

BIOMASSZÁBÓL ELŐÁLLÍTOTT SZINTÉZISGÁZ ALTERNATÍV ÜZEMANYAGKÉNT TÖRTÉNŐ ALKALMAZÁSÁNAK VIZSGÁLATA

Bodnár István

PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet,
Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszék
3515 Miskolc, Miskolc- Egyetemváros, e-mail: vegybod@uni-miskolc.hu

Összefoglalás

A tanulmány a fagáz üzemű autókról és a gázosítás új lineáris termo-kinetikai modelljéről szól. Bemutatásra kerülnek a fagáz üzemű autók feltalálásuktól napjainkig. Részletesen ismertetem a különböző fafajták kémia összetételét, az energiatartalmát, és a gázosítás során lejátszódó reakcióegyenleteket. A fa kémiai tulajdonságainak és a reakcióegyenletek függvényében készítettem egy közelítő modellt, aminek a segítségével meg tudom határozni a keletkező szintézisgáz kémiai összetételét és energetikai tulajdonságait. A modell energetikai számításra alapul és numerikusan könnyen megoldható. Alkalmaztam a modellt és megvizsgáltam néhány fafajtát. A kapott eredményeket összehasonlítottam a benzín üzemű autó adataival. Végül költségelemzést végeztem, ami alapján a fagáz alternatív üzemanyagként történő alkalmazásával jelentős költségmegtakarítás érhető el.

Kulcsszavak: fagáz, szintézisgáz, gázosítás, fagázosító, fagáz üzemű autó

Abstract

This paper presents the wood gas powered cars and the new linear thermo-kinetic model of gasification. The wood gas powered cars will be presented from their invention up to this day. I will describe in detail the chemical composition of different types of trees, the heating value and the reaction equations of gasification. On the basis of the wood's chemical composition and of the reaction equation I have made an approximate model, which helps to specify the resulting synthesis gas' chemical composition and the energetic properties. The basis of the model is an energy calculation, and it can be easily solved numerically. I have applied the model and I analysed some types of trees. I have compared the results with the data of the gas powered cars. Finally I have made a cost analysis and I have concluded that if wood gas is used as petrol, the costs can be reduced significantly.

Keywords: wood gas, synthesis gas, gasification, wood gasifier, wood gas powered car

1. Bevezetés

A gázosítási technológia lehetővé teszi, hogy a szilárd biomasszát és tüzelőanyagot gáz halmazállapotú energiahordozóvá alakítsuk át. A gázosítás során keletkező szén-monoxidban és hidrogénben gazdag gázelegyet szintézisgáznak nevezzük. A gáz elégetésé-

vel ipari és lakossági hőenergia nyerhető ki, ezen kívül mechanikai- és villamos energiát is elő lehet állítani különböző motorok és forgó villamos gépek alkalmazásával. A szintézisgáz kémiai szintézisekben történő alkalmazása kiemelten megemlítenendő, hiszen a metanol ipari előállításának egyik alapanyaga. Éghető gázok fából (fagáz) és szénből (széngáz) történő előállítása az 1790-es évekre tehető. Ezeket a mesterséges gázokat első sorban a közvilágítás, valamint a nemesség és a jómódú polgárok háztartási energiaigények kielégítésére használták. Emellett az iparban és a mezőgazdaságban is alkalmazták gépek üzemeltetésére. A Pennsylvanai olajmezők 1859-ben történő felfedezése hosszú évekre véget vetett a mesterségesen előállított gázok alkalmazásának. A kőolajszármazékok olcsóbbak és nagyobb energiataralmuk miatt gyorsan elterjedtek az egész világon. Az így már feleslegessé vált gázgyárakat lebontották és elfeledték [1] [2].

2. Fagázzal működő autók története

Az első fagázzal működő autót 1901-ben Thomas Hugh Parker tervezte és építette meg, azonban elterjedésére mintegy harminc évet kellett várni (1. ábra). Az 1930-as években a hadipar rohamos fejlődése és a második világháború okozta nyersanyaghiány, alternatív technológiák alkalmazását tették szükségessé az üzemanyagiparban is. A II. világháború alatt a Szövetségesek és a Szovjetunió nem szállított kőolajat a németek által megszállt európai országokba. A helyi kismértékű kitermelést a német hadsereg (Wehrmacht) használta fel. A faapríték gázosítása során keletkező szintézisgáz kémiai összetétele és energiataralma megfelelő volt ahhoz, hogy az akkori belső égésű motorok hajtóanyagául szolgáljon. A technológia a kor kényelmi és műszaki elvárásoknak eleget tett. Megbízhatósága és kedvező gazdasági oldala miatt nagy sikert aratott. Néhány évtizeddel később a gázosítás továbbfejlesztett változatát a hulladékgyártásban is alkalmazni kezdték. Németországban a háború lezárásig megközelítőleg fél millió ilyen jármű volt használatban. Külön szerelőműhelyeket alakítottak ki, hogy a már forgalomban lévő hagyományos autókát át tudják alakítani fagáz üzeművé. Bizonyos autómódelleket gyárilag szerelték fel fagázosító reaktorrallal, amit akkoriban találoan csak gázgenerátornak neveztek (4. ábra). De nem csak autók, teherautók és buszok, hanem traktorok és motorkerékpárok, valamint még hajók és vonatok is fel voltak szerelve fagázosító reaktorrallal (2. és 3. ábra). A megszállt Dániában a civil járművek és mezőgazdasági gépek 95 %-a fagázzal üzemelt. Gyakorlatilag az egész világ ismerte és alkalmazta a fagáz üzemű járműveket. Mindazonáltal a járművek és gépek kis hatékonyságuk és kényelmetlenül üzemeltethetőek, amik a folyamatosan növekvő igényeket egy idő után már nem tudták kielégíteni. Karbantartásigényük miatt átlagosan kéthetente át kellett vizsgálni a gázgenerátorokat, és az autókat. Igaz, azokban az időkben az autók maguk is gyakori szervizt igényeltek. Mindemellett jelentős egészségügyi kockázatot hordoztak főként a szén-monoxid veszélyessége miatt, ezért az olajhiány megszűnése után a legtöbb ország visszatért az olajszármazékokra [1]. A II. világháborút követően a fagáz üzemű autók eltűntek az utacról és szinte majdnem a feledés homályába kerültek. Újra megjelenésük az utóbbi két évtizedre tehető, amikor is a kőolaj világpiaci ára jelentősen emelkedett, így a fagáz alkalmazása a kedvező előállítási költségeknek köszönhetően ismételten indokolttá vált. Fejlesztésük jelenleg is tart első sorban a fejlődő országokban. Kínában, Oroszországban és Észak-Koreában mai napig gyártják és közlekednek fagázzal üzemelő teherautók. A következő évtizedekben a fosszilis energiahordozók fogyása miatt ismételten megjelenhetnek a gázgyárak, és elterjedhetnek a korszerű fagáz üzemű járművek.



1. ábra. Fagázzal üzemelő autók a kezdetekkor és a jelenben



2. ábra. Fagáz üzemű autóbusz



3. ábra. Fagáz üzemű teherautó, motorkerékpár és mezőgazdasági gép

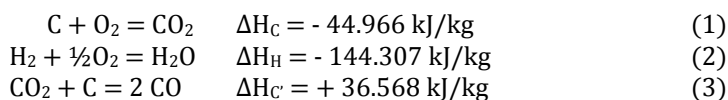


4. ábra. Fagáz üzemű teherautók „sorozatgyártása”

3. A fakémia, a faanyag, mint energetikai anyagforrás

A fát, mint a természetben leggyakrabban előforduló energiahordozót, az emberiség létezése óta használja. A világ favagyona megközelítőleg 300 milliárd köbméterre tehető. Ebből évente átlagosan 3-4 milliárd m³ kerül kitermelésre, aminek a fele ipari, a másik fele pedig kémiai (rostanyag) és energetikai (tüzelőanyag) hasznosításra kerül [4]. A zöld növényzet fotoszintézis útján építi szerkezetét, amely végterméke a C-H, C-O és O-H oxidálható kötések. A fa elégetése levegő (oxigén) jelenlétében történik. Az égés során CO₂ és H₂O keletkezik (1. és 2. képlet). Oxigén hiány esetén CO keletkezésével is számolnunk kell (3. képlet) [5].

Lejátszódo reakciók:



Ahol: C: karbon; CO: szén-monoxid; CO₂: szén-dioxid; H₂: hidrogén; O₂: oxigén; H₂O: víz; ΔH: reakcióhő (negatív: exoterm reakció, pozitív: endoterm reakció);

A szilárd biomassa elemi összetevői a karbon, a hidrogén és az oxigén, mindezek mellett egyéb összetevők, mint például nyomelemek és fémek valamint nitrogén és kén is jelen lehet. A fa üzemanyagként történő hasznosítása során a kén- és a nitrogéntartalomtól származó oxidok a járművek kibocsátásánál bírnak jelentőséggel. Mivel jelenlétük jellemzően kisebb arányú, mint a fosszilis üzemanyagok esetén, ezért környezetkímélőbbek. A különböző típusú fafajták kémiai összetétele megközelítőleg állandónak mondható a szénfajták összetételéhez viszonyítva, de fizikai tulajdonságuk lényegesen eltérő lehet.

A kémiai összetétel mellett az energiatartalom a legmeghatározóbb tényező. Az energiatartalom megfogalmazására többfajta standard definíciót használnak a szakirodalmak, amelyek között nagymértékű különbség tapasztalható. A leggyakrabban alkalmazott definíció a HHV (Higher Heating Value), vagy felső fűtőérték, amit adiabatikus kaloriméterben laboratóriumi méréssel határoznak meg. Legnagyobb hibája, hogy magába foglalja a vízgőz kondenzációs hőjét is, ami nehezen nyerhető vissza. Reálisabb képet kapunk, ha az LHV (Lower Heating Value), alsó fűtőérték alapján számolunk. A két fűtőérték között egy empirikus összefüggés ad jó közelítést [1].

$$LHV = \frac{HHV}{(1 + M + A)} \quad (4)$$

Ahol: M: a nedvességfrakció tömegszázalékban; A: a hamutartalom tömegszázalékban;

Az 1. táblázatban feltüntettem a leggyakoribb fafajták, valamint két haszonnövény kémiai összetételét és energiatartalmát. Referenciának a faszenet választottam a nagy karbon tartalma miatt.

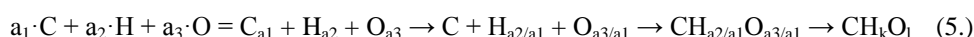
1. táblázat. Faajták kémiai összetétele és fűtőértéke [1]

Fa/biomassza fajta	Kémiai összetétel [tömegszázalék/száraz bázis]						HHV [kJ/kg]
	C	H	N	S	O	Hamu	
Douglas fenyő	52,3	6,3	0,1	0,0	40,5	0,8	21,0
Douglas fenyő kéreg	56,2	5,9	0,0	0,0	36,7	1,2	22,0
Kaliforniai fenyő	53,5	5,9	0,1	0,0	40,3	0,2	21,0
Erdeifenyő	50,1	6,1	0,2	0,0	43,4	0,2	19,5
Bükkfa	51,6	6,3	0,0	0,0	41,5	0,6	20,3
Juhar	50,6	6,0	0,3	0,0	42,7	0,4	19,9
Nyárfa	51,6	6,3	0,0	0,0	41,5	0,6	20,3
Tölgyfa	53,7	5,4	0,0	0,0	40,3	0,6	21,2
Akác	49,5	5,9	0,4	0,0	43,3	0,9	17,7
Búzaszalma	45,0	6,0	0,6	0,1	43,0	5,3	17,3
Kukoricaszár	44,0	5,8	1,3	0,1	40,0	8,8	17,5
Faszén (referencia)	80,3	3,1	0,2	0,0	11,4	4,1	31,0

4. A fagázosítás termo-kinetikai modellje

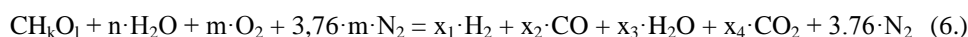
A fagázosítási folyamat vizsgálatára egy egyszerűsített lineáris termo-kinetikai modellt alkalmazok, aminek az alapja a tömeg- és az energia-megmaradási törvény. A modell kidolgozásának az volt a célja, hogy az előállított szintézisgáz energiatartalmára egy jól közelítő becslést tudjak adni, a gázosítás alapanyagául szolgáló biomassza kémiai összetételének függvényében. A további – energetikai – számítások során (földgáz és üzemanyag kiváltás) főleg a szintézisgáz energiatartalma hordoz információt. Azért egyszerűsített a modellt, mert a modellegenletek felírása során több elhanyagolással is éltem. Az első és egyben a legfontosabb elhanyagolás a metánképződés figyelmen kívül hagyása. A szakirodalmak szerint

normál légköri nyomáson, egyensúlyi hőmérsékleten és alsó kiáramlású gázosító reaktorban végzett biomassza-gázosítás során a metánképződés valószínűsége kisebb, mint 1 % [6] [7]. A gyakorlatban mindig keletkezik metán is, ezért a modell pontossága kisebb, mint 97-98 %, ami főleg a szintézisgáz energiatartalmában jelentkezik. További elhanyagolásként a biomassza egyéb összetevőit figyelmen kívül hagyjuk, valamint feltételezzük, hogy a rendszer termodinamikai egyensúlyban van [8]. Az egyensúlyi állapot létrejötte előtt a modell nem alkalmazható. A modellegyenlet felírásához ismerni kell a biomassza egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkozó kémiai összetételét. Az 5. képlet a karbon-tartalomra vonatkozó átszámítást és a felírási formalizmust mutatja.



Ahol: a_1 a biomassza karbon, a_2 a hidrogén és a_3 az oxigén tartalma [mol/kg biomassza]; k és l a biomassza egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott hidrogén és oxigéntartalma;

Az egyszerűsített modellegyenlet a tömegmegmaradás tétele alapján a következő [9]:



Ahol: n a biomassza egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott nedvességtartalma (a biomassza átlagos nedvességtartalma $\sim 20 \pm 2$ %); m a moláris oxigénigény; x_1 a keletkező nyers szintézisgáz moláris hidrogéntartalma, x_2 a szén-monoxidtartalma; x_3 a vízgőztartalma és x_4 a szén-dioxidtartalma;

A kezdeti és peremérték-feltételek [9]:

$$\text{Karbon egyensúly:} \quad 1 = x_2 + x_4 \quad (7)$$

$$\text{Hidrogén egyensúly:} \quad k + 2 \cdot n = 2 \cdot x_1 + 4 \cdot x_3 \quad (8)$$

$$\text{Oxigén egyensúly:} \quad l + n + 2 \cdot m = x_2 + x_3 + 2 \cdot x_4 \quad (9)$$

$$\text{Víz-gáz reakció egyensúlyi állandó:} \quad K = \frac{x_1 \cdot x_4}{x_2 \cdot x_3} \quad (10)$$

Az egyszerűsített modellegyenlet az energia-megmaradás tétele alapján:

$$- E_{CH_kO_l} - E_{H_2O} - E_{H_2} - E_{CO} + E_{H_2O} + E_{CO_2} = 0 \quad (11)$$

A fajlagos energiaegyenlet:

$$- e_{CH_kO_l} - n \cdot e_{H_2O} - x_1 \cdot e_{H_2} - x_2 \cdot e_{CO} + x_3 \cdot e_{H_2O} + x_4 \cdot e_{CO_2} = 0 \quad (12)$$

Ahol: ($- e_{CH_kO_l}$) a C-H-O kötések bontásához szükséges energia, ($- e_{H_2O}$) a H_2O kötés bontásához szükséges energia, ($- e_{CO}$) a CO kötés létrehozásához szükséges energia, e_{H_2O} vízgőz felszabadulás során keletkező energia, e_{CO_2} szén-dioxid felszabadulás során keletkező energia; Az energiák a reakcióegyenletek felhasználásával, a reakcióhőkből meghatározhatók.

A fagázosítás során olyan folyamatoknak kell lejátszódnia, hogy a keletkező fagáz maximális szén-monoxid és hidrogén (bizonyos esetekben metán) tartalommal rendelkezzen. Ekkor valósul meg az energiamaximumra való törekvés. Akkor lenne maximális a fagáz energiatartalma, ha csak éghető gázokat tartalmazna, tehát az összes szén szén-monoxiddá alakulna, és nem keletkezne szén-dioxid. Ez csak elméletileg valósítható meg, mert a lejátszó folyamatok energiaigényesek (nedvességtartalom \rightarrow vízbontás), így a rendszerben energiahiány lépne fel. A hiányzó energiát kívülről kellene bevinni a folyamatba például fűtéssel, vagy póttüzeléssel. Ekkor az eredő hatásfok kisebb lenne, mert a nagyobb energiatartalmú fagáz előállítása során külső energiaforrásra van szükség. Ahhoz, hogy a folyamat önfenntartó legyen (termodinamikai egyensúly) a keletkező nyers szintézisgázban meg fog jelenni a szén-dioxid és a vízgőz [1] [9]. A rendszer termodinamikai egyensúly esetén energetikai optimum pontban található. Az optimum pont egyben azt jelenti, hogy elértük a maximális energiaátalakítási hatásfokot és emellett a lehető legnagyobb energiatartalmú szintézisgázt tudjuk előállítani. Ekkor a fagázban új összetevőként megjelenik a szén-dioxid és a vízgőz, mivel ezek nem éghetők, így a reaktort elhagyó nyers szintézisgázban ballasztként fognak viselkedni. A reaktor redukáló zónájában további reakciók lejátszódásában fognak részt venni. Mindemellett a fának és a gázosításra használt levegőnek további (az adott hőmérsékleten) éghetetlen összetevői is vannak (nitrogén), ezért azok szintén ballasztként fognak megjelenni a reaktort elhagyó nyers szintézisgázban. Ezen gázok kiküszöbölhetők, ha levegő helyett tiszta oxigént, vagy éghető komponenseket tartalmazó oxigén és szén-dioxid keveréket, esetleg vízgőzt alkalmazunk. Utóbbi két esetben szintén plusz energia-bevitelre lehet szükség a kémiai kötések bontása miatt. Alkalmazásuk első sorban üzemeltetési szempontok miatt indokolt.

5. Fagázosítás elméleti vizsgálata

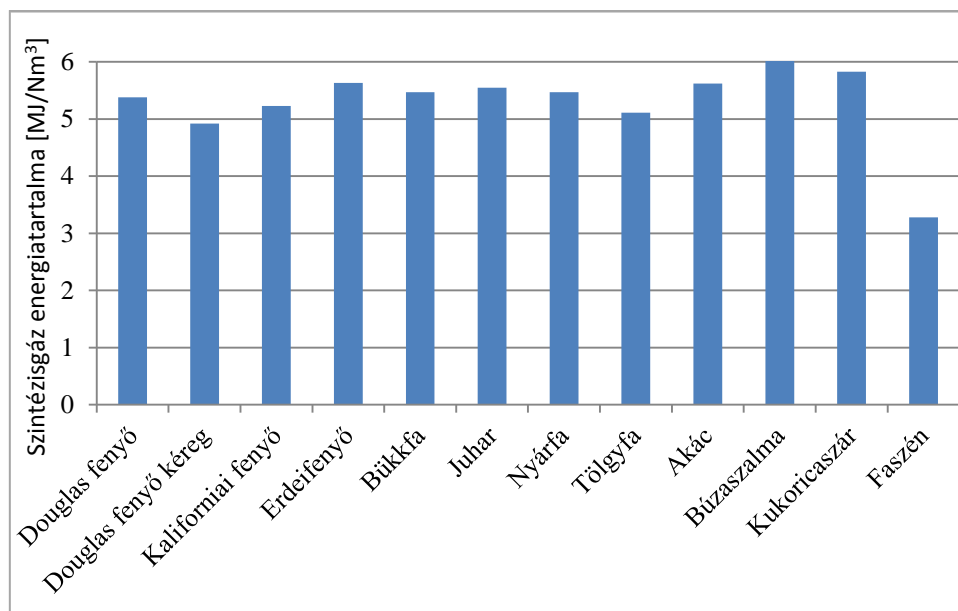
A vizsgálataim során alkalmaztam az ismertett egyszerűsített lineáris termo-kinetikai modellt egy kg feladott fa, illetve biomassza hulladék gázosítására vonatkozóan. A számítási folyamat során normál légköri nyomáson üzemelő alsó kiáramlású gázosítóreaktora vonatkozóan írtam fel és oldottam meg az egyenleteket.

5.1. A fagáz energetikai jellemzői

A számítási folyamat során legelsőként a kémiai összetétel és az oxidációs faktor függvényében meghatároztam, hogy mennyi a folyamat fajlagos levegőigénye (2. táblázat). A modellegyenletek megoldásával a levegőigény a moláris oxigénigényből, valamint a levegő oxigéntartalmának felhasználásával számolható ki. A legnagyobb levegőigény a referenciául szolgáló faszenet (5,58 kg/kg fa) leszámítva a douglas fenyő kérgénél (2,53 kg/kg fa), a legkisebb a búzaszalmánál (1,38 kg/kg fa) jelentkezik. Átlagosan 1,91 kg levegő igénnyel kell számolnunk egy kg fa gázosítása során. A második mérőszám az előállított szintézisgáz fajlagos mennyisége, ami megegyezik a levegőigény és a biomassza hamutartalmával kompenzált részének összegével. Tömeg és térfogat alapon is meghatározhatjuk. A két érték között a sűrűség teremt kapcsolatot. Átlagosan 3 Nm³ gázt tudunk előállítani egy kg biomasszából. A harmadik energetikai mérőszám-csoport az előállított szintézisgáz fajlagos energiatartalma (fűtőértéke). Meghatározása három alapon történik. Egyrészt a feladott fa tömegére, másrészt a keletkező gáz tömegére, harmadrészt pedig a keletkező gáz térfogatára vonatkoztatva (3. ábra).

2. táblázat. A folyamat fajlagos levegőigénye, valamint a keletkező tisztított és lehűtött szintézisgáz fajlagos mennyisége és az energiatartalma 20 °C-os gázhőmérsékleten

Fa/biomassza fajta	Levegőigény	Fagáz mennyisége		Fagáz energiatartalma		
	$\left[\frac{kg}{kg\ fa}\right]$	$\left[\frac{kg}{kg\ fa}\right]$	$\left[\frac{Nm^3}{kg\ fa}\right]$	$\left[\frac{MJ}{kg\ fa}\right]$	$\left[\frac{MJ}{kg\ gáz}\right]$	$\left[\frac{MJ}{Nm^3}\right]$
Douglas fenyő	2,06	3,05	3,24	17,42	5,72	5,38
Douglas fenyő kéreg	2,53	3,52	3,59	17,78	5,02	4,92
Kaliforniai fenyő	2,16	3,16	3,29	17,17	5,44	5,23
Erdeifenyő	1,75	2,75	2,98	16,77	6,10	5,63
Bükkfa	1,96	2,95	3,16	17,29	5,86	5,47
Juhar	1,82	2,82	3,02	16,74	5,94	5,55
Nyárfa	1,96	2,95	3,16	17,29	5,86	5,47
Tölgyfa	2,17	3,17	3,25	16,60	5,24	5,11
Akác	1,71	2,70	2,92	16,42	6,08	5,62
Búzaszalma	1,38	2,33	2,62	15,68	6,77	6,02
Kukoricaszár	1,45	2,36	2,62	15,26	6,47	5,83
Faszén	5,58	6,53	5,76	18,86	2,89	3,28



3. ábra. Az előállított tisztított és szárított 20 °C hőmérsékletű szintézisgáz energiatartalma

A szintézisgáz energiatartalma a kémiai összetétel ismeretében számítható, azok arányának és fajlagos energiatartalmának felhasználásával. A legnagyobb energiatartalmú gáz a búzaszalmából ($6,02 \text{ MJ/Nm}^3$) állítható el. A kemény fák gázosítása során jellemzően kisebb, a puha fák esetében pedig nagyobb energiatartalmú gázt kapunk. A biomasszából előállított szintézisgáz átlagos energiatartalma $5,48 \text{ MJ/Nm}^3$.

5.2. Az előállított szintézisgáz kémiai összetétele

A szintézisgáz kémiai összetételét tekintve energetikai szempontból az éghető komponensek mennyisége az érdekes (3. táblázat). A búzaszalma gázosítása során keletkezett szintézisgáz tartalmaz legnagyobb mennyiségben szén-monoxidot és hidrogént. A legkisebb értékeket a douglas fenyő kérgénél és a faszénnél tapasztaltam. A szén-monoxid aránya átlagosan 30 és 33 % közé esik. A hidrogén aránya jellemzően szélesebb intervallumban mozog (18-25 %). A folyamat lejátszódásához szükséges hőenergia előállítása miatt a szintézisgáz átlagosan 8 %-ban szén-dioxidot tartalmaz. Emellett a levegőben jelenlevő nitrogénnel és kis mértékben egyéb összetevőkkel is számolnunk kell.

3. táblázat. Az előállított szintézisgáz kémiai összetétele

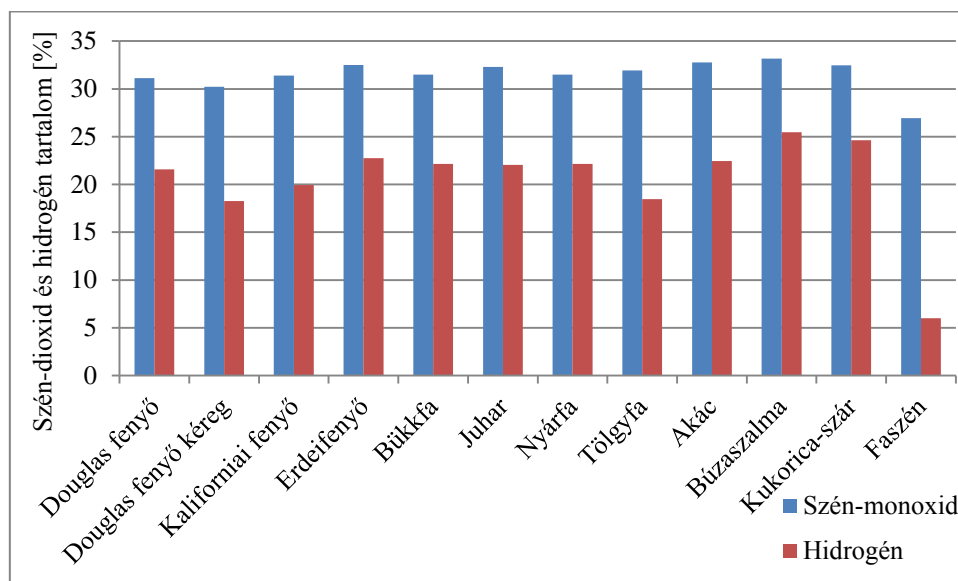
Fa/biomassza fajta	Kémiai összetétel térfogatszázalékban				
	CO	CO ₂	H ₂	N ₂	Egyéb
Douglas fenyő	31,13	7,73	21,58	39,55	0,01
Douglas fenyő kéreg	30,22	7,51	18,26	44,00	0,01
Kaliforniai fenyő	31,39	7,80	19,92	40,88	0,01
Erdeifenyő	32,48	8,07	22,74	36,70	0,01
Bükkfa	31,50	7,83	22,13	38,53	0,01
Juhar	32,30	8,02	22,04	37,63	0,01
Nyárfa	31,50	7,83	22,13	38,53	0,01
Tölgyfa	31,92	7,92	18,47	41,68	0,01
Akác	32,76	8,14	22,46	36,63	0,01
Búzaszalma	33,18	8,24	25,46	33,09	0,03
Kukoricaszár	32,45	8,05	24,61	34,86	0,03
Faszén	26,92	6,70	5,98	60,39	0,01

Egyéb összetevők lehetnek: hamu és kátrány, CH₄ és nagyobb rendszámú szénhidrogének, N₂O, NO_x, H₂S, SO_x

5.3. Energiaátalakítási hatékonyság jellemzői és a sűrűség

Az energetikai átalakítás hatékonyságát három jelzőszám határozza meg (4. táblázat). Az első a hidrogén és a szén-monoxid aránya. Az arányszám a szintézisgázban található hidrogéntartalom és a szén-monoxid-tartalom hányadosa. A két energiahordozó fajlagos fűtőértéke között 200 kJ/m^3 a különbség a hidrogén javára, ezért minél nagyobb a két elem arányszáma, annál nagyobb energiatartalmú gázt tudunk előállítani. Az arányszám növelése a levegő gázosító közeg vízgőzre történő cseréjével valósítható meg. A vízgőzt túlhevített formában kell bevinni a reaktorba, hogy a rendszer termodinamikai egyensúlyban marad-

jon. Előállítás a fagáz hűtése során felszabaduló hőenergia felhasználásával a leghatékonyabb [2] [10]. A legnagyobb H/CO arány a búzaszalmánál (0,77) és a kukoricaszárnál (0,76) figyelhető meg. A legkisebb érték a faszén (0,29) mellett a tölgyfánál (0,59) jelentkezik. E kategória esetében is észrevehető, hogy a kemény fák hozzák a rosszabb arányt, a puha fák pedig a kedvezőbbet.

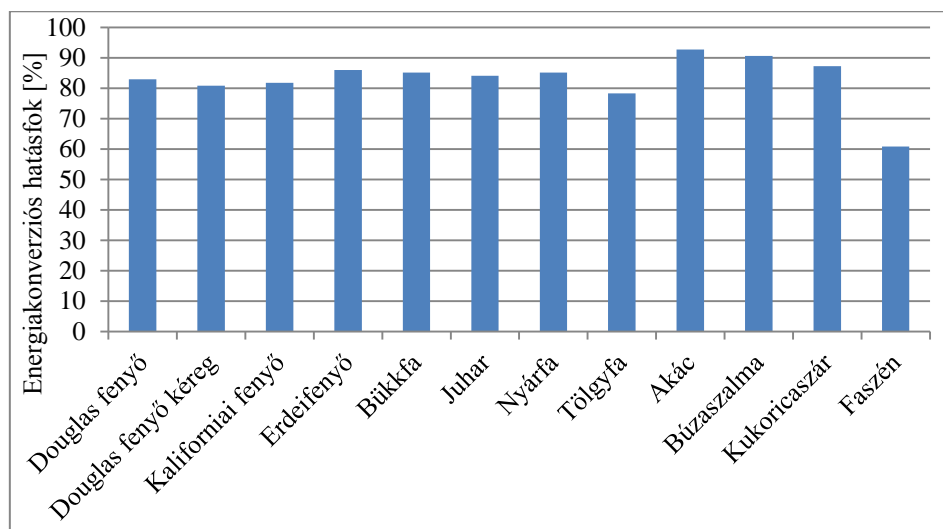


4. ábra. A szintézisgáz szén-monoxid és hidrogén tartalma

4. táblázat. Energiaátalakítási hatékonyság jellemzői és a sűrűség

Fa/biomassza fajta	H/CO arány	Éghető/inert arány	Energiaátalakítási hatékonyság jellemzői és a sűrűség	
			Energiaátalakítási hatékonyság [%]	Sűrűség [kg/Nm ³]
Douglas fenyő	0,69	0,53	82,95	0,9414
Douglas fenyő kéreg	0,60	0,48	80,82	0,9805
Kaliforniai fenyő	0,63	0,51	81,76	0,9605
Erdeifenyő	0,70	0,55	86,00	0,9228
Bükkfa	0,70	0,54	85,17	0,9335
Juhar	0,68	0,54	84,12	0,9338
Nyárfa	0,70	0,54	85,17	0,9335
Tölgyfa	0,58	0,50	78,30	0,9754
Akác	0,69	0,55	92,77	0,9247
Búzaszalma	0,77	0,59	90,64	0,8893
Kukoricaszár	0,76	0,57	87,20	0,9008
Faszén	0,22	0,33	60,84	1,1337

Az üzemeltetési feladatok miatt az éghető és az energetikailag inert gázok aránya is fontos szerepet játszik. Kiszámítása az éghető komponensek összegének ($\text{CO} + \text{H}_2$) és az energetikailag inert gázok összegének a hányadosa adja. Minél kisebb ez az arány annál nagyobb térfogatú motorra, vagy annál nagyobb sűrítési arányra lesz szükség. Ebből következik, hogy a cél az éghető/inert gázok arányának a növelése. Ez megvalósítható, ha levegő helyett tiszta oxigént, vagy a kettő keverékét alkalmazzuk. Járműveknél ez nehezen kivitelezhető és drága megoldás lenne, ezért csak ritkán élnek vele. A harmadik, és egyben a legfontosabb energetikai mérőszám az energiakonverziós arány, vagy hatásfok. Ez az érték megmutatja, hogy a szilárd tüzelőanyaghoz viszonyítva mekkora az előállított szintézisgáz energiatartalmának aránya. Számítása egyszerű, a szintézisgáz és a szilárd tüzelőanyag energiatartalmának a hányadosa. Az energiakonverziós hatásfokot az 5. ábra szemlélteti. A legnagyobb hatásfok az akácánál figyelhető meg, mintegy 92,77 %. A legrosszabb a tölgyfa 78,30 %-a és a faszén 60,84 %-a. Ne felejtjük el, hogy a faszén előállításánál is számolnunk kell egy átalakítási hatásfokkal, ami tovább csökkenti az energiakonverziós arányt. Így az eredő energiakonverziós hatásfok 50 % alá csökkenhet. Mivel a faszén pirolízis útján állítható elő fából, ebből következik, hogy a pirolízisből származó pirokksz, jelen esetben faszén égetése energetikailag hatékonyabb megoldás, mint a gázosítása. Végezetül a szintézisgáz sűrűségét célszerű megemlíteni, ami átlagosan $0,93 \text{ kg/Nm}^3$.



5. ábra. Az energiakonverziós hatásfok

5. Üzemanyag kiváltása személyautónál

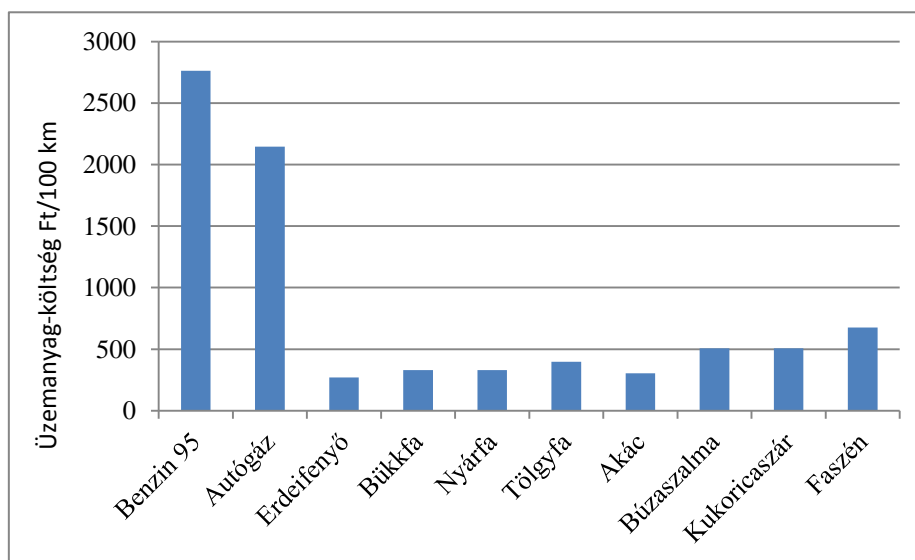
A számítás során egy átlagos futásteljesítményű (140.000 km) 8 éves, 1.400 cm^3 hengerűrtartalmú és 90 lóerős autót vettem alapul, városi forgalmi körülmények között. A megtett távolság 100 km. Az átalakítási költség autógáz esetén 250 eFt, gázosításnál 800 eFt [12]. Az átalakítás költsége mellett célszerű megnézni, hogy mekkora üzemanyagköltség-megtakarítást lehet elérni az alternatív fagázzal (5. táblázat), mert e két tényező hányadosa-

ként számolható ki a megtérülés. A közönséges erdei fenyő üzemanyagként történő alkalmazásával akár 90 százalékos költségmegtakarítást is el lehet érni a benzinhoz képest (7. ábra). Még faszénnel is 75,55 %-os megtakarítás érhető el. A megtérülés autógáz esetén 40.000 km, fagáznál átlagosan 33.000 km-re adódott. Mindezekből következik, hogy az átalakítás gazdasági szempontból indokolt, megtérülő befektetés.

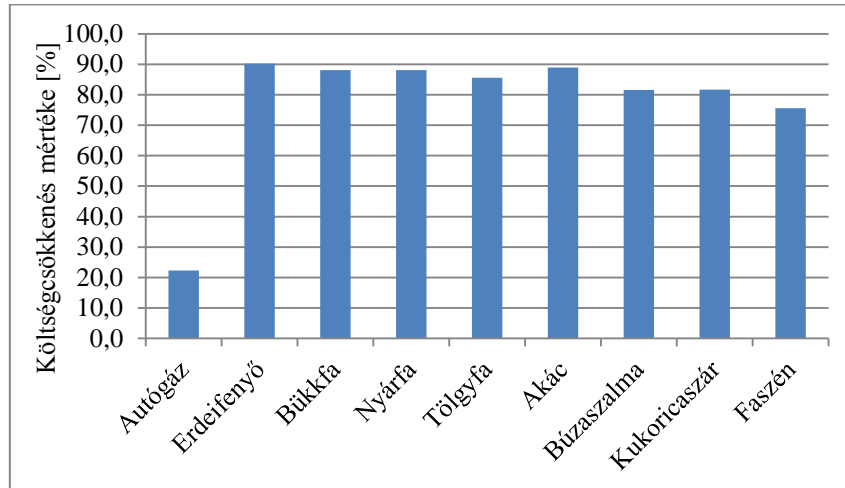
5. táblázat. A fogyasztás, az útiköltség valamint a megtakarítás és költségcsökkenési arány

Üzemanyag	Fogyasztás [kg/100 km]	Ár [Ft/kg]	Üzemanyag-költség [Ft/100 km]	Megtakarítás [Ft/100 km]	Költségcsökkenés [%]
Benzin 95	6,50*	425**	2.762,50	-	-
Autógáz	7,80*	275**	2.145,00	617,50	22,35
Erdeifenyő	13,57	20	271,4	2.491,10	90,18
Bükkfa	13,17	25	329,25	2.433,25	88,08
Nyárfa	13,17	25	329,25	2.433,25	88,08
Tölgyfa	13,70	29	397,30	2.365,20	85,62
Akác	13,86	22	304,92	2.457,58	88,96
Búza-szalma	14,51	35	507,85	2.254,65	81,62
Kukoricaszár	14,91	34	506,94	2.255,56	81,65
Faszén	12,06	56	675,36	2.087,14	75,55

Megjegyzés: * liter/100 km, ** Ft/liter,



6. ábra. Üzemanyag-költség mértéke 100 km-es útra vonatkozóan



7. ábra. Üzemanyagköltség csökkenésének mértéke

A 6. ábrán megfigyelhető, hogy a 100 km-es út megtétele során a benzin 2.762,5 Ft, az autógáz 2.145 Ft kiadást jelent. Ezzel ellentétben a fagáz átlagosan csak 378 Ft-tal terheli meg a pénztárcánkat. Legolcsóbban az erdeifenyővel tehetjük meg ezt az utat, mintegy 271,4 Ft-ért. Még a Magyarországon leggyakoribb fajfajtaival, az akácfával is kevesebb, mint 305 Ft-ból tehetünk meg 100 km-t.

Az 1930-as években úgy tervezték meg ezeket az autókat, hogy a reaktorba tett fa mennyisége megállás nélkül 200-250 km-es távolság megtételére elegendő legyen. Az indítás (termodinamikai egyensúlyba történő beállítás) 10-15 percet vett igénybe és a megtett út után ki kellett hamuzni, valamint újra meg kellett tölteni a reaktort. Ez a manuális működtetés napjainkban nem felel meg a kényelmi elvárásoknak. A rendszer könnyen automatizálható aprított fa vagy pellet alkalmazásával, így az üzemeltetés is lényegesen kényelmesebbé válhat. Az automatizálás tovább növeli az átalakítás költségét. Az automatizálásnak köszönhetően csak akkor kell megállni, ha már az adagoló tartályból is kifogyott az üzemanyag, vagy megtelt a hamutartály, így akár 1.000 km is megtehető megállás nélkül. De szükség esetén lehetőség van kombinált üzemre is fagáz/autógáz, vagy fagáz/benzin kombinálására. Gyakorlatilag minden típusú benzines autó átalakítható fagázüzeművé [1].

Az átalakítás során számos tényezőt kell figyelembe vennünk [1] [11]:

- A gáz kémiai összetétele: térfogatszázalékban megadott CO, CO₂, N₂, H₂, (esetekben CH₄ és magasabb széntartalmú szerves vegyületek). Az éghető komponensek aránya minimum 35 %-nak kell lennie a működés érdekében.
- A gáz energiatartalma: a gáz kémiai összetételéből számítható, vagy kalorimetriás módszerrel meghatározható. Alapfeltétel, hogy legalább 4 MJ/Nm³ legyen az optimális működés érdekében.
- A gáz kátránytartalma: 500 mg/Nm³ feletti kátránytartalmú gáz nehezen tisztítható.
- A gázban található szálló por részecskemérete és eloszlása: A 5 µm-nél nagyobb átmérőjű részecskéket el kell távolítani, a koncentráció maximum 10 mg/Nm³.

- A gáz tisztítási és szűrési módja: a nem megfelelően tisztított és portalanított gáz csökkenti a motor élettartamát.
- A gáz nedvességtartalma a hűtési mód miatt fontos.
- A motor térfogata és sűrítési aránya: nem megfelelően választott motortérfogat és sűrítési arány esetén akár 30-50 %-os teljesítmény-veszteséggel is kell számolnunk.
- Elektronikus vezérlés, gyújtás időzítése: a szikragyújtási szöveget átlagosan 30-40 fokkal előrébb kell hozni a benzinhoz képest, mert a gázkeverék lassabban ég.
- A gáz/levegő bekeverési aránya: a teljesítmény maximalizálás érdekében a gáz és a levegő arányát kicsivel a sztöchiometrikus égéshez szükséges arány alatt kell tartani.
- A gázosító reaktor mérete, térfogata: egy alulméretezett reaktor túlzott nyomásesést okoz, és a nyers gáz hőmérséklete is nagy. Egy túlméretezett gázosító nagyobb kátrányképződéssel jár.
- Motor típusa: a benzinmotor alkalmas kizárólag fagáz üzemre is, vagy működhetnek kombinált (fagáz/benzin, fagáz/autógáz) üzemben. A dízel motorok kizárólag kombinált (fagáz/gázolaj) üzemre alkalmasak (tisztá fagázzal nem működnek).

A gázosító reaktorok manapság nem minden esetben nyújtanak kellően esztétikus látványt és helyigényesek is, valamint az üzemanyagul szolgáló biomasszát tárolni és adagolni kell. A folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően ezek az autók egyre specifikusabb kialakításúak és esztétikailag is meg fognak felelni a kor elvárásainak. A következő években még nem kell attól tartani, hogy ellepik az utakat a fagáz üzemű autók, de a következő évtizedben egyre több jelenhet meg, utat nyitva az alternatív üzemanyagok és a környezetvédelem világába. Alkalmazásuk első sorban a mezőgazdaságban vehet nagy lendületet, mert ott nagy mennyiségben rendelkezésre áll az üzemanyagul szolgáló biomassza, első sorban a növénytermesztés melléktermékei és hulladékai jöhetnek számításba.

6. Konklúziók és célkitűzések

A gázosítási technológia már az 1790-es években ismert és alkalmazott módszer volt kőszén és szilárd biomassza hasznosítására. A gyárakban előállított mesterséges gázokat előszeretettel alkalmazták fűtési és világítási célokra egészen a kőolaj felfedezéséig. A II. világháború okozta üzemanyaghiány miatt újra felfedezték a gázgenerátorokat és járművekben, mezőgazdasági valamint ipari gépekben kezdték alkalmazni üzemanyag-kiváltás céljából. A gázosítás elméleti vizsgálata céljából egy egyszerűsített lineáris termo-kinetikai modellt alkalmaztam, amely segítségével meg lehet határozni, hogy a különböző típusú fafajták gázosítása milyen kémiai összetételű és energiatartalmú fagázt eredményez. Az így kapott értékeket összevettem a benzin és az autógáz üzemű jármű fogyasztási és üzemanyag költségadataival. Az eredmények alapján az erdei fenyővel, mint alternatív üzemanyaggal, akár 90 %-os költségmegtakarítás is elérhető a benzinhoz viszonyítva. A biomassza ugyan megújuló, de véges kapacitású nyersanyag- és energiaforrás, ezért alternatív üzemanyagként történő alkalmazásuk csak korlátozott keretek között valósítható meg. Célszerűen csak annyi biomasszát használhatunk fel, amennyit - a jelenleg kiaknázatlan mezőgazdasági földeken - erre a célra megtermeltünk. A fagáz üzemű járművek jövője első sorban nem a személyautók, hanem a mezőgazdasági és a nagyobb távolságokat megállás nélkül megtevő járművek (pl.: mozdonyok/vonatok) esetében látom. Fontosnak tartom a

kutatás folytatását az energiafűz vizsgálatával, ami megoldást adhat a mezőgazdaságban, mint alternatív és költséghatékony üzemanyag.

Jövőbeli célom, hogy kísérleti úton igazoljam a felállított lineáris termo-kinetikai modell alkalmazhatóságát és megállapítsam a pontosságát. A mérési sorozatokra alapozva szeretném pontosítani a modellt kiegészítve többek között a metánképződési reakcióval.

7. Köszönetnyilvánítás

A tanulmány elkészítése a TÁMOP 4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

8. Irodalom

- [1] Reed, B., T., Das, A.: *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine System*. The Biomass Energy Foundation Press. 1988.
- [2] Hanaoka, T., Inoue, Uno, S., Ogi, T., Minowa, T.: *Effect of wood biomass components on air-steam gasification*. Biomass and Bioenergy. Vol. 28. No. 1. 2005. pp. 69-75.
- [3] Rajvanshi, K., A.: *Biomass gasification*. Alternative Energy in Agriculture. Vol. 2. No. 4. 1986. pp. 83-102.
- [4] Panninger, A.: *Tüzeléstechnika*. BMGE, Oktatási segédlet, 2009.
- [5] Tillman, D. A.: *Wood as an Energy Resource*. Wood Science and Technology. Vol. 16. No. 4, 1982. p. 286.
- [6] Wang, Y., Kinoshita, C. M.: *Kinetic model of biomass gasification*. Solar Energy. Vol. 51. No. 1. 1993. pp. 19-25.
- [7] Bau, B. V., Sheth, P. N.: *Modeling and simulation of reduction zone of downdraft biomass gasifier: Effect of char reactivity factor*. Energy Conversion and Management. Vol. 47. No. 15-16. 2006. pp. 2602-2611.
- [8] Mehrdokht, B. N., Nader, M.: *Simulation of biomass gasification in fluidized bed reactor using ASPEN PLUS*. Biomass and Bioenergy. Vol. 32. 208. pp. 1245-1254.
- [9] Zainal, Z., A., Ali, R., Lean, C., H., Seetharamu, K., N.: *Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modelling for different biomass material*. Energy Conversion and Management. Vol. 42. 2001. pp. 1499-1515.
- [10] Schuster, G., Löffler, G., Weigel, K., Hofbauer, H.: *Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study*. Bioresource Technology. Vol. 77. 2001. pp. 71-79.
- [11] Varga, M., Csitári, Cs.: *Faalgázosításon alapuló kogenerációs rendszer fejlesztése*. GÉP magazin. LXIV. évf. 5. sz. 2013. pp 62-67.
- [12] Bodnár, I.: *Termikus hulladékkezelési technológiák gazdasági és gazdaságossági kérdései*. GÉP magazin. LXIV. évf. 5. sz. 2013, pp. 33-36.