

FÁS SZÁRÚ BIOMASSZÁBÓL TÖRTÉNŐ KAPCSOLT VILLAMOSENERGIA-TERMELÉS LEHETŐSÉGEINEK VIZSGÁLATA

Bodnár István

egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem,
Elektrotechnikai és Elektronikai Intézet

3515 Miskolc, Miskolc- Egyetemváros, e-mail: vegybod@uni-miskolc.hu

Összefoglalás

A tanulmány a fás szárú biomasszából történő villamosenergia-termelésről szól. A biomasszából kiemelkedő hatékonysággal kapcsolatosan lehet energiát termelni, a nemzetközi szakirodalomban ezeket a technológiákat CHP (Combined Heat and Power) néven ismerjük. Egy ilyen energiatermelési feladatra leginkább elterjedt berendezés a kogenerációs egység, azaz a gázmotor-generátor szett, és a gázturbina. A kapcsolt energiatermelés lényege, hogy egyetlen technikai körfolyamatban állítunk elő hasznos hőt és villamos energiát. Ha egyszerre, egyetlen folyamatban állítunk elő villamos- és hőenergiát, akkor csökkenthető az egységnyi termelt energiára vetített CO₂ kibocsátás és a felhasznált energia-hordozók mennyisége, az energiák külön-külön történő termeléséhez képest.

Kulcsszavak: biomassza, tűzifa, égetés, gázosítás, villamos hatásfok

Abstract

This paper presents the electricity generation of wood biomass. We can efficiently generate the energy out of biomass with Combined Heat and Power (CHP) technologies. For this task, a gas-engine set or a gas-turbine is the most popular method. With the basis of CHP generation, is that we produce useful heat and electricity in one technical cycle. If we generate electricity and thermal energy in one technical cycle, we can reduce the carbon-dioxide emission per kWh energy and the source of energy used.

Keywords: biomass, firewood, incineration, gasification, electrical efficiency

1. Bevezetés

A tűzifa alapú energiatermelés, napjainkban biomassza tüzelés az utóbbi években újra előtérbe került. Ennek oka egyrészt a hagyományos, fosszilis alapú tüzelőanyagok viszonylag magas ára és mennyiségi korlátja, másrészt a környezettudatosság; valamint a fenntartható energiatermelés- és fogyasztás, mint alapelv megjelenésére vezethető vissza. Kezdetben a biomasszát hőenergia előállítására alkalmazták, elsősorban vegyes- és fatüzelésű kazánokban, később megjelentek a speciálisan biomassza tüzelésre tervezett kazánok, legújabbban pedig a faelgázosító kazánok, amelyek egyenletesebb hőleadásra képesek a hagyományos kazánokhoz képest. Az utóbbi években a biomasszában rejlő lehetőségeknek köszönhetően

megjelentek a biomasszából kapcsolt energiatermelést megvalósító erőművek, amelyeknek több típusa is ismert, de mind ez idáig kevésbé terjedtek el. A hagyományos víz-gőz körfolyamaton alapuló Rankine-Clausius-körfolyamat mellett a belsőégésű motoros, Diesel-körfolyamat és a külsőégésű motoros, Stirling-körfolyamat egyaránt alkalmazható kapcsolt energiatermelésre, eltérő hatékonysággal. Azt, hogy milyen technikai körfolyamatot célszerű alkalmazni, a tüzelőanyagként szolgáló biomassza energetikai-minőségi tulajdonságai határozzák meg.

2. A fás szárú biomassza, mint tüzelő- és üzemanyag

A biomassza általános definíciója magába foglalja a Földön megtalálható összes élő tömeget. Mérnöki szemszögből biomasszának csak az energetikailag hasznosítható növényeket, terméseket, melléktermékeket, valamint a növényi és állattartási hulladékokat értjük. Magyarországon jogi fogalmát a 2010. évi CXVII. törvény határozza meg (1. § 3. bekezdés): ezek alapján a „biomassza: a mezőgazdaságból - a növényi és állati eredetű anyagokat is beleértve, erdőgazdálkodásból és a kapcsolódó iparágakból, többek között a halászatból és az akvakultúrából - származó, biológiai eredetű termékek, hulladékok és maradékanyagok biológiailag lebontható része, valamint az ipari és települési hulladék biológiailag lebontható része”.

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 köbméter kerül kitermelésre, aminek az egyik fele ipari, a másik fele pedig kémiai (rostanyag) és energetikai (tüzelőanyag) hasznosításra kerül.

A gőzgépek megjelenésével a fát elsőként ipari gépek hajtására, később a vasút fejlődésének köszönhetően, gőzmozdonyok működtetésére is fel tudták használni. Az Ottomotorok megjelenésével rohamos fejlődésnek indult az automobil-gyártás, így az 1900-as évek elején megjelent az olcsó és megbízható, első sorozatgyártott jármű, a Ford-T modell, amit ráadásul egy magyar mérnök, Galamb József tervezett. 1920-tól az autók relatíve alacsony árak miatt már közhasználatú járművek lettek, így egyre többen szokhattak hozzá ehhez a kényelmes közlekedési eszközhöz. Azonban a II. világháborúban bekövetkezett üzemanyaghiány miatt az autók üzemeltetése szinte lehetetlenné vált az addig üzemanyagul szolgáló benzín hiánya okán. Ebből adódóan egy olyan alternatív megoldást kellett kifejleszteni, amely rendszer könnyen alkalmazható a már meglévő automobilon, és benzín helyett olyan nyersanyagot hasznosít, amely mindenki számára elérhető: közönséges tűzfát.

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 [1]. Ennek megfelelően a hazai biomassza-potenciál 328 PJ-ra tehető, amiből jelenleg 49,2 PJ kerül hasznosításra, ez 15%-os hasznosítási arányt jelent [2]. Az energiatermelésre hasznosítható faanyag (energiafa) a kitermelt lombos fáknak a felét, a fenyőknek alig a 20%-át teszi ki. Az évente kitermelhető energiafa 4–4,5 millió m³-re becsülhető [2]. A száraz fa fűtőértéke 17–20 MJ/kg között van. Ezen számok alapján a

hazai erdők évi energiafa-potenciálja 56 PJ-re becsülhető. A fakitermeléskor körülbelül 20% apadék keletkezik, viszont ennek egy része faaprítékként még tüzelési célokra alkalmazható, a becsült évi értéke 6 PJ [1].

A biomassza a benne rejlő lehetőségnek köszönhetően a terület- és a településfejlesztésben, valamint a kistérségek munkahely-teremtésében kiemelt szerepet játszhat, ami ez által szerves részét képezheti a közmunkaprogramnak. A biomasszán alapuló fejlesztések lehetőséget adnak továbbá „falu fűtőművek” és villamos erőművek létesítésére, amik amellett, hogy zöldenergiát termelnek, még bevételi forrást is jelenthetnek a települések számára. Mindazon által nem lehet figyelmen kívül hagyni, hogy a biomassza egy olyan energiaforrás, amely folyamatosan megújulásra képes, de véges mennyiségben áll rendelkezésünkre, ezért hasznosítása csak korlátozott keretek között valósíthat meg. Túlzott kiaknázása a környezet elhasználódásához vezet, ami azt jelenti, hogy a megújuló energiaforrások megújulási ciklusideje nagyobb, mint amilyen ütemben azt használjuk. A környezet elhasználódásának iskolapéldája a Húsvét-sziget, ahol a fejlett iparosodás nélküli társadalom is képes volt a megújuló energiaforrásokat túlhasználni.

3. Az energiaültetvények

Az energiaültetvények a jövő energiapolitikájában fontos szerepet kapnak, hiszen a kihatálatlan mezőgazdasági területek újra használatba vételének egyik lehetséges alternatíváját jelentik. Az energetikai céllal természet növények akár fás, akár lágyszárúak, a környezetvédelem szerves részét képezik a teljes életciklusukra vonatkoztatott szén-dioxid semlegességük kapcsán. Önmagában a biomassza a környezetre nézve semlegesnek tekinthető, hiszen az életútja során a levegőben lévő széndioxidot fotoszintézis útján karbonná és oxigénné alakítja át. A karbon beépül a növény szerkezetébe, ezáltal növekedik, az oxigént pedig kibocsátja. Abban az esetben, ha ezt a biomasszát kitermeljük, szállítjuk és hasznosítjuk, a szén-dioxid semlegessége megszűnik. A biomasszán végzett műveletek energiaigénye negatívvá teszi a környezeti mérleget, amit csak úgy tudunk újra semlegessé tenni, ha a kibocsátásokkal azonos mértékben növeljük a biomassza mennyiségét. Ennek az a következménye, hogy egyre nagyobb ültetvények létesítésére lenne szükség, amely másodlagos környezeti károkat okozhat. A gyakorlatban ez nehezen kivitelezhető a termőföldek véges kapacitása miatt, ezért megoldásként a folyóvágási kitermelés csökkentése áll a rendelkezésünkre. Ez azt jelenti, hogy a következő vágási ciklusban egyre kevesebb a hasznosítható famennyiség, amelynek végeredményeként megszűnik a kitermelés.

Az energetikai céllal természetett faültetvényekkel szemben támasztott legnagyobb követelmény az, hogy nagy legyen az éves fahozam, illetve gyors növekedésre és sarjadásra alkalmas fafajtákból álljon. Szintén fontosak a jó energetikai tulajdonságok, mint a tüzelhetőség és a fűtőérték, valamint a károsodásokkal, kártevőkkel való szembenálló képesség. Magyarországon, az energiaültetvényeken alkalmazható fafajták listáját a 45/2007. (VI. 11.) FVM rendelet 1. számú melléklete tartalmazza. A listán jelenleg 13 alapfajta szerepel (1. táblázat). E fafajok mellett egyre jobban előtérbe kerül a császárfa (paulownia), amely még nagyobb fahozamú, és gyorsabban növekvő, mint a hagyományos energetikai fafajták.

Az energiaültetvények fahozama széles skálán mozog, amely nem csak a fajtától, hanem az időjárási viszonyoktól, a termőtalaj minőségétől, annak nedvességtartalmától, az ültetvény gondozásától, valamint a vágásfordulótól és az ültetvény korától is jelentősen függ. A becsült fahozam 20–120 tonna/ha intervallumban található. A hektáronkénti átl-

gos tőszám 8–15 ezer/ha, de akár 50 ezer növény is ültethető. A kitermelés 3–5 éves ciklusokban valósul meg, amely 4–5 vágásfordulót is jelenthet, így az ültetvény élettartama 12–25 év körültre tehető [3]. A rövid vágásfordulójú energiaültvények, akár évente is betakaríthatók. Természetesen a számok az alkalmazott fafajtától és az előbb említett körülményektől jelentősen eltérhetnek. Az átlagos évenként várható hektáronkénti fahozam 16–30 tonna/ha·év.

1. táblázat: Magyarországon fás szárú energetikai ültetvényekben engedélyezhető alapfajok

Magyar neve	Latin neve	Magyar neve	Latin neve
Fehér nyár	Populus alba	Korai Juhar	Acer platanoides
Fekete nyár	Populus nigra	Fehér akác	Robinia pseudoacacia
Szürke nyár	Populus x canescens	Vörös tölgy	Quercus rubra
Rezgőnyár	Populus tremula	Feketedió	Juglans nigra
Fehér fűz	Salix alba	Magas kőris	Fraxinus excelsior
Kosárfonó fűz	Salix viminalis	Keskenylevelű kőris	Fraxinus angustifolia
Mézgás éger	Alnus glutinosa		

4. Kapcsolt energiatermelés és a technikai körfolyamatok

A kapcsolt energiatermelés lényege, hogy egyszerre, egyetlen technikai körfolyamatban állítunk elő hasznos hőt és villamos energiát. Legelső lépésként célszerű meghatározni azt, hogy mi is az a hasznos hő. A 2007. évi LXXXVI. számú a villamos energiáról szóló törvény 3. § 23. bekezdése a következőképpen definiálja a hasznos hőt: „*a kapcsoltan termelt energia előállításánál során valamely, gazdaságilag indokolt hő- vagy hűtési igény kielégítése érdekében megtermelt hő*”.

A jogszabály jogharmonióban áll a 2002/0185 COD EU-direktívával. A hasznos hő a jogszabály egyik alappillére, mert a hő nehezen tárolható és szállítható, ezért a kapcsolt energiatermelést a hasznos hőt igénylő üzem helyén, vagy annak közelében és a fellépő hőigény idejében lehet megvalósítani [4]. A keletkező hőenergia hasznosítása nélkül nem beszélhetünk kapcsolt energiatermelésről [5]. A hulladékból kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételi ára jelenleg a támogatottak körébe tartozik, így emelt áron értékesíthető. Abban az esetben, ha a keletkező hőenergia nem kerül hasznosításra, akkor a megtermelt villamos energia sem vehető át emelt áron, így a normál piaci árat kell megfizetni a vásárlónak (napjainkban a támogatott átvételi ár több mint másfélszerese a normál piaci árak). Ezért fontos, hogy a biomassza energetikai célú hasznosítása kapcsolt energiatermeléssel legyen megvalósítva.

A villamos- és hőenergia együttes előállítását más néven kombinált hő- és villamosenergia-termelésként (Combined Heat and Power, CHP) ismerik, amely kombinált ciklusú erőművekkel valósítható meg. Az ilyen létesítmények rendszerint három fő egységből állnak, ahol az első egység a tüzelőanyag energiátartalmát hővé és forgó mozgássá alakítja, a második egységben a forgómozgás villamos energiává alakul, a harmadikban a felszabaduló hő visszanyerése történik meg. A kapcsolt energiatermelés eltérő méretekben,

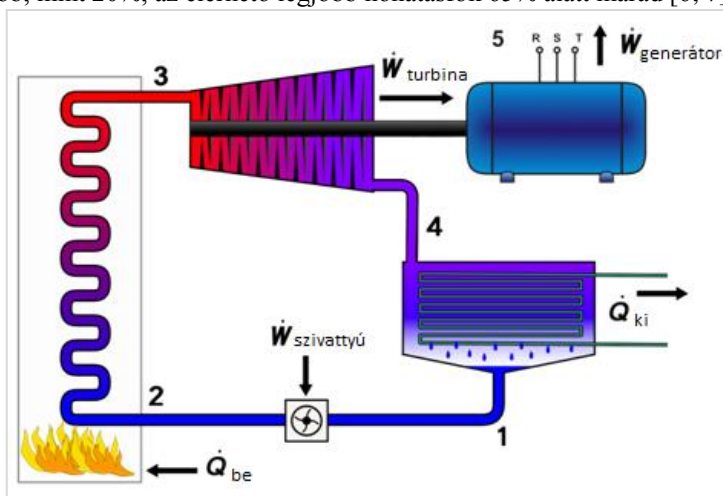
berendezésekkel és technikai körfolyamatokkal valósíthatók meg. A kis teljesítményű belsőégésű motoroktól és mikro-turbináktól kezdődően a külsőégésű, Stirling motoron át, egészen a nagy egység teljesítménnyel rendelkező gázturbinás és gőzturbinás turbógépekig széles palettaválaszték áll a rendelkezésre. Az energiatermelő egységek villamos-, termikus- és eredő hatásfoka között jelentős különbségek figyelhetők meg [9].

A kapcsolt energiatermelés számos előnnyel rendelkezik, amely egyaránt magában hordozza az energetikai, a környezetvédelmi és a gazdasági-gazdaságossági szempontokat is. A kapcsolt energiatermelés a nagyobb hatásfok mellett számos előnnyel rendelkezik [9]:

- Ha az összes megtermelt hőt a helyszínen fel lehet használni, akkor a kapcsolt energiatermeléssel lehet a legolcsóbban villamos energiát előállítani.
- A kapcsolt energiatermelés alkalmazásával csökken a fajlagos tüzelőanyag-szükséglet, amely ezen keresztül csökkenti a környezetterhelés mértékét, legfőképp szén-dioxid megtakarítás érhető el.
- A villamos energia helyben történő előállítása növeli az ellátás üzembiztonságát.
- A kapcsolt energiatermelésben tüzelőanyagként lehet használni a termelési folyamatok hulladékait (pl.: erdészeti- és faipari hulladék).

4.1. Rankine-Clausius- körfolyamat

A Rankine-Clausius - körfolyamat a leggyakrabban alkalmazott technikai munkafolyamat a villamosenergia-termelésben. E körfolyamat elvén működik a gőzturbinás energiatermelés, ami gőzkazánból, gőzturbinából, villamos generátorból és hőcserélőből áll (1. ábra). A legelterjedtebb gőzturбина típus a kondenzációs, amely ugyan nem teszi lehetővé a keletkező hőenergia hasznosítását, cserébe viszont kimagasló villamos hatékonysággal üzemel. Kapcsoltan kedvező villamos hatásfok mellett ellennyomású, vagy kisebb villamos hatásfokkal megcsapolásos gőzturbinával tudunk energiát termelni. Mivel a munkaközeg gőz, ezért a kapcsolt energiatermelés során elérhető villamos hatásfok biomassza égetésnél rendszertint kisebb, mint 20%, az elérhető legjobb hőhatásfok 65% alatt marad [6, 7].



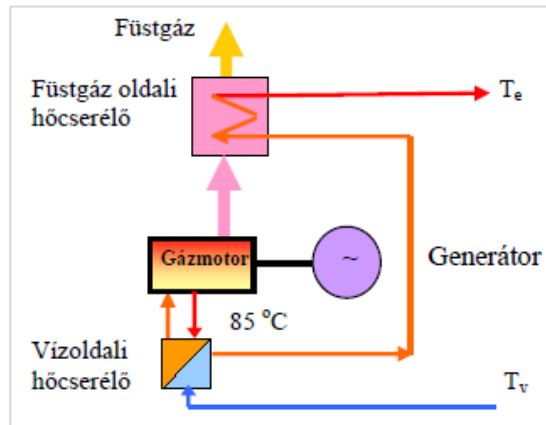
1. ábra. Gőzkazánal és gőzturbinával megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája

2. táblázat. Jelmagyarázat az 1. ábrához

Jelölés	Jelentése
\dot{Q}_{be}	tüzelőanyaggal bevitt hőteljesítmény
$\dot{W}_{turbina}$	turbina mechanikai teljesítménye
$\dot{W}_{generátor}$	generátor teljesítménye
\dot{Q}_{ki}	kivett hőteljesítmény
$\dot{W}_{szivattyú}$	szivattyúteljesítmény

4.2. Diesel-körfolyamat

Diesel- körfolyamatot valósít meg a gázmotor, amely átlagosan 40%-os villamos- és 45%-os hőhatásfokkal üzemel [8]. A gázmotoros kapcsolt energiatermelés egy gázmotorból és egy vele tengelykapcsolatban lévő villamos generátorból áll. A motor hűtőköréből, valamint a füstgázból visszanyert hő fűtési célokra és használati melegvíz előállítására kiválóan alkalmazható. A gázmotoros energiatermelés elvi felépítését a 2. ábra szemlélteti. A gázmotor a gáz halmazállapotú tüzelőanyag elégetésével forgó mozgást hoz létre. A motor tengelykapcsolatban van egy háromfázisú szinkron generátorral, ami villamos energiát állít elő. A motor hűtőköréből származó és a füstgázból visszanyert hő használati melegvíz előállítására és távfűtésre alkalmazható. Magyarországon a gázmotorok alkalmazása a kapcsolt energiatermelésben a 2000-es évek elején kezdődött. Elsősorban a távhőt szolgáltató fűtőerőművekben kerültek telepítésre. Azonban a mai földgázárak mellett, valamint a földgázból kapcsoltan termelt villamos energia kötelező átvételi árának a támogatottak köréből való kikerülése miatt, ezek az erőművek nem gazdaságos megoldások, nagy a megterülési idejük.



2. ábra. Gőzkazánnal és gőzturbinával megvalósított kapcsolt energiatermelés elvi sémája

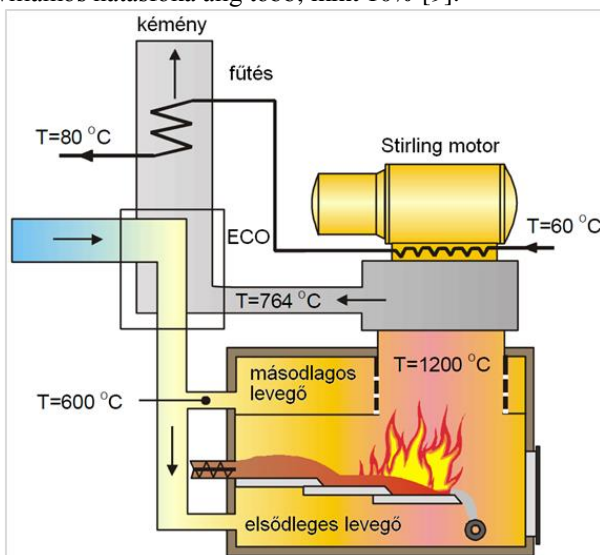
Biomasszából (az új termikus kezelési technológiákkal termelt szintézisgázok hasznosítása céljából) az energetikai hatékonyság és környezetvédelmi szempontok alapján ez a technikai körfolyamat tűnik optimális megoldásnak, így ezeknek a rendszereknek vált szükségessé a vizsgálatuk. A gázmotorok legnagyobb hátránya a turbinákhoz képest, hogy több

forgó alkatrészt tartalmaznak, amelyek gyakoribb karbantartást igényelnek, és mindemellett rövidebb élettartammal rendelkeznek. Egy erőműi gázmotor tervezett élettartama 100.000 üzemóra, amit az üzemeltetés jellegétől függően 15 év alatt elérhet el. Nagy erőműi teljesítmények esetén a gázmotorok helyét a gázturbinák veszik át, amik várható élettartama a gőzturbinákhoz hasonlóan meghaladja a 100.000 üzemórát [6, 7].

4.3. Stirling-körfolyamat

A kapcsolt energiatermelésben egy alternatívaként alkalmazható technológia a Stirling motor. Valójában az alapvetet 1816-ban fejlesztették ki, még mielőtt a belsőégésű Ottomotorot járművek meghajtására használták volna. Akkoriban a legígéretesebb technológiának tartották. A Stirling motor azonban nagyon jó minőségű anyagokat igényel, mivel a hőcserélőt kívülről folyamatosan melegíteni kell. Ha abban az időben rendelkezésre álltak volna megfelelő anyagok, lehet, hogy a járműveket ma Stirling motorok hajtánák.

A Stirling motor a hőmérsékletkülönbséget alakítja át mozgási energiává. Az alapelve egy adott mennyiségű gáz (levegő, hidrogén vagy hélium) ismétlődő felmelegítése és lehűtése. Ez úgy történik, hogy a gáz a forró és a hideg hőcserélő között mozog, miközben mechanikai munkát végez. A forró hőcserélő egy külső hőforrással (amelyet pl. az tüzelőanyag elégetése táplál) a hideg hőcserélő pedig egy külső hőelnyelővel termikus csatolásban lévő kamra (4. ábra). A fejlesztők már közel járnak az olyan Stirling motorok elkészítéséhez, amelyek családi házak (hő és villamos) energiaellátására lesznek majd alkalmasak. A Stirling motor villamos hatásfoka alig több, mint 10% [9].



4. ábra. A Stirling motoros kapcsolt villamosenergia-termelés elvi sémája

5. Kapcsolt villamosenergia-termelés hatékonyságát leíró paraméterek

A fás szárú biomasszából kapcsoltan történő villamosenergia-termelés hatékonyságát számos tényező befolyásolja. Az alkalmazott technikai körfolyamatok villamos hatásfoka

mellett, a termikus kezelési eljárások (pl.: égetés, gázosítás) égési- illetve reakció hatásfoka, a tüzelőanyag energetikai minőségi tulajdonságai, mint a kémiai összetétel, a nedvességtartalom és a fűtőérték. Mindezek figyelembevételével dönthető el, hogy az adott tüzelőanyag, milyen termikus technológiával és technikai körfolyamattal hasznosítható a legnagyobb eredő villamos hatásfokkal.

A három ismertett technikai körfolyamat között lényeges különbség az, hogy míg a Diesel- körfolyamat csak akkor alkalmazható, ha a szilárd tüzelőanyagot előbb gáz halmazállapotú energiahordozóvá alakítjuk, addig a Rankine-Clausius- körfolyamat esetében erre nincs szükség. Stirling motoros energiatermelésnél mindkét halmazállapotában alkalmazható a biomassa.

A szilárd tüzelőanyag gáz halmazállapotú energiahordozóvá történő átalakítására a gázosítás alkalmas. Gázosításnál a szerves anyagok pirolízise minimum 850–950 °C hőmérsékleten (maximum 1 600–1 700 °C hőmérsékletáig), segédanyagok – levegő, oxigén, vízgőz – segítségével megy végbe, a lehető legnagyobb gázkihozatal érdekében. Biomassa hasznosítása esetén, termikus úton, gázosítással nyerhető a legjobb hatásfokkal szintézisgáz. A gázosítási technológia a tüzelőanyag nagy részét éghető gázokká alakítja, aminek energiataartalma a gyakorlatban körülbelül 60–90%-át magában foglalja a biomassa energiataartalmának. A folyamat során tisztítandó nyersgáz és megolvadt szerves maradék keletkezik. A folyamat endoterm, tehát hőt kell bevinni a rendszerbe. A szükséges energia-közlés történhet direkt úton belső hőforrással, ahol az elgázosítandó közeg egy részének oxidációja szolgáltatja a hőt a folyamathoz. Az oxidálószer lehet levegő vagy oxigén, amit az elgázosítandó közeghez kell keverni. Amennyiben a gázosító berendezés nyomás alatt üzemel, és segédanyagként oxigént használunk, úgy sokrétűen hasznosítható szintézisgázt kapunk, ami elsősorban jól éghető szén-monoxidból és hidrogénből áll. A gázosításhoz szükséges még gázosító reagens adagolása is, ami vízgőz vagy szén-dioxid lehet [10].

Az energia átalakításának hatékonyságára számos hagyományos és nem konvencionális mérőszám ismert és alkalmazhatott. A leggyakrabban meghatározásra kerülő jelzőszámok megnevezését, jelét és mértékegységét a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat. Energetikai hatékonyságot leíró mérőszámok

Megnevezés	Jele	Mértékegysége
Reakció/ kémiai hatások	η_r	-; %
Égési hatásfok	η_e	-; %
Erőgéphatásfok villamos, termikus össz.	η_{egv} η_{egth} η_{eg}	-; %
Energiakonverziós hatásfok villamos termikus össz.	η_{ekv} η_{ekth} η_{ek}	-; %
Fajlagos energia-kihozatal	e_k	MJ/kg _{tüzelőanyag}
Fajlagos gáztermelés	k_{gt}	kg _{gáz} /kg _{tüzelőanyag}
Villamosenergia-sűrűségváltozás	Δe_v	-; %

A reakció-, vagy más néven a kémiai hatásfok megmutatja azt, hogy a szilárd tüzelőanyag energiatartalmának mekkora része jelenik meg az előállított gáztermékben (1.) [11]. A reakció hatásfok ismeretében meghatározható az égetés tökéletességét jellemző paraméter. Számítási módszerét az (2.) képlet mutatja. Ezek alapján:

$$\eta_r = \frac{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}}, \quad (1.)$$

$$\eta_\epsilon = 1 - \eta_r, \quad (2.)$$

ahol: η_r a reakció hatásfok, \dot{m}_{gt} a gáztermék tömegárama, és F_{gt} a gáztermék fűtőértéke, \dot{m}_{szt} a szilárd tüzelőanyag tömegárama és F_{szt} a tüzelőanyag fűtőértéke.

Az erőgép hatásfoka megmutatja azt, hogy a gáz halmazállapotú tüzelőanyaggal bevitt hőenergia mekkora része alakul át hasznos energiává. A hasznos energia továbbosztható villamos- és hőenergiára [11]. Az összefüggések sorra adódnak:

$$\eta_{eg} = \frac{P_v + P_{th}}{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}, \quad (3.)$$

$$\eta_{egv} = \frac{P_v}{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}, \quad (4.)$$

$$\eta_{egth} = \frac{P_{th}}{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}, \quad (5.)$$

$$\eta_{eg} = \eta_{egv} + \eta_{egth} \leq 1, \quad (6.)$$

ahol: η_{eg} az erőgép eredő nettó hatásfoka, P_v az erőgép által leadott nettó villamos teljesítmény, P_{th} az erőgép által leadott nettó termikus teljesítmény, η_{egv} az erőgép nettó villamos hatásfoka, η_{egth} az erőgép nettó termikus hatásfoka.

A fajlagos energia-kihozatal megmutatja azt, hogy egységnyi tömegű bemenő szilárd tüzelőanyagra vonatkozóan, mekkora energiamennyiség állítható elő. Felhasználásával közvetlenül számítható az eredő energiakonverziós hatásfok [11].

A fajlagos energia-kihozatal:

$$e_k = \frac{\dot{m}_{gt} \cdot F_{gt}}{\dot{m}_{szt}} = \eta_r \cdot F_{szt}, \quad (7.)$$

összefüggéssel írható fel, ahol: e_k a fajlagos energia-kihozatal.

Energetikai szempontból van egy lényeges technológiai paraméter, a fajlagos gáztermelés, amely azt megmutatja meg, hogy egy kg tüzelőanyagból (a segédgázok figyelembe vételével) hány kg gáztermék állítható elő [11]. A fajlagos gáztermelés:

$$k_{gt} = \frac{\dot{m}_{gt}}{\dot{m}_{szt}}, \quad (8.)$$

ahol: k_{gt} a fajlagos gáztermelés.

Az energiakonverziós hatásfok megmutatja, hogy a szilárd tüzelőanyag energiatartalmának mekkora része hasznosult villamos és hőenergia formájában [11]. E jelzőszám mutatja meg, hogy 1 kg szilárd tüzelőanyag mekkora hatásfokkal alakítható át energiává. Az energiakonverziós hatásfok felírható külön-külön alakban a villamos- és a hőenergiára vonatkozóan is:

$$\eta_{ek} = \left(\frac{P_v + P_{th}}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}} = \eta_\epsilon \cdot \eta_{eg} \right)_{\text{égetés}} = \left(\frac{P_v + P_{th}}{\dot{m}_{szt} \cdot e_k} = \eta_r \cdot \eta_{eg} \right)_{\text{gázosítás}}, \quad (9.)$$

$$\eta_{ekv} = \frac{P_v}{\dot{m}_{szt} \cdot F_{szt}} = \eta_r \cdot \eta_{egv}, \quad (10.)$$

$$\eta_{ekth} = \frac{P_{th}}{m_{szt} \cdot F_{szt}} = \eta_r \cdot \eta_{egth}, \quad (11.)$$

$$\eta_{ek} = \eta_{ekv} + \eta_{ekth} \leq \eta_{eg}, \quad (12.)$$

ahol: η_{ek} a nettó erdő energiakonverziós hatásfok, η_{ekv} a nettó villamosenergia-konverziós hatásfok, η_{ekth} a nettó termikusenergia-konverziós hatásfok.

A villamosenergia-sűrűségváltozás megmutatja, hogyan változik a fajlagos villamosenergia-kihozatal az alternatív technikai körfolyamatnál a referencia technikai körfolyamathoz képest [11].

$$\Delta e_v = \frac{e_{k \text{ alternatív}} \cdot \eta_{egv \text{ alternatív}}}{e_{k \text{ referencia}} \cdot \eta_{egv \text{ referencia}}}, \quad (13.)$$

ahol: Δe_{rv} a villamosenergia-sűrűségváltozás.

6. Konklúziók

A fás szárú biomasszából kapcsoltan történő villamosenergia-termelés hatásfokát az alkalmazott technikai körfolyamat- és a reakció/égési hatásfok egyaránt befolyásolja. A legnagyobb villamos hatásfokkal a Diesel- körfolyamat rendelkezik, azonban itt nincs lehetőség a szilárd biomassza közvetlen eltüzelésére, ezért gázosítási technológia közbeiktatása válik szükségessé, amely csökkenti a rendszer összh hatásfokát. Célszerű definiálni a villamosenergia-sűrűségváltozás mértékét, amely megadja azt, hogy az alternatív technikai körfolyamat hatékonyabb-e villamos energetikai megközelítésben, mint az alapfolyamat.

7. Irodalom

- [1] Büki, G.: *Kapcsolt energiatermelés*. Műegyetemi Kiadó, Budapest 2007. p. 420.
- [2] Gyulai, I.: *A biomassza dilemma*. Negyedik átdolgozott kiadás, Magyar Természetvédők Szövetsége, Föld Barátai Magyarország, 2010. p. 116.
- [3] Dr. Szajkó, G.: *Erdészeti és ültetvény eredetű fás szárú energetikai biomassza Magyarországon*. Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont, Budapesti Corvinus Egyetem. 2009. p. 109.
- [4] Bükki, G., Szederkényi S.: *EU-direktíva a kapcsolt energiatermelésről*. Magyar Energetika. 9. évf. 5. szám. 2002, pp. 45–48.
- [5] Ósz, J.: *Kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés*. BME, Segédlet, 2011.
- [6] Dr. Hornyák, M., Bánhid, J., Dr. Kovács, E., Dr. Kovács, L., Dr. Varga, P.: „*Útmutató az elérhető legjobb technika meghatározásához a hulladékégetők engedélyezése során*.” Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, Budapest 2008. p. 386.
- [7] Bükki, G.: *Erőművek*. Műegyetemi Kiadó, Budapest 2004. p. 608.
- [8] Gróf, Gy., Könczöl, S.: *Gázmotoros kapcsolt hő- és villamosenergia-termelés*. Háttér tanulmány az üzemeltetési ajánlás kidolgozásához. 2008.
- [9] Bükki, G.: *Megújuló energiák hasznosítása*. Köztisztületi Stratégiai Programok, Magyar Tudományos Akadémia, Budapest 2010. p. 144.
- [10] Thomas, B., Reed, A., D.: *Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems*. The Biomass Energy Foundation Press, 1988. p. 140.
- [11] Bodnár, I.: *Hulladékok energetikai célú hasznosításának vizsgálata energiahatékonyság, költség-haszon és életciklus-elemzési módszerekkel*. Miskolci Egyetem, Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola. 2016. p. 161.