

Kísérleti fagázgenerátor

Madár V.¹ – Tóth L.² – Madár Gy.² – Schrempf N.²; 1 – PYROWATT Kft., 2 – SZIE GEK

A biomassza előállításban Magyarország kedvező tulajdonságokkal rendelkezik. Az évente keletkező biomassza fő- és leginkább a melléktermékeinek jelentős része fordítható energiaeelőállításra. A sokféle energia célú hasznosítás közül meghatározó a hő- és/vagy villamos energia előállítása. A hőenergiává igen kedvező, viszont villamos energiává csak kedvezőtlen hatásfokkal alakítható át. A hő- és villamos energia együttes (CHP) előállítása a leginkább előnyös. Nagy erőművekben ezzel jó hatásfok érhető el, viszont a keletkező hőre teljes egészében csak ritkán van igény. A nagy erőművek esetében a szállítási távolságok növekedése (szállítási energia) is rontja a hatékonyságot. A kísérőműi felhasználás ígéretes technológiának bizonyul, mivel közvetlen a keletkezés közelében valósítható meg, s a kisebb volumenű hőfelhasználásra is többféle helyi lehetőség adódik. Valójában decentralizálja az energiaeelőállítást, ami lehetőséget biztosít a helyi munkaerő alkalmazására és a pénzügyi források is az adott települést szolgálják. A biomasszák ilyen értelmű decentralizált energiacélú felhasználásához igen ígéretes lehetőség a biomasszák hőbontással (pirolitikus úton) való felhasználása a kapcsolt hő- és villamos energia előállítására. Cikkünkben ezeknek az eljárásoknak a jellemzőit tárgyaljuk.

A rendszerben felhasználható tüzelőanyagok jellemzői

Az elgázosító generátorokat sokféle tüzelőanyaggal tudjuk üzemeltetni, de olyan gázosítási technológiai folyamat, mely az összes tüzelőanyaggal megfelelően működőképes, nem létezik. Minden gázgenerátornak eltérő tulajdonságai vannak, mind a gáz generálására, mind pedig a felhasználás feltételeire vonatkozóan. Mindegyiknek megvan a saját gazdasági, illetve műszaki előnye, ill. hátránya.

A leggyakoribb tüzelőanyagok a faiparból származó aprítékok. A tüzelőanyagok a belső és a külső tulajdonságaik alapján rendezhetők [1]:

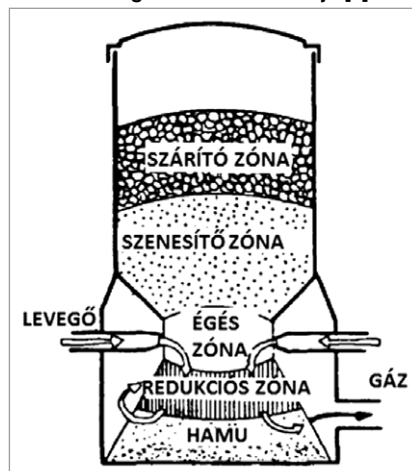
Belső tulajdonságok:

- Energiatartalom
- Nedvességtartalom
- Illóanyag
- Hamu
- Reakcióképesség
- Sűrűség
- Szenesedési tulajdonság

Külső tulajdonság

- Méret

1. ábra Gázgenerátor elvi sémája [8]



A nedvességtartalom a gázosításnál fontos szerepet játszik, hiszen belőle éghető gázok keletkeznek, viszont egy határon túl rontja a gázgenerátor hatásfokát. Ez abból adódik, hogy megkötött állapotban van benne a víz és ezt csak szárítással vagy kigőzöléssel távolítható el, ami energiát von el a folyamatból. Az illóanyagok kipárolgása alacsony hőmérsékleten elkezdődik és a rendszerben jól hasznosul.

A tüzelőanyag sűrűsége általában arányos a tüzelőanyag energiasűrűségével.

A tüzelőanyagok szenesítési zónában való tartózkodási idejét az *elszenesedési képesség* határozza meg. Ha ez túl hosszú, romlik a gáz minősége, illetve csökken a kiáramló gáz nyomása. A *biomasszaszemcsék mérete* befolyásolja a szenesítési időt és a reakcióképességet (a felület méretéből adódik).

A faapríték felhasználásában élenjáró országokban a tüzelési célú aprítékfeleléseket szabványosították.

Szintézisgázt előállító főbb rendszerek

A fa elgázosításának folyamata

A gázosítás folyamatban a tüzelőanyag először szárad az égő gázok által előállított hővel, majd a hőmérséklet növekedésének hatására megkezdődik a pirolízis, mely során vízgőz, szén-dioxid, hidrogén, nehéz szénhidrogének, legfőképp etilén, metán, szén-monoxid, kátránygázok, ecetsav, faszész, nitrogén, ammóniák és kénhidrogének szabadulnak fel. A keletkező koksz, illetve az oxigén kémiai reakciójának eredményeként úgynevezett világitógáz keletkezik. Ezek a gázok összekeveredve alkotják a generátorgázt. Az elgázosítás folyamatában jellemző zónák (1. ábra):

- a) Kiszáritási zóna
- b) Pirolízis zóna
- c) Égési zóna
- d) Redukciós zóna

A berendezésekben ezek a zónák élesen nem különülnek el, de tartományaikban különböző kémiai reakciók és hőmérsékleti sávok köthetők.

Kiszáritó zóna

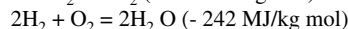
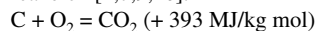
A kiszáritási zónában megtörténik a faanyag kiszáritása, ami elveszti nedvességtartalmának nagy részét. Ha a fa alapanyag nedvességtartalma 10-30 % között van, a zóna elhagyása után 6-10 %-ra csökken [7, 9].

Szenesítő zóna

A 200 °C-os tartományában a nedvességtartalom nagyobb része távozik a fából, majd 200-280 °C körül további nedvesség és egyéb illékony anyagok is távoznak, és ecetsav, illetve CO₂ keletkezik. A hőmérséklet további növekedésével (280-500 °C között) jelentős mennyiségű kátrány, CO₂ és metilalkohol képződik. 500-700 °C-nál hidrogén szabadul fel. A kátrány keletkezése hátrányos a belső égésű motorokra, ezért olyan gázosítók az előnyösek, amelyek végtermékgáza kis mennyiségben tartalmaz kátrányt. [2, 7, 10]

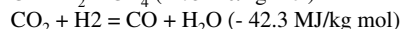
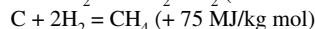
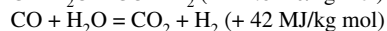
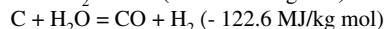
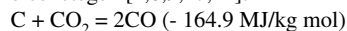
Égési zóna

A faanyagban meghatározó éghető anyag a szén és a hidrogén. Az égésnél szén-dioxid keletkezik szén és oxigén reakciójából és a hidrogén és oxigén vízgőzt alkot. Az 1450 °C-os égés exoterm folyamatában lejátszódó kémiai reakciók [2,7,9,10]:



Redukciós zóna

A CO₂, a H₂O és a nem éghető pirolízisgázok keresztuláramolnak a faszén izzó redukciós rétegén [1,6,9,17,21]:

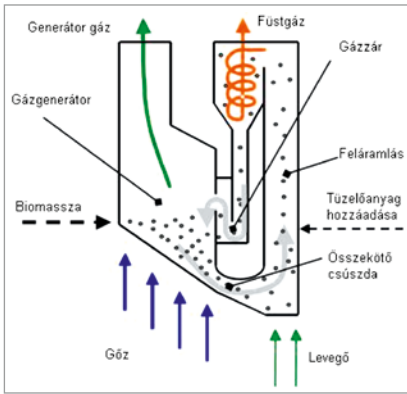


Ebben az endoterm redukciós zónában az első két reakció játszódik le, s hőmérséklet-csökkenés jön létre (800-1000 °C-ra).

Gázgenerátorok jellemzőbb konstrukciói

Többféle gázgenerátort fejlesztettek a nagyobb teljesítmény, a jobb hatásfok, illetve a kisebb kátránytartalom elérése érdekében. Létrehozták az átáramlásos és a fluidizált (mozgó és fix) ágyas rendszereket.

A *fluidizált elven működő gázgenerátorok* a biomassza és a rendszerben használt szilárd közeganyag (folyadékhoz hasonló viselkedéssel rendelkező) keverékével működik (2. ábra). Az elgázosítási segédanyag a generátor alsó részén kialakított fúvókán keresztül érkezik az ágyba, mely a benne lévő közeganyagot „buborékolatja” vagy keringeti. A benne lévő közeganyag lehet például a kvarchomok vagy akár a szerves anyagokra nézve katalitikus hatású is. A maximálisan 5-10 cm él-



2. ábra A fluidizált ágyas (gőzös) elgázosító berendezés (FICFB)

hosszúságú, aprított biomassza a fluidizált vagy cirkulált ágyba kerül.

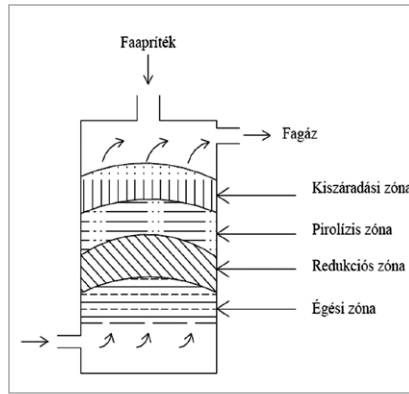
A fluidizált technológiák előnye a fix ágyas elgázosítási technológiákkal szemben, hogy nagy teljesítménykategóriákban is létesíthetők.

A fix ágyas gázgenerátoroknál a tüzelőanyag megtölti a reakcióteret. A friss tüzelőanyagot általában a generátor felső pontján kerül betöltésre egy nyíláson vagy zsilipen keresztül, majd gravitációs elven süllyed a generátor alsó része felé, miközben végbemegy az elgázosodás.

A felfelé áramoltató gázgenerátorban (3. ábra) a generátorgáz és az elgázosító segédanyag a tüzelőanyaggal szemben áramlik keresztül a generátoron. Ha a friss tüzelőanyagot a reaktor felső részén juttatjuk a rendszerbe, akkor az elgázosító segédanyag (levegő, oxigén vagy gőz) a tüzelőanyagoszlopot tartó rostély fölől érkezik a reakcióterébe.

A felfelé áramoltató gázgenerátor áramlási iránya alapján a pirolízis zónában keletkezett bomlástermékek és a frissen betáplált tüzelőanyag száradásakor keletkezett gőz a keletkezett generátorgázzal együtt hagyja el a gázgenerátort. A fő probléma oka az, hogy a pirolízisgáz egyetlen magas hőmérsékletű zónán sem halad keresztül, ezért nem oxidálódik vagy bomlik el megfelelően. Így a generátort elhagyó nyers generátorgáz akár 100g/Nm³-nyi vagy akár magasabb kátránytartalommal is rendelkezhet.

A lefelé áramoltató gázgenerátor esetében az elgázosító segédanyag egy irányba áramlik a fentről beérkező friss tüzelőanyaggal, tehát felülről lefelé (4. ábra). Ezáltal a száradási és pirolízis zónák közvetlenül az oxidációs zóna fölött helyezkednek el, tehát hőszállítás útján megkapják a lejátszódó folyamatokhoz szükséges hőmennyiséget. Az oxidációs zónában pedig a főleg gázalmazállapotú pirolízis-termékek lépnek reakcióba a beérkező elgázosítási segédanyaggal. Az oxidációs zónából szivárgó gázokat (CO₂ és H₂O) a redukciós zónában található izzó faszén CO-vá és H₂-vé redukálja. Tehát az endotermikus Boudouard és víz-gáz reakciók után a füstgáz az érzékelhető hőjének egy részét átadja a generátorgáznak. Ebből adódóan a lefelé áramoltató gázgenerátornál a redukciós zónában a rostély fölött



3. ábra A felfelé áramoltató gázgenerátor működési elve

maradhat faszén, ami a hamuval együtt távozik el. Ennek ellenére optimális üzemi körülmények között a tüzelőanyag száraz tömegének akár 95 %-át is átalakíthatjuk. A generátorgáz a rostély alatt távozik a reakcióteréből (4. ábra). A kátránytartalom általában ~1,0 g/Nm³.

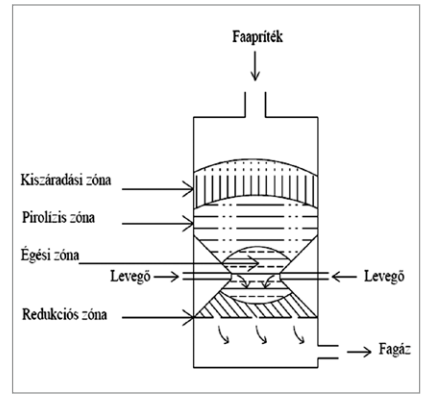
A lefelé áramoltató gázgenerátorok kialakítása és a benne lejátszódó folyamatok igen érzékenyek a berendezésbe betáplált tüzelőanyag minőségére, főként a víztartalmára. A szárítási zónában keletkezett teljes gőzmennyiségnek el kell távoznia a tüzelőanyagoszlopon keresztül, vagyis a vízzel nem csak az elpárologtatásához szükséges hőt kell közölnünk, hanem egészen az oxidációs zónában található hőmérsékletűre kell hevítenünk. Tehát a lejátszódó endoterm víz-gáz reakcióval hőt vonunk el az oxidációs zónától. Ezért a magas víztartalom csökkenti az oxidációs zóna magasabb hőmérsékletét, amely a pirolízisgázt átalakítaná.

A tüzelőanyag szemcsemérete, a por- és hamuszerű összetevőik is erősen befolyásolják a gázgenerátor keresztmetszeteiben létrejövő reakciómező egységességét, rontják a tüzelőanyagoszlop tulajdonságait. (1. táblázat)

A kettős tüzelésű elgázosító elve gyakorlatilag a felfelé és a lefelé áramoltató gázgenerátorok működését valósítja meg egy berendezésben. A megoldás célja, hogy a rostélyon visszamaradt tüzelőanyagot teljes mértékben generátorgázzá alakítsa.

A két generátoros rendszerben az első egy indirekt fűtésű csigás adagoló, amelyen belül már a pirolízis folyamata is végbemegy (5. ábra). A második pedig a kombinált generátor, amely a pirolízis során keletkezett gázok oxidálásáért (elsődleges kátrány átalakítás), valamint a heterogén

5. ábra A Dán Műszaki Egyetem Viking fantáziánévű kétfázisú elgázosító berendezése



4. ábra A lefelé áramoltató gázgenerátor működési elve

1. táblázat A lefelé áramoltató gázgenerátorra vonatkozó tüzelőanyagminőség alapvető feltételei

Nedvességtartalom	< 10–25% száraz tömeg
Frakcióméret	20–200 mm
Pormennyiség (≥ 5 mm)	< 15 % nedves tömeg
Hamutartalom	< 6 % száraz tömeg

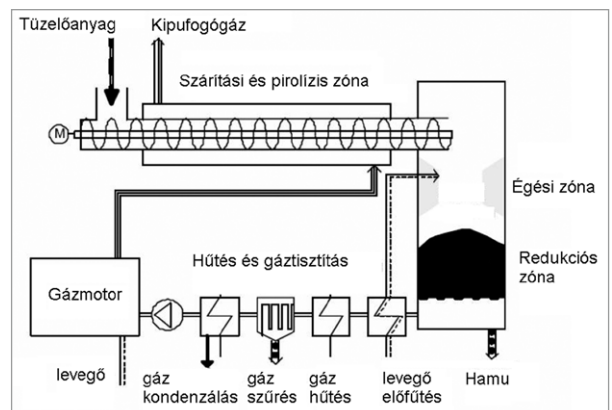
gáz-faszén reakció (redukciós/elgázosítási folyamat) lefutásáért felelős. A technológia előnye, hogy a keletkezett generátorgáz kátránytartalma 25 mg/m³ alá csökkenthető, amely már alacsonyabb, mint amit egy gázmotor megkíván, tehát szükségtelen egyéb gáztisztító/kezelő berendezéseket alkalmazni.

A többfázisú elgázosítási technológiák olyan alacsony kátránytartalmú generátorgáz előállítására képesek, amelyek közvetlenül elégethetők a belső égésű motorokban.

A fagáz jellemzői

Az imbert és a több fázisú fix ágyas rendszereket alapul véve 1 kg biomassza gázgenerálása során 1,5 m³ levegő felhasználásával 2,5 m³ gáz keletkezik. A keletkezett gáz fűtőértéke 4,5-5,2 MJ/Nm³ és összetétele:

- 22-26 % H₂
- 17-19 % CO
- 0,7-1,5 % CH₄
- 10-12 % CO₂
- 42-51 % N₂ [3, 9, 19]



Az értékek alapján az vehető észre, hogy igen nagy mennyiségű nitrogént tartalmaz, ami a levegő betáplálásával jut be a folyamatba, ezzel rontva a keletkezett gáz fűtőértékét. [1,9] A gázgenerátorból kijövő gázban gázosító konstrukciótól és a gázosított anyagtól függően változó mennyiségű por és rosszabb esetben kátrány is kijuthat.

A kísérleti gázgenerátor

A hazai viszonyokhoz $P_e=30\text{kW}$ teljesítményű, s ehhez megfelelő technológiájú többfázisú fix ágyas gázgenerátor jól alkalmazható. Az általános hazai gyakorlat szerint a rendszerbe bekerülő biomassza nedvességtartalma 20-30 % (mérete 1-32 mm 80 %, megengedett max. 85 mm), ezért a technológiában meg kell oldani a szárítást és a gázban lévő kátránytartalom minimalizálását is. A többfázisú rendszereknek főbb előnye az elkülönített tereken alapul, amelyek szabályozhatók és a kátrányképződés is minimalizálható. A kísérleti berendezés elvi felépítését a 6. ábra szemlélteti.

2. táblázat A generátorgáz paramétereit gázmotor üzemeltetése esetén [5,8]

Kátrány [mg/m ³]		Szilárd részecskék [mg/m ³]	
maximum	ajánlott	maximum	ajánlott
< 100	< 50	< 50	< 5

A fagázgenerátor megfelelő működésével szemben támasztott követelmények

- A termelt generátorgáz magas fűtőértékkel rendelkezzen, tehát magas legyen benne az éghető gázok tartalma, H₂, ill. CO. A 30 % nedvességtartalmú tüzelőanyag felhasználása esetén 3500-5000 kJ/Nm³ fűtőérték már megfelelő.
- A motor élettartamának megóvása érdekében a termelt gáz kátránytartalma 0,5 g/Nm³-nél ne legyen több.

- A tüzelőanyaggal bevitt szén teljes elégetése (>95 %), ami a folyamat magas hatásfokát biztosítja (70-80 %).
- Kis nyomásesés a gázgenerátorban, illetve a berendezéseiben.
- A terhelés változására megfelelően reagáljon. [2]

A motor kiválasztása

Mivel a fagáznak magasabb az oktánszáma, ezért növelhető a motor kompresszióviszonya, ebből adódóan javul a keverék égése. Kompressziónövelés esetén a gyújtórendszer teljesítményét is meg kell növelni, mivel sűrűbb közegen nehezebben húz át a szikra. Az azonos gáz- és levegőnyomás beállításához nyomásszabályozó (zero pressure regulator) van a biztonsági rendszerbe. Abban az esetben, ha más összetételű gázt vezetünk a motorba, akkor a kiadott teljesítmény állandóságát biztosítani kell. A gázadagoló szelep ennek a problémának a kiküszöbölésében nyújt segítséget, amit egy elektronikus vezérlésű motor mozgat a kapott jelnek megfelelően.

A teljesítmény a fordulatszám függvényében egyenesen arányosan nő, ám a fagáznál számolni kell azzal, hogy a benne található, jelentős mennyiségű, 17-19 % CO gáz égési sebessége jóval alacsonyabb, kb. 0,35 m/s, míg a hidrogéné 2,55 m/s. Ezért a teljesítmény nem fog arányosan emelkedni a fordulatszámmal. Tehát az így kivehető teljesítmény fagázzal esetében:

$$P_{fa} = V \cdot P_l = 4,75 \cdot 6,5 = 30,8\text{kW}$$

ahol:

- V: lökettérfogat [l]
- P_l: literenként kivehető teljesítmény fagázzal [kW/l]

A fában lévő nedvességtartalom lecsökkentéséhez energia szükséges, továbbá a keletke-

zett gáz nagyobb mennyiségben, 15-17 %-ban tartalmaz szén-dioxidot és a segédanyagtól függően még 40-52 %-ban nitrogént, ami nem éghető, így rontja a fagáz fűtőértékét.

A kísérleti berendezésben 1,0 kg biomasszából 2,5 m³ fagázt kaptunk, amelynek a fűtőértéke átlagosan 5,2 MJ/m³ (a száraz faanyag fűtőértéke 16 MJ/kg). Tehát a gázgenerátor hideghatásfoka:

$$\eta_{HG} = \frac{H_{agáz} \cdot q_{gáz}}{H_{a\ t\ddot{u}} \cdot q_{t\ddot{u}}} = \frac{5,2 \cdot 2,5}{18 \cdot 1} = 0,72 \rightarrow 72\%$$

ahol:

- H_{agáz} : a generátorgáz fűtőértéke [kJ/m³]
- q_{gáz} : a generátorgáz térfogatárama [m³/h]
- H_{ati} : átlagosan vett tüzelőanyag fűtőértéke [kJ/kg]
- q_{tü} : a tüzelőanyag tömegárama [kg/h]

A villamos energiára vetített összes hatásfok: 29,6 %.

Nulla nedvességtartalmú, 18 MJ/kg fűtőértékű fa esetén az óránként szükséges fa mennyisége B_f:

$$B_f = \frac{E_{fa}}{H_{fa}} = \frac{374,4}{18} = 20\text{ kg/h}$$

ahol:

- E_{fa} : óránként bevitt hőenergia [MJ]
- H_{fa} : A tüzelőanyag fűtőértéke [MJ/kg]

15 % nedvességtartalomnál ez az érték 23 kg/h-ra növekszik, de 72 %-os hideggáz-hatásfokkal a tényleges igény ~32 kg/h.

A reduktions zónát határoló henger átmérőjének meghatározása

Az elgázosítás részfolyamatai mind más és más idők alatt zajlanak le, ezért az anyag zónánkénti tartózkodási ideje fontos tényező a zónák méreteinek meghatározásához [7].

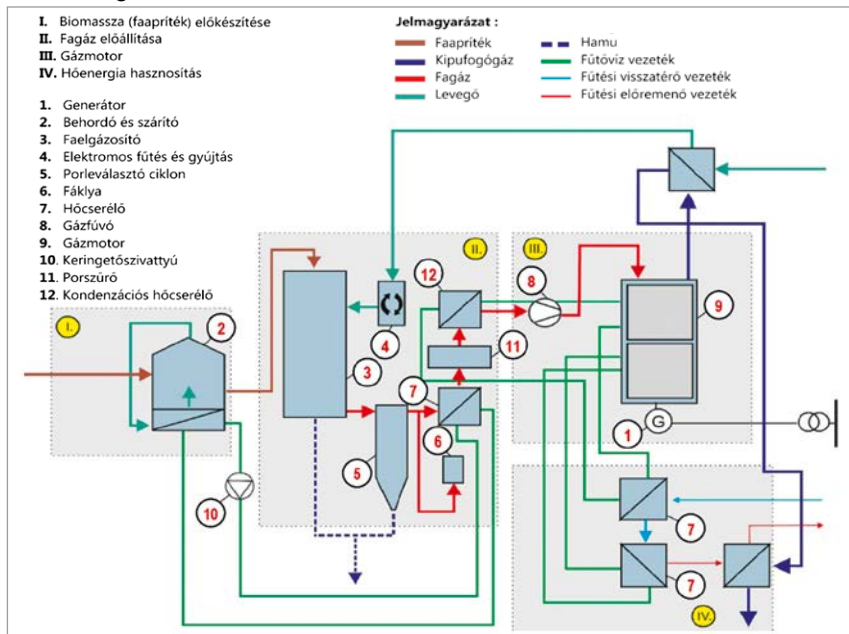
Az áramló anyag mennyisége és sebessége a zónák méreteinek függvényében változik. A szilárd anyagnál ezt a mértéket kg/m²h-ban, gázneműeknél pedig m/s-ban határozzuk meg. Az utóbbi 0 °C-os, üres készülék esetén számítható.

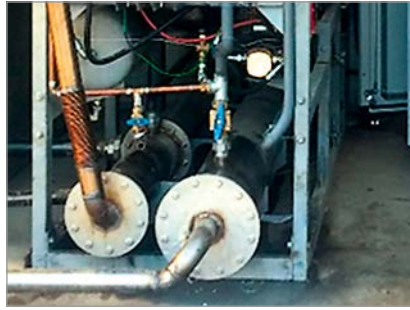
A tüzelőanyag szárítási és pirolízis zónákban töltött idejének elegendőnek kell lenni ahhoz, hogy olyan faszén jöjjön létre, mely illóanyagoktól már teljes mértékben mentes. De a tüzelőanyag tartózkodási ideje korlátozottan rövid ahhoz, hogy a faszén ne égessen el [1]. A valós égési zóna igen vékony, ugyanis a levegő oxigéntartalma rövidtávon elhasználódik az elgázosítóban. A reduktio gyorsan és az oxidációs zónához igen közel játszódik le. A reduktions zóna első, magas hőmérsékletű része rendkívül fontos a kátrányok krakkolása szempontjából. A faszén 400 °C-os hőmérsékleti szinten alakul ki. A krakkolás 950 °C felett megy végbe.

Általában 1,0 kg tüzelőanyag gázgenerálásához 1,8 kg levegő szükséges.

A primer kör az, ahol a pirolízis gázok keletkeznek, a szekunder levegő pedig a kátránymentesítést szolgálja a pirolízis zónában. A kísérletek (10 mintás sorozatban) során a

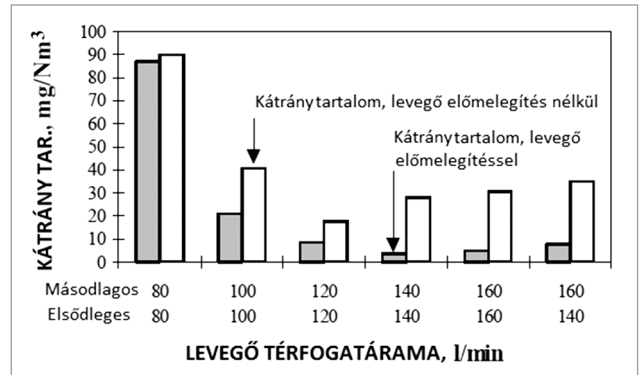
6. ábra Fagáz kísérőmű elvi működési séma





8. ábra Füstgáz hőcserélő szigetelés előtt

7. ábra Fagáz hőcserélő szigetelés előtt



9. ábra Kátránytartalom a légáram előmelegítésének hatására

primer és szekunder kör aránya 80 %-nál volt a legkedvezőbb, amikor a bejuttatott levegő 20 Nm³/h-ra, a hideg gáz hatásfoka ~68 %-ra, a kátránytartalom 54 mg/Nm³-ra adódott és a páratartalom 22,7 mg/Nm³ volt.

A rendszerben a rostély feladata, hogy létrehozzon egy olyan teret, ahol a faelgázosításból visszamaradt hamu összegyűlik és magas a hőmérséklet (~550 °C). A hamuleválasztás érdekében a rostély mozgatott kivitelű.

A fagázgenerátor minden egysége szigetelt, hogy a környezet felé hőenergia ne távozzon, mivel az a hatásfokát nagymértékben rontaná.

Porszűrés

A kiválasztott zsákos szűrő fonott textilanyagból és papírból készül. Az összegyűjtött részecskéket időként el kell távolítani, amit a kísérleti rendszernél egyelőre rázatással oldottunk meg.

Hőcserélés (hulladékhő felhasználása)

A fagázgenerátort elhagyó gáz hőmérséklete körülbelül 600 °C körüli, amihez nem alkalmasak a zsákos szűrők. A gáz lehűtését hőcserélővel oldottuk meg. A gázból kivett hőt szekunder energiaként más technológiai rész fűtésére használtuk. Ehhez hasonlóan használtuk fel a gázmotor kipufogógázának kilépési (500°C körüli) hőenergiáját is. Végül is az anyag elszárazítását és a reaktorba belépő levegő melegítését szolgálta, ami a minőség javulásában és a teljesítmény növekedésében jól kimutatható (7. és 8. ábra).

Az előmelegített levegő hatására az oxidációs zónában magasabb hőfok lesz, s megtörténik a kátrány hosszú szénláncának a krakolása (9. ábra).

A tárolóból az anyag beadagolását elektronikával vezérelt továbbítórendszer végzi, igazodva a rendszer paramétereire (10. ábra).

Összefoglalás

Bemutattuk a biomassza elgázosításának főbb rendszereit, az alapvető elveket és követelményeket. Meghatároztuk a tervezéshez szükséges lényeges paramétereket. Méréseket végeztünk a kisüzemi kísérleti rendszerrel.

A kísérleti berendezés folyamatosan működik, de további módosítások szükségesek a hatékonyság javítása érdekében.

A fagázgenerátor fő terméke a villamos energia, továbbá szekunder energiahordozót (hőenergiát) télen fűtésre, nyáron pedig meleg víz előállítására lehet használni. A ~30 kW-os rendszerrel éves szinten 210000 kWh villamos energia termelhető és 1512 GJ hőenergia kiadására képes.

Summary

We presented the main systems of the biomass gasification and the basic principles and requirements. We determined the relevant parameters necessary to drop the plan. Measurements were carried out by small-scale pilot system. The pilot plant operates continuously, but further changes are needed to improve the efficiency

The main product of the wood gas generator for electricity, and the secondary energy source (heat energy) for heating (in winter) and, hot water can be used (in summer). The system 210000kWh annual electricity produced and is able to issue 1512GJ heat.

Lektorálta: Dr. Patay István

Megjegyzés: A tanulmány a Nemzeti Fejlesztési Minisztérium PIAC_13 Piacorientált kutatás-fejlesztési tevékenység támogatása program közreműködésével készült.

Irodalomjegyzék

- [1] Surjosatyo A et al.: 2010. A review on gasifier modification for tar reduction in biomass gasification, Jakarta, Indonesia,
- [2] G. Sridhar, H.V. Sridhar, S. Dasappa, P.J. Paul, N.K.S. Rajan and H. S. Mukunda.: 2011, Development of Producer Gas Engines In: Indian Institute of Science, India (motor 3.31)
- [3] I.-S. Antonopoulos, et al.: 2011, Development of an innovative 3-stage steady-bed gasifier for municipal solid waste and

10. ábra
A kísérleti fagázgenerátor konténerben elhelyezve, valamint a rendszer tárolója

