

## AKÁCFÁ GÁZOSÍTÁSÁNAK VIZSGÁLATA VÁLTOZÓ ÜZEMI PARAMÉTEREK MELLETT

### INSPECTING THE GASIFICATION PROCESS DONE ON THE ACACIA-TREE UNDER INDUSTRIAL CONDITIONS

Bodnár István<sup>1</sup>, Iski Patrik<sup>2</sup>, Skribanek Ádám<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet, cím: Magyarország, 3515 Miskolc- Egyetemváros; Telefon / Fax: +36 46 565 142, vegybod@uni-miskolc.hu*

<sup>2</sup> *BSc hallgató, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet, cím: Magyarország, 3515 Miskolc- Egyetemváros; Telefon / Fax: +36 46 565 142, iskip95@gmail.com*

<sup>3</sup> *BSc hallgató, Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet, cím: Magyarország, 3515 Miskolc- Egyetemváros; Telefon / Fax: +36 46 565 142, skribike@gmail.com*

#### Abstract

This paper presents a thermos-kinetical modelling on the gasification process done on the acacia-tree under varying industrial circumstances and different humidity levels. The gasification does not produce flue gas, but due to imperfect burning synthesis gas which is rich in flammable components (CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>). The chemical structure of this gas is depends on the components of the fuel and the humidity levels but greatly affected by the technological parameters, also. Such as parameters are the pressure and the temperature, as well as the air-ratio. The study introduces the changing in the conjunction, the fuel value and the reaction efficiency due to varying gasification temperature and pressure. Rising temperature results in improved efficiency, while the higher pressure worsens the reaction efficiency. However at higher temperature intervals the effect of the pressure is neglect able.

**Keywords:** *acacias, gasification, temperature, air-ratio, reaction efficiency*

#### Összefoglalás

A dolgozat az akácfa gázosításának termokinetikai modellezésével kapott eredményit ismerteti, változó üzemi paraméterek és fanedvesség esetében. A gázosítás egy olyan folyamat, amely során a tökéletlen égésnek köszönhetően nem füstgáz, hanem éghető komponensekben (CO<sub>2</sub> és H<sub>2</sub>) gazdag szintézisgáz képződik. A keletkező szintézisgáz kémiai összetételét a tüzelőanyag összetételén és nedvességtartalmán felül, a technológiai paraméterek is jelentős mértékben befolyásolják. Ilyen paraméter az üzemi nyomás, a gázosítási hőmérséklet, valamint a légfeslel-tényező. A tanulmány a gázosítási hőmérséklet és az üzemi nyomás változtatására bekövetkező összetétel-, fűtőérték- és reakcióhatásfok-változást mutatja be. Míg a hőmérséklet növelése javuló hatásfokot eredményez, addig a nyomás növekedése a gázosítás reakció-hatásfokának romlását okoz. Azonban nagyobb hőmérséklettartományokban a nyomásváltozás hatása elhanyagolható.

**Kulcsszavak:** *akácfa, gázosítás, hőmérséklet, légfeslel-tényező, reakció hatásfok*

## 1. Bevezetés

Napjaink egyik kulcsfontosságú kutatási területe az energetika, ami az energia-termelés- és felhasználás, valamint a hatékonyságnövelés köré épül. A hőenergia termelés kapcsán gyakran hallani a gázosítási technológiáról, első sorban a faelgázosító kazánok esetében. Azonban a gázosítás nem csak a hőenergia, hanem a villamos-energiatermelés folyamatába is bevonható, mivel a gázosítás fő terméke az éghető szintézisgáz, amely gázmotorokban, és gázturbinákban nagy hatásfokkal alkalmazható villamos-energia termelésére. A gázüzemű erőgépek gyakran kényesek a bemenő gáz összetételére, minőségi paramétereire, ezért elkerülhetetlen a fagázosítás vizsgálata. Mindemellett a fagázosítás lehetőséget biztosít tűzifa, illetve biomassza alapú gyorsindítású erőművek létesítésére.

## 2. A gázosítás történeti áttekintése

A gázosítás az egyik legrégebben alkalmazott eljárás szilárd halmazállapotú fosszilis és megújuló energiahordozók éghető szintézisgázzá és folyékony üzemanyaggá történő átalakítására. A gázosítást elsőként Thomas Shirley alkalmazta hidrogén előállítására 1659-ben. Az első szabadalmat 1788-ban Robert Gardner nyújtotta be, ezzel kezdetét vette a gázosítás térhódítása. Ipari alkalmazása William Murdoch nevéhez fűződik, és 1798-ban kezdődött Angliában valamint Franciaországban [1].

Kezdetben fából és szénből állítottak elő éghető gázokat (fagáz és széngáz), amit főleg fűtési és közvilágítási célokra alkalmaztak. 1850-re a technológia olyan fejlettségi szintet ért el, ami lehetővé tette, hogy London közvilágításának 75%-át, az ilyen módon előállított mesterséges gázokkal oldják meg. Néhány évvel később a gázosítási technológia megjelent az Amerikai Egyesült Államokban is, és 1920-ra a legtöbb városban (pl.: Chicago, Denver) fűtésre,

valamint világításra használták a gázgyárakban előállított szintézisgázokat [2].

A texasi olajmezők felfedezését követően 1930-ban kiépült az első földgázvezeték Denverben, ami megszüntette a szintézisgáz egyeduralmát. Az északi tenger alatt lévő olajmező felfedezését követően idővel Európában is a feledés homályába merültek a gázgyárak. Ugyan, az utolsót 1970-ben bontották le Angliában, de még napjainkban is található működő rendszer a harmadik világbeli országokban [1].

A belső égésű motorok megjelenésével a gázosítást alternatív üzemanyag előállítására is alkalmazni kezdték. Az első fagázzal működő autót 1901-ben Thomas Hugh Parker tervezte és építette meg, azonban elterjedésére mintegy harminc évet kellett várni. Az 1930-as években a hadiipar 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. Mivel még a hadiipar számára sem volt elegendő üzemanyag, a Wehrmacht még fagáz-üzemű tankokkal is kísérletezett, amelyeket bevetésére végül körülményes üzemeltetésük miatt nem kerülhetett sor. A II. világháború végére, csupán Németországban körülbelül félmillió fagáz-üzemű jármű üzemelt [1]. Európában egymillióra volt tehető az ilyen járművek száma. A megszállt Dániában a civil járművek és mezőgazdasági gépek 95%-a fagázzal üzemelt [2].

A tűzifa gázosítása során keletkező szintézisgáz kémiai összetétele és energiatartalma megfelelő volt ahhoz, hogy az akkori, kezdetleges belsőégésű motorok (Otto-motorok) hajtóanyagául szolgáljon [1]. Néhány évtizeddel később a gázosítás továbbfejlesztett változatát a hulladékgazdálkodásban és az erőmű-energetikában is

alkalmazni kezdték. Külön szerelőműhelyeket alakítottak ki, hogy a már forgalomban lévő hagyományos autókat át tudják alakítani fagáz üzeművé, továbbá olyan üzemanyagtöltő állomások jöttek létre, ahol megfelelő méretűre aprított tüzfát lehetett vásárolni.

A gázosítás az anyagok gyors hőbontásán alapuló, parciális oxidációval lejártszódo folyamat, amely így a tökéletes égéshez szükséges elméleti oxigénmennyiséghez képest kisebb oxigénszükséglettel rendelkezik [2]. Az alapanyagban található szerves vegyületek részleges oxidációja közben szintézisgáz szabadul fel, ami akár nyersanyagként, vegyipari szintézisekben, vagy tüzelőanyagként hasznosítható [1].

A folyamat érzékenysége miatt fontos, hogy a beadagolt tüzelőanyag jellegzetességei (méret, nedvességtartalom, konzisztencia) bizonyos előre meghatározott határértékek közt maradjon [3]. Az érzékenység hatása jellemzően az energetikai- és a környezeti hatékonyságban jelentkezik.

Az eljárás legfőbb célja a hulladék ártalmatlanítása mellett a legnagyobb gázkihozatal, amihez az optimális energetikai hatásfok elérése társul. A gázosítás során előállított szintézisgáz hidrogénben és szén-monoxidban gazdag gázelegy, ami a gázosító közegtől függően más, energetikailag inert összetevőket is tartalmazhat. A leggyakrabban előforduló éghetetlen komponens a szén-dioxid és a vízgőz, amik a reaktortérben részt vesznek a kedvező reakciók lejátszódásában, de a reaktort elhagyva ballasztként viselkednek. A gázosító közeg jelentősen befolyásolja a keletkező szintézisgáz kémiai összetételét és energiatartalmát, valamint az átalakítás hatékonyságát. A gázosító közeg segít lebontani a szilárd kARBONT és a nagyobb molekulatömegű szén-hidrogéneket, ami eredményeként hidrogén és szén-monoxid szabadul fel [2]. Leggyakrabban levegőt, vízgőzt, vagy tiszta oxigént alkalmazunk, de szén-dioxid és oxigén megfelelő arányú keveréke is ked-

vező eredményt hozhat [2]. A helytelenül megválasztott segédgáz a technológia működésképtelenségéhez vezethet.

A szintézisgázt hasznosítás előtt célszerű lehűteni, továbbá komplex tisztítási eljárásnak kell alávetni a káros- és a korrozív anyagok (kénsav és kén-dioxid) eltávolítása érdekében. A tisztított szintézisgázból rendszerint gázmotorban, vagy gázturbinában kombinált ciklusban elégetve villamos- és hőenergiát állítanak elő, de számottevő a vegyipari szintézisekben történő alkalmazása, főleg a metanol gyártásban [2].

A gázosítás önállóan nem létező technológia, mert az erre a célra kialakított reaktorban pirolízis és égetési zóna egyaránt kialakul. A megnevezés mégis helytálló, mert a lejátszódo reakciók termodinamikai egyensúly esetén, a sugárzási veszteségeket leszámítva, önfenntartó folyamatot eredményeznek [1]. Termodinamikai egyensúlyi állapotban a rendszer nem hűl és nem melegszik, tehát nem igényel hőbetáplálást (pirolízis), vagy hőelvonást (égetés), valamint éghető szintézisgázt állít elő. A gázosítás négy lépcsőben valósul meg, ami a reaktorban eltérő hőmérsékletű és sztöchiometriai arányú zónákat eredményez. A zónák egymáshoz való viszonyát a reaktor típusa határozza meg [2].

A termikus kezelési technológiák közül a gázosítás az egyetlen, amely a légfesleges tényező és a hőmérséklet függvényében lehet endoterm és exoterm folyamat [4]. A gázosítás alkalmazása során az önfenntartó folyamat elérése a cél [2]. Ez akkor következik be, ha a reaktor sugárzási és egyéb hőveszteségeit figyelembe véve, termodinamikai egyensúlyi állapotban üzemel. Az indítást követően az 5-20 perces tranziensfolyamat lefutása után a rendszer eléri, beáll egyensúlyi állapotba. A termodinamikai egyensúlyi állapotot a feladott alapanyag nedvességtartalma jelentősen befolyásolja. A légfesleges tényező értékét a nedvességtartalom és a reaktor hő-veszteségei alapján lehet meghatározni. [1].

### 3. A termokinetikai modellvizsgálatok alapegyenletei

A termokinetikai modellvizsgálat során meghatározzuk az egyes alapanyagokból előállított gáztermékek kémiai és energetikai tulajdonságait. A folyamatok modellezésére termokinetikai modellt alkalmazunk, ami a moláris tömeg- és energia megmaradás tételén alapul [1]. A modell alkalmazásával közelítő becslést lehet adni a keletkező gáz kémiai összetételére, fűtőértékére, viszkozitására, és a lejátszódó kémiai reakciók energetikai hatékonyságára.

Mivel a modell lényege, hogy egyszerűbbé és gyorsabbá tegye a számítást, ezért az egyszerűsített modellegyenletek felírásakor egyes összetevőket, mint például a nitrogén-oxidokat, valamint az etilén és acetilén vegyületeket elhanyagoltuk. A modell egyenlet a tüzelőanyag egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott hidrogén- és oxigéntartalmára kerül felírásra [1, 5, 6].

A modellvizsgálatokat az egyensúlyi állandók módszerével, előre definiált elemi összetételű alapanyagra vonatkozóan, rögzített hőmérséklet és üzemi nyomás mellett végeztük el. Az egyensúlyi állandók módszere a megadott hőmérsékleten, az egyensúlyi átalakuláshoz tartozó számítás. Lényege, hogy a Gibbs-féle szabadenergia minimalizálásának elve alapján határozzuk meg a vizsgált folyamatok során keletkező termékek összetételét [7]. Az elemzések elkészítéséhez a Gaseq nevű, a NASA-módszeren alapuló szoftvert alkalmaztuk, amit Chris Morley fejlesztett ki és mindenki számára térítésmentesen elérhető, valamint szabadon felhasználható oktatási és nem profitorientált célokra. Elsősorban gázfázisú reagensek kölcsönhatását leíró egyenletek megoldására használható, de a termikus kezelési technológiák termokinetikai folyamatainak szimulálására is alkalmas. Abban az esetben, ha az elméleti és az alkalmazott moláris oxigénigény aránya egyenlő

eggyel ( $\lambda=1$ ), vagy egynél nagyobb, akkor visszakapjuk az égési egyenleteket.

A kibővített modellegyenlet a moláris anyagmegmaradás tétele alapján a következő módon írható fel (1):

$$\begin{aligned} CH_k O_l + n_m \cdot H_2 O + a \cdot N_2 = x_1 \cdot H_2 + x_2 \cdot CO + x_3 \cdot H_2 O + x_4 \cdot CO_2 + x_5 \cdot CH_4 + x_6 \cdot O_2 + x_7 \cdot NO + x_8 \cdot NO_2 + x_9 \cdot N_2 + x_{10} \cdot N_2 O + x_{11} \cdot C + x_i \cdot C_d H_f O_g \end{aligned} \quad (1)$$

ahol:  $n_m$  a tüzelőanyag egy mólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott nedvességtartalma;  $a$  a tüzelőanyag nitrogéntartalma,  $x_1$  a keletkező nyers szintézisgáz moláris hidrogéntartalma,  $x_2$  a szén-monoxidtartalma;  $x_3$  a vízgőztartalma és  $x_4$  a szén-dioxid-tartalma;  $x_5$  a metántartalom,  $x_6$  a maradó oxigéntartalom,  $x_7$  a nitrogén-monoxid,  $x_8$  a nitrogén-dioxid tartalom,  $x_9$  a nitrogéntartalom;  $x_{10}$  a dinitrogén-oxid-tartalom;  $x_{11}$  a visszamaradt szilárd karbon;  $x_i$  a keletkező egyéb összetevők moláris mennyisége (pl.: etilén, acetilén).

A modellvizsgálatok arra irányultak, hogy meghatározzuk a keletkező gáztermék kémiai összetételét, amiből származtatni tudjuk a technológiai-, valamint az energetikai hatékonyságot jellemző tulajdonságokat és paramétereket.

A paraméteres alapegyenletek megadása azért szükséges, mert ezeket felhasználva építettük fel a modellvizsgálatokat. A bemeneteli összetételek függvényében és a keletkező termékek ismeretében felírt (1) jelű képlet egyenlőségjelének jobb oldalán található ismeretlen mennyiségek meghatározására, azaz az egyenlet megoldására az egyensúlyi állandók módszerét választottuk.

Alkalmaztuk az egyensúlyi állandók módszerét, amihez előbb felírtuk minden egyes komponensre a moláris anyagmérleg egyenletet és ellenőriztük, hogy teljesül-e a moláris anyagmegmaradás tétele (2-4 összefüggések), végül meghatároztuk az egyensúlyi állandókat (5-6 képlet) [1, 6].

Karbon egyensúly:

$$1 = x_2 + x_4 + x_5 \quad (2)$$

Hidrogén egyensúly:

$$k + 2 \cdot n_m = 2 \cdot x_1 + 2 \cdot x_3 + 4 \cdot x_5 \quad (3)$$

Oxigén egyensúly:

$$l + n_m = x_2 + x_3 + 2 \cdot x_4 + 2 \cdot x_6 \quad (4)$$

Víz-gáz reakcióegyensúlyi állandó:

$$K_1 = \frac{x_1 \cdot x_4}{x_2 \cdot x_3} \quad (5)$$

Metánképződési egyensúlyi állandó:

$$K_2 = \frac{x_5}{x_1^2} \quad (6)$$

ahol:  $K_1$  és  $K_2$  a víz-gáz és a metánképződés egyensúlyi állandók, amelyek függnek a hőmérséklettől és a nyomástól.

Az egyes keletkező termékek moláris mennyiségben kifejezett értékét az egyensúlyi mól számmal ( $x$ ) jelöljük. Az egyensúlyi mól szám megmutatja, hogy a keletkező komponens milyen mennyiségben keletkezik a többi termékkomponenshez képest.

A Gibbs-féle szabadenergia az egyensúlyi számok, a nyomás és a hőmérséklet függvényében a (7) képlet alapján írható fel [1, 8]:

$$\frac{G}{R \cdot T} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i \cdot G_i^0}{R \cdot T} + x_i \cdot \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + x_i \cdot \ln p \right) \quad (7)$$

ahol:  $G$  a Gibbs-féle szabad energia,  $G_i^0$  az  $i$ -edik alapanyag 1 mol anyag-mennyiségre vonatkoztatott fajlagos szabadenergiája atmoszférikus nyomáson,  $R$  az egyetemes gázállandó,  $T$  a rendszer hőmérséklete,  $p$  a rendszer nyomása,  $x_i$  az  $i$ -edik komponens egyensúlyi mólszáma, azaz az  $i$ -edik alapanyag anyagmennyisége a keverékben,  $n$  a kémiai elemek száma,  $\sum x_i$  a végtermék egyensúlyi mól számainak összege, a keverék anyagmennyisége.

Termodinamikai egyensúlyi állapotban a  $G/RT$  hányados minimalizálása a cél, amit az elemi összetétel határoz meg.

A modellvizsgálatok során a modell-egyenletek megoldására a Gaseq szoftverben a rögzített nyomáson és hőmérsékleten vett egyensúlyi állandók módszerét alkalmaztuk. A szoftvert kémiai egyensúlyi folyamatok elemzése céljából fejlesztették ki, így használata megfelelő a termikus kezelési technológiák megfigyelésére. A gázosítási folyamatok szimulálásával megfigyelhetjük, hogy a bemenő paraméterek változtatása hogyan befolyásolja a gázosítás során keletkező gáztermék összetételét.

#### 4. Energetikai hatékonyságvizsgálat

Az energiahatékonyság napjaink egyik központi témája. Az energiahatékonysági politika szorosan kapcsolódik a kereskedelmi, az ipari versenyképesség, valamint az energiabiztonsági tevékenységekhez, de egyre fontosabbá vált a környezetvédelmi előnyök, mint a szén-dioxid kibocsátás csökkentésére irányuló törekvések egyik alapeszközeként [3]. Az energia átalakításának hatékonyságára számos hagyományos és nem konvencionális mérőszám ismert és alkalmazható. A következőkben három nem konvencionális paramétert mutatunk be.

A reakció-, vagy más néven a kémiai hatásfok (8) képlet megmutatja, hogy a szilárd tüzelőanyag energiatartalmának mekkora része jelenik meg az előállított gáztermékben [9, 10]. A reakció hatásfok ismeretében meghatározható az égés tökéletességét jellemző paraméter. Számítási módszerét a (9) képlet mutatja. Ezek alapján:

$$\eta_r = \frac{m_{gt} \cdot F_{gt}}{m_{szt} \cdot F_{szt}} \quad (8)$$

$$\eta_\epsilon = 1 - \eta_r \quad (9)$$

ahol:  $\eta_r$  a reakció hatásfok, ( $m_{gt}$ ) a gáztermék tömegárama,  $F_{gt}$  a gáztermék fűtőértéke, ( $m_{szt}$ ) a szilárd tüzelőanyag tömegárama,  $F_{szt}$  a tüzelőanyag fűtőértéke és  $\eta_\epsilon$  az égési hatásfok.

## 5. Akácfa gázosításának vizsgálata

A tanulmány kivitelezése a korábban említett „Gaseq Chemical Equilibrium Program” segítségével, az egyensúlyi állapotok módszerével történt. Egy adott elemzés lefuttatásához szükség van az adott folyamatot jellemző hőmérséklet, nyomás, valamint légfesleg-tényező értékeire, és a választott tüzelőanyag összetételére. Ebben a feladatban tüzelőanyagként minden esetben akácfa szerepel. A száraz tüzelőanyag összetételét az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat. Akácfa elemi összetétele a száraz bázisra vonatkoztatva.

Összetevő neve	Mennyisége
Karbondtartalom	49,50%
Hidrogéntartalom	5,90%
Oxigéntartalom	43,30%
Nitrogéntartalom	0,40%
Hamutartalom	0,90%

A modellezés folyamata során azonban, nem az elemi összetevőket, hanem az elemi alkotó molekulákat kell megadni. A fa cellulóz molekulákból épül fel, amit a szoftver nem tartalmaz, ezért a cellulózt fenollal helyettesítettük. A korrigált összetételt a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat. A fenol-tartalommal korrigált száraz akácfa tüzelőanyag összetétele.

Összetevő neve	Mennyisége
Karbondtartalom	0,000%
Hidrogéntartalom	1,746%
Oxigéntartalom	32,311%
Nitrogéntartalom	0,400%
Hamutartalom	0,900%
Fenoltartalom	64,644%

A fenti adatok meghatározása után a reakció (gázosítás) hatásfokának vizsgálatára került sor a (8) összefüggés alapján, különböző peremfeltételek mellett.

A hatásfok meghatározásához kiszámítottuk a felszabaduló éghető gázok elméleti

fűtőértékének, és a fa tényleges fűtőértékének hányadosát. A felszabaduló gázok mennyiségét a fent említett Gaseq program segítségével határoztuk meg, az égéstermékben éghető alkotóként szén-monoxid és hidrogéngáz volt jelen a vizsgálat szempontjából számottevő mennyiségben.

Az elemzések során a légfesleg-tényező, a reakció hőmérséklet és az üzemi nyomás változtatására bekövetkező gázösszetétel- és reakció-hatásfok változását vizsgáltuk.

Jelen szimuláció során a hőmérsékletet 600 °C és 1.000 °C fok között 100-as léptékkal, valamint a nyomást 1-20 bar között 5-ös léptékkal végeztük el. Az adatokat a következő táblázatokban foglaltuk össze, majd diagramon ábrázoltuk. A vizsgálat során az akácfa nedvességtartalmát konstans 15%-nak vettük, a légfesleg-tényezőt pedig 0,5-nek állítottuk be. Minden esetben 1 kg akácfa gázosítását vizsgáltuk.

3. táblázat. 600 °C hőmérsékleten kapott hidrogén és szén-monoxid mennyiségek.

Nyomás [bar]	Hidrogéntartalom [kg]	Szén-monoxid-tartalom [kg]
1	0,03700	0,38466
5	0,02339	0,19235
10	0,01809	0,13551
15	0,01539	0,11033
20	0,01367	0,09534

4. táblázat. 600 °C hőmérsékleten kapott fűtőérték és reakció hatásfok.

Nyomás [bar]	Fagáz fűtőértéke [MJ/kg]	Reakció hatásfok [%]
1	8,3251	70,3682
5	4,7495	40,1458
10	3,5395	29,9174
15	2,9611	25,0292
20	2,6033	22,0049

A **3. táblázat**ban megfigyelhető, hogy kis hőmérsékleten végzett gázosítás során az üzemi nyomás növekedése csökkenti a hidrogén- és a szén-monoxid-termelést, amely következtében a felszabaduló fagáz fűtőértéke csökken és a reakció határfoka drasztikusan romlik (4. táblázat).

Az **5. és a 6. táblázat** 700 °C hőmérséklet esetében szemlélteti a kapott eredményeket. A nyomás növelésének függvényében szintén energetikai hatékonyság-csökkenés figyelhető meg, azonban a csökkenés mereedsége kisebb értékű.

**5. táblázat.** 700 °C hőmérsékleten kapott hidrogén és szén-monoxid mennyiségek.

Nyomás [bar]	Hidrogén-tartalom [kg]	Szén-monoxid-tartalom [kg]
1	0,03740	0,48279
5	0,03409	0,44707
10	0,02950	0,39625
15	0,02611	0,35773
20	0,02362	0,32876

**6. táblázat.** 700 °C hőmérsékleten kapott fűtőérték és reakció határfok.

Nyomás [bar]	Fagáz fűtőértéke [MJ/kg]	Reakció határfok [%]
1	9,3642	79,1514
5	8,6062	72,7445
10	7,5421	63,7503
15	6,7463	57,0233
20	6,1549	52,0245

A 7. és a 8. táblázat 800 °C hőmérsékleten végzett gázosításra vonatkozóan tartalmazza a kapott eredményeket. A nyomás növelésének hatására bekövetkező energetikai hatékonyság-romlás egyre csökken. Míg 600 °C-on a reakció határfok 20 bar üzemi nyomáshoz képest kevesebb, mint a harmadára csökkent 1 bar üzemi nyomáson történő vizsgálatokhoz képest, addig 800 °C-nál ez az érték már a 10%-ot sem érte el.

**7. táblázat.** 800 °C hőmérsékleten kapott hidrogén és szén-monoxid mennyiségek.

Nyomás [bar]	Hidrogén-tartalom [kg]	Szén-monoxid-tartalom [kg]
1	0,03438	0,52939
5	0,03412	0,52648
10	0,03339	0,51837
15	0,03240	0,50705
20	0,03129	0,49426

**8. táblázat.** 800 °C hőmérsékleten kapott fűtőérték és reakció határfok.

Nyomás [bar]	Fagáz fűtőértéke [MJ/kg]	Reakció határfok [%]
1	9,4724	80,0664
5	9,4118	79,5543
10	9,2423	78,1215
15	9,0092	76,1509
20	8,7468	73,9331

**9. táblázat.** 900 °C hőmérsékleten kapott hidrogén és szén-monoxid mennyiségek.

Nyomás [bar]	Hidrogén-tartalom [kg]	Szén-monoxid-tartalom [kg]
1	0,03179	0,56572
5	0,03176	0,56542
10	0,03168	0,56455
15	0,03156	0,56318
20	0,03140	0,56132

**10. táblázat.** 900 °C hőmérsékleten kapott fűtőérték és reakció határfok.

Nyomás [bar]	Fagáz fűtőértéke [MJ/kg]	Reakció határfok [%]
1	9,5286	80,5409
5	9,5219	80,4849
10	9,5036	80,3294
15	9,4753	80,0908
20	9,4373	79,7697

A 9. és a 10. táblázatok 900 °C hőmérsékleten végzett gázosítás eredményeit tartalmazza. Megfigyelhető, hogy itt már a nyomásnövelés hatására bekövetkező reakcióhatásfok-romlás az 1%-ot sem éri el.

1.000 °C hőmérsékleten végzett gázosításhoz (11. és 12. táblázatok) a nyomásnövelés hatása elhanyagolható.

A kapott eredmények alapján elmondható, hogy állandó légfelesleg-tényező mellett az üzemi nyomás növelése a gázosítás reakció hatásfokának csökkenését eredményezi, az alkalmazott hőmérséklet azonban pozitív irányban befolyásolja. A hőmérséklet függvényében figyelembe vett nyomásnövekedés reakcióhatásfok-csökkentő hatása exponenciális jellegűt mutat. Az ideális gázosítási hőmérséklet akácfa esetében 800 °C és 900 °C közé tehető.

11. táblázat. 1.000 °C hőmérsékleten kapott hidrogén és szén-monoxid mennyiségek.

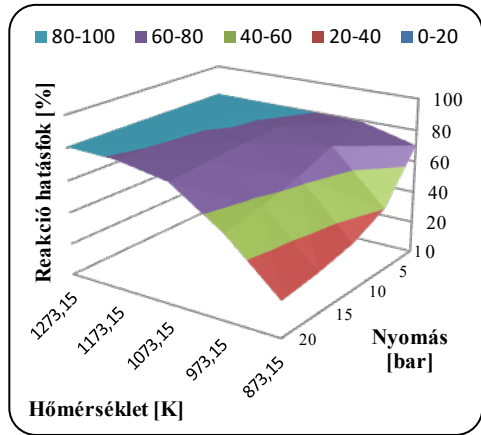
Nyomás [bar]	Hidrogén-tartalom [kg]	Szén-monoxid-tartalom [kg]
1	0,02967	0,59522
5	0,02966	0,59516
10	0,02964	0,59503
15	0,02962	0,59482
20	0,02960	0,59454

12. táblázat. 1.000 °C hőmérsékleten kapott fűtőérték és reakció hatásfok.

Nyomás [bar]	Fagáz fűtőértéke [MJ/kg]	Reakció hatásfok [%]
1	9,5721	80,9090
5	9,5703	80,8937
10	9,5666	80,8624
15	9,5621	80,8241
20	9,5569	80,7800

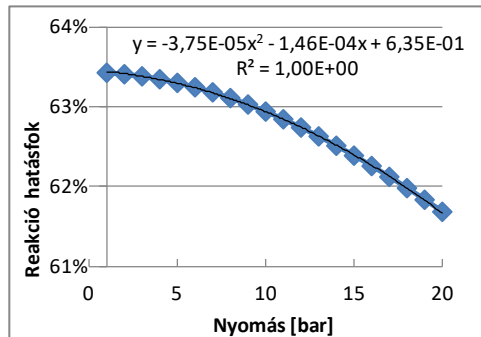
Az elmondottakat az 1. ábra szemlélteti. Megfigyelhető, hogyan alakul a reakció hatásfok a gázosítási hőmérséklet és az üzemi nyomás függvényében. Látható,

hogy kisebb hőmérsékleten az üzemi nyomás nagyobb hatást gyakorol a gázosítás reakció hatásfokára, mint nagyobb hőmérsékleten.



1. ábra. Reakció hatásfok a hőmérséklet és a nyomás függvényében, akácfa gázosítása során.

Megvizsgáltuk az is, hogyan változik a reakció hatásfok állandó légfelesleg tényező és hőmérséklet mellett, valamint állandó nedvességtartalmú tüzelőanyag esetében. A 2. ábra szemlélteti, hogyan változik a nyomás függvényében a reakció hatásfoka 0,6 légfelesleg tényezőnél, 800 °C hőmérsékleten végzett gázosítás során, a 15% az elgázosított akácfa nedvességtartalma.



2. ábra. Reakció hatásfok a nyomás függvényében, állandó hőmérséklet, légfelesleg tényező és nedvességtartalom esetén.



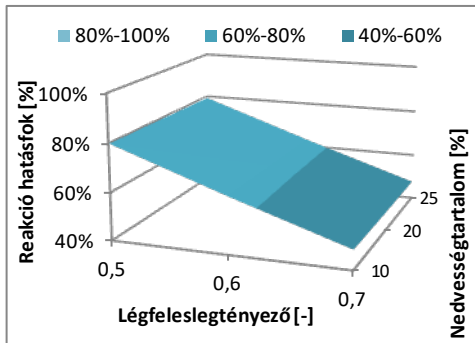
Megfigyelhető, hogy a nyomás növelése exponenciális jelleggel csökkenti a reakció hatásfokát, tehát gázosítás során célszerűtlen magas nyomást választani a reakció színterén. Hasonló tendencia figyelhető meg változó légfesleg tényező, hőmérséklet és nedvességtartalom esetén.

Következő lépésként megvizsgáltuk, hogyan változik a reakció hatásfoka, ha a légfesleg-tényező értéke, illetve a tüzelőanyag nedvességtartalma változik, amennyiben a gázosítás hőmérséklete 800 °C és az üzemi nyomás 1 bar.

Megfigyelhető, hogy a légfesleg-tényező növelésével a reakció hatásfoka drasztikusan csökken. A tüzelőanyag nedvességtartalmának növekedése pedig csak kis mértékben csökkenti a reakció hatásfokát. Mindezt a 13. táblázat és a 3. ábra szemlélteti.

13. táblázat. 800 °C hőmérsékleten és 1 bar üzemi nyomás mellett végzett gázosításra vonatkozó reakció hatásfokok.

Nedv.- tartalom	Légfesleg-tényező [-]		
	0,5	0,6	0,7
[%]			
10	80,10%	63,65%	48,14%
20	79,49%	63,19%	47,77%
25	79,16%	62,93%	47,58%



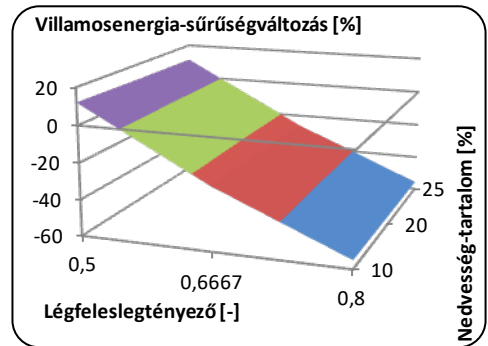
3. ábra. A hatásfok alakulása a légfesleg-tényező és a nedvességtartalom függvényében 800 °C hőmérsékleten.

Az elemzés legvégén pedig azt vizsgáltuk meg, hogyan viszonyul a nedves fa gázosítása során előállított szintézisgázból, gázmotor segítségével termelt villamosenergia, ahhoz az energiamennyiséghez, amelyet a nedves fa elégetésével, gőzturbinás erőműben nyernénk. Ezt a mennyiséget villamosenergia-sűrűségváltozásnak neveztük el. A számítási módszerét a 10. összefüggés mutatja.

$$\Delta e_v = \frac{e_k \text{ gázosítás} \cdot \eta_{\text{egv D}}}{e_k \text{ égetés} \cdot \eta_{\text{egv RC}}}, \quad (10)$$

ahol:  $\Delta e_{rv}$  a villamosenergia-sűrűségváltozás,  $e_k \text{ gázosítás}$  a gázosítás fajlagos energia kihozatala,  $e_k \text{ égetés}$  az égetés fajlagos energia kihozatala,  $\eta_{\text{egv D}}$  a gázosítás során alkalmazott Diesel-körfolyamat villamos hatásfoka,  $\eta_{\text{egv RC}}$  az égetés során alkalmazott Rankine-Clausius-körfolyamat villamos hatásfoka.

A Rankine-Clausius ciklus villamos hatásfokát 27%-nak, míg a gázmotoros energiatermelés villamos hatásfokát 36%-nak vettük, amely értékek átlagosnak tekinthetők. Az így kapott értékeket diagramon ábrázoltam (4. ábra).



4. ábra. A villamosenergia-sűrűségváltozás alakulása a légfesleg-tényező és a nedvességtartalom függvényében 800 °C hőmérsékleten.

A 4. ábráról leolvasható, hogy mind a légfesleg tényező, mind a nedvességtarta-

lom növekedésével az energiasűrűség-változás kedvezőtlen irányba változik. A légfesleg tényező növelése intenzívebb villamosenergia-sűrűségváltozást eredményez, mint a nedvességtartalom növekedése, ezért nagyobb nedvességtartalmú tüzelőanyag esetében is kedvező lehet a gázosításon alapuló villamosenergia-termelés.

0,5-ös légfesleg tényező felett pedig az energiasűrűség-változás értéke negatívvá válik, ami azt eredményezi, hogy egységnyi tüzelőanyagból nem lehet több villamos energiát előállítani gázosítási technológia alkalmazásával, mint a hagyományos égetésses technikával.

## 6. Következtetések

Az elemzések során megbizonyosodtunk arról, hogy a fás szárú biomasszák gázosításának szimulációja mögött rendkívül bonyolult számítások állnak. Továbbá az is nyilvánvalóvá vált számunkra, hogy az alapanyag tulajdonságai közül vizsgált nedvességtartalom, valamint a technológiához kapcsolódó paraméterek közül a légfesleg-tényező, a hőmérséklet, valamint a nyomás változtatása nagymértékben tudja befolyásolni az előállított szintézisgáz fűtőértékét. Az elemzés arra mutatott rá, hogy a nedvességtartalom, a légfesleg-tényező, valamint a nyomás növelése a reakció hatásfok csökkenését eredményezi, míg a hőmérséklet emelése a reakció hatásfok növekedéséhez járul hozzá.

A fenti eredményekből megállapítható tehát, hogy a gázosítás hatásfoka a három vizsgált légfesleg-tényező közül 0,5 értéken a legmagasabb. Mivel a nedvességtartalom nem befolyásolja jelentősen a gázosítás hatásfokát, ezért jól alkalmazható olyan esetekben is, ahol a tüzelőanyag nedvességtartalma viszonylag magas (20-25%).

A nyomás növekedésével a hatásfok exponenciálisan csökken, ezért nem célszerű magas nyomást választani a gázosítás reakcióterében. A reakcióter hőmérséklete 800

°C feletti növelése csekély mértékben javítja a reakció hatásfokát, ezért növelése gazdaságossági megfontolások alapján nem célszerű.

Véleményünk szerint tehát egy-egy adott gázosító üzem hatékony működtetése rendkívül összetett folyamatnak minősül és gondos mérnöki munkát igényel.

## Szakirodalmi hivatkozások

- [1] 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. 1499–1515.
- [2] Red, T. B., Das, A.: *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*, Solar Energy Research Ins., 1988. 148.
- [3] Hill, T. & Downen, S.: *Pyrolysis and gasification*. Briefing (Draf 2), UK Without Incineration Network (UK WIN), 2010. 1–9.
- [4] Patterson, M. G.: *What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues*. Energy Policy. Vol. 24, No. 5. 1996. 377–390.
- [5] Wang, Y., Kinoshita, C. M.: *Kinetic model of biomass gasification*. Solar Energy, Vol. 51. No. 1. 1993, 19–25.
- [6] Mountouris, A., Voutsas, E., Tassios, D.: *Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and exergy analysis*. Energy Conversion and Management. Vol. 47. 2006. 1723–1737.
- [7] Hatzilyberis, K. S.: *Design of an indirect heat rotary kiln gasifier*. Fuel Processing Technology. 92, 2011. 2429–2454.
- [8] Morly, C.: *Method for calculating equilibrium compositions at specified temperature*, Gaseq, a chemical equilibrium program for windows. www.gaseq.co.uk 2005. 6.
- [9] Rajvanshi, K., A.: *Biomass gasification*. Alternative Energy in Agriculture. Vol. 2. No. 4. 1986. 83–102.
- [10] Schuster, G., Löffler, G., Weigel, K., Hofbauer, H.: *Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study*. Bioresource Technology. Vol. 77. 2001. 71–79.