



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**MINŐSÉGI BIOSZÉN ELŐÁLLÍTÁS
MEZŐGAZDASÁGI FELHASZNÁLÁSRA**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

MADÁR VIKTOR

GÖDÖLLŐ

2023

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki tudományok

Vezető:

Prof. Dr. Kalácska Gábor

egyetemi tanár, DSc
MATE Műszaki Intézet

Témavezető

Prof. Dr. Tóth László

Professor emeritus, DSc
MATE Műszaki Intézet

Társ-témavezető:

Dr. Kurják Zoltán

Egyetemi docens, PhD
MATE Műszaki Intézet

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

| | |
|--|----|
| 1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK..... | 4 |
| 2. ANYAG ÉS MÓDSZER..... | 5 |
| 2.1 A vizsgálatok és műszereik | 5 |
| 2.2 TGA vizsgálatok módszerei és műszerei..... | 6 |
| 2.3 Az anyagok előkészítése, jellemzőik, hatásuk a folyamatokra..... | 7 |
| 3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE | 11 |
| 3.1 A tömegsökkenés a nedvességtartalom és a hőmérséklet függvényében..... | 11 |
| 3.2 A fűtési hőmérséklet hatása a tömegsökkenésre..... | 11 |
| 3.3 Anyagrétegek mértékének hatása a lebontásra (TG jellegére) | 12 |
| 3.4 Hevítési hőfok és a szén mennyiségének aránya a szárazanyag függvényében..... | 15 |
| 3.5 Gáz visszavezetése | 15 |
| 3.6 A minta berendezés és a kapott vizsgálati értékek | 16 |
| 3.7 A kapott bioszén főbb jellemzői..... | 20 |
| 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK..... | 22 |
| 5. KÖVETKEZTETÉS ÉS JAVASLATOK | 26 |
| 6. ÖSSZEFOGLALÁS | 27 |
| 7. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI..... | 28 |

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

A bioszenet a biomasszákból pirolízisnek nevezett technikával állítjuk elő. A folyamatban a szerves anyag oxigén hiányában - a magas hőmérsékleten-, *nagy felületű, repedezett szénre alakul* és szilárd mátrixban van jelen. A bioszén biológiailag stabil, fekete termék. A felhasználási célok miatt csak megfelelően ellenőrzött biomasszákból készíthető.

A felhasználása segít mérsékelni a globális felmelegedést, mivel a talajba helyezett szén hosszú ideig változatlan marad, és nem terheli a légkört, miközben a talajt termékenységét segíti. A pirolízis folyamata során a bioszén mellett felhasználható megújuló energia is keletkezik (hőenergia, ill. az átalakításával villamos energia).

Napjainkban a nemzetközi kutatások jelentős része a talaj és a bioszén kapcsolatát elemzi. A gyártással foglalkozó kutatók célként, a termékek minőségét is a talajra gazdálkodáshoz való igazodást határozzák meg, mint elsőrendű feladatot.

A biomassza bioszénre történő átalakítása mérsékeli a klímaváltozást, mivel a hagyományos biomassza lebomláshoz viszonyítva kisebb befolyású a légköri ÜHG-koncentrációra.

Célom:

- *a nemzetközi és hazai irodalom alapján, a meglévő bioszén gyártási technológiák kutatása,*
- *károsanyagokat nem tartalmazó,*
- *kiváló minőségű,*
- *szerkezetében időálló (stabil) anyag előállításához,*
- *hatékony gépi technika és technológia létrehozása,*
- *a folyamat gépsorának előállítása,*
- *a rendszer energetikai vizsgálata,*
- *a nyert bioszén összetételének elemzése.*

Az utóbbi azért fontos, hogy a bioszén olyan alkotókat ne tartalmazzon, amelyek a talajban (a termeszőközegekben) a növényzetre hátrányos hatással vannak.

A legfontosabb előnyei:

- *a növények számára fontos anyagokat megtart a termeszőközegekben,*
- *helyreállítja a talaj pH értékét,*
- *növeli a talaj vízvisszatartását, és*
- *a mérgező fémeket (számottevően) lokalizálja, stb.*

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1 A vizsgálatok és műszereik

A mezőgazdasági biomasszák és hulladékaik fizikai megjelenésben igen sokfélék. H. Liang (2016) szerint az alapanyagoknak nagy jelentősége van a folyamat során kapott bioszén morfológiai jellemzőire. Tehát a pirolízishez a biomasszának alkalmas fizikai állapota szükséges, ezért is az igen eltérő biomassza struktúrákat a használathoz megfelelő állapotba kell hozni.

Aprítás révén az anyagok energiatakarékosabban száríthatók. A tömörítés (pl. peletálás) kisebb helyet igényel és nagyobb az anyag energia sűrűsége.

Célként megfogalmazott minta berendezés létrehozása előtt az anyagok hőtechnikai lebomlását laboratóriumban vizsgáltuk és a kapott eredményeket a tervezésnél felhasználtuk.

A fontos anyagok jellemzők:

- nedvességtartalom,
- szemcseeloszlás,
- anyagi összetétele,
- égéshő, fűtőérték,
- az anyagvastagság hatására a gázáramlási jellemzői.

A lebontási (TGA) kísérleteknél mértem:

- a hamutartalmat,
- a keletkező gáz mennyiségét és összetételét,
- a halmazok magassági pontjain az átégési sebességeket,
- a szemcsemérettől függően a gáz áramoltatáshoz szükséges nyomást és a tömegáramot.

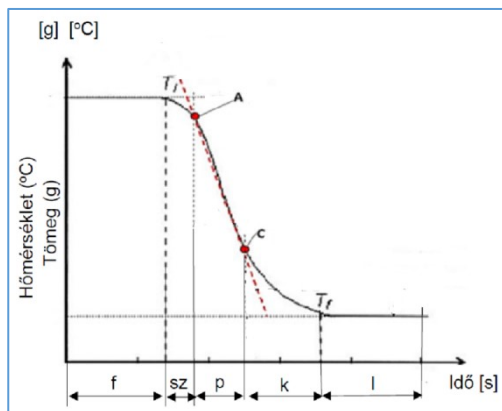
A kísérleti berendezésnél mértem:

- A visszaáramoltatott gáz mennyiségét.
- A hamu és széntartalom mennyiségét (arányát).
- A bioszén szemcseeloszlását.
- A rendszer energia mérlegét (a szükséges és nyert energiát).
- Meghatároztuk bioszén belső anyagi összetételét (pl. nehézfémeket, PAH tartalmat stb.)

A vizsgálataimat a NAIK Mezőgazdasági Gépkísérleti Intézet akkreditált laboratóriumában végeztem. A műszerek legnagyobbbrészt rendelkezésre álltak, de új vizsgáló egységek tervezésére és legyártására is sor került.

2.2 TGA vizsgálatok módszerei és műszerei

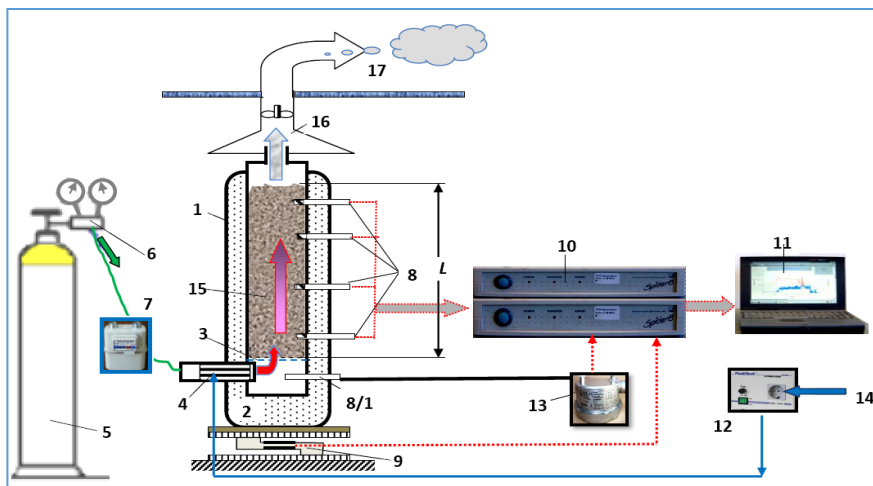
A TGA értékeinek jellemző adatai:



- ✓ *f* – felfűtés
- ✓ *sz* – párolgás (víz, olajok stb)
- ✓ *p* – pirolízis (intenzív átalakulás)
- ✓ *k* – krakkolás, redukció
- ✓ *l* – lehűlés
- ✓ T_1 – lebontás kezdete
- ✓ *A* és *C* – intenzív szakasz
- ✓ T_f – lehűlés kezdete

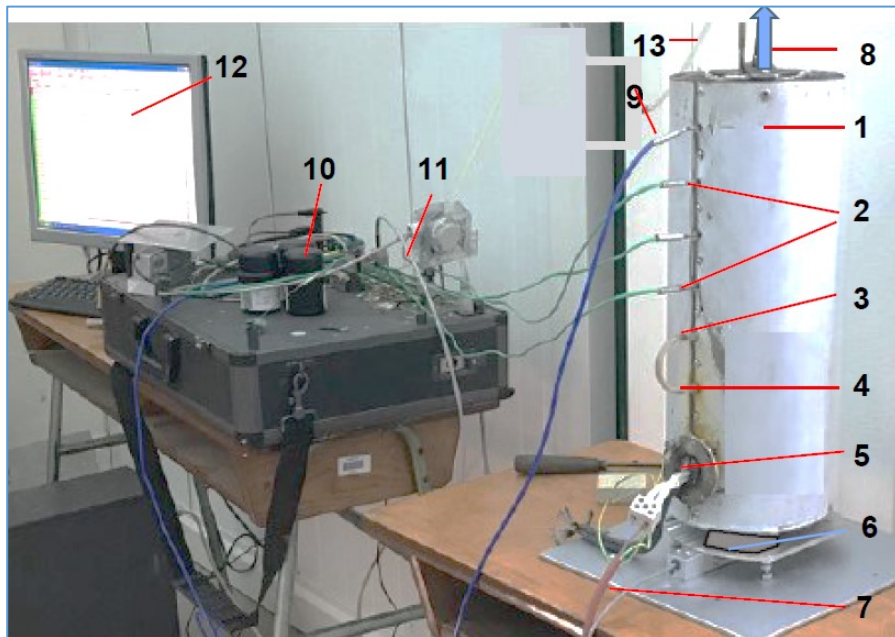
1.ábra TGA diagram jellemző pontjai (saját értékeléshez).

Nitrogén gázfűtéssel működő laboratóriumi egység:



2.ábra Laboratóriumi egység (részben saját fejlesztés).

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1- generátor test, | 9- tömegmérő érzékelő (Hottinger), |
| 2- szigetelés, | 10- adatgyűjtő (több csatornás), |
| 3- anyag rács, | 11- PC, |
| 4- fűtőtest, | 12- fűtésszabályzó, |
| 5- N gázpalack, | 13- gáz nyomásérzékelő, |
| 6- gázszabályozó, | 14- villamos csatlakozó, |
| 7- gázmérő, | 15- biomassza, |
| 8- az anyag hőmérséklet érzékelői | 16- gázgyűjtő, |
| 8/1- a gáz hőmérséklet érzékelő, | 17- gáz kivezetése. |



3. ábra: Közvetlen elektromos fűtésű, gázvisszavezetésre alkalmas berendezés (1300oC-ig üzemeltethető)

Az ábra jelölései

1. Szigetelt pirolízis egység, 2. hőmérsékletmérők 3. gáz visszavezetés 4. levegő bevezetés 5. fűtőberendezés 6. tenzometrikus tömegmérő, 7. vezeték a szabályozótól 8. gázkimenet 9. gázkivezetés az analizátorba 10. elektromos jelátalakító 11. gáznyomás érzékelő 12. adatok rögzítése 13. a gáz visszavezetése

2.3 Az anyagok előkészítése, jellemzőik, hatásuk a folyamatokra

Laboratóriumi aprítógéppel végeztük a megfelelő szemcseméret előállítását. Az aprítás révén csökken az egyes darabok mérete (x_n), de növekszik az apríték darabok összes felülete (F_n), ami a szárítás és pirolízis szempontjából meghatározó:

$$F_n = F_0 \frac{x_0}{x_n} \quad (\text{mm}^2)$$

Aprítás előtt (x_0) és -utáni (x_n) a szemcsék száma.

A különféle anyagoknál meghatároztuk a szemcseeloszlás százalékos arányát a méretek függvényében.

A relatív hézagterfogat (porozitás - ε) a szemcsék közötti hézagterfogatnak az összes térfogathoz viszonyított értéke (Ahmed S.: 2010):

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V + V_h}$$

ahol:

- V = az anyagtérfogat (m^3)
- V_h = az ún. hézagterfogat (m^3)

A porozitás a halmazsűrűségből is számítható, ekkor a szemcsék térfogatán kívül a szemcsék közötti –levegővel kitöltött – térfogatot is figyelembe kell venni:

$$\rho_t = \frac{m}{V + V_h} \quad (\text{kg}/\text{m}^3)$$

Ahol:

m = az anyag tömege (kg)

Ezzel a porozitás:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_t}{\rho}$$

Ahol:

ρ = az eredeti anyag sűrűsége (kg/m^3)

Pirolizálás során a szemcsék között levegő, ill. termék-gáz áramlik át.

A gáz átáramlásának intenzitása, a rendszer nyomás-gradiensével arányos (*Darcy - Klinkenberg-törvénye a ritkított rendszerekben mutatja meg a gáz áteresztését, vagyis amikor a molekulák átlagos szabad útja ugyanolyan nagyságrendű, mint a pórus jellegzetes mérete*).

Vagyis a homogén gradiens: felső (p_o) és alsó szinteknél (p_k) gáz nyomásának különbsége, osztva a mérési pontok távolságával (q_g):

$$q_h = \frac{\Delta p}{h} \quad (\text{Pa}/\text{m})$$

- $\Delta p = (p_k - p_o)$ = gáz nyomásának különbsége (Pa)
- h = mérési pontok távolsága (m)

A szemcseházagokon át a gáz elvezetésénél a szemcsés halmaz és a gáz tulajdonságait is figyelembe kell venni (κ tényező):

$$\kappa = (\varepsilon \cdot \rho \cdot q) / \mu$$

ahol:

- ε = a szemcsés halmaz porozitása,
- ρ = a gáz sűrűsége [kg/m^3],
- μ = a gáz dinamikai viszkozitása [Pa s , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$]
- q = a gravitációs állandó [$\text{m}^3/\text{kg s}^2$].

A κ nevezhető a halmaz gázvezető képességének is.

Végül is a vezetőképesség a különféle anyagoknál az aprózottság mértékétől, az anyagok szilárdságától, a szemcsék alakjától (pl. pellet, gyaluforgács, darált puha, vagy keményfa, szál aspríték stb.) függ. Ezek alapján a halmaz lehet durván-, vagy finoman szemcsézett, vagyis nagy- és kisméretű szemcséket egyaránt tartalmazó, továbbá kemény és puha szemcsékből álló stb. Legjobb a homogén szemcsézettnek a kemény pelletek számítanak, amelyeknél a vezetőképesség közel állandó a teljes rétegvastagságában. Pirolizálódás során az erősen inhomogén anyagoknál az alsó és felső rétegek ellenállása eltérő. Erős hamuképződéssel a vezetőképesség romlik.

Az egységnyi keresztmetszeten átáramló tömeg hozam: kg/m^2 (inhomogén gradiens).

Makroszkopikusan szemlélve átlagos gázsebesség értékét (keresztmetszeti átlagértéket jelent). Az anyaghalmaz belsejében az áramlásokat végül is a porozitása (ε) határozza meg, így

$$v = \frac{q_i}{\varepsilon}$$

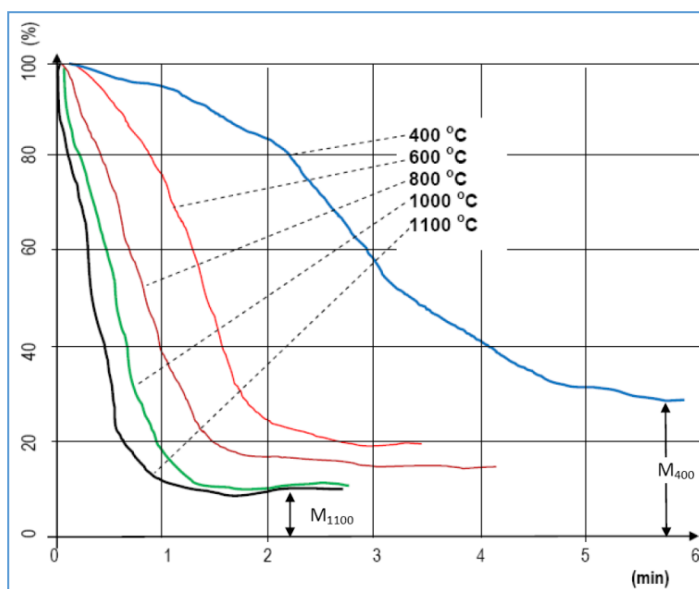
Tehát különbség van a hozam alapján alakuló intenzitás és a belső intenzitás között.

Meg kell különböztetni az átáramlott mennyiséghez (hozamhoz, \dot{Q}) kapcsolódó áramlási intenzitást és az anyagban áramló gáz sebességét (v). A rendszer jellemzői kalkulálhatók, de ehhez kísérleti alapon több tényezőt előre meg kell határozni. Az apríték halmazán átáramló gáz nyomásváltozása a légsebesség változásának függvénye, amely mérésekkel meghatározható:

$$\Delta p = f(v_f)$$

A nyomáskülönbséget kialakító tényezők közül a pirolizálási rendszerekben a legfontosabbak a különféle anyagjellemzők (energia-, nedvességtartalom, szemcsesűrűség, halmazsűrűség) esetén a hőmérséklettől függő gázképződési intenzitása stb.).

Pontosabb modell is elkészíthető, ha az egyes szemcsékre jellemző, a hőmérsékletváltozás közben létrejövő gázkiáramlási intenzitást is számba vennénk, viszont ennek akadályai a teljesen véletlenszerűen kialakuló szemcsealakok.



5.ábra A TG görbék alakulása a fűtés idejétől és - hőfokától függően (M = maradék).

Mérés az átalakított Nabertherm kemencével történt, MGI.

Figyelemre méltó, hogy a magas hőfokokon az ún. száradási szakasz nincs is, mivel az anyag a hirtelen hősock hatására azonnal megszabadul a nedvességtől.

A lebontási (fűtési) hőmérséklet ($x = \text{°C}$) és a lebontási idő viszonya:

$$y = -0,0061x + 7,295 \quad (\text{min})$$

$$(R^2 = 0,829)$$

Ahol:

- $x = 400 - 1100 \text{ °C}$.

Tehát a kísérletnél, a két tényező közötti összefüggés közelítőleg lineáris.

3.3 Anyagrétegek mértékének hatása a lebontásra (TG jellegére)

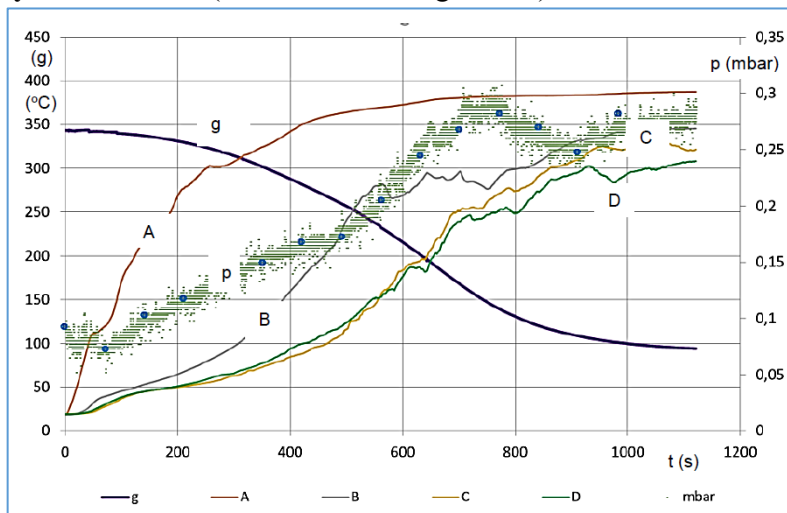
E mérésekhez a saját készítésű kísérleti egységet használtuk. A hengeres mérőtartályba helyeztünk be a 300-500g mennyiségű anyagot.

A mérést többféle szemcseméretű anyagnál is elvégeztük annak meghatározása céljából, hogy az anyagok légáteresztő képessége (átáramlási nyomásváltozás) a lebontás különböző fázisaiban mekkora értékkel szerepelnek. A mérések során a különféle adatokat a közvetlenül kapcsolt számítógéppel rögzítettük. Részleteiben a mérési paramétereket, valamint a mérés folyamatát az alábbiakban közlöm:

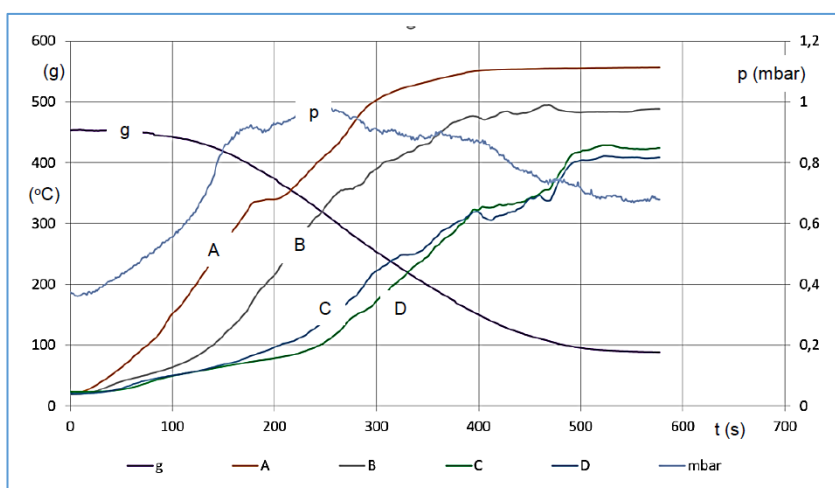
Mérési jellemzők az idő függvényében:

- a tömegváltozás (s - g)
- a hőmérsékletváltozás a mérési pontokon (s - °C)
- a nyomásváltozás a biomassa alatt (tartó rács alatt) (s - mbar)
- a gázáram (s - liter/min)

Keményfa szeszenítése (mintavétel sűrűsége: 1,0 s)



6.ábra Keményfa (G30) szeszenítése (400 °C).



7.ábra Keményfa (G30) szeszenítése (600 °C).

Az ábrák jelei:

g = Tömeg, °C = Hőmérséklet, A - Felső hőérzékelő, B és C = Közbenső érzékelők, D = Alsó érzékelő, p = Az átáramlás során mért nyomásváltozás



8.ábra Keményfa apríték szenesítés előtt és után.

Ha trendet képezünk és a lebontási intenzitás ($x = \text{g/s}$), valamint a kiindulási anyag tömege és a maradék szén (y) %-os arány között a teljes lebontási szakaszra (beleértve száradást és a redukción is) a jellemző összefüggés keményfánál:

$$y = -36,047x + 44,502 \quad (\%)$$

$$R^2 \sim 1,0$$

- $x =$ lebontási intenzitás (g/s) a 0,2 – 0,9 g/min tartományban.

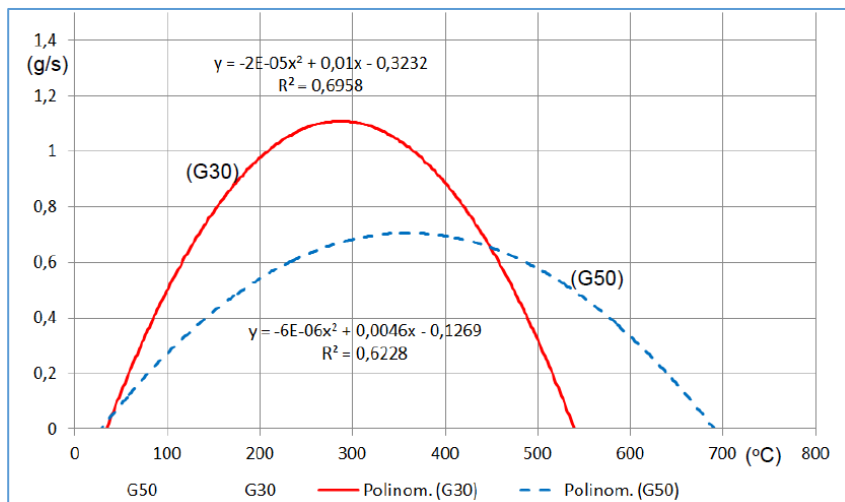
A jellemző összefüggés csak az „intenzív” lebontási szakaszra:

$$y = -28,232x + 65,409 \quad (\%)$$

$$R^2 = \sim 1,0$$

A magasabb hőfokon a maradék $\sim 10\%$ -kal kevesebb.

A kisebb szemcsézettségű G30-as anyagnál az intenzív fűtési szakasz alacsonyabb hőfokon kezdődik és $\sim 37\%$ -kal nagyobb csúcsertéken (9.ábra).

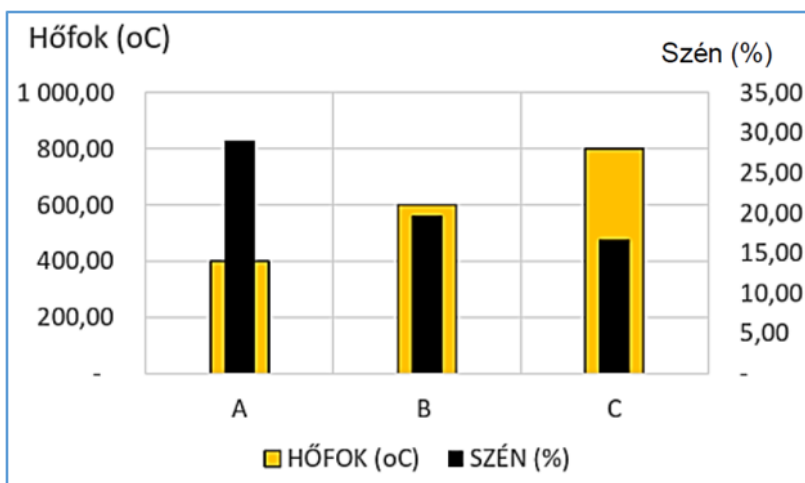


9.ábra A fűtési hőfok és a lebomlás sebessége az intenzív szakaszban

Ebből következik, hogy a kisebb szemcseméretű anyagnál célszerű kisebb fűtési sebességet választani.

3.4 Hevítési hőfok és a szén mennyiségének aránya a szárazanyag függvényében

A lebontást légmentes körülmények között történt (a műszer tökéletesen le volt zárva), az égéshez csak az anyagban és a halmaz pólusaiban lévő levegő biztosított oxigént.



10.ábra A szenesedett anyag százalékos aránya a hőfok hatására, azonos anyag esetén

Egyértelmű, hogy a hőmérséklet növekedésével a maradék anyag mennyisége csökken.

A szenesedett anyag százalékos aránya a hőfok (400-800 °C tartományban) hatására, azonos anyag esetén az alábbi összefüggést követi (G30 keményfa apríték 10 % nedvességtartalom mellett):

$$y = -6,1667x + 34,111, \quad (\%)$$

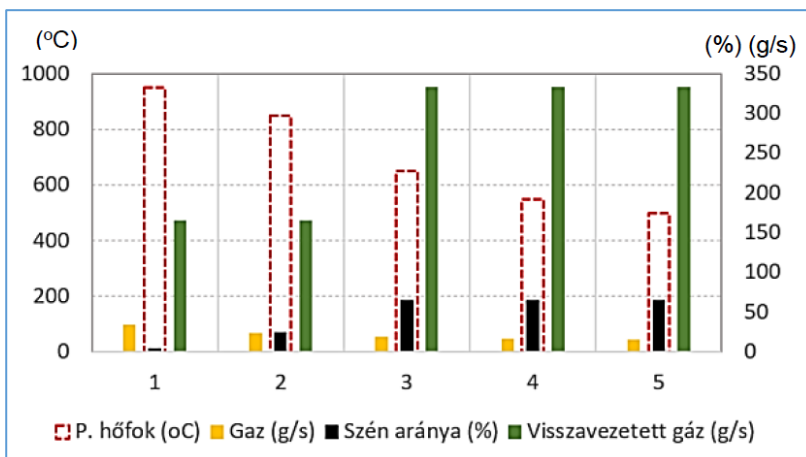
$$R^2 = 0,9192$$

Ahol:

- y = a széntartalom (maradvány) százalékos aránya a kiindulási szárazanyaghoz viszonyítva (kg/kg x 100),
- x = a mérési (fűtési) hőmérséklet (°C),

3.5 Gáz visszavezetése

E kísérlet a villamos fűtésű berendezéssel végeztem úgy, hogy a termelődött gázt visszavezetem az alsó égését zóna fölé (~10 mm-rel).



11.ábra Gázvisszavezetés hatására a szenes maradékra
A diagramban szereplő tényezők trendjét az alábbi összefüggések jellemzik:
A szén %-os arányának függése a visszavezetett gáz tömegáramától az $x = 166 - 330$ g/s-os tartományban:

$$y = 0,3052x - 35,961$$

$$R^2 = 0,942$$

A szén %-os aránya kivezetett gáz tömegárama az $x = 35 - 15,5$ g/s-os tartományban:

$$y = -0,2612x + 33,907 \text{ (\%)}$$

$$R^2 = 0,8989$$

A keletkezett szén aránya a hőfoktól függően az $x = 500 - 900^\circ\text{C}$ -os tartományban:

$$y = -0,1425x + 145,03 \text{ (\%)}$$

$$R^2 = 0,9204$$

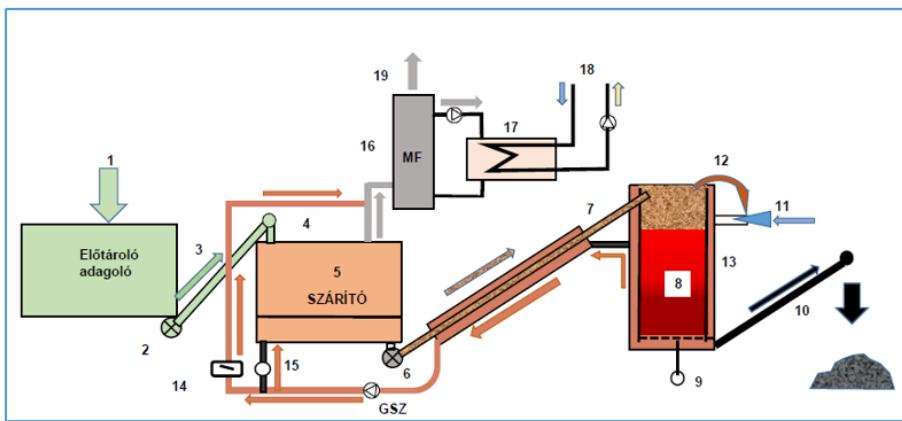
A kivezetett gáz tömegárama a hőfok $x = 500 - 900^\circ\text{C}$ -os tartományában:

$$y = 0,0386x - 4,9167 \text{ (g/s)}$$

$$R^2 = 0,8884$$

3.6 A minta berendezés és a kapott vizsgálati értékek

A vállalkozásban (Pyrowatt Kft.) készítettük el az **egyedülálló gázvisszavezetéssel működő** szenesítő berendezés fő terveit és gyártottuk le az üzemi méretű berendezést (12. ábra)

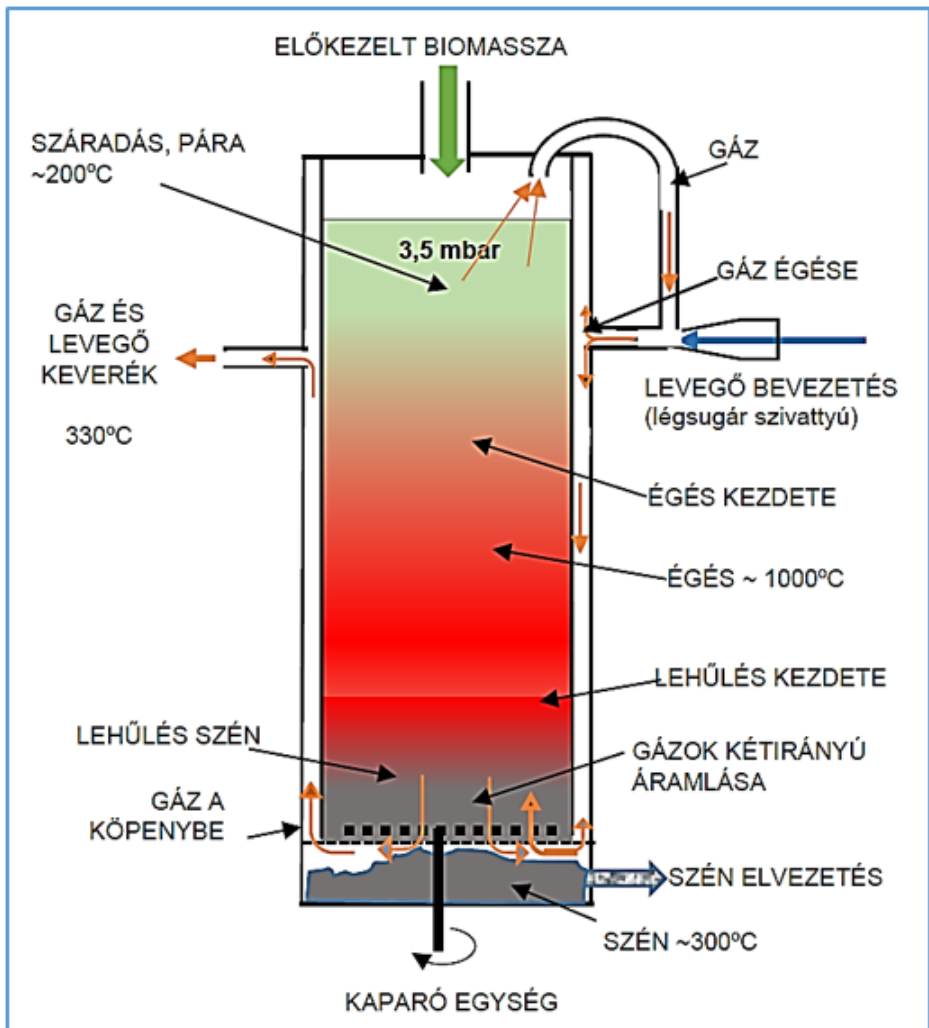


12. ábra Folyamat ábra a rendszerről

- | | |
|---|--|
| 1. Biomassza (előtároló-adagoló) | 12. Elsődleges gáz ki- és bevezetése |
| 2. Cellásadagoló | 13. Köpeny (falközötti keverő és égőtér) |
| 3. Ferdefelbordó | 14. Szabályzó (kiegészíthető hőcserélővel) |
| 4. Anyag adagolása a szárítóba | 15. Levegő gázkeverék bevezetése a szárítóba |
| 5. Kétrészes szárító | 16. Szárítóból kiáramló gáz |
| 6. Cellásadagoló | 17. Hőcserélő (hővisszanyerő rekuperátor) |
| 7. Felhordócsiga | 18. Rekuperált hő kinyerése |
| 8. Reaktor | 19. Tisztított füstgáz |
| 9. Mozgató- és kaparó szerkezet | Mf. Léghmosó tartály |
| 10. Bioszén kitaroló csiga | Gsz. Gáz szivattyú |
| 11. Levegő bevezetés (légsugár szivattyú) | |

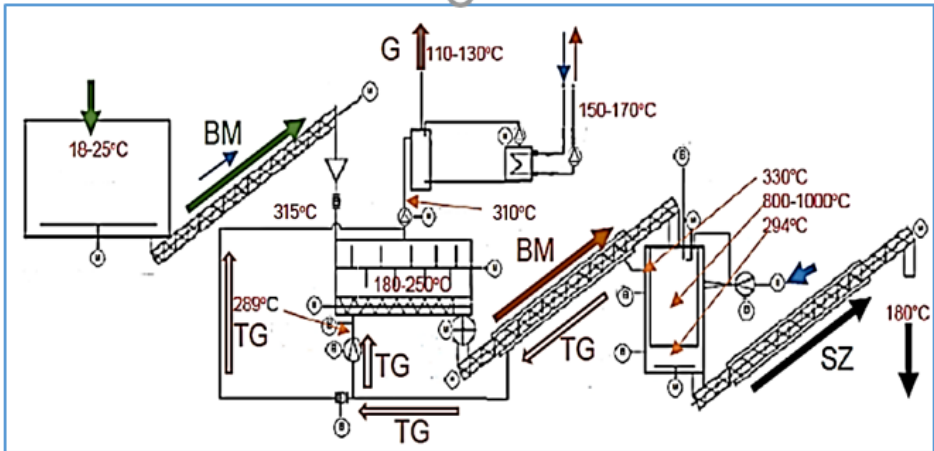
A berendezés fontosabb tulajdonságai:

- A beállítható legnagyobb hőmérséklet 600-1000 °C.
- A bioszén előállító teljesítmény: 50-100 kg/h.
- Kilépő füstgázhőmérséklet: 110-130 C°.
- Kilépő bioszén hőmérséklete: 180 C°.
- A kilépő füstgáz hőtartalmának visszanyerésével létrejövő teljesítmény: ~100 kW

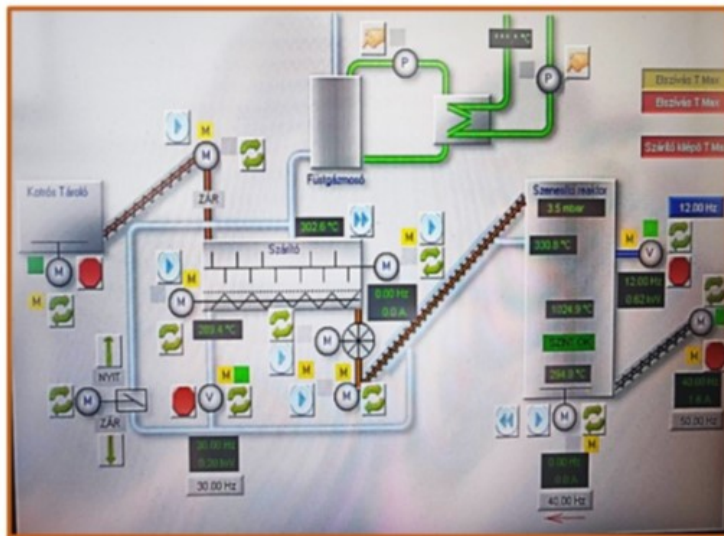


13.ábra A reaktor működési vázlata.

14.ábra A vizsgálatnál mért hőmérsékleti értékek és az anyagáramlási iránya.



14. ábra A hőmérsékleti értékek és az áramlási irányok
 Jelölések: BM – biomassza, TG – termék gáz, SZ – bioszén, G – lehűtött, tisztított gáz



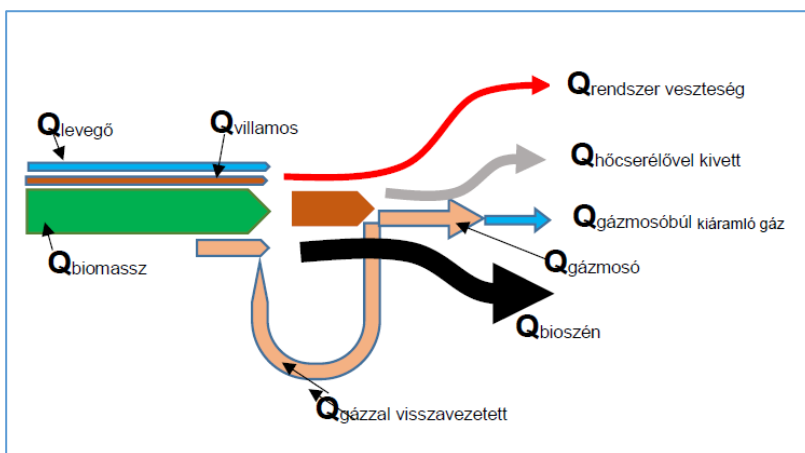
15. ábra A rendszervezérlő és irányító panelje (kivitelezve)

A bioszén rendszer összes hatásfoka:

$$\eta_{ter} = \frac{Q_{BSZ}}{Q_{BM}} 100 = 37,03 \quad (\%)$$

Gyakorlatilag a keletkezett bioszén energia tartalmának és a bevitt biomassza energiatartalmának a hányadosa (a mérési adatok alapján).

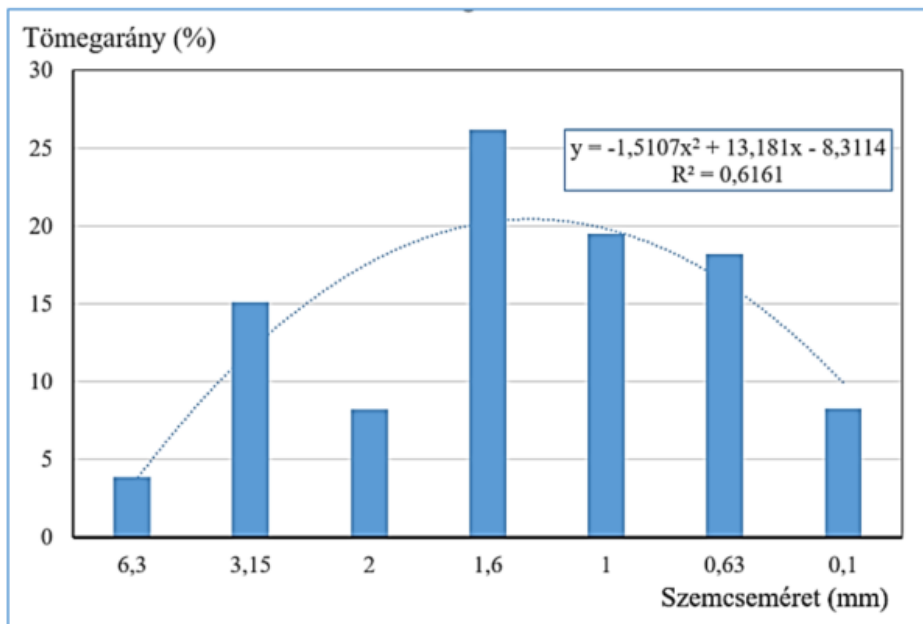
Az energetikai folyamatot a 16. ábra szemlélteti.



16.ábra A rendszer energetikai folyamata.

3.7 A kapott bioszén főbb jellemzői

A szemcseelosztást a 17. ábra szemlélteti:



17. ábra A kapott bioszén 7 osztályba sorolt tömegarányai

A felhasználóknak fontos ismerni a bioszén belső összetevőit (1. táblázat), a különféle ásványi anyagtartalmakat és a pH értékét. Különösen fontos a nehézfémeknél a megengedett határértékeke és a PAH tartalom.

1.táblázat A kapott szén fontosabb belső jellemzői.²

| Vizsgált paraméter | Eredmények | |
|-------------------------|----------------|-------|
| | Mértékegység | Érték |
| pH | | 10,1 |
| Vezetőképesség 25 fokon | mS/cm | 3980 |
| Nitrit | mg/kg (L/S=10) | <0,5 |
| Klorid * | mg/kg (L/S=10) | 3310 |
| TC | m/m% sz.a. | 50,2 |
| Arzén | mg/kg sz.a. | <1 |
| Foszfor | mg/kg sz.a. | 2770 |
| Kalcium | mg/kg sz.a. | 1760 |
| Kálium | mg/kg sz.a. | 19500 |
| Magnézium | mg/kg sz.a. | 1540 |
| TOC | m/m% sz.a. | 44,6 |
| Összes PAH | mg/kg sz.a. | <0,12 |

² WESSLING Hungary Kft. Környezetanalitikai Laboratórium H-1045 Budapest, Anonymus utca 6. H-1325 Budapest, Újpest Pf. 211. Tel.: (+36-1) 872 3600 www.wessling.hu

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A tudományos kutatások tanulmányozása alapján megállapítottam, hogy a biomasszák, ill. a hulladékaik a pirolizálás útján történő feldolgozása korszakot meghatározó előnyökkel jár:

- *a természethez viszonyítva a pirolízis berendezésekben, ellenőrzött körülmények között végzett átalakítás mérsékeli a légköri káros anyagok (gázok) kibocsátását,*
- *a pirolizálás része a körkörös gazdálkodásnak, mivel az előállított bioszén a szerkezetileg leromlott talajokba visszajuttatva, hosszú ideig a talaj része marad és segíti a regenerálódást,*
- *a pirolízis során keletkező hulladékhő más technológiai folyamatokban felhasználható.*

A biomasszák hőbontással történő átalakításához ellenőrzött anyagok szükségesek. A jó minőségű bioszének készítéséhez és a káros anyagok elkerüléséhez csak pontosan vezérelt, szabályozott gyártó berendezések lehetnek alkalmasak. Ezeknek a feltételeknek megfelelő berendezést tervezése, legyártása és kísérleti vizsgálata a megelőző kutatások alapján vált lehetővé.

1. A pirolízis folyamat hőmérsékletfüggése

A biomasszák termokémiai átalakítása - a pirolízis - soktényezős, összetett folyamat. A laboratóriumi kismintás berendezéssel történt méréseim alapján megállapítottam, hogy a nedvességtartalomtól (~0,0 -25% között) és a lebontási hőmérsékletektől (800 - 1100 °C tartományban) függően megközelítőleg kétszeresére nő a teljes lebontás időtartama. A biomassza alapanyagokban a szén és hidrogén aránya megközelítőleg azonos marad, de jelentős eltérés van a Cl és N tartalomban.

Az inertgázzal fűtött berendezésnél (oxigén mentes állapotban) a lebontási (fűtési) hőmérséklet és a fűtési idő között a következő összefüggést határoztam meg 400 - 1100 °C. hőmérséklet tartományban:

$$y = -0,0061 x + 7,295,$$
$$R^2 = 0,829$$

ahol:

y – a fűtési idő (min),

x – a fűtési hőmérséklet (°C).

Megállapítottam, hogy a szenesedett anyag százalékos aránya a hőmérséklet hatására (400 – 800 °C tartományban) azonos anyag esetén az alábbi összefüggést követi (G30 keményfa apríték, 10% nedvességtartalom mellett):

$$y = -6,1667 x + 34,111$$
$$R^2 = 0,9192,$$

ahol:

- y – a széntartalom (maradvány) százalékos aránya a kiindulási szárazanyaghoz viszonyítva (kg/kg x 100%),
- x – a mérési (fűtési) hőmérséklet (°C).

Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a hőmérséklet növekedésével a maradék anyag mennyisége csökken.

2. A lebontási maradék meghatározása

A lebontási maradék (a szén, ásványi anyag és hamu) mennyiségének meghatározására thermogravimetrikus (TG) laboratóriumi méréseket végeztem oxigénmentes (ill. szegény) környezetben, mind az inert gázos fűtésű, mind pedig a villamos fűtésű egységeknél.

Keményfánál 400 °C-os és a 600 °C-os tartományban, ha a trendet vizsgáljuk a lebontási intenzitás, valamint a kiindulási anyag tömege és a maradék szén (y) %-os arány között, akkor a teljes lebontási szakaszra (beleértve száradást és a redukciót is) a jellemző összefüggés:

$$y = -36,047 x + 44,502$$
$$R^2 \sim 1,0$$

y – a kiindulási anyag tömege és a maradék szén %-os aránya,
 x – lebontási intenzitás (g/s) a 0,2 – 0,9 g/min tartományban.

A csak az intenzív lebontási szakaszra jellemző összefüggés:

$$y = -28,232x + 65,409$$
$$R^2 = \sim 1,0$$

Ezek alapján megállapítottam, hogy a magasabb hőfokon a maradék ~10%-kal alacsonyabb értékű lesz.

A kisebb szemcsézettségű G30-as anyagnál az intenzív fűtési szakasz alacsonyabb hőfokon kezdődik és ~37%-kal nagyobb a csúcsertéken a lebontási intenzitás (g/s):

$$y = -6 \cdot 10^{-6} x^2 + 0,0046 x - 0,1269.$$

Ezek alapján megállapítottam, hogy a nagyobb aprózottságnál célszerű kisebb fűtési sebességet választani.

3. Az elsődleges gáz visszakeverésének hatása

A szén %-os aránya a visszavezetett gáz tömegáramától függően ($x = 166 - 330$ g/s tartományban):

$$y = 0,3052x - 35,961 \text{ (\%)} \\ R^2 = 0,942$$

A szén %-os aránya kivezetett gáz tömegárama az $x = 35 - 15,5$ g/s tartományban:

$$y = -0,2612x + 33,907 \text{ (\%)} \\ R^2 = 0,8989$$

A keletkezett szén aránya a hőfoktól függően az $x = 500 - 900$ °C tartományban:

$$y = -0,1425x + 145,03 \text{ (\%)} \\ R^2 = 0,9204$$

A kivezetett gáz tömegárama a hőfok $x = 500 - 900$ °C tartományában:

$$y = 0,0386x - 4,9167 \text{ (g/s)} \\ R^2 = 0,8884$$

Ezek alapján megállapítottam, hogy a gáz visszavezetése, energetikai és a termék minősége szempontjából is előnyös.

4. A gáz átvezetésének teljesítményigénye

Új megoldást javasoltam, amely szerint a gáz és levegő keveréket áramoltatok (felfelé és lefelé is) a redukciós térbe.

Megállapítottam, hogy az 50 cm vastag rétegben $x = 0,1 - 6,3$ mm-es szemcsetartományban a szemcseméreték tömegaránya (%):

$$y = -1,51x^2 + 13,18x - 8,3 \\ R^2 = 0,6161$$

Felfele áramlásnál a szükséges nyomás ($x = 0,05 - 0,4$ m/s között) $y = 200 - 2300$ Pa tartományban változott:

$$y = 6508,2x - 205,06 \text{ (Pa)} \\ R^2 = 0,9221$$

Lefelé áramlásnál a nyomásigény ennek közel 4,5 szerese volt:

$$y = 34977 x - 1260,8 \quad (Pa)$$
$$R^2 = 0,9926$$

Igazoltam, hogy ezen összefüggések alkalmazhatók a légsugár szivattyú paramétereinek meghatározására. A berendezés szívó oldala a gáz felső beáramoltatását szabályozza, a nyomó oldala pedig meghatározza a gáz és levegő keverékét, ezzel az égés kialakuló hőmérsékletét a köpenyben a krakkolási tér („ágy”) és a fűtőcső felé.

5. Az új gép és a kapott szén jellemzői

Egyedi gázvisszavezetéssel rendelkező berendezéssel végzett mérések alapján megállapítottam, hogy a hétféle méret szerint osztályba sorolt bioszén szemcsék százalékos eloszlása előnyös. Kevés a nagyobb és az igen kisméretű (porszerű) szemcsék százalékos aránya (x = szemcseméret (min. 0,1 – max. 6,3 mm)):

$$y = -1,5107 x^2 + 13,181 x - 8,3114 \quad (\%)$$
$$R^2 = 0,6164$$

A bioszén belső jellemzői, a fontos vegyületek, fémek és nehézfémek a határérték alatt alakultak. Előnyösen alakult a pH értéke (10,1 pH), amely jól alkalmazható az elsavanyodott talajok javítására. A termék minőségének javítását azzal értem el, hogy a még magas *poli-ciklikus aromás szénhidrogéneket* tartalmazó elsődleges termékgázt légkeveréssel visszavezettem a redukációs térbe. Ezt módszert először alkalmaztam a PAH típusú alkotók lebontása céljából. Így az összes PAH tartalom 0,01-0,12 mg/kg sz.a. értékre adódott, de az összetevői kisebbek voltak 0,01 mg/kg sz.a. értéknél. A kapott termék nemzetközi előírásoknak (EBC és IBI - 0,5 mg/kg) is jól megfelel. A biomasszák változékonysága miatt a gyártási eljárás folyamata csak (a kísérleti berendezésnél is alkalmazotthoz hasonló) programvezérléssel valósítható meg.

A rendszerrel elért összes hatásfok a bevitt biomassa és a kapott szén alapján:

$$\eta_{ter} = \frac{Q_{BSZ}}{Q_{BM}} 100 \approx 37,03 \quad (\%)$$

A bioszén a nagy porozitása és fajlagos felülete révén segíti a talajéletet, a pórusok vízmegtartó, valamint tápanyag szűrő képessége révén. A bioszén alkalmazása a minőségének ellenőrzése után, vizsgálatokkal ellenőrzött talajokon, a használati dózis (kg/ha) kiszámításával lehet előnyös. A javasolt eljárást megvalósító berendezést olyan méretű, hogy az egy konténerben is elhelyezhető. Ennek révén áttelepíthető és ezáltal követhetők a biomassa termelő helyek, tehát jól kihasználható.

4. KÖVETKEZTETÉS ÉS JAVASLATOK

A bioszén jelentős mértékben különbözik a kőszéntől, amely számos káros anyagot tartalmaz, de eltér az orvoslásban használatos széntől is, melyet agresszív tulajdonsága révén a különféle folyamatokban tisztításra alkalmaznak (ivóvízelőállítás, gyógyszeripar stb.). Az anyagban a magas cellulóz tartalmú biomassza-félék lebontásával, az ún. pirolizálási eljárásokkal foglalkoztam, melyekben a bontási hőmérséklettől függően szén, olaj, illetve gáz keletkezik. E folyamat során kapott szenet (bioszenet) talajok javítására, a talaj széntartalmának növelésére, a gázt és az olajt hajtóanyagként, mechanikai- és villamosenergia előállítására használhatjuk.

A pirolízis technológiánál a biomasszát oxigénmentes környezetben magasabb hőmérsékleten hevítettem. Ennek hatására a szerves anyagokat átalakulnak (megrepednek) és az így létrejövő bioszén a nagy felülete révén jelentős abszorbeáló képességgel rendelkezik.

A pirolízis az égetéses (oxidációs) az eljárástól abban különbözik, hogy a keletkező széndioxid mennyisége min 40 %-al kevesebb, ezzel „a felmelegedést okozó üvegházi gáz kibocsátást mérsékeli”.

A nyerhető bioszén mennyiségét és minőségét jelentősen befolyásolják a folyamat hőmérsékleti viszonyai, a nyersanyag fizikai formája, a kémiai összetétele és a pirolízis technológia is.

A bioszén pótlása a talajban, a természetű közegekben a kutatások szerint számos előnnyel jár, de az alkalmazását csak ellenőrzött körülmények között célszerű végezni. A talajba kerülő bioszén előnyös a talaj struktúrájára, közvetíti a talajból a tápanyag felvételt a növények számára, hat a pH értékére, növeli a talajok vízmegtartó képességét, de a talajban lévő mérgező anyagokat, például nehézfémeket is megköti. A bioszén pirolízissel való készítése zárt, a környezetre számottevően nem ható rendszer, **ami lehetővé teszi a biológiai hulladékok a körkörös természeti modellben való alkalmazását.**

Az irodalmi munkák adatainak felhasználásával és számos megelőző laboratóriumi kísérlet elemzése alapján készítettem el a kísérleti, de üzemei méretű berendezés terveit, gyártottam le saját üzememben és végeztem kísérleteket különféle anyagokkal. A kapott bioszén kémiai összetételét akkreditált laboratóriumban vizsgáltuk és meghatároztuk a fizikai jellemzőit is. A rendszerrel kapott anyag a követelményeknek megfelel.

A berendezés kihasználhatósága szempontjából előnyös a konténerbe építés, mivel az egyszerű áttelepítéssel követhetőek a jelentősebb mennyiségű biomassza anyaggal (vagy hulladékkal) rendelkező területek.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A bioszén egyedülállóan jól használható többcélú erőforrás, amely jelentős előnyökkel rendelkezik számos környezetvédelmi probléma megoldásában is. Segíti az elmúlt években (évtizedekben) tapasztalt káros talaj degradáció mérséklését, beleértve a talajban, a vízben és a gázhalmazállapotú közegben lévő szennyező anyagok egyensúlyának helyreállítását.

Végül is szinergikusan megfelelő használat mellett javíthatja a talajban, a víz és a levegő minőségét, a szén-dioxid-megkötést és mérsékeli az üvegházhatású gázok kibocsátását. Más biomassza lebontási eljárásokhoz viszonyítva a metán kibocsátás közel nullára csökken.

A jó minőségű bioszén előállításához laboratóriumi és üzemi berendezést hoztam létre és különféle biomasszákkal kísérleteket végeztem. Először alkalmaztam levegővel keverve elsődleges nyers gáz visszavezetését a lebontási folyamatba és ezzel a bioszén PAH tartalmát minimálisra mérsékeltem.

A tervezett és kivitelezett berendezés kisebb üzemekbe is megfelelő, jó minőségű anyag állítására alkalmas (gyakorlati körülmények között jelenleg is üzemel). A bioszén minősége számottevően függ az alapanyag jellemzőitől (fizikai, kémiai stb.) és a pirolízis körülményeitől is. A felhasználás megbízhatósága érdekében a termékek folyamatos minőségi vizsgálatai indokolt, de a talajokhoz illesztése sem hanyagolható el. Végül is, fontos tényező, hogy a felhasználandó biomasszák a pirolízis követelményeknek feleljenek meg.

Nemzetközi kutatócsoportok és szakmai szövetségek véleménye szerint a bioszén mennyiségi felhasználása a jövőben még számottevően növekszik. Egyre nagyobb az érdeklődés mutatkozik az alkalmazása iránt: a szennyező anyagok talajból, vízből és gázból történő eltávolítására, valamint annak lehetőségére, hogy helyettesítse a drága kereskedelmi aktív szenet.

A létrehozott berendezés használata már a jelenlegi gazdasági körülmények mellett is gazdaságosnak ítélem, de jövőben a bioszén felhasználás növekedésével a jelentősége egyértelmű.

Az általam készített prototípus berendezésem jelenleg is üzemel (rizspelyvából készít megfelelő anyagot).

7. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI

Idegen nyelven:

- [1] V. Madár, A. Betovics, L. Tóth: 2023 Production and Production-Increasing Factors of Biochar, Hungarian Agricultural Engineering, ISSN 0864-7410 (Print), HU ISSN 2415-9751(Online), DOI: 10.17676/HAE.2023.42.14, Published online: <http://hae-journals.org/HU>
- [2] V., Madár ; N., Schrempf ; A., Betovics ; L., Toth (2021) Generating Cold Energy Using Waste Heat From A Pyrolysis Generator (Chp) Hungarian Agricultural Engineering : 40 pp. 78-90. , 13 p. HU ISSN 0864-7410 (Print) / HU ISSN 2415-9751(Online) DOI: 10.17676
- [3] Bacsikai, Istvan ; Madar, Viktor ; Fogarassy, Csaba ; Toth, Laszlo (2019) Modeling of Some Operating Parameters Required for the Development of Fixed Bed Small Scale Pyrolysis Plant RESOURCES 8: 15 p. doi:10.3390/resources8020079, WoS Scopus Q2. <http://pyrowatt.hu/wp-content/uploads/2019/08/resources-08-00079-v2-1.pdf>
- [4] Madár, V. ; Bácskai, I. ; Dhaundiyal, A. ; Tóth, L. (2018) Development of biomass-based pyrolysis CHP (R + D) Hungarian Agricultural Engineering : 33 pp. 17-23. , 7 p. HU ISSN 0864-7410 (Print) / HU ISSN 2415-9751(Online) DOI: 10.17676
- [5] P. Tóvári, V. Madár: 2011 Gasification experiments on herbaceous biomass, Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry, Gödöllő, Hungary, pp: 9–15.
- [6] V., Madár ; J., Gubó ; L., Tóth (2022) Dehydrating Using Combined Energy Intake Method, Hungarian Agricultural Engineering : 41 pp. 24-37. , 14 p. HU ISSN 0864-7410 (Print) / HU ISSN 2415-9751(Online) DOI: 10.17676
- [7] V. Madár, A. Betovics, L. Tóth. : (2023) Production and Production-increasing Factors of Biochar, HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING, No. 42/2023 p-p: 14-25., 11p. HU ISSN 2415-9751(Online), DOI: 10.17676/HAE.2023.42.14
- [8] Betovics András, Madár Viktor, Schrempf Norbert és Tóth László 2024 : Hő és villamos energia előállítása keményfa aprítékból ~100

kW fix ágyas pirolízis rendszerrel. Article uploaded to Acta Politechnica, IF 1.2, Number 6773. Mechanical Engineering, DOI: 10.12700, xxxxxx, <https://acta.uni-obuda.hu/>

- [9] Mátyás Koves, **Viktor Madár**, Marianna Ringer, Tamás Kocsis_ 2024 Overview of Traditional and Contemporary Industrial Production Technologies for Biochar along with Quality Standardization Methods Land 2024, 13, 1388., Open Access ISSN: 2073-445X Journal Rank: **JCR-Q2**, IF 3,2 <https://doi.org/10.3390/land13091388>

Magyar nyelven (lektorált)

- [1] **Madár, V.** ; Schrempf, N. ; Betovics, A. ; Toth, L (2022) Hidegenergia előállítás pirolízis generátor (CHP) hulladék hőjével, ENERGIAGAZDÁLKODÁS 63 : 3 pp. 2-8. , 7 p. ISSN 0021-0757, 5-9p-p.enga@ete-net.hu
- [2] **Madár, Viktor** ; Halász, Tamás ; Madár, György ; Tóth, László (2020) Porszerű szennyezőanyagok leválasztása primer gázokból: ciklonos és elektrosztatikus leválasztás berendezései (elvi alapok) Mezőgazdasági Technika 61 : 8 pp. 2-6. , 5 p.
- [3] **Madár, Viktor** ; Tóth, László ; Gubó, János ; Bodnár, István Aszalás kombinált energiabeviteli technikával Mezőgazdasági Technika 61 : 4 pp. 2-6. , 5 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [4] Tóth, László ; **Madár, Viktor** ; Bácskai, István (2019) Pirolízis berendezés fejlesztését megelőző vizsgálatok, Energiagazdálkodás 60 : 1-2 pp. 27-33. , 7 p.
- [5] Bácskai, I. ; **Madár, V.** ; Dhaundiyal, A. ; Schrempf, N. ; Tóth, L (2018) Biomassza-hulladékok hőbontásának mérés technikája, Mezőgazdasági Technika 59 : 5 pp. 2-6. , 5 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [6] Tóth, László ; **Madár, Viktor** ; Bácskai, István ; Schrempf, Norbert (2017) Biomassza-pirolízis alapú kiserőmű fejlesztése. Magyar Energetika 24 : 3 pp. 18-23. , 6 p.
- [7] **V, Madár** ; L, Tóth: (2012) Fagázgenerátor üzemű bio-kiserőmű (CHP) és öntöző berendezés Mezőgazdasági Technika 53 : 9 pp. 4-9. , 6 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [8] Gubó, János ; **Madár, Viktor** ; Tóth, László (2022) Hő- és villamosenergia előállítása nagy hatékonyságú diverzifikált

- biomassza rendszerben Mezőgazdasági Technika: 10 pp. 15-17. , 3 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [9] Gubó, János ; **Madár, Viktor** ; Tóth, László (2022) Biomix 50 gázgenerátoros biomassza kogenerációs kiserőmű fejlesztése Mezőgazdasági Technika: 7 pp. 15-17. , 3 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [10] Tóth, László ; Gubó, János ; **Madár, Viktor** (2022) A metán mérséklése a légkör hőegyensúlyának fenntartása érdekében AGRÁRIUM 2-3 pp. 40-43. , 4 p. Szaktudás Kiadó Ház Budapest, 47p. www.agrarium7.hu
- [11] **Madár, Viktor** ; Tóth, László ; Schrempf, Norbert ; Madár, György ; Gubó, János (2016) GG100 típusú fagázgenerátoros kiserőmű Mezőgazdasági Technika 57 : 11 pp. 2-5. , 4 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [12] **Madár, V.** ; Bácskai, I. ; Dhaundiyal, A. ; Schrempf, N. ; Tóth, L. (2018) Hő-, villamos energia és szén előállítása pirolizálással, Mezőgazdasági Technika 59 : 2 pp. 2-6. , 5 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [13] **Madár, V** ; Tóth, L ; Madár, Gy ; Schrempf, N: (2014) Kísérleti fagázgenerátor Mezőgazdasági Technika 55 : 5 pp. 2-5. , 4 p. ISSN 0026 1890, www.mgitech.hu
- [14] Tóvári P. – Szabó I. – **Madár V.** – Jung L. – Dorsánszki Zs. – Gergely S.: Biomassza tüzelőanyagok termokémiai kezelésének laboratóriumi és félüzemi vizsgálata Mezőgazdasági Technika, 2013. február
- [15] Madár V., Betovics A., Tóth L.: 2023 Bioszén és termelésnövelő tényezői, AGRÁRIUM, Budapest, 33. évf. 9-10. sz. pp. 14-17, HU-ISSN 1215-8380 / <https://agrarium7.hu/cikkek/2445-bioszen-es-termesnovelo-tenyezoi>

Konferencia kiadvány idegen nyelven

- [1] P. Tóvári, **V. Madár**: Gasification experiments on herbaceous biomass, Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry, Gödöllő, Hungary, 9–15. October 2011.