

FÁS SZÁRÚ BIOMASSZÁK PIROLÍZISÉNEK TERMOKINETIKAI MODELLEZÉSE

THERMOKINETIC MODELLING OF WOOD BIOMASS PYROLYSIS

Bodnár István¹, Plásztán Bence²

¹ Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet, Magyarország, 3515 Miskolc-Egyetemváros; Tel: +36 46 565 142, vegybod@uni-miskolc.hu

² Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Vegyipari Gépészeti Intézet Tanszék, Magyarország, 3515 Miskolc-Egyetemváros; Tel: +36 46 565 168, bence.plasztan@gmail.com

Abstract

The optimal parameters of the Pyrolysis Technology have been investigated. During the thermokinetic modelling of the procedure pyrolysis of different biomasses with chemical composition have been analysed. The modelling has been executed with different wood biomass at different percentages of moisture. On the basis of the wood's chemical composition and of the reaction equation we have made an approximate model, which helps to specify the resulting pyrolysis gas' chemical composition and the energetic properties. The results have been compared with the required reaction efficiency and with the energy generation.

Keywords: biomass, pyrolysis, efficiency, modelling

Összefoglalás

A pirolízisteknológia optimális üzemi paramétereit keressük. A folyamatok termokinetikai modellezése során eltérő kémiai összetételű biomasszák pirolízisét vizsgáltuk. A modellezést különböző hőmérsékleteken, a nedvességtartalom mértékének figyelembevételével végeztük. Egységnyi faanyag pirolízise során keletkezett gázok energetikai tulajdonságait határoztuk meg, és összevetettük a reakcióhoz szükséges energiaigénnyel.

Kulcsszavak: biomassza, pirolízis, hatékonyság, modellezés

1. Bevezetés

A fás szárú biomasszák hasznosítása egyidős az emberiség történelmével. Az emberiség létezése óta arra törekedett, hogy számára hasznossá tegye a természet által rendelkezésre bocsátott energiaforrásokat. Kezdetben szinte kizárólag megújuló energiaforrásokat alkalmaztunk, mint a bio-

massza, a víz, a szél és a napenergia. Az ipari forradalom idején a kőszéntelepek felfedezése, a XIX. század második felétől kezdődően a kőolaj- és a földgázlelőhelyek feltárása kiszorította a megújuló energiaforrásokat az energiaiparban, amelyek jellemzően a XX. században kerültek újra előtérbe. A megújulóenergia-források közül kiemelkedő a biomassza, amely folyamatos

erőmű-üzemeltetést tesz lehetővé a szakszos napenergián és szélenergián alapuló, ingadozó teljesítményű rendszerekhez képest.

A biomassa alapú energiatermelés, tehát a korszerű biomasszatüzelés az elmúlt években egyre népszerűbbé vált. Ennek oka egyrészt a hagyományos, fosszilis alapú tüzelőanyagok viszonylag magas ára és mennyiségi korlátja, másrészt a környezet-tudatosság; valamint a fenntartható energiatermelés és -fogyasztás mint alapelv megjelenésére vezethető vissza.

A világ favagyona megközelítőleg 300 milliárd köbméterre tehető. Ebből évente átlagosan 3-4 milliárd köbméter kerül kitermelésre, aminek az egyik fele ipari, a másik fele pedig kémiai (rostanyag) és energetikai (tüzelőanyag) hasznosításra kerül [18]. Magyarország területének közel 20%-át erdő fedi, Európát tekintve ez az arány 45%. Hazánk 1,9 millió hektár erdőterületének faállománya mintegy 330 millió m³-re tehető. Évente közel 11 millió m³ a fanövekmény (folyónövedék), ami átlagosan 30 éves megújulási ciklusidőt jelent. Az éves energiahozam 160 PJ. Erdőink nagyobb részét, körülbelül 86%-át lombhullató fák képezik, akác (több mint 50%), cser, tölgyek, bükk, gyertyán, fenyő és egyéb lombos fák. Ennek megfelelően a hazai biomasszapotenciál 328 PJ-ra tehető, amiből jelenleg 49,2 PJ kerül hasznosításra, ez 15%-os hasznosítási arányt jelent [18].

Az energiatermelésre hasznosítható faanyag (energiafa) a kitermelt lombos fának a felét, a fenyőknek alig a 20%-át teszi ki. Az évente kitermelhető energiafa 4-4,5 millió m³-re becsülhető. A száraz fa fűtőértéke 17-20 MJ/kg. Ezen számok alapján a hazai erdők évi energiafa-potenciálja 56 PJ-re becsülhető [18]. A biomassa a benne rejlő lehetőségnek köszönhetően a terület- és a településfejlesztésben, valamint a kistérségek munkahelyteremtésében kiemelt szerepet játszhat, ami ezáltal szerves részét képezheti a közmunkaprogramnak. A

biomasszán alapuló fejlesztések lehetőséget adnak továbbá „falufűtőművek” és villamos erőművek létesítésére, amik nemcsak zöldenergiát termelnek, hanem bevételi forrást jelenthetnek a települések számára.

Mindazonáltal nem szabad elfelejteni, hogy a biomassa egy olyan megújuló energiaforrás, amely véges kapacitással áll a rendelkezésünkre, ezért a megújítható energiaforrás megnevezés lenne a helytálló. Túlzott kiaknázása a környezet elhasználódásához vezet, ami azt jelenti, hogy már a megújuló energiaforrások sem képesek újratermelődni, mert a fogyasztási folyamat gyorsabb, mint azok megújulási ciklusideje. Ebből következik, hogy elsősorban az erdészeti és a faipari feldolgozás során keletkező melléktermékek, hulladékok termikus hasznosításában célszerű gondolkodni és alternatív tüzeléstechnikákat alkalmazni.

2. Pirolízis

A pirolízis a szerves anyagok hőbontásán alapuló folyamat, ami jellemzően az oxigén teljes kizárása mellett játszódik le. Mivel a biomasszában az oxigén kémiailag jelen van, ezért kezelése során nem beszélhetünk tökéletes pirolízisről. Szerves hulladékok kezelése egy arra a célra megfelelően kialakított, rendszerint nyomás vagy vákuum alatt lévő, hő hatására bekövetkező kémiai bomlással történő átalakítást jelent [1]. A kezelés során gáz halmazállapotú energiahordozó szabadul fel, amit pirolízisgáznak vagy pirogáznak nevezünk.

A pirogáz döntően szén-monoxidban és hidrogénben, valamint metánban gazdag gázelegy, amelynek fűtőértéke megközelítheti a földgáz fűtőértékét az energetikailag inert összetevők leválasztását követően. Az energetikailag inert összetevőket főleg a szén-dioxid, a vízgőz és esetekben a nitrogén teszi ki, amelyek leválasztása körülményes. A gáztermékben előfordulhatnak fémgözzök, por, és szervesetlen vegyületek, amelyek jó hatásfokkal leválaszthatók [2].

A gáztermék erőművi hasznosítása első-sorban gázmotoros rendszerekben célszerű, amely így alkalmassá teszi a földgáz üzemű erőművek kiváltását [3].

Szilárd fázisban pirolíziskoksz, röviden pirokoksz marad vissza, amiben a betáplált alapanyag karbon tartalma feldúsul [4]. Az így előállított energiahordozó a vaskohászatban, a cementgyártásban, valamint a széntüzelésű erőművekben alkalmazható kőszén kiváltására. Nehéz- és könnyűfémekkel szennyezett hulladék esetében a fémek rendszerint szilárd fázisban maradnak vissza, így azok visszanyerésére további kezelésnek vetik alá a pirokokszot [5].

Folyékony fázisban úgynevezett pirolízisolaj, piroolaj keletkezik, amely szén-hidrogéneket és kátrányt tartalmaz [4]. A klasszikus pirolízis hőmérséklet-tartományában ($> 600\text{ °C}$) a folyadékfázis keletkezése csekély valószínűségű. Megfelelő tisztítást és lepárlást követően akár különféle üzemanyagok is gyárthatók belőle, így a közlekedésben is alkalmazható haszontermékek állíthatók elő [6]. A keletkező termékek arányát az alkalmazott hőmérséklet, az alapanyag nedvességtartalma, valamint a kezelési idő jelentősen befolyásolja [5]. A nagyobb hőmérséklet és nedvességtartalom, valamint a hosszabb kezelési idő kedvez a gázhozamnak, mivel megnöveli a szénláncok elbomlásának valószínűségét. Emellett az sem elhanyagolható, hogy a kezelési idő növekedésével a kokszolódás mértéke is megnő, ami káros a folyamatokra nézve. [7].

A pirolízis a hagyományos égetéshez hasonlóan a termikus kezelési eljárások közé tartozik, de alapjában véve két különböző folyamatról beszélünk. Az égetéshez három lényeges dolog szükséges, ami az éghető anyag, az oxidálóanyag és a megfelelő égestéri hőmérséklet. Ezzel ellentétben a pirolízis során csak éghető anyagra és hőre van szükség [8].

A gyakorlatban nem beszélhetünk tökéletes pirolízisről, mert maga a tüzelőanyag

is tartalmaz valamekkora mértékben oxigént, így szén-monoxid, szén-dioxid, vízgőz valamint kén- és nitrogén-oxidok is keletkeznek [4]. További eltérés, hogy az égés hőtermelő, tehát exoterm folyamat, míg a pirolízis endoterm, azaz fenntartásához hőt igényel, amit rendszerint villamos fűtéssel visznek a rendszerbe, de alkalmazható közvetlen vagy köpenyfűtés is a felfszabaduló forró pirolízisgáz visszacirkulálásával.

A joggyakorlatban a pirolízis, ahogy a többi alternatív termikus technológia, nem különbözik a hagyományos égetéstől, de műszaki értelemben egyik üzem sem tekinthető hagyományos égető rendszernek, mert különböző kémiai folyamatok játszódnak le az egyes technológiáknál. Az alternatív technológiák társadalmi megítélése, a környezeti és gazdasági hatásai mégis azonosak, mint a hagyományos hulladékégetőknek [2].

A pirolízis egy olyan gyűjtőfogalom, amely több technológiát is magába foglal. Az egészen kis hőmérsékletű ($<300\text{ °C}$) eljárás, mint a pörkölés (torrefaction) legfőbb célja a tüzelőanyagban lévő illékony vegyületek eltávolítása és a nedvességtartalom csökkentése, így a visszamaradó szilárd termék energiasűrűségének növelése. A szintén kis hőmérsékletű, $410\text{--}450\text{ °C}$ közötti hőmérséklettartományban alkalmazott krakkolással üzemanyagok állíthatók elő.

A kokszosítás, más nevén a svélezés célja a pörköléshez hasonlóan olyan szilárd végtermék előállítás, amelyben a karbon feldúsul. A folyamat során felszabaduló gáztermék elégetésével a technológia energiaigénye fedezhető. Az alkalmazott hőmérséklet rendszerint a $400\text{--}600\text{ °C}$ tartományban található [2].

A klasszikus pirolízis a hulladék, illetve tüzelőanyag szerves molekuláinak a hőbontását valósítja meg $500\text{--}800\text{ °C}$ -on, aminek eredményeként gáznemű és szilárd frakció jön létre. Ezen belül beszélhetünk lassú és gyors pirolízisről [2].

A pirolízist gyakran kiegészítik gázosítással. A kigázosítás a pirolíziskokszban maradó szén folyamatgázzá (pirolízisgázzá) történő átalakítását jelenti 800–1.000 °C-on. Mivel a folyamat során gázosodást segítő anyag (pl. levegő, tiszta oxigén) jelenléte szükséges, ezért ezt a megoldást a legtöbb szakirodalom már a gázosításhoz sorolja. A gyakorlatban ezt a kialakítást pirolitikus elgázosításnak is nevezik.

3. Fás szárú biomasszák kategorizálása

A fás szárú biomasszák pirolízissel történő kezelésére, hasznosítására vonatkozóan termokinetikai modellvizsgálatokat végeztünk, amelyek a moláris anyagmegmaradás tételén alapulnak. A modellegenlet felírásához ismerni kell az alapanyag egymólnyi karbontartalmára vonatkozó, fajlagos kémiai összetételét tömegszázalékban. Az (1) összefüggés mutatja a hulladék egymólnyi karbontartalomra vonatkozó hidrogén és az oxigén-tartalom-átszámítást, valamint mutatja a felírási formalizmust [9]:

$$a_C \cdot C + a_H \cdot H + a_O \cdot O =$$

$$C_{a_C} + H_{a_H} + O_{a_O} = C + \frac{H_{a_H}}{a_C} + \frac{O_{a_O}}{a_C} =$$

$$CH_{\frac{a_H}{a_C}}O_{\frac{a_O}{a_C}} = CH_kO_l, \quad (1)$$

ahol:

a_C a tüzelőanyag moláriskarbontartalma,
 a_H a hidrogéntartalma
 a_O az oxigéntartalma [mol/kg_{tüzelőanyag}];
 k és l a tüzelőanyag egymólnyi karbontartalmára vonatkoztatott hidrogén- és oxigéntartalma, tehát a H/C és az O/C arány.

Néhány jellegzetes fafajta H/C és O/C arányát szemlélteti az **1. táblázat**, amiket az elemi összetételek függvényében az ismeretett módon határoztuk meg.

1. táblázat. *Fafajták H/C és O/C arányai a száraz bázisra vonatkoztatva*

	Akác	Bükk	Fenyő	Nyár	Tölgy
H/C	1,42	1,45	1,45	1,45	1,20
O/C	0,66	0,60	0,65	0,60	0,56

A táblázatból látható, hogy az egyes fafajták fajlagos összetételüket tekintve széles skálán mozognak, ezért a fás szárú biomasszák kémiai összetétele alapján készítettünk egy összefoglaló táblázatot (**2. táblázat**), amely a H/C és az O/C arányok alapján tartalmazza az egyes fajtákat. Összesen 46 kategóriát különítettünk el, ami jellemzően lefedi az ismert fafajtákat, valamint a fahulladékokat [10]. A feltüntetett arányok alapján elkészítettük az elemzéseket pirolízisre, 500 °C hőmérsékletű kezelés mellett, változó nedvességtartalom esetében.

2. táblázat. *Fás szárú biomasszák H/C és O/C kategóriái [-]*

H/C	O/C	O/C	O/C	O/C	O/C	O/C
1,15	-	0,45	0,50	0,55	-	-
1,20	-	0,45	0,50	0,55	0,60	-
1,25	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	-
1,30	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,40	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,45	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65
1,50	-	-	0,50	0,55	0,60	0,65
1,55	-	-	0,50	0,55	0,60	0,65
1,60	-	-	-	-	0,60	0,65

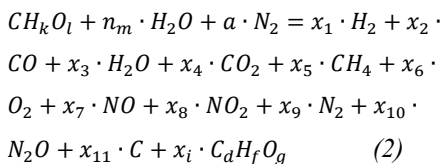
4. Termokinetikai modell alapegyenletei

A termokinetikai modellvizsgálat során meghatároztuk az egyes alapanyagokból előállított gáztermékek kémiai és energetikai tulajdonságait. A folyamatok modellezésére termokinetikai modellt alkalmaztunk, ami a moláris tömeg- és energiamegmaradás tételén alapul [9]. A modell alkalmazásával közelítő becslést lehet adni a keletkező gáz kémiai összetételére, fűtőér-

tékére, viszkozitására és a lejátszódó kémiai reakciók energetikai hatékonyságára. Mivel a modell lényege, hogy egyszerűbbé és gyorsabbá tegye a számítást, ezért az egyszerűsített modellegetlenetek felírásakor egyes összetevőket, mint például a nitrogén-oxidokat, valamint az etilén- és acetilén-vegyületeket elhanyagoltuk. A modellegetlenet a tüzelőanyag egymólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott hidrogén- és oxigéntartalmára kerül felírásra [9, 11, 12].

A modelvizsgálatokat 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 [13]. 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 visszkapjuk az égési egyenleteket.

A kibővített modellegetlenet a moláris anyagmegmaradás tétele alapján a következő módon írható fel:



ahol:

- n_m a tüzelőanyag egymólnyi karbon-tartalmára vonatkoztatott nedvességtartalma,
- a_a a tüzelőanyag nitrogéntartalma,
- x_1 a keletkező nyers szintézisgáz moláris hidrogéntartalma,
- x_2 a szén-monoxid-tartalma,
- x_3 a vízgőztartalma,
- 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 modelvizsgálatok arra irányultak, hogy meghatározzuk a keletkező gáztermék kémiai összetételét, amiből származtatni tudjuk a technológiai, valamint az energetikai hatékonyságot jellemző tulajdonságokat és paramétereket.

A paraméteres alapegetlenetek megadása azért szükséges, mert ezeket felhasználva építettük fel a modelvizsgálatokat. A bemeneteli összetételek függvényében és a keletkező termékek ismeretében felírt 2. 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 (3–5. összefüggések), végül meghatároztuk az egyensúlyi állandókat (6–7. képlet) [9, 12]:

Karbonegyensúly:

$$1 = x_2 + x_4 + x_5 \quad (3)$$

Hidrogénegyensúly:

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

Oxigénegyensúly:

$$l + n_m = x_2 + x_3 + 2 \cdot x_4 + 2 \cdot x_6 \quad (5)$$

Víz-gáz reakcióegyensúlyi állandó:

$$K_1 = \frac{x_1 \cdot x_4}{x_2 \cdot x_3} \quad (6)$$

Metánképződési egyensúlyi állandó:

$$K_2 = \frac{x_5}{x_1} \quad (7)$$

ahol K_1 és K_2 a víz-gáz és a metánképződés egyensúlyi állandók, amik függnek a hőmérséklettől és a nyomástól. A modellezés során állandó 500 °C hőmérsékleten és állandó 1 bar üzemi nyomáson vizsgáldtunk.

Az egyes keletkező termékek moláris mennyiségben kifejezett értékét az egyensúlyi mólszámmal (x) jelöljük. Az egyensúlyi mólszám 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 (8.) képlet alapján írható fel [9, 14]:

$$\frac{G}{R \cdot T} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i \cdot G_i^0}{R \cdot T} + x_i \cdot \ln \frac{x_i}{\sum x_i} + x_i \cdot \ln p \right) \quad (8)$$

ahol G a Gibbs-féle szabadenergia, G_i^0 az i -edik alpanyag 1 mol anyagmennyiségre 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 alpanyag anyagmennyisége a keverékben, n a kémiai elemek száma, $\sum x_i$ a végtermék egyensúlyi mólszámainak 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 az állandó nyomáson és hőmérsékleten vett egyensúlyi állandók módszerét alkal-

maztuk. A szoftvert kémiai egyensúlyi folyamatok elemzése céljából fejlesztették ki, így használata megfelelő a termikus kezelési technológiák vizsgálatára. A kezelési folyamatok szimulálásával megfigyelhetjük, hogy a bemenő paraméterek változtatása hogyan befolyásolja a pirolízis során keletkező gáztermék összetételét.

5. Energetikai hatékonyságvizsgálat

Az energiahatékonyság napjaink egyik kulcsfontosságú kérdése. 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 [15]. 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 (9.) megmutatja, hogy a szilárd tüzelőanyag energiataralmának mekkora része jelenik meg az előállított gáztermékben [16, 17]. A reakcióhatásfok ismeretében meghatározható az égetés tökéletességét jellemző paraméter. Számítási módszerét a (10.) képlet mutatja. Ezek alapján:

$$\eta_r = \frac{m_{gt} \cdot F_{gt}}{m_{szt} \cdot F_{szt}} \quad (9)$$

$$\eta_e = 1 - \eta_r \quad (10)$$

ahol: η_r a reakcióhatásfok, (m_{gt}) a gáztermék tömegárama, F_{gt} a gáztermék fűtőértéke, (m_{szt}) a szilárd tüzelőanyag tömegárama, F_{szt} a tüzelőanyag fűtőértéke és η_e az égési hatásfok.

A fajlagos energiakihozatal megmutatja, hogy egységnyi tömegű bemenő szilárd tüzelőanyagra vonatkoztatva mekkora energiamennyiség állítható elő. Felhasználásá-

val közvetlenül számítható az eredő energiakonverziós hatásfok.

A fajlagos energiakihozatal a (11.) összefüggéssel írható fel

$$e_k = \frac{m_{gt} \cdot F_{gt}}{m_{szt}} = \eta_r \cdot F_{szt} \quad (11)$$

ahol e_k a fajlagos energiakihozatal.

Energetikai szempontból van egy lényeges technológiai paraméter, a fajlagos gáztermelés, amely megmutatja, hogy egy kg tüzelőanyagból (a segédgázokat is figyelembe véve) hány kg gáztermék állítható elő [10]. A fajlagos gáztermelés

$$k_{gt} = \frac{m_{gt}}{m_{szt}} \quad (12)$$

ahol k_{gt} a fajlagos gáztermelés.

Pirolízis esetében a gáztermék mellett éghető piroolaj és pirokoksz is keletkezik, amikre vonatkozóan szintén meghatározható a fajlagos pirokokszkihozatal (k_{pk}), és a fajlagos piroolajkihozatal (k_{po}) mértéke. A fajlagos kihozatalok összege egyet ad.

A 46 fás szárú biomassza kategóriákra vonatkozóan a pirolízist folyamatos üzemben vizsgáltuk. A reakció-hőmérsékletet 500 °C-ra választottuk, és segédgázt nem alkalmaztuk. Az alkalmazott üzemi nyomás 1 bar. Az ismertetésre kerülő hatékonyságmátrixok e reakciókörülményekre vonatkoznak.

A felállított modell és az így kapott eredmények maximum 35%-os nedvességtartalmú fás szárú biomasszára alkalmazhatók. A modellezés folyamata során a száraz fa és a 35%-os nedvességtartalom közötti tartományban a nedvesség hatása lineáris függvénnyel írható le. 35%-nál nagyobb nedvességtartalom esetében a linearizált modell nem alkalmazható, mivel nagyobb nedvességtartalom esetében a modell 100%-nál nagyobb kémiai hatásfokot eredményez.

Az energetikai hatékonyságot jellemző paraméterek közül, kiindulásként a fajlagos energiakihozatalt határoztuk meg az előállí-

tott pirolízisgáz kémiai összetétele alapján (3. és 4. táblázat).

3. táblázat. Fajlagos energiakihozatal mértéke pirolízisnél, e_k [MJ/kg_{fa}]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	5,0557	4,6962
1,20	-	5,3548	4,9392
1,25	5,7804	5,5874	4,9653
1,30	6,0386	5,7008	5,1989
1,35	6,2317	5,8263	5,3213
1,40	6,2237	5,9501	5,4605
1,45	6,4525	5,9798	5,5505
1,50	-	-	5,5769
1,55	-	-	5,6990
1,60	-	-	-

4. táblázat. Fajlagos energiakihozatal mértéke pirolízisnél, e_k [MJ/kg_{fa}]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	4,6143	-	-
1,20	4,6350	4,4128	-
1,25	4,7949	4,4936	-
1,30	4,8707	4,5893	4,1822
1,35	5,0088	4,5337	4,3322
1,40	5,0723	4,7053	4,4967
1,45	5,0955	4,7363	4,4724
1,50	5,1337	4,8342	4,4310
1,55	5,2298	4,7961	4,5427
1,60	-	4,8978	4,7612

Megfigyelhető, hogy az alapanyag H/C arányának növekedése nagyobb fajlagos energiakihozatalt eredményez, míg az O/C aránynál fordított tendencia tapasztalható. Míg előbbi esetben jellemzően hidrogén-felszabadulással, utóbbinál szén-dioxid- és vízgőzképződéssel számolhatunk.

A nedvességtartalom fajlagos energiakihozatalra gyakorolt hatását az 5. és 6. táblázatból olvashatjuk le, amely 10%-os nedvességtartalom-növekedésre vonatkozik. Látható, hogy a növekvő nedvességtartalom pirolízis alkalmazása során pozitív irányban befolyásolja a fajlagos energiakihozatalt.

5. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energiakihozatalra, Δe_k [MJ/kg_{td}]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,5436	0,5796
1,20	-	0,5129	0,5553
1,25	0,4696	0,4896	0,5528
1,30	0,4423	0,4778	0,5294
1,35	0,4223	0,4655	0,6145
1,40	0,4236	0,4528	0,5029
1,45	0,4003	0,4497	0,4942
1,50	-	-	0,4914
1,55	-	-	0,4795
1,60	-	-	-

6. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos energiakihozatalra, Δe_k [MJ/kg_{td}]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,5875	-	-
1,20	0,5849	0,6069	-
1,25	0,5702	0,5990	-
1,30	0,5623	0,5892	0,6274
1,35	0,5485	0,5942	0,6131
1,40	0,5417	0,5774	0,5971
1,45	0,5388	0,5739	0,5986
1,50	0,5353	0,5647	0,6024
1,55	0,5264	0,5676	0,5914
1,60	-	0,5581	0,5709

Ez a tendencia jellemző a pirolízisreakció hatásfokának alakulására (7–10. táblázatok).

7. táblázat. Pirolízisreakció hatásfoka, Π_r [%]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	34,38%	33,32%
1,20	-	36,39%	35,18%
1,25	38,78%	38,22%	36,06%
1,30	40,66%	39,54%	38,13%
1,35	42,33%	41,24%	39,67%
1,40	43,09%	42,75%	41,27%
1,45	45,16%	43,94%	42,83%
1,50	-	-	43,95%
1,55	-	-	45,69%
1,60	-	-	-

8. táblázat. Pirolízisreakció hatásfoka, Π_r [%]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	33,12%	-	-
1,20	34,09%	33,35%	-
1,25	35,80%	34,89%	-
1,30	37,15%	36,28%	34,58%
1,35	38,75%	37,40%	36,55%
1,40	40,14%	38,99%	38,29%
1,45	41,34%	40,14%	38,88%
1,50	42,35%	41,69%	40,13%
1,55	43,92%	42,70%	41,24%
1,60	-	44,24%	43,76%

9. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízisreakció hatásfokára, $\Delta \Pi_r$ [%]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	12,91%	13,47%
1,20	-	12,89%	13,52%
1,25	14,41%	12,97%	13,79%
1,30	12,74%	13,15%	13,93%
1,35	12,84%	13,42%	15,01%
1,40	13,10%	13,62%	14,35%
1,45	13,23%	13,93%	14,65%
1,50	-	-	14,96%
1,55	-	-	15,23%
1,60	-	-	-

10. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a pirolízisreakció hatásfokára, $\Delta \Pi_r$ [%]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	13,63%	-	-
1,20	13,96%	14,34%	-
1,25	14,18%	14,73%	-
1,30	14,48%	14,99%	15,63%
1,35	14,69%	15,63%	15,97%
1,40	15,02%	15,71%	16,12%
1,45	15,40%	16,06%	16,45%
1,50	15,66%	16,35%	17,12%
1,55	15,95%	16,87%	17,17%
1,60	-	17,12%	17,41%

A fajlagos fagáztermelésnél eltérő hatás figyelhető meg (11. és 12. táblázat). Ennél

a kategóriánál mind a H/C, mind az O/C arány növekedése nagyobb fajlagos gáztermelést eredményez. A növekvő nedvességtartalom hatására nagyobb a fajlagos gáztermelés (13. és 14. táblázat), azonban itt a H/C és az O/C aránypárok fordítottan arányosak.

11. táblázat. Fajlagos gáztermelés mértéke pirolízis esetén, k_{gt} [kg_{gáz}/kg_{fa}]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,1652	0,2200
1,20	-	0,1671	0,2268
1,25	0,1538	0,1781	0,2523
1,30	0,1616	0,1980	0,2667
1,35	0,1754	0,2261	0,2884
1,40	0,2012	0,2468	0,3067
1,45	0,2180	0,2759	0,3327
1,50	-	-	0,3582
1,55	-	-	0,3794
1,60	-	-	-

12. táblázat. Fajlagos gáztermelés mértéke pirolízis esetén, k_{gt} [kg_{gáz}/kg_{fa}]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,2348	-	-
1,20	0,2668	0,3002	-
1,25	0,2868	0,3339	-
1,30	0,3138	0,3561	0,4076
1,35	0,3320	0,4060	0,4312
1,40	0,3599	0,4117	0,4419
1,45	0,3893	0,4375	0,4650
1,50	0,4087	0,4572	0,5089
1,55	0,4296	0,4917	0,5117
1,60	-	0,5075	0,5251

A pirokoks keletkezése a gázképződéssel fordítottan arányos. Ez az állítás nemcsak matematikailag, hanem azon elv alapján is levezethető, hogy az alapanyagban található nedvesség- és illóanyag-tartalom a hő hatására gőz/gáz formájában felszabadul, és reagál a karbonnal, ami ezáltal csökkenti a visszamaradó szilárd végtermék mennyiségét.

13. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos fagáztermelésre, Δk_{gt} [kg_{gáz}/kg_{fa}]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,1438	0,1384
1,20	-	0,1436	0,1377
1,25	0,1448	0,1425	0,1351
1,30	0,1440	0,1405	0,1337
1,35	0,1426	0,1377	0,1335
1,40	0,1400	0,1356	0,1297
1,45	0,1383	0,1327	0,1271
1,50	-	-	0,1245
1,55	-	-	0,1224
1,60	-	-	-

14. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos fagáztermelésre, Δk_{gt} [kg_{gáz}/kg_{fa}]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,1369	-	-
1,20	0,1337	0,1303	-
1,25	0,1317	0,1269	-
1,30	0,1290	0,1247	0,1194
1,35	0,1272	0,1196	0,1171
1,40	0,1244	0,1191	0,1160
1,45	0,1214	0,1165	0,1137
1,50	0,1195	0,1146	0,1092
1,55	0,1174	0,1111	0,1090
1,60	-	0,1095	0,1077

A 15. és 16. táblázatokból látható, hogy az alapanyag H/C és O/C arányának növekedése csökkenti a fajlagos kokszttermelést. A tüzelőanyag nagyobb fajlagos hidrogén- és oxigéntartalma arra utal, hogy az nagyobb mennyiségben tartalmaz illó vegyületeket.

A növekvő nedvességtartalom a gázképződésnek kedvez, így a kokszttermelésnél csökkenő tendencia figyelhető meg. A keletkező fajlagos pirolízisolaj mennyisége azon elv szerint határozható meg, hogy a keletkező fajlagos gáz (k_{gt}), kokszt (k_{pk}) és olajtermékek (k_{po}) összege egységnyi értéket képvisel.

$$k_{gt} + k_{pk} + k_{po} = 1 \quad (13)$$

15. táblázat. Fajlagos kokszttermelés mértéke pirolízis esetén, k_{pk} [$\text{kg}_{\text{koksz}}/\text{kg}_{\text{fa}}$]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	0,4084	0,3810
1,20	-	0,4074	0,3776
1,25	0,4141	0,4019	0,3648
1,30	0,4102	0,3920	0,3576
1,35	0,4033	0,3780	0,3468
1,40	0,3904	0,3676	0,3377
1,45	0,3820	0,3530	0,3247
1,50	-	-	0,3119
1,55	-	-	0,3013
1,60	-	-	-

16. táblázat. Fajlagos kokszttermelés mértéke pirolízis esetén, k_{pk} [$\text{kg}_{\text{koksz}}/\text{kg}_{\text{fa}}$]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	0,3736	-	-
1,20	0,3576	0,3409	-
1,25	0,3476	0,3241	-
1,30	0,3341	0,3130	0,2872
1,35	0,3250	0,2880	0,2754
1,40	0,3111	0,2851	0,2701
1,45	0,2963	0,2722	0,2585
1,50	0,2867	0,2624	0,2366
1,55	0,2762	0,2451	0,2352
1,60	-	0,2373	0,2285

17. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos kokszttermelésre, Δk_{pk} [$\text{kg}_{\text{koksz}}/\text{kg}_{\text{fa}}$]

H/C; O/C	0,40	0,45	0,50
1,15	-	-0,0714	-0,0687
1,20	-	-0,0713	-0,0683
1,25	-0,0719	-0,0707	-0,0671
1,30	-0,0715	-0,0697	-0,0663
1,35	-0,0708	-0,0683	-0,0658
1,40	-0,0695	-0,0673	-0,0643
1,45	-0,0687	-0,0658	-0,0630
1,50	-	-	-0,0618
1,55	-	-	-0,0607
1,60	-	-	-

Példaként szemléltetjük három eltérő fajlagos összetételű és változó nedvességtartalmú fafajta pirolízisére kapott eredményeit (17. és 18. táblázatok). A referencia fajtánál megfigyelhető, hogy a nagyobb nedvességtartalom növeli a fajlagos energiakihozatal mértékét, ezen keresztül pedig a reakcióhatásfokot, tovább kedvez a fajlagos gázképződésnek, és csökkenti a pirolíziskoksz mennyiségét. Amennyiben a vizsgálati eredményeket összehasonlítjuk a táblázatokból leolvasott, illetve köztes H/C és O/C arányoknál lineáris interpolációval meghatározott értékeket, akkor megkaphatjuk a táblázatrendszerünk pontosságát.

18. táblázat. 10%-os nedvességtartalom hatása a fajlagos kokszttermelésre, Δk_{pk} [$\text{kg}_{\text{koksz}}/\text{kg}_{\text{fa}}$]

H/C; O/C	0,55	0,60	0,65
1,15	-0,0679	-	-
1,20	-0,0663	-0,0646	-
1,25	-0,0653	-0,0630	-
1,30	-0,0640	-0,0618	-0,0592
1,35	-0,0631	-0,0593	-0,0580
1,40	-0,0617	-0,0591	-0,0575
1,45	-0,0602	-0,0578	-0,0563
1,50	-0,0592	-0,0568	-0,0541
1,55	-0,0582	-0,0550	-0,0540
1,60	-	-0,0542	-0,0533

19. táblázat. Fafajták pirolízise, összefoglalás

Fafajta	Nedvesség [%]	e_k [$\text{MJ}/\text{kg}_{\text{fa}}$]	η_r [%]
Energiafűz	0	4,4032	35,89
Energiafűz	15	5,3056	59,79
Bükkfa	0	4,7363	40,14
Bükkfa	20	5,8841	72,26
Tölgyfa	0	4,5906	33,98
Tölgyfa	23	4,6007	66,78

20. táblázat. Fajfajták pirolízise, összefoglalás

Fajfajta	Nedvesség [%]	k_{gt} [kg _{gt} /kg _{fa}]	k_{pk} [kg _{pk} /kg _{fa}]
Energiafűz	0	0,3846	0,2988
Energiafűz	15	0,5673	0,2082
Bükkfa	0	0,4375	0,4074
Bükkfa	20	0,6705	0,2648
Tölgyfa	0	0,2735	0,3543
Tölgyfa	23	0,5794	0,2011

7. Következtetések

A termokinetikai modellvizsgálatok azt az eredményt hozták, hogy a fás szárú biomassza pirolízissel történő hasznosítás során a nedvességtartalom növekedése a fajlagos energiakihozattal (5–6. táblázat), a kémiai hatásfokot (9–10. táblázat) és a fajlagos fagázstermelést (13–14. táblázat) pozitív irányba változtatja. A nagyobb nedvességtartalom nagyobb energiataralmú és mennyiségű fagázt eredményez. A pirolízis-olaj és a pirokoks mennyisége (17–18. táblázat) a nedvességtartalommal fordított arányban áll.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] BASU, P.: *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Practical design and theory*, Second edition, Elsevier, San Diego, 2013. p. 529.
- [2] SZUHI, A.: *Az új termikus technológiák környezeti hatásai (pirolízis, elgázosítás és plazma technológia)*. Humusz Szövetség és Vidék-fejlesztési Minisztérium 2013. p. 14.
- [3] WAMPLER, T., P.: *Applied pyrolysis handbook*. Taylor & Francis, Second edition, 2007. p. 285.
- [4] SZUHI, A.: *Új termikus technológiák és hagyományos hulladékégetők*. Környezetvédelmi-Vízügyi Minisztérium, 2009. p. 36.
- [5] HILL, T. & DOWEN, S.: *Pyrolysis and gasification*. Briefing (Draf 2), UK Without Incineration Network (UKWIN), 2010. p. 9.
- [6] HANAOKA, T., INOUE UNO, S., OGI, T., MINOWA, T.: *Effect of wood biomass components on air-steam gasification*.

- [7] HOGG, R.: *Energy from waste by pyrolysis and gasification the experience and performance of an operational plant*. Solid Waste Management, 2007, pp. 385–392.
- [8] HELSEN, L., BOSMANS, A.: *Waste-to-Energy through thermochemical processes: matching waste with process. Proceedings of the International Academic Symposium on Enhanced Landfill Mining*, Houthalen-Helchteren, Belgium, 2010, pp. 133–180.
- [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] RED, T., B., DAS, A.: *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*, Solar Energy Research Ins., 1988. p. 148.
- [11] WANG, Y., KINOSHITA, C. M.: *Kinetic model of biomass gasification*. Solar Energy, Vol. 51. No. 1. 1993, pp. 19–25.
- [12] MOUNTOURIS, A., VOUTSAS, E., TASSIOS, D.: *Solid waste plasma gasification: equilibrium model development and exergy analysis*. Energy Conversion and Management. Vol. 47. 2006. pp. 1723–1737.
- [13] HATZILYBERIS, K. S.: *Design of an indirect heat rotary kiln gasifier*. Fuel Processing Technology. 92, 2011. pp. 2429–2454.
- [14] MORLY, C.: *Method for calculating equilibrium compositions at specified temperature*, Gaseq, a chemical equilibrium program for windows. www.gaseq.co.uk 2005. p. 6.
- [15] PATTERSON, M. G.: *What is energy efficiency? Concepts, indicators and methodological issues*. Energy Policy. Vol. 24, No. 5. pp. 377–390. 1996.
- [16] RAJVANSHI, K., A.: *Biomass gasification*. Alternative Energy in Agriculture. Vol. 2. No. 4. 1986. pp. 83–102.
- [17] SCHUSTER, G., LÖFFER, G., WEIGEL, K., HOFBAUER, H.: *Biomass steam gasification – an extensive parametric modeling study*. Bioresource Technology. Vol. 77. 2001. pp. 71–79.

- [18] GYULAI, I.: *A biomassza dilemma*, Magyar Természetvédők Szövetsége, Föld Barátai Magyarország, 2010. p. 116.