kinyerési és előállítási fázisban	35
21. ábra Alternatív hajtású személygépjárművek kipufogó-kibocsátásának összehasonlítása	36
22. ábra Alternatív üzemanyagok karbonintenzitásának összehasonlítása hagyományos üzemanyagokéval napjainkban (2024-es adatok alapján).....	37
23. ábra Alternatív üzemanyagok karbonintenzitásának összehasonlítása hagyományos üzemanyagokéval a jövőben (2050-re prognosztizált adatok alapján).....	38

Irodalomjegyzék

- [1] C. Hochgraf, “Applications – Transportation | Electric Vehicles: Fuel Cells,” in *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier, 2009, pp. 236–248. doi: 10.1016/B978-044452745-5.00863-7.
- [2] “How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?” US Department of Energy; Energy Efficiency and Renewable Energy; Alternative Fuels Data Center. [Online]. Elérhető: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>
- [3] I. Dincer, M. A. Rosen, and M. Al-Zareer, “3.11 Chemical Energy Production,” in *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier, 2018, pp. 470–520. doi: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00326-6.
- [4] E. Budsberg, J. Crawford, R. Gustafson, R. Bura, and M. Puettmann, “Ethanologens vs. acetogens: Environmental impacts of two ethanol fermentation pathways,” *Biomass Bioenergy*, vol. 83, pp. 23–31, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.08.019.
- [5] P. Busch, A. Kendall, and T. Lipman, “A systematic review of life cycle greenhouse gas intensity values for hydrogen production pathways,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 184, p. 113588, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113588.
- [6] A. Midilli, H. Kucuk, M. E. Topal, U. Akbulut, and I. Dincer, “A comprehensive review on hydrogen production from coal gasification: Challenges and Opportunities,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 46, no. 50, pp. 25385–25412, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.05.088.
- [7] K. W. Bandilla, “Carbon Capture and Storage,” in *Future Energy*, Elsevier, 2020, pp. 669–692. doi: 10.1016/B978-0-08-102886-5.00031-1.
- [8] T. Lepage, M. Kammoun, Q. Schmetz, and A. Richel, “Biomass-to-hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno-economical assessment,” *Biomass Bioenergy*, vol. 144, p. 105920, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105920.
- [9] B. Pandey, Y. K. Prajapati, and P. N. Sheth, “Recent progress in thermochemical techniques to produce hydrogen gas from biomass: A state of the art review,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 44, no. 47, pp. 25384–25415, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.08.031.

- [10] S. Shiva Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 442–454, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.mset.2019.03.002.
- [11] K. Bareiß, C. De La Rua, M. Möckl, and T. Hamacher, "Life cycle assessment of hydrogen from proton exchange membrane water electrolysis in future energy systems," *Appl. Energy*, vol. 237, pp. 862–872, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.01.001.
- [12] H. Engerer and M. Horn, "Natural gas vehicles: An option for Europe," *Energy Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 1017–1029, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.054.
- [13] "How Do Natural Gas Vehicles Work?" US Department of Energy; Energy Efficiency and Renewable Energy; Alternative Fuels Data Center. [Online]. Elérhető: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-natural-gas-cars-work>
- [14] S. A. Momin, M. Dutta, S. Hassan, G. Kader, and S. Iftakher, "Study of Liquefied Petroleum Gas and Compressed Natural Gas Vehicles And It's Future Aspects," presented at the International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering (ICMIEE), Khulna, Bangladesh, Dec. 2016.
- [15] A. Demirbas, "Fuel Properties of Hydrogen, Liquefied Petroleum Gas (LPG) , and Compressed Natural Gas (CNG) for Transportation," *Energy Sources*, vol. 24, no. 7, pp. 601–610, Apr. 2017, doi: 10.1080/00908310290086527.
- [16] C. Un, "A Sustainable Approach to the Conversion of Waste into Energy: Landfill Gas-to-Fuel Technology," *Sustainability*, vol. 15, no. 20, p. 14782, Oct. 2023, doi: 10.3390/su152014782.
- [17] S. Singhal, S. Agarwal, S. Arora, P. Sharma, and N. Singhal, "Upgrading techniques for transformation of biogas to bio-CNG: a review: A review on upgradation techniques to transform biogas to bio-CNG," *Int. J. Energy Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1657–1669, Oct. 2017, doi: 10.1002/er.3719.
- [18] J. H. Reith and R. H. Wijffels, *Bio-methane & bio-hydrogen: status and perspectives of biological methane and hydrogen production*. Petten: Dutch Biological Hydrogen Foundation, 2003.
- [19] J. Guilera, "Economic viability of SNG production from power and CO₂," *Energy Convers. Manag.*, vol. 162, pp. 218–224, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.02.037.
- [20] H. Harada, A. Sinha, T. Yajima, and Y. Kawajiri, "Model-based techno-economic analysis of an integrated synthetic natural gas production system with direct air capture and water electrolysis," *Carbon Capture Sci. Technol.*, vol. 10, p. 100181, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.ccst.2023.100181.

- [21] N. Gerloff, “Comparative Life-Cycle Assessment Analysis of Power-to-Methane Plants Including Different Water Electrolysis Technologies and CO₂ Sources While Applying Various Energy Scenarios,” *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 30, pp. 10123–10141, Aug. 2021, doi: 10.1021/acssuschemeng.1c02002.
- [22] “How Do Flexible Fuel Cars Work Using Ethanol?” US Department of Energy; Energy Efficiency and Renewable Energy; Alternative Fuels Data Center. [Online]. Elérhető: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-flexible-fuel-cars-work>
- [23] T. Blumberg, G. Tsatsaronis, and T. Morosuk, “On the economics of methanol production from natural gas,” *Fuel*, vol. 256, p. 115824, Nov. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115824>.
- [24] B.-P. Ren, Y.-P. Xu, Y.-W. Huang, C. She, and B. Sun, “Methanol production from natural gas reforming and CO₂ capturing process, simulation, design, and technical-economic analysis,” *Energy*, vol. 263, p. 125879, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2022.125879.
- [25] C. Arnaiz Del Pozo, S. Cloete, and Á. Jiménez Álvaro, “Techno-economic assessment of long-term methanol production from natural gas and renewables,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 266, p. 115785, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.enconman.2022.115785.
- [26] D. Wang *et al.*, “Novel coal-to-methanol process with near-zero carbon emission: Pulverized coal gasification-integrated green hydrogen process,” *J. Clean. Prod.*, vol. 339, p. 130500, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130500>.
- [27] E. A. Daranin *et al.*, “Preliminary study of the methanol production process from coal to support the coal downstream program,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1288, no. 1, p. 012006, Dec. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1288/1/012006.
- [28] C. N. Hamelinck and M. Bunse, “Carbon footprint of methanol.” Methanol Institute, Jan. 2022. [Online]. Elérhető: https://www.studiogearup.com/wp-content/uploads/2022/02/2022_sGU-for-MI_Methanol-carbon-footprint-DEF-1.pdf
- [29] R. Gao *et al.*, “Sustainable production of methanol using landfill gas via carbon dioxide reforming and hydrogenation: Process development and techno-economic analysis,” *J. Clean. Prod.*, vol. 272, p. 122552, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122552.
- [30] C. Choe, M. Byun, H. Lee, and H. Lim, “Techno-economic and environmental assessments for sustainable bio-methanol production as landfill gas valorization,” *Waste Manag.*, vol. 150, pp. 90–97, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2022.06.040.
- [31] A. Nemmour, A. Inayat, I. Janajreh, and C. Ghenai, “Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A

literature review,” *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 48, no. 75, pp. 29011–29033, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.03.240.

[32] Y. N. Guragain, K. V. Probst, and P. V. Vadlani, “Fuel Alcohol Production,” in *Reference Module in Food Science*, Elsevier, 2016, p. B9780081005965001372. doi: 10.1016/B978-0-08-100596-5.00137-2.

[33] D. Pimentel and T. Patzek, “Ethanol Production: Energy and Economic Issues Related to U.S. and Brazilian Sugarcane,” *Nat. Resour. Res.*, vol. 16, no. 3, pp. 235–242, Sep. 2007, doi: 10.1007/s11053-007-9049-2.

[34] B. S. Moraes, M. Zaiat, and A. Bonomi, “Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 888–903, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.01.023.

[35] M. Kohler, “SAEF_Bioethanol-Production_MK-.pdf.” University of KwaZulu-Natal College of Law and Management Studies School of Accounting, Economics & Finance, Aug. 2016. [Online]. Elérhető: https://saef.ukzn.ac.za/wp-content/uploads/2018/05/SAEF_Bioethanol-Production_MK-.pdf

[36] S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout, and A. K. Dalai, “Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 2, pp. 578–597, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.10.003.

[37] K. S. Ro *et al.*, “Production of Ethanol from Livestock, Agricultural, and Forest Residuals: An Economic Feasibility Study,” *Environments*, vol. 6, no. 8, p. 97, Aug. 2019, doi: 10.3390/environments6080097.

[38] A. Gupta and J. P. Verma, “Sustainable bio-ethanol production from agro-residues: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 550–567, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.032.

[39] S. Aghaei, M. Karimi Alavijeh, M. Shafiei, and K. Karimi, “A comprehensive review on bioethanol production from corn stover: Worldwide potential, environmental importance, and perspectives,” *Biomass Bioenergy*, vol. 161, p. 106447, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.biombioe.2022.106447.

[40] Y. Kalogo, S. Habibi, H. L. MacLean, and S. V. Joshi, “Environmental Implications of Municipal Solid Waste-Derived Ethanol,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 1, pp. 35–41, Jan. 2007, doi: 10.1021/es061117b.

[41] M. E. Dry, “High quality diesel via the Fischer–Tropsch process – a review,” *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 77, no. 1, pp. 43–50, Jan. 2002, doi: 10.1002/jctb.527.

[42] “How Do Diesel Vehicles Work?” US Department of Energy; Energy Efficiency and Renewable Energy; Alternative Fuels Data Center. [Online]. Elérhető: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-diesel-cars-work>

- [43] G. Evans and C. Smith, "Biomass to Liquids Technology," in *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, 2012, pp. 155–204. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00515-1.
- [44] M. Martinelli, M. K. Gnanamani, S. LeViness, G. Jacobs, and W. D. Shafer, "An overview of Fischer-Tropsch Synthesis: XtL processes, catalysts and reactors," *Appl. Catal. Gen.*, vol. 608, p. 117740, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.apcata.2020.117740.
- [45] G. Zang, P. Sun, A. A. Elgowainy, A. Bafana, and M. Wang, "Performance and cost analysis of liquid fuel production from H₂ and CO₂ based on the Fischer-Tropsch process," *J. CO₂ Util.*, vol. 46, p. 101459, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.jcou.2021.101459.
- [46] G. Finnveden and J. Potting, "Life Cycle Assessment," in *Encyclopedia of Toxicology*, Elsevier, 2014, pp. 74–77. doi: 10.1016/B978-0-12-386454-3.00627-8.
- [47] J. Widheden, "Life Cycle Assessment," *Handb. Cleaning/Decontamination Surf.*, vol. 2, pp. 695–720, 2007, doi: 10.1016/b978-044451664-0/50021-8.
- [48] C. Wulf and M. Kaltschmitt, "Environmental impacts of hydrogen use in vehicles," in *Compendium of Hydrogen Energy*, Elsevier, 2016, pp. 337–358. doi: 10.1016/B978-1-78242-364-5.00015-4.
- [49] A. Sanchez and D. Gomez, "Analysis of historical total production costs of cellulosic ethanol and forecasting for the 2020-decade," *Fuel*, vol. 130, pp. 100–104, Aug. 2014, doi: 10.1016/j.fuel.2014.04.037.
- [50] M. Rivarolo, D. Bellotti, L. Magistri, and A. F. Massardo, "Feasibility study of methanol production from different renewable sources and thermo-economic analysis," *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 41, no. 4, pp. 2105–2116, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.128.
- [51] A. Demirbas, "Fuel Properties of Hydrogen, Liquefied Petroleum Gas (LPG), and Compressed Natural Gas (CNG) for Transportation," *Energy Sources*, vol. 24, no. 7, pp. 601–610, Jul. 2002, doi: 10.1080/00908312.2002.11877434.
- [52] T. Gül, U. Remme, and J. Miguel, "Global Hydrogen Review 2024," International Energy Agency, 2024. [Online]. Elérhető: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>
- [53] Tsiropoulos, I., Nijs, W., Tarvydas, D., Ruiz, P., and European Commission. Joint Research Centre., *Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050: insights from scenarios in line with the 2030 and 2050 ambitions of the European Green Deal*. LU: Publications Office, 2020. Accessed: Oct. 23, 2024. [Online]. Elérhető: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/081488>