



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**MINŐSÉGI BIOSZÉN ELŐÁLLÍTÁS MEZŐGAZDASÁGI
HASZNÁLATRA**

Doktori (PhD) értekezés

MADÁR VIKTOR

DOI: 10.54598/005850

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

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE	5
1. BEVEZETÉS	8
1.1. A téma időszerűsége, jelentősége	8
1.2. Célkitűzések	9
2. SZAKIRODALOMI ÁTTEKINTÉS	10
2.1. Meghatározások a témakörrel kapcsolatosan	10
2.2. A bioszén és előállítása	11
2.3. Alapvető pirolízis eljárások	15
2.3.1. Fixágyas rendszerek	15
2.3.2. Kétfázisú rendszer	17
2.3.3. Fluidizáló rendszerek	17
2.3.4. Bioszén előállítására specializált kivitelek	18
2.4. A pirolízis és a folyamatának szakaszai (zónái)	21
2.4.1. A szakaszok jellemzése	21
2.4.2. A szakaszok jelentősége a végtermékre	24
2.5. A bioszén felhasználása, fontos tényezők	30
2.5.1. A bioszén porozitása	30
2.5.2. A talaj porozitása és a bioszén	34
2.5.3. Bioszén hatása a légkörre	35
2.5.4. A bioszén hozzáadása a talajokhoz	37
2.5.5. A bioszén gazdálkodásra gyakorolt hatása	37
2.5.6. Az irodalom megismerése alapján a közvetlen célok	39
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	40
3.1. A rendelkezésre álló főbb biomasszafélék	40
3.2. A vizsgálatoknál használt eszközök és műszerek	41
3.2.1. Többcélra megfelelő mérőeszközök	41
3.2.2. Hőmérséklet hatása a tömegváltozásra	46
3.2.3. Saját fejlesztések a TGA mérés elvégzéséhez	46
3.3. A méréseknél használt jellemzők és fogalmak meghatározása	49
3.2.1. Az aprítás és a célja	49
3.2.2. A tüzelőanyag sűrűsége	51
3.2.3. A szemcsés szén gázáteresztő képessége	52
3.2.3.1. Az anyagok porozitása	52

3.2.3.2. Áramlási intenzitás és vonal menti sebesség	54
4. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE	57
4.1. Anyagi jellemzők	57
4.1.1. Nedvességtartalom és fűtőérték	57
4.1.2. A tömegcsökkenés a hőmérséklet függvényében	57
4.1.3. A biomasszák belső összetétele elemek szerint	58
4.1.4. Az aprított biomasszák sűrűsége	58
4.1.5. A sűrűséggel megváltozó energiatartalom	59
4.2. Hőmérséklet hatása a tömegváltozásra	60
4.2.1. A fűtési hőmérséklet hatása a tömegcsökkenésre	60
4.2.2. A fűtési sebesség (°C/min) hatása a tömegcsökkenésre	61
4.3. Anyagrétegek mértékének hatása a lebontásra (TG jellegére)	63
4.3.1. Keményfa szenesítése	64
4.3.2. Puhafa apríték szenesítés	65
4.3.3. Gáz visszavezetése	68
4.3.4. Az anyaghalmazok hatása a gázáramlásra	72
4.3.5. A szemcsés szén gázáteresztő képessége	73
4.4. A szénkészítéshez kialakított üzemi berendezés	75
4.4.1. A fejlesztett szenesítő bemutatása	75
4.4.2. A reaktor (szenesítő) elvi kialakítása	77
4.4.3. A szenesítő működése, energetikai rendszere	79
4.4.4. Termék szemcsézettsége	85
4.4.5. A gyártott faszén beltartalmi jellemzői	87
4.4.6. A termék anyagi összetétele	86
4.5. Új tudományos eredmények	91
5. KÖVETKEZTETÉS ÉS JAVASLATOK	96
6. ÖSSZEFOGLALÁS	97
7. MELLÉKLETEK	98
M1. Irodalomjegyzék	98
M2. Az berendezés kiviteli példája	105
M3. A jellemző lebontási reakciók	106

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

C	szén	$[-]$
CH_4	metán	$[-]$
CO	szén-monoxid	$[-]$
CO_2	szén-dioxid	$[-]$
H_2	hidrogén	$[-]$
$H_{tü}$	tüzelőanyag fűtőértéke	$[MJ/kg]$
H_2O	víz	$[-]$
W	nedvességtartalom	$[\%]$
N	nitrogén	$[-]$
n	hézagtérfogat	$[m^3]$
O_2	oxigén	$[-]$
$q_{\bar{u}}$	biomassza tömegárama	$[kg/s]$
T	hőmérséklet	$[^{\circ}C]$
t	idő	$[s]$
V	anyagtérfogat	$[m^3]$
h	magasság	$[m]$
ε	porozitás	$[-]$
V_w	víz térfogata	$[m^3]$
V_t	teljes térfogat	$[m^3]$
V_v	üreg térfogata	$[m^3]$
V_a	levegő térfogata	$[m^3]$
V	anyagtérfogat	$[m^3]$
V_h	hézagtérfogat	$[m^3]$
M_t	talaj tömege	$[kg]$
M_s	szilárd anyag térfogata	$[m^3]$
p_t	porozitási halmaz sűrűség	$[kg/m^3]$
q_i	áramlási intenzitás	$[m/s]$
w	nedvességtartalom	$[\%]$
μ	dinamikus viszkozitás	$[Pa \cdot s]$
k	halmaz gázvezető képessége	$[kg \cdot m/s]$
v	sebesség	$[m/s]$
X	az anyag lebomlása (konverziója)	$[kg]$
m_o	kiinduló anyag	$[kg]$

m_t	maradék anyag	[kg]
K	sebességi állandó	[min ⁻¹]
F_n	apríték összes felülete	[m ²]
F_o	kiindulási felület	[m ²]
x_o	kiindulási darabszám	[db]
x_n	aprított darabszám	[db]
k_a	anyagállandó	[J]
Q_k	kezdeti tömeg	[kg]
Q_v	stabilizálódott tömeg	[kg]
η_g	fagáz viszkozitás	[Ns/m ²]
$q_{gáz}$	generátorgáz térfogatárama	[m ³ /h]
$q_{tü}$	tüzelőanyag tömegárama	[kg/h]
A	szemcsék felülete	(m ²)
n és m	szemcsék mérete a darálás előtt és darálás után	[mm]
Δp	gáznyomáskülönbség	[Pa]
c	fajhő	[MJ/kg K]
$\dot{m}_g$	gáz tömegáram	[kg/s]
W_f	teljesítmény változás (folyadék)	[W/K]
W_g	teljesítmény változás (gáz)	[W/K]
$i_{g,be}$	bemenő gáz entalpia	[W s/kg]
$t_{f,ki}$	folyadék ki	[s]
$t_{f,be}$	folyadék be	[s]
$t_{g,be}$	gáz be	[s]
i'	kondenzációnál felszabaduló entalpia	[J/kg K]
i''	kondenzátum lehűlési entalpia	[J/kgK]
V	gázmosó térfogata	[m ³]
k_v	tárolási tényező	[m ³ /J]
A_{py}	gyakorisági tényező	[1/s]
E_{py}	az indítási energia	[J/mol]
$E_{ü}$	az aktiválási energia	(kJ/mol)
R	általános gázállandó (8,317)	[J/mol K]
Φ'_{vol}	az illékony anyagok mennyisége	[kg]
Q_{BSZ}	a nyert bioszén energiatartalma	[MJ]
Q_{BM}	a bevitt biomassa energiatartalma	[MJ]
A	a szemcsék felülete	[m ²]

Jelölések jegyzéke

k_a	alaktényező	[J/mm]
S	telítettségi fok	-
p_h	halmazsűrűség	[kg/m ³]
p_m	anyagsűrűség	[kg/m ³]
q_i	egységnyi keresztmetszeten átáramló hozam	[kg/m ²]
p	nyomás	[mbar]
Δp	halmaz okozta nyomásváltozás	[mbar]
TG	termo-gravimetrikus mérleg	-
PAH	poliaromás szénhidrogének	—
VOC	illékony szerves vegyületek	—
SEM	pásztázó elektromikroszkóp	—
CEC	kation kicserélő képesség	—

1. BEVEZETÉS

1.1. A téma időszerűsége, jelentősége

A bioszenet a biomasszákból pirolízisnek nevezett technikával állítjuk elő, amikor a szerves anyag magas hőmérsékleten, oxigén hiányában, *nagy felületű, repedezett szén* alakul és szilárd mátrixban van jelen.

Minőségi bioszenet, amely szilárd és biológiailag stabil, fekete termék, csak megfelelően ellenőrzött biomasszákból készíthetünk. A gyártása segít leküzdeni a globális felmelegedést azáltal, hogy a talajba helyezett szén hosszú ideig változatlan marad, miközben a talajt termékenyebbé is teszi. Az előállításához az energetikai célokra termesztett biomasszákon túl, nem a közvetlen élelmiszerrel jelentő biológiai anyagokat célszerű felhasználni, hanem a termelés és feldolgozás során keletkező hulladékokat, melléktermékeket. A pirolízis folyamata során a bioszén mellett felhasználható megújuló energia is keletkezik (hőenergia, ill. az átalakításával villamos energia).

A talajok a művelés, a klímaváltozás és az antropogén hatások következtében megváltoznak, degradálódnak (pl. savanyodás, szikesedés, vegyszermaradványok és nehézfémek felhalmozódása stb. miatt), amelyek hatással vannak a talaj mikrobiológiájára és termőképességére. Ezek leküzdésére már ma is igen sokféle talajjavító (termésmenővelő) anyagot ajánlanak a talajok dekompenzációs képességének fenntartása, visszaállítása érdekében. A bioszén a mezőgazdasági talajok közegeire, azok termelésre gyakorolt hatására jelentősen kihat, ezzel a termesztett anyagok minőségi és mennyiségi jellemzőire is.

Napjainkban a nemzetközi kutatások jelentős része a talaj és a bioszén kapcsolatával foglalkozik. A gyártással foglalkozó kutatómunkák, a gyártandó termékekkel kapcsolatban is a talajerő gazdálkodáshoz való igazodást fogalmazzák meg, mint elsőrendű célkitűzést.

A talaj és bioszén kapcsolatával foglalkozó tudományos munkák szerint a bioszén stabil részének átlagos tartózkodási ideje a talajokban évtizedekre (egyések szerint évszázadokra) tehető. LEHMANN et al, (2015) kutatásai szerint a bioszénben lévő szén felvételéhez (felbontásához) szükséges energia nagy, miközben az eredeti biomasszában (alapanyagban) lévő szénvegyületek nettó pozitív energiaforrást jelentenek, és a talaj mikrobái könnyebben mineralizálják azokat. *A talajok, a bioszenek és a növények közötti hatások* viszont igen összetettek (sokféle tényezőre hatnak).

1.2. Célkitűzések

A bioszén előállítása és felhasználása összetett rendszer, amelynek egyik fontos tényezője a megfelelő alapanyag-ellátás. Ezek előkészítéséhez és a felhasználásához a mezőgazdaság, a biológiai anyagokat előállító környezet a leginkább megfelelő. A kisebb méretű és szállítható bioszén előállító egység szolgálja leginkább az anyagokat előállító helyi lakosság érdekeit, védi a biodiverzitást és átfogóan a természeti környezetet is.

Jelenleg igen nagymennyiségű erdészeti és mezőgazdasági hulladékot és egyéb biomasszát égetünk el, vagy segítjük a természeti lebomlását és ezzel két fő üvegházhatású gáz (ÜHG), a szén-dioxid (CO₂) és a metán (CH₄), kerül a légkörbe.

A bioszén készítés közben a nyers biomasszában található könnyen mineralizálódó szénvegyületek a bioszénben olvadt széngyűrűs szerkezetekké alakulnak. Tehát a biomassza bioszénné történő átalakítása globálisan képes mérsékelni a klímaváltozást, csökkentve a légköri ÜHG-koncentrációt. WOOLF et al. (2010) ezt összességében 12%-ra teszi. Ellentétben a pirolizálással, a biomassza *természetes égetése* során a szén elvész és szén-dioxid képződik.

Célom:

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

Mindezt azért, mert a bioszén talajba (a termesztőközegbe) való bevitele a gazdálkodásra számos előnnyel jár.

Ezekből a legfontosabbak:

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

2. SZAKIRODALOMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Meghatározások a témakörrel kapcsolatosan

A részletesebb irodalmi áttekintés előtt célszerű **a fogalmakat tisztázni**. Az egységesebb értelmezése érdekében elfogadtam a *Nemzetközi Biomassza Szövetség*¹ ajánlását:

Biomassza (Biomass): E kifejezés alatt tágabb értelemben a földön lévő összes élő tömeget (értjük esetünkben: energetikailag hasznosítható), amely a bioszén előállításának alapanyaga.

Faszén (Charcoal): az a szilárd, szénben gazdag maradék, amely a biomasszának korlátozott oxigén tartalmú környezetben történő hevítésekor marad vissza. Általában a faszenet fából készítik, és tovább feldolgozható „aktív szén” előállítására.

Bioszén (Biochar): Előállításához szinte minden szerves anyag, növényi maradvány (pl. fakéreg, dióhéj stb.), trágya és szennyvíziszap felhasználható az arra megfelelő gyártó eszközökben. A bioszén, tehát ezen anyagokból előállított, apró darabokra zúzott és talajba keverhető faszénszerű anyag. Lényeges, hogy a kiinduló anyag ne legyen olyan biomassza, amely önmagában megfelelő tápanyag élőlények számára. A bioszén és a kőszén számottevően különbözőek.

Char: bármely szerves anyag hőbomlásából (pirolíziséből) származó szilárd termék (*általános kifejezés*).

Pirogáz (Pyrogas - pirolízisgáz): pirolízisnél, az elgázosításból származó gáz és aeroszol, amely elsősorban éghető CO, H₂ és CH₄ gázokat tartalmaz (CO₂-vel, gőzzel és N₂-vel együtt fagáz, ill. szintézisgáz).

Hamu (Ash) Szervetlen vegyületek és bioszén keveréke. A pirolizálás után a visszamaradó anyagra utal (általában csak kis százalékban tartalmaz szenet.)

Felhasználás előtt az **elő-feldolgozott**, rendszerint tömörített vagy szemcsézett biomassza anyagokból készített bioszén általában a szemcseformában is különbözik a csupán aprítva a folyamatba bevitt anyagoktól.

A **szemcsék zsugorodása** jellemző az összes bioszén készítményre (1. és 2. ábrakon az alsó sorok).

¹ <https://biochar-international.org/about-biochar/faqs/>



1. ábra A csupán aprított- és a hozzájuk tartozó bioszén anyagok (saját ábra)



2. ábra A pelletek és a hozzájuk tartozó bioszén formációk

2.2. A bioszén és előállítása

A bioszén mint anyag = *A szerves anyagok ellenőrzött körülmények között, oxigénszegény vagy oxigénmentes környezetben történő termokémiai bontásának terméke.*

Egyes szervezetek szerint:

- Az *Európai Bioszén Alapítvány* (EBF) a bioszenet aromás, szénben és ásványokban gazdag heterogén anyagnak határozza meg. *A biomassza pirolízisével, tiszta*

technológiával, pontosan ellenőrzött körülmények között állítják elő és lényeges, hogy a folyamata fenntartható módon valósuljon meg.

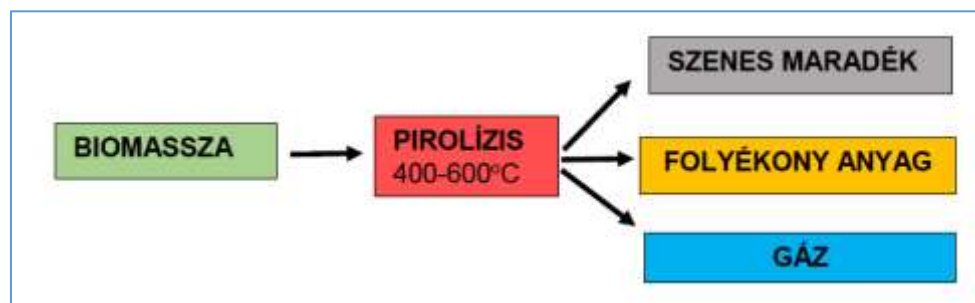
- Az International Biochar Initiative (IBI) a definíciót tovább finomította²:és szerintük: Csak a talajjavításban és a környezetvédelemben használható szén a bioszén.

A kiindulási alapanyagoktól és a pirolízis körülményeitől függően a bioszén nagymértékben eltérő tulajdonságokkal rendelkezik. A magasabb hőmérsékleten előállított bioszén általában kevesebb tápanyagot és több aromás szenet tartalmaz, magasabb pH értékkel és nagy felülettel rendelkezik.

Az alacsonyabb hőmérsékleten előállított bioszenek több felhasználható tápanyagot tartalmaznak, de labilisabb szerves vegyületek, ami a mikrobiális aktivitást serkenti (gyorsabban lebomlanak).

A bioszén elsősorban a savanyú talajokra van kedvező hatással: KOCSIS (2018) és még sokan mások.

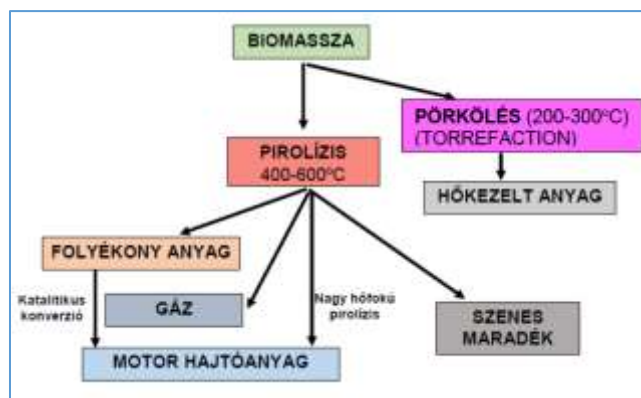
A 3. folyamatábra a biomassza anyagok általános pirolizálási eljárását szemlélteti.



3.ábra Biomassza anyagok hasznosítása termikus eljárással (CÉGÉNY et al. 2017)

A többcélú hasznosítást a 4. ábra szemlélteti, ahol a folyamat kettéválk a kevésbé stabil anyagra (pörkölés = torrefaction), amely gyakorlatilag csak a biomassza hőkezelését jelenti. A folyamat másik ága már stabil anyag és energia előállítási célokat is szolgálhat. Ha hajtóanyag előállítása a cél, akkor már csupán néhány százalék a hamuval kevert szenes maradék van.

² <https://biochar-international.org/about-biochar/>



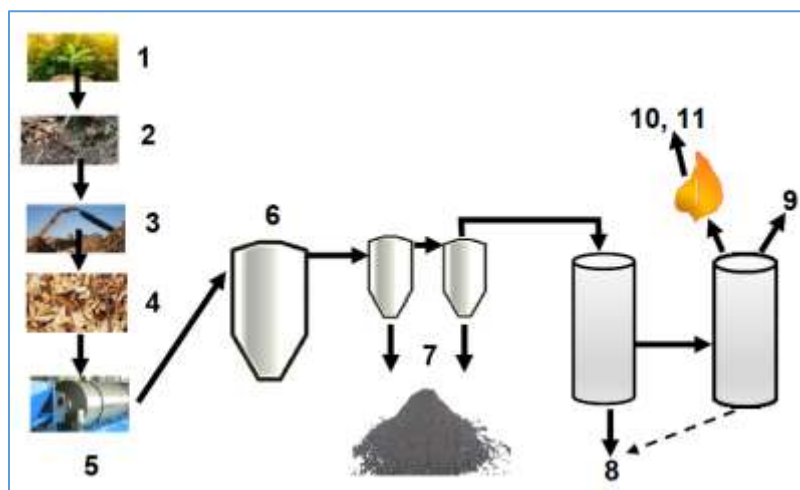
4. ábra Biomassza anyagok többcélú hasznosítása termikus eljárással

(saját ábra: torrefaction - pörkölés)

A folyamatot kissé részletesebben is megismerhetjük az 5. ábráról, ahol már a technológiai eszközök is szerepelnek.

A bemenő biomassza, amelyet elő kell készíteni (szárítani és aprítani) ahhoz, hogy a pirolízis folyamat tökéletesen végrehajtható legyen, tehát a technológia zavarmentesen alakuljon.

A végtermék, a hőmérséklettől függően (a már említettek szerint) lehet bioszén, vagy hő és villamosenergia, ill. gáz vagy folyékony termék.



5. ábra A pirolizálás technológiai folyamata (saját ábra)

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. Biomassza előállítása | 7. Bioszén |
| 2. Begyűjtés | 8. Bio-olaj |
| 3. Aprítás | 9. Gáz a hálózatra |
| 4. Kondicionálás (Pl. brikett) | 10. Gáz a szikragyújtású motorokhoz |
| 5. Szárítás | 11. Villamos generátor, villamoshálózat |
| 6. Pirolízis | |

A lebontási folyamathoz igen sokféle technológiai módszert dolgoztak ki, amelyeknek alapvető célja a végtermékek javítása és a hatékonyság növelése. *Ez azt jelenti, hogy az anyag egység mennyiségével bevitt belső energia tartalomból (a biomasszából) minél nagyobb mennyiségben tudjunk előállítani felhasználásra alkalmas energiahordozókat, tehát a kezdeti- és a végenergia tartalmában minél kisebb legyen az eltérés, valamint a folyamatnak a lehető legalacsonyabb legyen a káros környezeti hatása.*

A folyamatokban lezajló kémiai reakciókat és a keletkező anyagok összetételét számos kutató vizsgálta, de jelenleg is sokan folytatnak ilyen irányú kutatások (DADI et al. 2018).

A dolgozatomban a technikai megoldások közül néhányat bemutatok, de terjedelmi korlátok miatt nem foglalkozom az összes ismertetésével. Egyesek igen összetettek és magas szintű technikai megoldásokat tartalmaznak: általában a teljes folyamat valamilyen módon program vezérelt, több szintűen is PC-vel szabályozott (figyelemmel az előállított anyag és energia minőségére, valamint a környezetre gyakorolt hatásokra).

A bioszén a fenntarthatóság egyik kulcsfontosságú anyaga, mivel számos más (itt nem említett) használati területe van, Pl.: építőipar, ruházat, elektronikai stb., de az élelmiszer termékek egész sorában is részt vesz.

Dolgozatomban alapvetően a bioszén előállításával (felhasználásának jelentőségével) foglalkozom, de a fő célom az agrárgazdaság részére jó minőségű bioszén előállítása, ahhoz technikai eszköz létrehozása.

Ennek eléréséhez fontos a témához tartozó általános hőbontási (pirolizálási) eljárás alapos megismerése, mivel ***a bioszén minősége az alapanyagokon túl főként az eljárás folyamatától függ.***

A bioszén előállításához bármilyen tiszta biomassza hulladék alkalmazható (CHA et al. 2016). A földünkön, a különféle éghajlatokon más és más biomasszák dominálnak, tehát a bioszén előállításához is ezek hulladékait használják. Az irodalmi forrásokból megismerhető a legkülönbözőbb biomasszák specialitásai és a szerzők elemzik is a velük kapcsolatos gyártási formációkat.

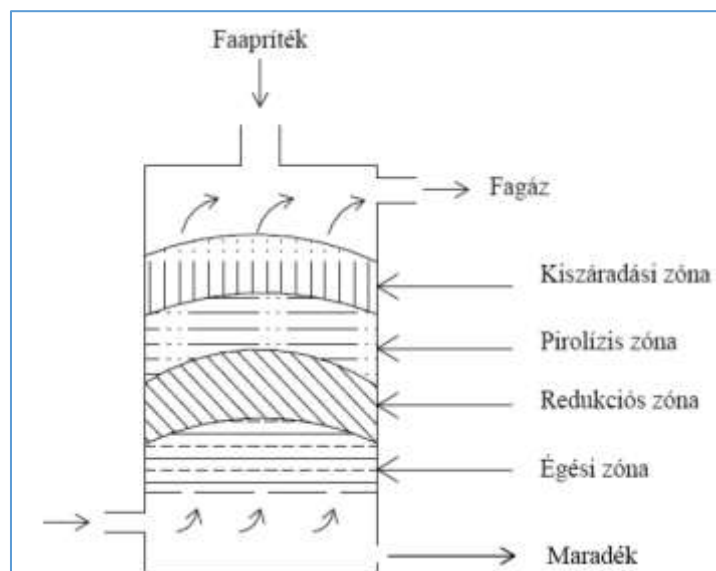
Dolgozatomban elsősorban a Magyarországon fellelhető anyagokat emelem ki és teszek megállapításokat azok jellemzőiről (TÓTH et al. 2019).

2.3. Alapvető pirolízis eljárások

2.3.1. Fixágyas rendszerek

A fixágyas rendszereknél a tüzelőanyag megtölti a reakcióteret. A friss tüzelőanyagot általában a generátor felsőpontján kerül betöltésre egy nyíláson vagy zsilipen keresztül, majd gravitációs elven süllyed a generátor alsó része felé, miközben végbemegy a reakció (WAMPLER 2007).

A **felfelé áramoltató gázgenerátorban** (6. 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 tüzelőanyag oszlopot tartó rostély felől érkezik a reakcióterbe.



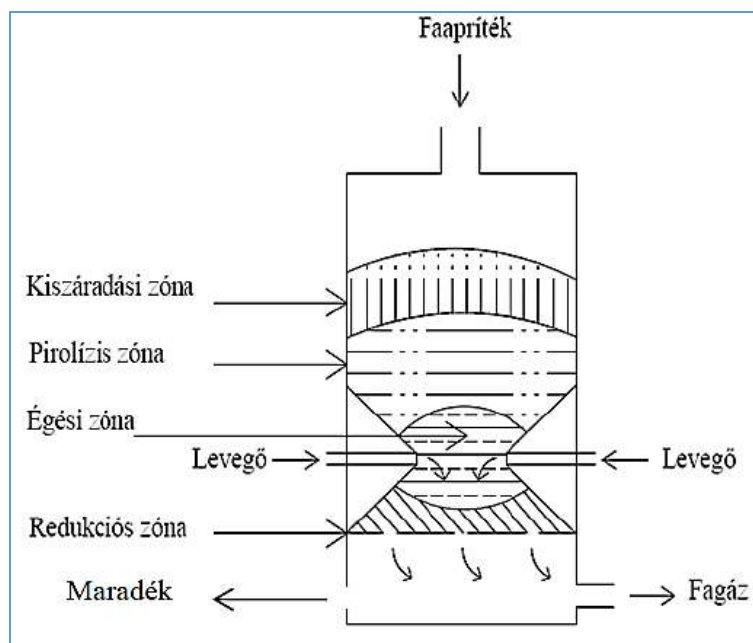
6. ábra: A felfelé áramoltató gázgenerátor működési elve³

A **felfelé áramoltató gázgenerátor** áramlástanai iránya alapján, a pirolízis zónában keletkezett bomlástermék és a frissen betáplált tüzelőanyag száradásakor keletkezett gőz a keletkezett generátorgázzal együtt hagyja el a gázgenerátort (MADÁR et al. 2012). A fő probléma oka, hogy a pirolízis gáz 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 (7. ábra). Ezáltal a száradási és pirolízis zónák közvetlenül az oxidációs zóna fölött helyezkednek el, tehát hőszállítás útján

³ Nemzetközileg sokat idézett ma már általánosnak tekinthető ábra.

megkapják a lejátszódó folyamatokhoz szükséges hőmennyiséget. Az oxidációs zónában pedig a főleg gáz halmazállapotú pirolízis termékek reakcióba lépnek a beérkező elgázosítási segédanyaggal. Az oxidációs zónából szivárgó gázokat (CO_2 és H_2O) a redukciós zónában található izzó szén CO -vá és H_2 -vé redukálja. Tehát az endoterm Boudouard- ($\text{C} + \text{CO}_2 = 2\text{CO}$), és víz-gáz reakciók után a füstgáz a hőjének egy részét átadja a generátorgáznak. Ebből adódóan a lefelé áramoltató gázgenerátornál a redukciós zónában a rostély fölött 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 reakciótérből (7. ábra). A kátránytartalom általában $\sim 1,0 \text{ g/Nm}^3$.



7. ábra: A lefelé áramoltató gázgenerátor működési elve⁴

A lefelé áramoltató gázgenerátoroknál a lejátszódó folyamatok bonyolultak, érzékeny a berendezésbe betáplált tüzelőanyag minőségére, főként a víztartalmára (KAUPP et al. 1984). A szárítási zónában keletkezett teljes gőzmennyiségnek el kell távoznia a tüzelőanyag oszlopon 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 víztartalma csökkenti az oxidációs szakasz (zóna, reakciómező) magasabb hőmérsékletét, amely a pirolízis gázt átalakítaná (BÁCSKAI et al. 2019). A tüzelőanyag szemcsemérete, a por- és hamuszerű összetevőik is erősen befolyásolják a gázgenerátor keresztmetszeteiben létrejövő reakciómező

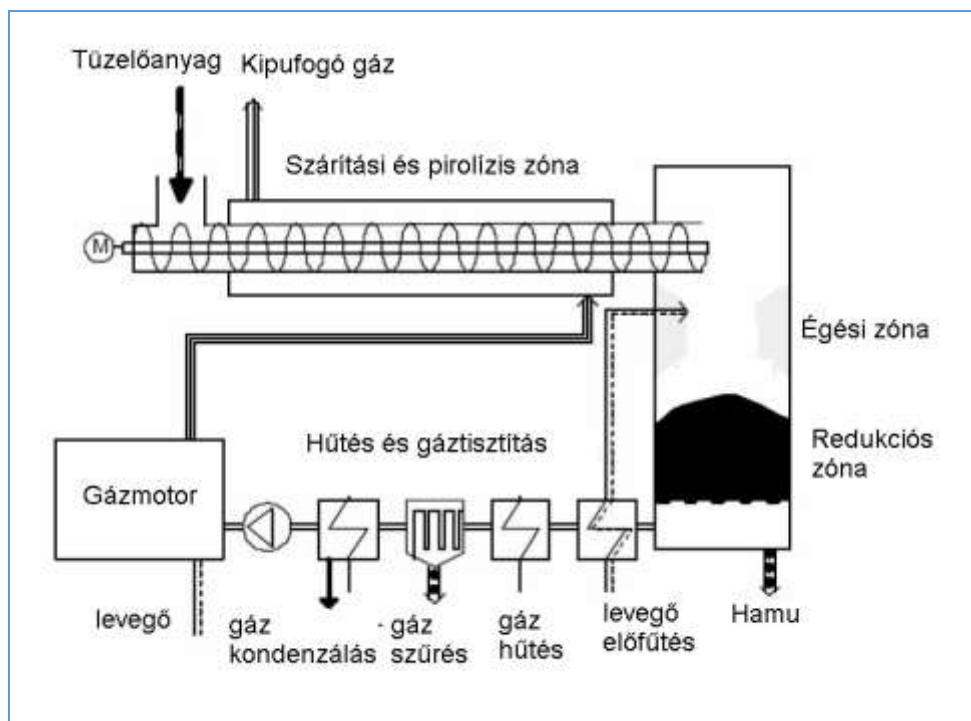
⁴ Nemzetközileg sokat idézett, ma már általánosnak tekinthető ábra.

egységességét, rontják a tüzelőanyag oszlop tulajdonságait. A gáz átáramlásának is nagyobb az energiaigénye.

A **kettős tüzelésű elgázosító elve** gyakorlatilag a felfelé és a lefelé áramoltató gázgenerátorok működését valósítja meg egyetlen berendezésben (RAMAN et al. 2013). A megoldás célja, hogy a rostélyon visszamaradt tüzelőanyagot teljes mértékben generátorgázzá alakítsa.

2.3.2. Kétfázisú rendszer

A kétfázisú rendszerben, az első fázis gyakorlatilag az indirekt fűtésű csigás adagoló, amelyen belül már a pirolízis folyamata is végbemegy (8. ábra). A második fázis pedig a kombinált generátor, amely a pirolízis során keletkezett gázok oxidálásáért (elsődleges kátrány átalakítás), valamint a heterogén gáz-faszén reakció (redukciós/elgázosítás) lefutásáért felelős (RAMAN et al. 2013). A technológia előnye, hogy a keletkezett generátorgáz kátránytartalma 25 mg/m^3 alá csökkenthető, amely már alacsonyabb, mint amit a gázmotorhoz kell, tehát nem feltétlenül szükséges további gáztisztító/kezelő egységeket alkalmazni.

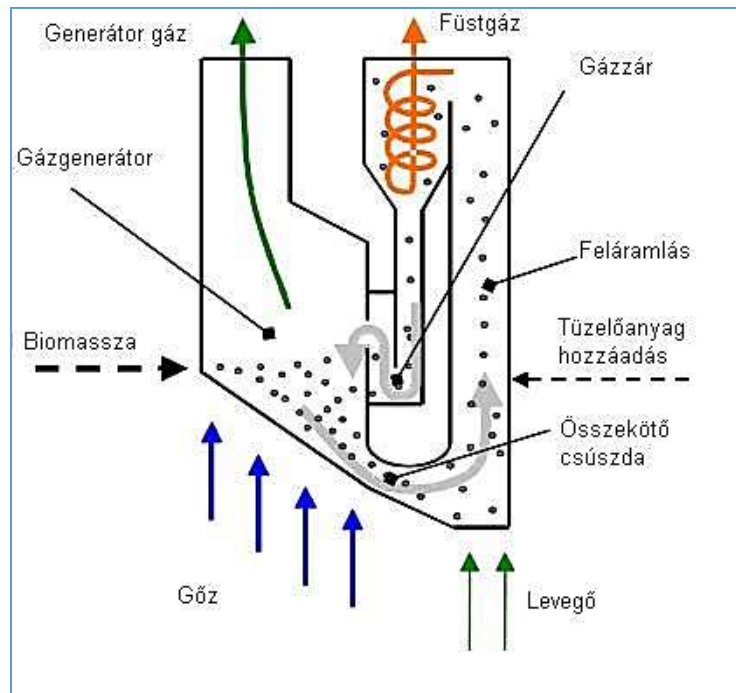


8.ábra A Dán Műszaki Egyetem VIKING elnevezésű, kétfázisú elgázosító berendezése (Forrás: LETTNER et al. 2007)

2.3.3. Fluidizáló rendszerek

A fluidizálás elven működő pirolízis generátorokkal cél termék-gáz előállítás. A rendszer a biomassza és a fluid zónában használt szilárd közeganyag (folyadékhoz hasonló viselkedéssel rendelkező segédanyag) keverékével működik (9. ábra). A segédanyag a generátor alsó részén

kialakított fűvókán keresztül érkezik az „ágyba”, mely a benne lévő közeganyagot „buborékoltatja” vagy keringteti. A segédanyag lehet pl. kvarchomok, de más is, ami a szerves anyagokra katalitikus hatással bír. A maximálisan 5-10 cm élhosszúságú aprított biomassza kerülhet a fluidizáló cirkulációs ágyba.



9. ábra: A 100 kW teljesítményű fluid ágyas berendezés (FICFB)

(Forrás: BOLHÁR-NORDENKAMPF et al. 2002)

A fluid technológiák előnye a fixágyas elgázosítókhoz szemben, hogy nagyobb teljesítmény-kategóriákban is létesíthetők.

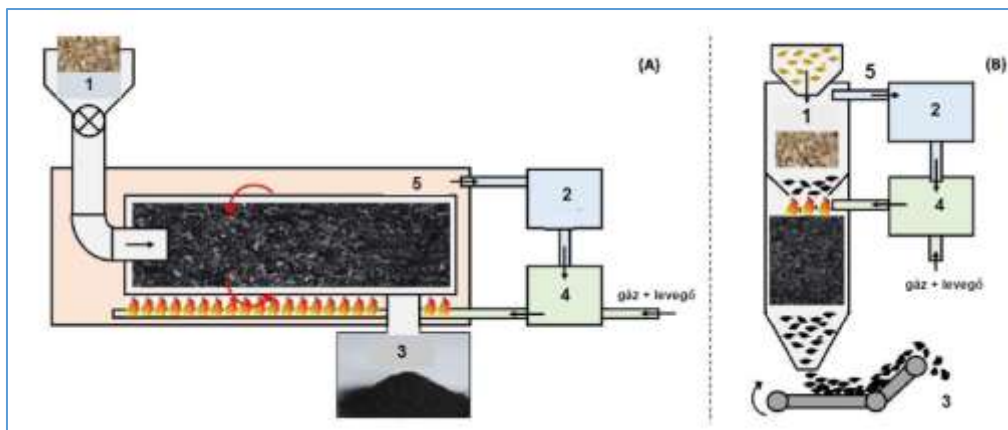
2.3.4. Bioszén előállítására specializált kivitelek

A kezdetektől eltérően a biomassza pirolízis során bioszén a fő termék is lehet. A **bioszén**: szénben gazdag és alkalmazás szempontjából specifikus fizikai-kémiai szerkezettel rendelkező anyag. Emiatt az evolúciós viselkedése eltérő a pirolízis során. Alacsonyabb hőmérsékleten (<500 °C) a biomassza először „benzolgyűrűk 3D-s hálózata” alakult át és bőségessé válik funkciós csoportokkal. A hőmérséklet emelkedésével (500-700 °C) nagy porozitással „összeolvadt gyűrűs 2D-s szerkezetű” lesz. A hőmérséklet további emelkedésével (>700 °C) „grafit-mikrokristályos szerkezetté” alakulhat át és a porozitása ennek megfelelően csökkenhet. A bioszén készítése során a korábbi „gázszennyező” anyagok szorbensként alkalmazhatók. Az adalékok jelentősen növelhetik a porozitást és más speciális funkciós csoportjait, ami kedvező pl. a gázszennyező anyagok adszorpciójára. Nagyobb porozitás esetén a gázszennyező anyag

adszorpciós képessége is nagyobb, miközben a funkciós csoportok határozták meg a gázszennyező anyag szorpciós stabilitását.

Tehát a bioszén előállítása (mint a korábbiakban láttuk) a pirolízis technika egyik terméke, mondható, hogy az egyik legfontosabb (BASU 2013). Előállítása az általános pirolízis eljáráshoz hasonló, de azzal nem azonosítható (DHAUNDIYAL et. al. 2021, és 2021). Ha üzemanyag előállításánál a cél pl. a hajtógáz, akkor megfelelő tisztaság és kátránymentes anyag előállítása szükséges, mivel a szikragyújtású motorokban csak így használható fel. Ennél az eljárásnál két szűrési folyamatra van szükség, egyrészt a keletkező pirolízisgáz tisztítása a motorba való felhasználhatóság céljából, másrészt a motor után keletkező füstgáz tisztítás a környezet megóvása céljából.

A bioszén előállítása viszont a szénrel kapcsolatban követel meg fontos technikai műveleteket, hogy annak az összetétele, a káros anyag tartalma a leginkább megfelelő legyen (DHAUNDIYAL et al. 2020). Ezek következtében az előállító berendezések különböznek egymástól. Két bioszén készítési eljárást szemléltet a 10. ábra:



10. ábra Bioszén gyártás egyszerűsített változata. A - vízszintes elrendezésű forgódobos, B – függőleges elrendezés un, nyugvóágyas kivitel, 1- biomassza, 2- gázhűtő, 3 – bioszén, 4 – gáz és levegő, 5 – gáz (SIMENG LI et al. 2020, átszerkesztve)

Az úgynevezett mozgó ágyas (forgó dobos, A) megoldás, amikor az anyag a teljes lebontási folyamatban fizikai kényszer mozgási állapotban van.

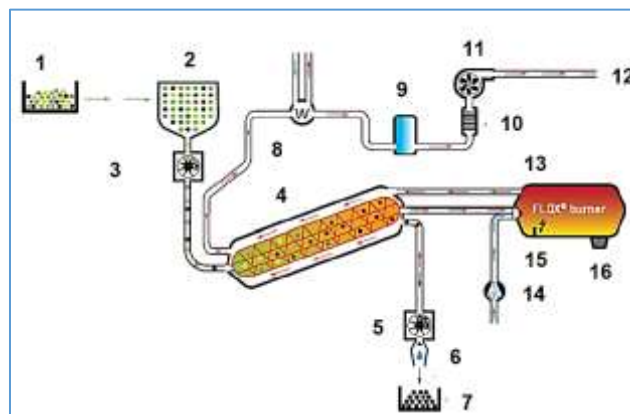
Az úgynevezett fix ágyas (B), illetve, nyugvó ágyas megoldás, ahol a mozgást a gravitáció hozza létre (alkalmasint a technológia miatt szükséges jelentéktelen energiát igénylő mozgatás). Vannak megoldások pl. a Biogreen rendszere (11. ábra), amelyeknél a hőn tartást és szabályozást teljesen külső energiával végzik. Ezek jól szabályozhatók, de a fajlagos energia felhasználásuk a sajátenergiásoknál jóval nagyobb. A feldolgozott ömlesztett termék a pirolíziskamrába való belépés után csigával halad a reaktorban és a pirolíziskamrában. A stabil,

elektromos áramellátásnak köszönhetően a folyamat körülményei pontosan megmaradnak a pirolíziskamra mentén, biztosítva az egyenletes anyagátalakítást.



11. ábra Csigás reaktorral rendelkező megoldás⁵

A 12. ábrán a PYREG rendszerű bioszén előállító berendezés látható, amely az előzőekben bemutatott technológiák közül a mozgó ágyas kivitel képviseli.



12. ábra PYREG típusú bioszén előállító (Forrás: <https://www.izes.de/>)

Ábra jelei:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1) biomassza tároló | 9) szárító |
| 2) előtároló | 10) aktív szén-szűrő |
| 3) cellás adagoló | 11) centrifugális gáz szivattyú |
| 4) PYREG típusú reaktor | 12) gáz a külső légterbe |
| 5) cella-kerekes leválasztó | 13) kazán |
| 6) hűtés | 14) égési levegő |
| 7) bioszén tároló | 15) indító égő (begyűjtáshoz) |
| 8) gáz- és külső levegő hőcserélő | 16) hamu leválasztó |

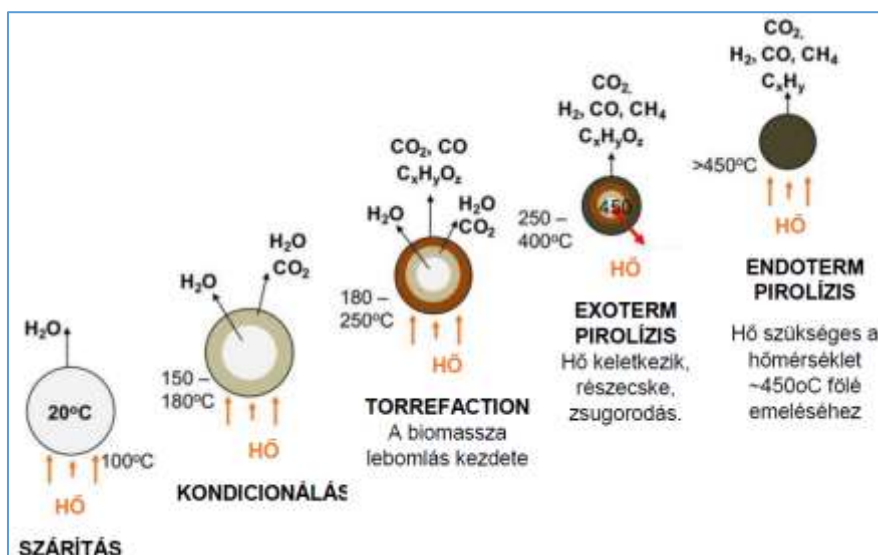
⁵ Forrás: ETIA SAS Compiègne FRANCE <https://www.biogreen-energy.com/pyrolysis-equipment/processes>

A beérkező biomassza (1.-2.) adagolón át (3) a ferdén elhelyezett és csigás szárítóval ellátott pirolízis tartályba jut (4) az itt az anyagban keletkező gáz elégetésre kerül (13) és a magas hőmérsékleten a füstgáz visszavezetéssel kerül a csigás pirolízis egység és külső köpenye közé. Gyakorlatilag ezzel történik a berendezés fűtése. Innen a gáz a levegő-gáz hőcserélőhöz (8) kerül és megtörténik a gáz lehűtése. A hőcserélő külső oldalán lévő felmelegített anyag pedig külső hőellátást (pl. szárítást) szolgálhatja. Ezt követően a gáz szárítókamrán át (9) az aktív-szénszűrőhöz (10) jut, majd centrifugál szivattyú (11) nyomja a külső légterbe. A bioszén a ferde csigával ellátott kettős falú dob felső pontján lévő nyíláson keresztül cellakerekes leválasztóhoz kerül. Ez alatt a léghűtő található, majd pedig a bioszén tárolója. A folyamat beindítása a kazánban történik külső energia segítségével (15), de az elsődleges gáz égése során keletkező hamu leválasztását is itt végzik (16). A megfelelő hőmérsékletű gáz előállításához a (14) levegőadagoló szolgál. Ezzel az eljárással a megfelelő nedvesség tartalmú biomassza feleségekből jó minőségű bioszén állíthatók elő.

2.4. A pirolízis és a folyamatának szakaszai (zónái)

2.4.1. A szakaszok jellemzése

A pirolízis termokémiai folyamat, amely elsősorban a lignocellulóz anyagokra vonatkozik, és szerves polimerek és biomassza ásványi anyagainak lebomlásából áll. A pirolízis folyamatának jellemző szintjeit a 13. ábra jeleníti meg.



13. ábra A pirolízis folyamatának (a száradást is beleértve) 5 jellemző szintje⁶

[JOSEPH et al. 2017]

⁶ **Exoterm:** Az anyag belső energiája csökken, a környezet belső energiája nő (energia leadás).

Endoterm: A kötések felbontásához a felszabadulónál több energia szükséges az új kötések kialakulásához, akkor a kémiai reakció energiafelvétellel jár.

A bomlási termékek oxigén nélkül 400 °C és 800 °C közötti hőmérsékleten keletkeznek. A főterméket rendszerint a generátorgáz, vagy kondenzált folyékony fázis a bioolaj. Az un. lassú pirolízisnél (300-400 °C) hosszú a reakcióidő, szén előállítás a cél (RONSSE et al. 2013). A gyors pirolízis 500-650 °C közötti hőmérsékleten megy végbe. Ha gáz halmazállapotú a végtermék, a hőmérséklet ~700 °C, vagy magasabb.

1. táblázat A pirolízis folyamat rendszertől függő és jellemző számai [JOSEPH et al. 2017]

Módszer	Hőközlés sebessége	Hőfok (°C)	Termék
Lassú pirolízis	1-20 °C/min	400-650	1/3 részben olaj, gáz, bioszén
Gyors pirolízis	>300 °C/s	700	Bio-olaj 75% bioszén 10-20%
Gázosítás	2-100 °C/min	>800	Gáz 80% bioszén 10-20%

Magas hőmérsékleten az anyag rövid idő alatt pirolizálható, ha a részecskék elég kicsik ahhoz, hogy a hő gyorsan behatoljon. Ezt gyakran gyors pirolízisnek nevezik.

A pirolízis során végbemenő folyamatokat zónákra felosztva (14. ábra):

Kiszáritó zóna:

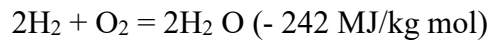
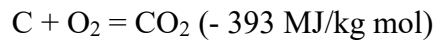
A kiszáritás zónában megtörténik a faanyag kiszáritása, elveszti nedvességtartalmának nagy részét. Ha a fa alapanyag nedvességtartalma 10-30% között van, a zóna elhagyása után 6-10%-ra csökken (NÉMETH 1998).

Szenesítő zóna

A 200°C-os tartományában nedvességtartalom nagyobb része távozik a fából, majd 200-280 °C körül további nedvesség és egyéb illékony anyagok is távoznak el 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 belsőégésű motorokra, ezért olyan gázosítók az előnyösek, amelyek vég termékéke kis mennyiségben tartalmaz kátrányt (CÉGÉNY et al., 2017) redukciós térbe a krakkolási tér határáig.

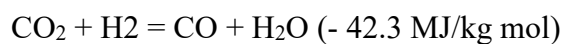
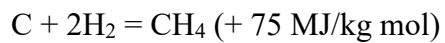
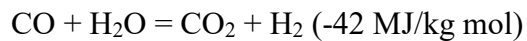
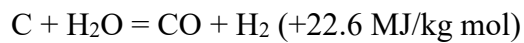
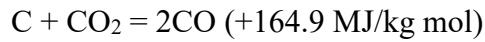
Égési - krakkolási zóna

A faanyagban meghatározó éghető anyag a szén és a hidrogén. Az égésnél szén-dioxid keletkezik a szén és oxigén reakciójából és a hidrogén és oxigén vízgőzt alkot. Az 1450 °C égés exoterm folyamatában lejátszódó kémiai reakciók (AMONETTE Joseph S., 2009; CHA et al. 2016):



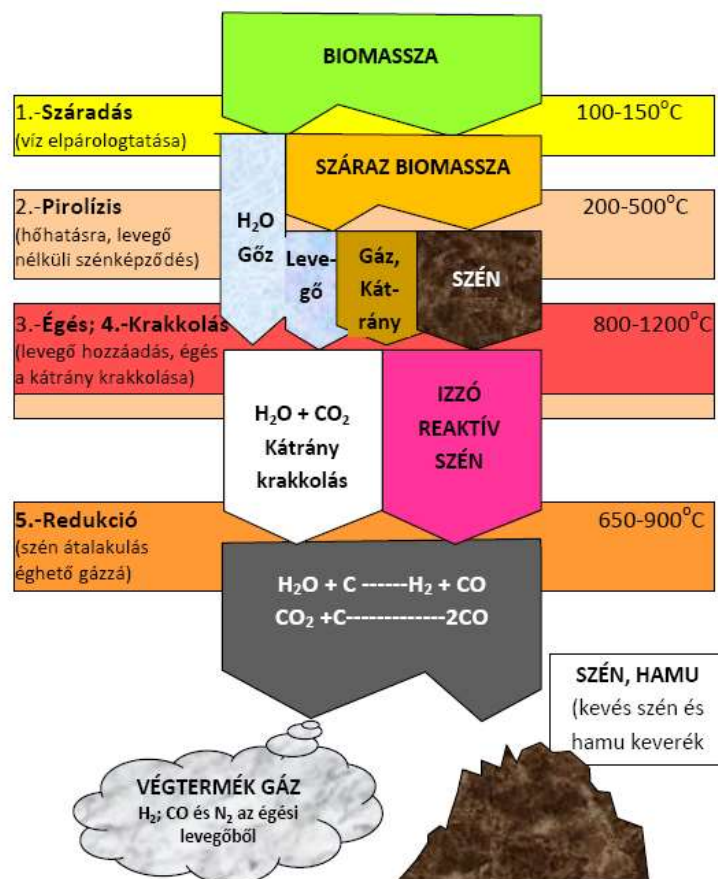
Redukciós zóna

A CO_2 , a H_2O és a nem éghető pirolízis gázok keresztáramolnak a faszén izzó redukciós rétegén:



Az ALL PWER LABS a pirolízis folyamatát 5 lépésben mutatja be (14. ábra).

A kátrány krakkolását (lebontását) a H_2 , CO és más éghető gázok reakciójának tekinti a magas hőmérsékleten).



14. ábra A pirolízis folyamatábrája

<https://www.allpowerlabs.com/gasification-explained>

(Letöltve: 2019, saját átrajzolás)

A redukciós zónában a hőmérséklet csökkenés jön létre, mivel az endoterm folyamatok hőt vonnak el a környezettől és ha nincs meg a megfelelő (650- 900 °C) hőmérséklet, akkor romlani fog a termék minősége. (BASU 2013; LETTNER et al. 2007; PERRY et al. 2013; GRØNLI et al. 2002)

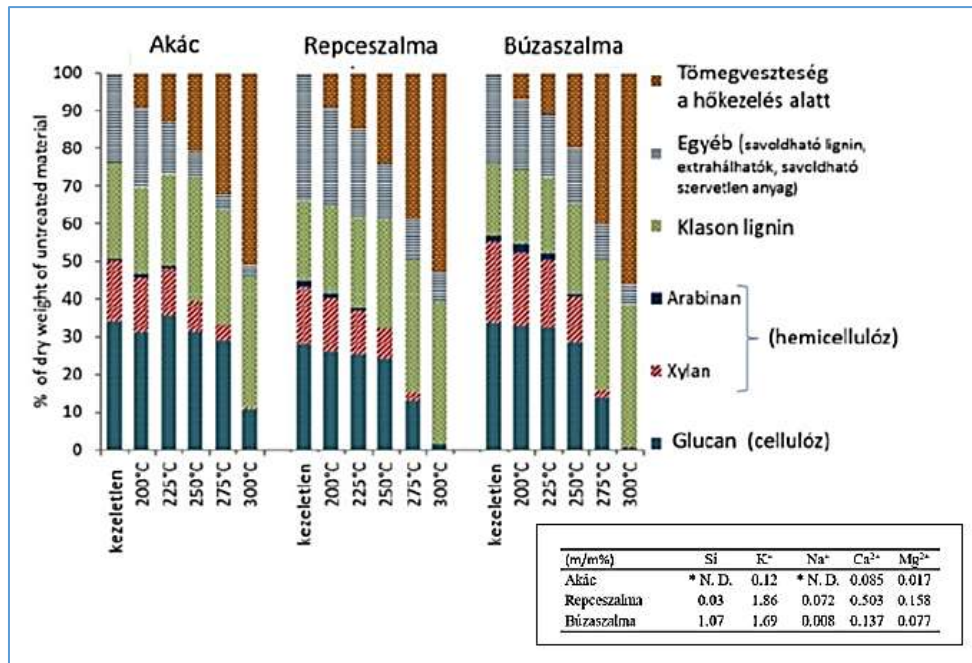
2.4.2. A szakaszok jelentősége a végtermékre

A bioszén előállításának és a folyamata elméletének a kísérleti és a modellezett bemutatása ma már hatalmas irodalmi anyag. Eltérő megfogalmazások és az értékek is szórást mutatnak, amelyeket feltehetően a használt anyagok és a kísérleti módszerek jelentik. Fő vonalakban azonban a mondanivalók és az állítások azonosak.

Ezt írja le YUDKEVICS (2013), miszerint: A pirolízis termékek összetételét és tulajdonságait befolyásolja a biomassza fajtája és minősége, a nyersanyag szemcsemérete és kezdeti nedvességtartalma, a hőfokváltozás sebesség, a nyersanyag tartózkodási ideje (adott hőmérsékleten), a végső hevítési hőmérséklet, a gázok áramlási sebessége (kezdetben) a farétegen és majd a szénbázison keresztül. Az egyszerűbb rendszereknél az alacsony hőmérsékletű folyamatot a szerzők általában 4 részre bontják:

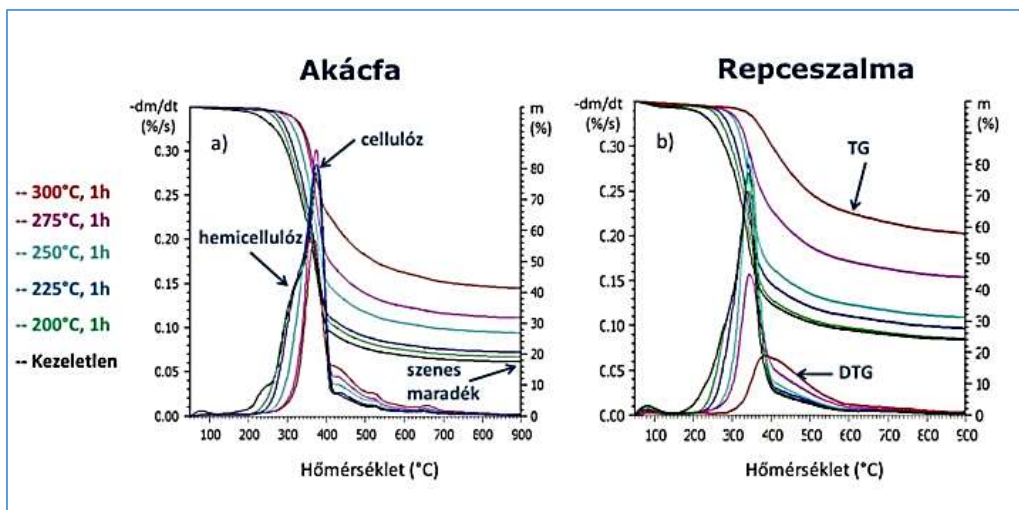
- 1) *Az anyag szárítása:* hőmérséklet nem magasabb, mint 150 °C; endoterm folyamat, amelyet hőelnyelés jellemezi; a fa összetétele szinte változatlan.
- 2) *Az anyag lebontásának kezdeti szakasza:* hőmérséklet 150 és 275 °C között; endoterm folyamat; megkezdődik a hemicellulózok és a lignin egyes fragmenseinek bomlása; kis molekulatömegű termékek keletkeznek (víz, szén-oxidok, metanol, ecetsav stb.).
- 3) *A pirolízis szakasza:* hőmérséklet 275 °C és 450 °C között; exoterm folyamat; a cellulóz és a lignin intenzív bomlása megy végbe és a disszociációs termékek zöme kialakul, majd létrejön a szénmaradéka szerkezetének kialakulása.
- 4) *Faszén izzása:* a hőmérséklet 450-550 °C; a maradék funkciós csoportok lehasadnak a szénvázról (krakkolás –redukció). Ekkor az endoterm és exoterm reakciók párhuzamosan futnak (viszont a szakasz összesített egyensúlya endoterm).

CÉGÉNY (2017) a 300 °C-ig végzett vizsgálataiban kimutatta, hogy a folyamat (15. ábra) végére (a kiindulást is számítva 5 mintában) a különféle anyagok a tömegüket tekintve ~50%-ban lebomlanak. A vizsgálatokat inert közegben végezte. Mindegyik anyagnál a hemicellulóz anyagok szinte teljesen lebomlottak, de a lignin nem, sőt aránya a kezdethez képest százalékosan változhat is.



15. ábra Különféle anyagok alkotó elemeinek lebomlása 200-300°C tartományban
(Forrás: CÉGÉNY 2017)

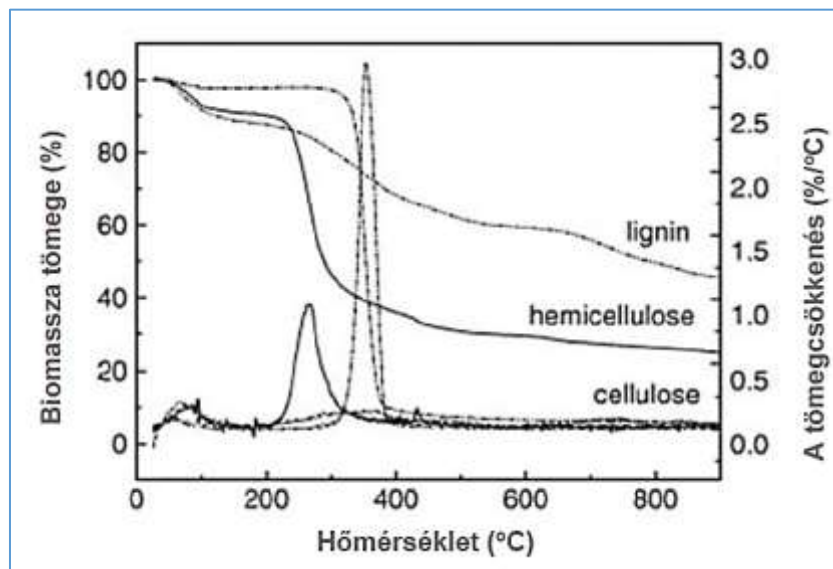
A nagyobb fűtési intenzitásoknál a visszamaradó **szenes maradék** mennyisége növekszik, tehát a nagyobb tömegvesztési intenzitással a maradék növekszik. A maradék legnagyobb mértékben szenet és kisebb mértékben hamut tartalmaz. Arra is rámutatott, hogy a lebomlás mértéke, pl. a fa belső bomlása sokkal lassúbb mind a kéregé, ami nagyobb mennyiségben tartalmaz lignint.



16. ábra A lebontási intenzitás összefüggése a maradék anyaggal (szén +hamu)
(Forrás: CÉGÉNY 2017)

ANTAL et al. (1998) szerint a lebomlás mértéke (a maradék anyagmennyisége) nagymértékben függ a lebomlás sebességétől, amit a fűtési hőfok generál

Hasonló eredményekre jutott PHAM (2018) ellenáramú fixágyas rendszerénél (17. ábra).



17. ábra A bomlási (TG) folyamat a hőmérséklet függvényében és a tömegcsökkenés sebessége egyes összetevőknél

DI BLASI (2008) szerint a pirolízis folyamatában a gázok CO_2 -t, CO -t, CH_4 -et és kisebb mennyiségű hidrogént és szénhidrogéneket tartalmaznak. A keletkező gázok (folyadékok) mennyisége és összetétele a hőkezelés hőmérsékletétől, valamint a tartózkodás időtartamától is függ a forró reakciókörnyezetben. Az elsődleges gőzök (oxigenátok) $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$ alatti hőmérsékleten vannak jelen, majd $\sim 850\text{ }^\circ\text{C}$ -ig a szénhidrogének vagy másodlagos kátrányok. Az aromás vagy tercier kátrányok pedig $850\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$ tartományban bomlanak. A lebomlás a vegyes oxigéntartalmú vegyületek sorrendjében növekszik, fenol-éterek, alkil-fenolok, heterociklusos éterek, poliaromás szénhidrogének (PAH). Az reakció elején a gázok jelentős arányban tartalmaznak vizet is, amely a szilárd tüzelőanyag nedvességtartalmából és a bomlási reakciókból származik.

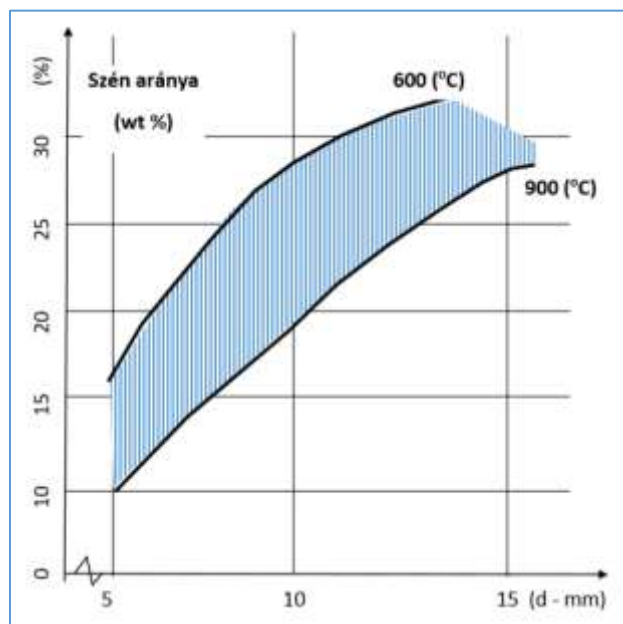
Az üzemanyag célú pirolízis folyamata során *policiklusos aromás szénhidrogének (PAH)*, és *illékony szerves vegyületek (VOC)* és *a szén (ecetszerű) nanorészecskék elkerülhetetlenül keletkeznek* elsősorban a hulladékbiomassza pirolízise során (WANG et al. 2017), amelyek a bioszénnek nevezett szilárd maradék részei (lehetnek). Az ilyen szennyező anyagok káros *hatással vannak* a növények növekedésére, valamint a talaj mikrobiális közösségére. Bár a bioszenet „szén-negatív stratégiaként” javasolták az ÜHG gázok kibocsátásának mérséklésére, alkalmazásának a veszélyes összetevők hosszú távú perzisztenciájára és biológiai hozzáférhetőségére gyakorolt hatása még mindig nem egyértelmű.

Az alacsony molekulatömegű VOC-k és a PAH-ok együttes előfordulása a bioszénben további fitotoxikus hatásokat fejthet ki. Számos irodalom vélelmezi ezt az alapvető ténytet. Cél, hogy feltárjuk azokat a kulcsfontosságú mechanizmusokat, amelyek ezeknek a szerves anyagoknak létrejöttét irányítják, de vizsgálni kell a szorbens (bioszén) és a talajmikrobák közötti dinamikát. Szükség van szabványosított módszerekre a bioszénben lévő PAH-k és VOC-k mennyiségi elemzésére környezetvédelmi szempontból, releváns feltételek mellett (DUTTA et al. 2017).

A bioszén kémiai és fizikai tulajdonságait javítja, ha a gyártási folyamatban **magas hőfokon érintkeznek-e gőzzel és szén-dioxiddal**. *A biomassza széntartalma csak így alakul át aromás szénecsoporthoz, amorf- és grafitos szerkezetekké.*

A hőbontás során a biomasszában található szerves vegyületek feloldódhatnak és egyesítik a dioxinokat, furánokat, de főként a policiklikus aromás szénhidrogénekkel (kátrány, gyanta és más rövid élettartamú vegyületek). HUNT et al. (2010) szerint az így keletkező PAH-ok a lipofil struktúrájuk miatt talajszennyezők, tehát az ilyen tartalmú bioszén előnytelen (káros is) lehet. *A bioszén legfontosabb minőségi ismérvei a magas adszorpciós és kation kicserélő képesség (CEC) és az alacsony mobilis anyagtartalom* (CHEN és YUAN 2011).

Az előállítási hőmérséklet is meghatározó tényező. Nagyobb szemcseméreteknél a szénmennyiség számottevő növekedése figyelhető meg (18. ábra).

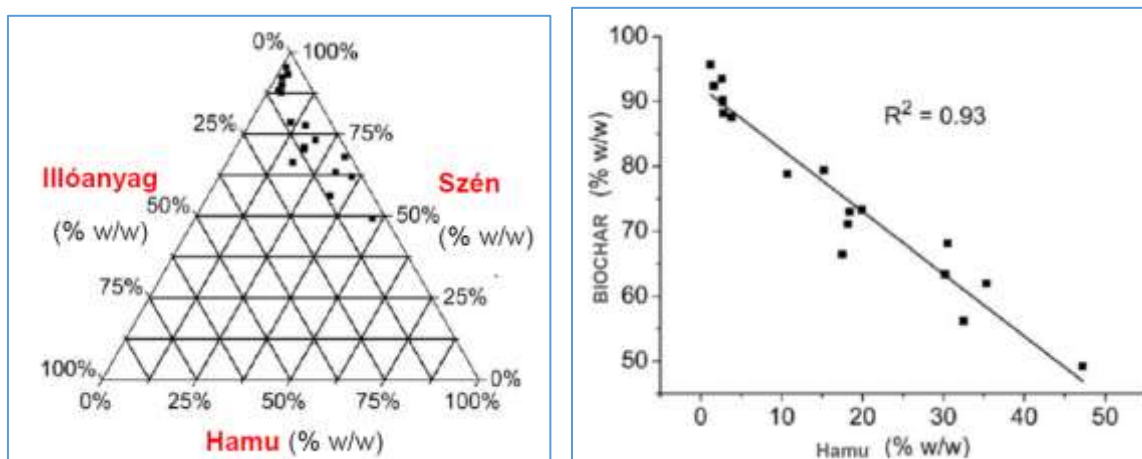


18. ábra A méret és a hőmérséklet függvényében a szén arányának változása
(Forrás: DI BLASI 2004)

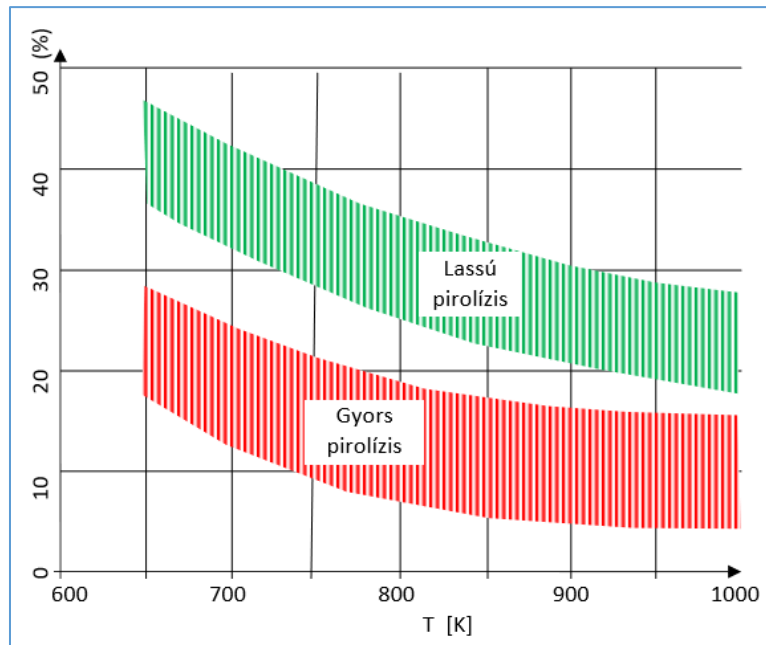
A faalapú bioszenek 450 °C felett történő előállítása általában nagyobb valószínűséggel ad stabilabb és nagyobb porozitású, ill. adszorpciós képességű terméket, mint az alacsonyabb hőmérsékleten előállítottak (DOWNIE et al. 2009). Alacsonyabb hőmérsékleten (300–350°C) a karbonizáció csak részlegesen megy végbe, így kisebb pórusokat, kisebb felületet is eredményez (AMELOOT et al. 2013; ANTAL et al. 1998). A visszamaradó széntartalomra az anyagok struktúrájának hatása, leginkább a szemcsemérettel jellemezhető.

PERRY et al. (2013) és mások, pl. KLOSS et al. (2012) rámutatott arra, hogy a pirolizálás első szakaszában (többféle anyagot is vizsgálva) azonos „gyártási” körülmények között összefüggés van az elsődlegesen kiváló illóanyag és a maradó szén és hamu között. Statisztikailag megbízható összefüggést mutatott ki a hamu százalékos aránya és a bioszén százalékos arány között (19. ábra).

DADI (2018) azt bizonyította, hogy a hőfoktól függetlenül a keletkező szén százalékos arányában a lassú pirolízis az eredményesebb (20. ábra).



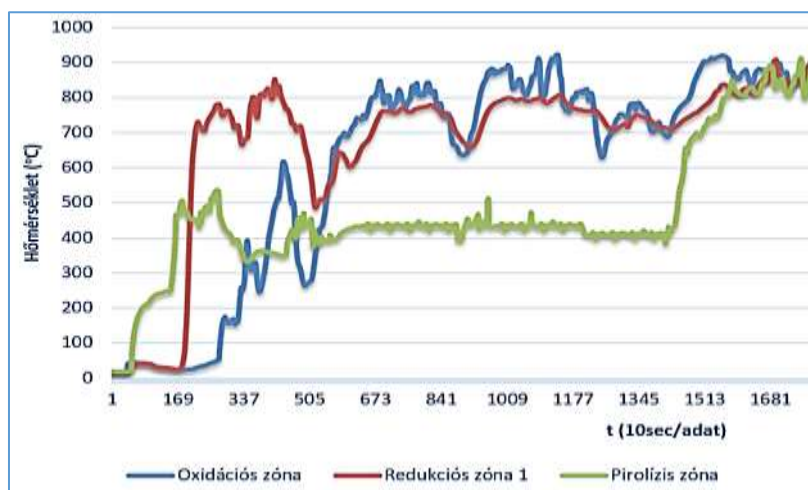
19. ábra A hamu, az illóanyag és a fix széntartalom közötti összefüggés bemutató hármas diagram, valamint a fix szén- és hamutartalma közötti összefüggés (18 települési hulladék bioszéné gyártásánál) (Forrás: PERRY et al. 2013)



20. ábra A széntartalom változása (% -os aránya) a hevítési hőmérséklet függvényében

(Forrás: MASEK 2018)

TÓVÁRI et al. (2011) kísérletei szerint a fixágyas rendszereknél nem karakteresen, de a 3 fontos hőzóna elkülönül. Az oxidációs és a redukciós zóna leginkább a felfűtési szakaszban tér el, majd hosszabb hőntartásnál a kiegyenlítés irányába hat a folyamat. Ezért is kell a berendezések automatizálásával a zónákat jól különválaszthatóvá tenni (pl.: oxigén adagolás, az anyagok tömegárama).



21. ábra Reaktortér zónák szerinti hőmérséklet diagramja

(TÓVÁRI és MADÁR 2011)

Összefoglalva megállapítható, hogy olyan berendezéseket célszerű készíteni, amelyeknél az anyagféleségektől függően jól szabályozható a fűtési hőmérséklet és a fűtési sebesség.

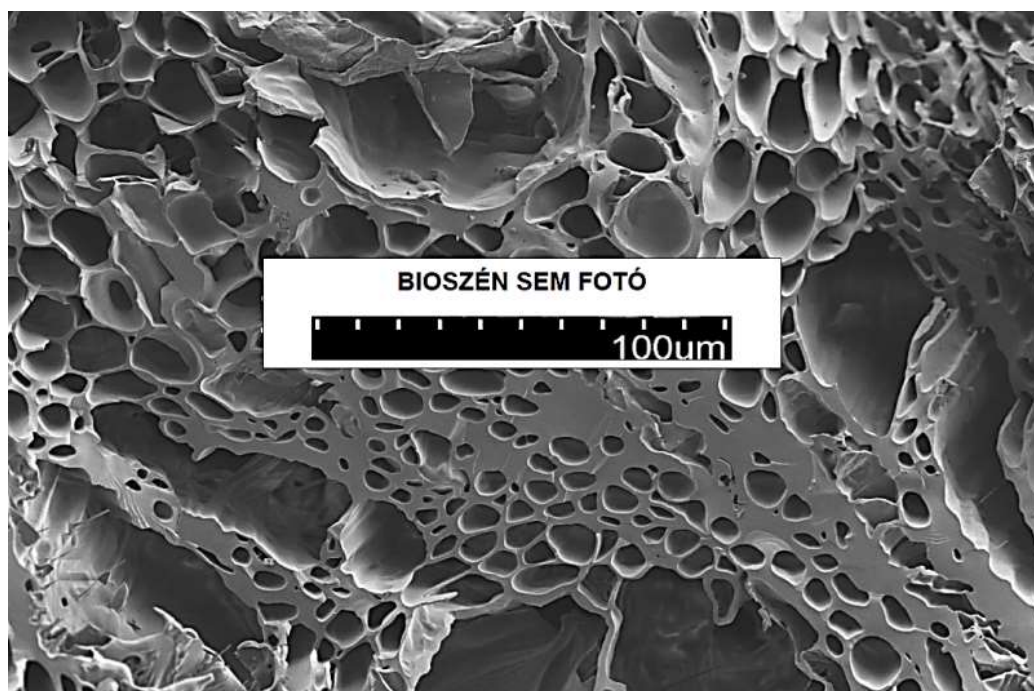
2.5. A bioszén felhasználása, fontos tényezők

2.5.1. A bioszén porozitása

A finomszemcsés bioszén, erősen porózus anyag, a legfontosabb tulajdonsága a nagy felülete ($200\text{--}300\text{ m}^2/\text{g}$), amit gyakorlatilag a $\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$ -os hőkezelése hoz létre. Összehasonlítva más talajjavítókkal, a bioszén nagy fajlagos felülete és porozitása lehetővé teszi, hogy felszívja a vizet és megtartsa a tápanyagokat, miközben élőhelyet is biztosít a hasznos mikroszervezetek számára (HUNT et al. 2010). Azt is megállapították, hogy a mikrobák reprodukciós rátája is növekedést mutatott a bioszénrel kezelt talajokban (STEINER et al. 2009).

A bioszenet pásztázó elektronmikroszkóppal, termogravimetriával, kémiai elemzéssel, valamint a fajlagos felület és porozitás meghatározásával jellemezték. A dinamikus stabilitás szabályozó képességének vizsgálatai azt mutatták, hogy a bioszén gócképző szerként működik, és fokozza a teljes kristályosodási folyamatot. A talajszerkezet stabilitása növekszik a bioszén adagolása révén, de az függ a bioszén szerkezeti szilárdságától is (22. ábra).

JEFFERY (2017) áttekintette a bioszén kutatásokkal kapcsolatos irodalmakat, elsősorban a talajra, illetve termésre gyakorolt hatásokat. Az alkalmazott statisztikai Meta-analízissel (*MetaWin 2. verzióval*) 111 publikációt vizsgált. A pozitív és negatív eredmények összefüggését megbízhatónak találta (95%-os konfidencia tartományban).



22. ábra Rizsszalmából készült bioszén porozitása,
(SEM felvétel 500°C -os hőbontás után, (HARDIE et al. 2014))

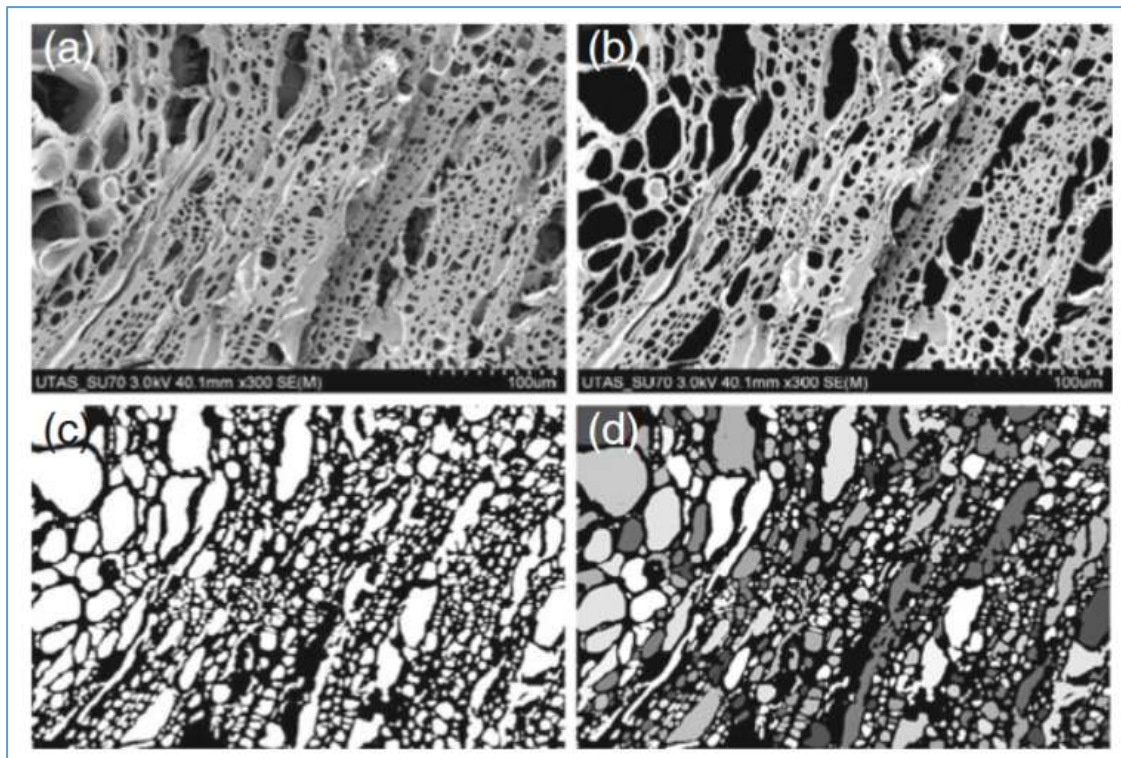
Megállapította, hogy a bioszén használata, előállítása a környezetre egyértelműen pozitív hatással van. A talajokra gyakorolt hatásával és a terméshozamokkal kapcsolatban az eredmények ellentmondásosak voltak. De a degradált- és savanyú, kevés tápanyagot tartalmazó talajokon a pozitív hatása szinte egyértelmű, jobb a tápanyagok hasznosítása és a talaj vízmegtartó képessége. A jobb termőképességű (mérsékelt égövi) talajokon, ahol jelentős mennyiségben alkalmaznak műtrágyákat a hatás már nem egyértelmű.

2. táblázat A bioszén jellemzői

Minta	Átlagos pórus átmérő (4V/A)	Medián pórus átmérő (térfogat)	Tömeg- sűrűség	Pólus- váz- sűrűség	Porozi- tás	Porozi- tás jellem- ző hossz	Torzult- ság	95% pórus átmérő <
	μm	μm	g/cm ³	g/cm ³	%	μm	%	μm
A	13,02	14,23	0,51	0,64	20,34	41,94	8,01	32,93
B	0,92	3,46	0,50	1,13	55,65	50,09	4,16	7,75
C	2,17	11,37	0,47	0,68	31,47	45,05	7,05	45,31
D	0,44	3,102	0,51	0,90	42,82	38,26	7,07	1,0

A 100 mm-es átmérőjű talajmintákon kimutatták, hogy a bioszén a teljes talajtérfogat 6,53 %-a volt. A bioszén jelentősen csökkentette a talaj tömegét (sűrűségét) minden ismételtsben.

Tehát a *bioszénnel kezelt talaj* kisebb térfogatsűrűségét, maga a bioszén térfogatsűrűsége okozza. A bioszénnel kezelt talajoknak szignifikánsan nagyobb a hidraulikus vezetőképessége (-0,25 ill. -0,10 kPa) és talajvíz visszatartása (-0,1 kPa), ami nagy makró pórusoknak tudható be (> ~1200 μm). A porozitást befolyásolja a gyökérszónában zajló folyamatokat, beleértve a növények légzését és a gyökérvíz felvételét (lásd 23. ábrát). Végül is a bioszén a talajt is módosítja, javítja annak *porozitását és szerkezetét*.



23. ábra Példa: Pásztázó elektronmikroszkópiával (SEM)⁷ bioszén és pórusméret elemzés képe. (Eredeti SEM kép $\times 300$ -as nagyítással);

a - korrigált SEM kép az („szennyeződések” eltávolítva);

b - inverz bináris kép (fekete - pórus fal, fehér - pórustér);

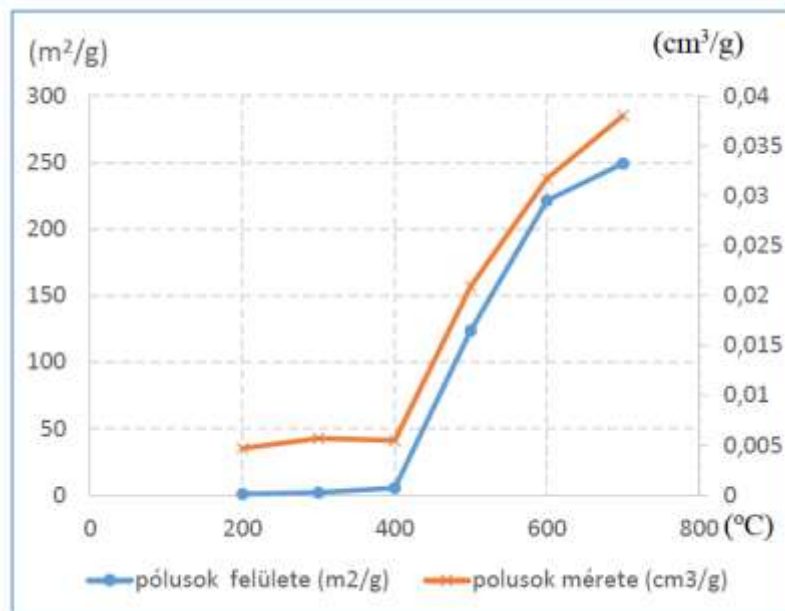
c - a pórusméret, a szürkeárnyalatok javítása (Image J Pore Analysis használatával).

d - Példa a pórusra (méretek eloszlása).

A homokos agyagos talaj a térfogat sűrűségben (SBD), a porozításban és a víztartalomban jelentősen javult. A porózus szerkezete segíti a talajvíz megőrzését, de valójában nem növeli a hasznosítható vízkapacitást.

ELNOUR (2019) szerint a pirolízis folyamat jellemzői jelentős hatást gyakoroltak a bioszén szerkezetére. A hőmérséklet növelésével, megfelelő mennyiségű szén- és hamutartalom esetén a felület és a pórustérfogat is nő, míg a H/C, O/C és (O+N)/C arányok csökkennek a pirolízis hőmérsékletével (24. ábra).

⁷Deng Z: 2021 Modification of coconut shell-based activated carbon and purification of wastewater March Advanced Composites and Hybrid Materials 4(1):1-9DOI: 10.1007/s42114-021-00205-4



24. ábra A bioszén előállítási hőfokának függvényében a fajlagos felület/tömeg és a pólustérfogat/tömeg nő.
(REHRAH et al. 2014)

A talajban a nyers szerves anyagok tápanyagként szolgálnak a növények és talaj mikroorganizmusai számára, **a bioszén pedig katalizátorként működik**, fokozva a növények tápanyagfelvételét (KOCSIS et al. 2015; SZILI-KOVÁCS et al. 2011). A kereskedelemben árult bioszén alapú talajjavító készítmények potenciálisan képesek növelni a talaj specifikus felszínét az eredeti talaj pórusméreteinek és sűrűségének megváltoztatásával (RÉKÁSI és UZINGER 2015).

A bioszén kémiai és fizikai tulajdonságait javítja, ha a gyártási folyamatban magas hőfokon érintkeznek-e gőzzel és szén-dioxiddal. A biomasza széntartalma csak így alakul át aromás szénsoportokká, amorf- és grafitos szerkezetekké. A hőbontás során a biomaszában található szerves vegyületek feloldódhatnak és egyesítik a dioxinokat, furánokat, de főként a policiklikus aromás szénhidrogénekkkel. Az így keletkező PAH-ok a lipofil struktúrájuk miatt talajszennyezők, tehát az ilyen tartalmú bioszén előnytelen (káros is lehet) (CHEN és YUAN 2011). A bioszén legfontosabb minőségi ismérvei a magas adszorpciós és kation kicserélő képesség (CEC) és az alacsony mobilis anyagtartalom (kátrány, gyanta és más rövid élettartamú vegyületek) (HUNT et al. 2010; DUTTA et al. 2017; HARDIE et al. 2013).

Az előállítási hőmérséklet is meghatározó tényező. A faalapú bioszenek 450 °C felett történő előállítása általában nagyobb valószínűséggel ad stabilabb és nagyobb porozitású, ill. adszorpciós képességű szilárdabb terméket, mint az alacsonyabb hőmérsékleten előállítottak (DOWNIE et al. 2009). Alacsonyabb hőmérsékleten (300–350°C) a karbonizáció csak

részlegesen megy végbe, így kisebb pórusokat, kisebb felületet is eredményez (AMELOOT et al. 2013).

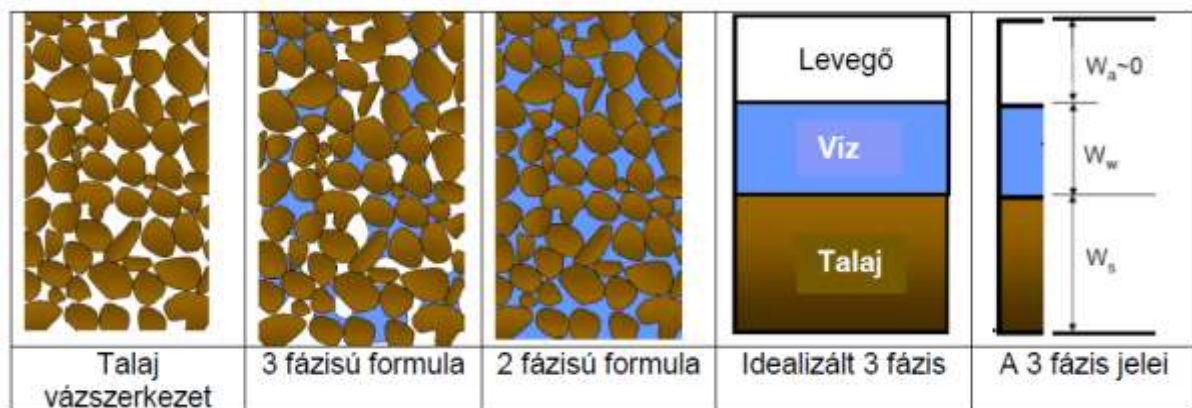
2.5.2. A talaj porozitása és a bioszén

AHMED (2010) a tanulmányában a talajok porozitásával, részecske tömeg és térfogat eloszlásával foglalkozik. A vizsgálata lényeges a bioszén szemcsemérete szempontjából. A kisméretű szemcse kimosódhat a nagyobbak pedig rontják a vízháztartás szempontjából a talaj vázszerkezetét. A talajokat három fő részre osztotta meg, ezek:

- szilárd
- víz
- levegő

Bemutatta a száraz, a vízzel és levegővel, valamint a pórus térfogatokban lévő vízzel kevert talajok szimbólumait (25. ábra).

Kísérleti úton határozta meg, hogy az egyes mennyiségek hatása az összes talaj sűrűségére milyen mértékben hat.



25. ábra A talajok összetételét szimbolizáló képek

Az ábra szerint három fázis formából az első a talaj légüres vázszerkezete, a második amikor a pórusokban levegő és víz van, a harmadik pedig amikor a vázszerkezetet teljes egészében víz tölti ki. Az elméleti megfontolásait a talajok nedvesítésére kiszállításával elemezte.

Ezek szerint: A **porozitás** (ε) az üregek térfogatának aránya a teljes térfogathoz viszonyítva (kitöltési arány)

$$\varepsilon = \frac{V_w}{V_t} = \frac{V_w}{V_s + V_w}$$

A **telítettségi fok** (S): a víz térfogatának és a víz + üregek térfogatának aránya:

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

Ahol $V_v = V_a + V_w$ (levegő + víz)

A három fázis részaránya felírható:

- Nedvességtartalom w (%) $w = \frac{W_w}{W_s} 100$
- Hézagterfogat n (%) $n = \frac{V_v}{V_s} 100$
- Porozitás ε (%) $\varepsilon = \frac{V_p}{V_t} 100$
- Telítettségi fok S (%) $S = \frac{V_w}{V_t} 100$
- A száraz rész tömege γ_d (%) $\gamma_d = \frac{W_s}{V_t} 100$

A szilárd anyagok és üregek aránya térfogatsűrűség határozzák meg:

- *A teljes talaj sűrűség:* A talaj tömegének (M_t) és a talaj térfogatának (V_t) aránya
- *A száraz talajsűrűség:* A szilárd anyag (M_s) és a talaj térfogatának (V_t) aránya

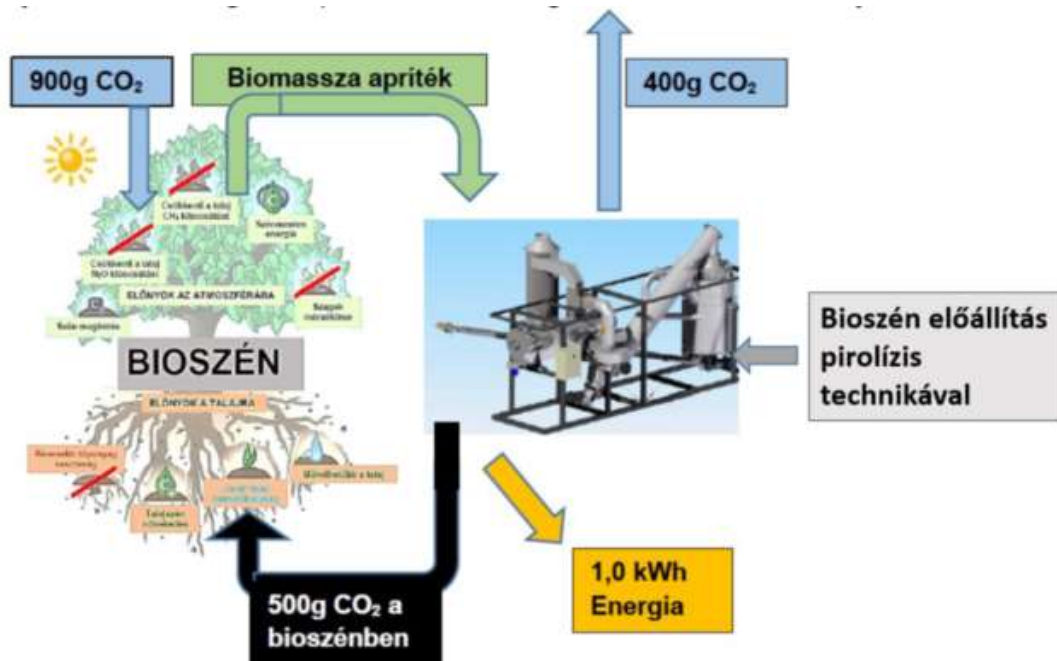
A talaj szilárd részének a porozitása azért jelentős, mert az üreges részben lévő anyagok tömegek gravitációs erejének eltérése, tehát a benne lévő anyagok (levegő, víz) súly erejének különbsége hozza létre a keveredést (a felhajtó erőt is). Amint látható is: ha a teljes talaj sűrűségéből kivonjuk a víz sűrűséget (víztartalmat) a keveredéshez szükséges felhajtó hatást kapjuk. *A fentiekből kitűnik a porozitás mértékének a talajokban fennálló jelentősége.* A bioszén használatánál ezzel kapcsolatban jelenik meg az előnye, mivel az igen nagy a pólustérfogata és a szilárd szerkezete révén a talajban a gravitációs erő hatására elősegíti a víz és levegő mozgását. *Amíg a hagyományos talajszerkezetek szilárdsága a víz hatására mérséklődik (el is veszthetik), addig a bioszén szilárd vázat alkot, tehát a talaj állapota lényegesen hosszabb ideig megfelelő struktúrában fenntartható.* Feltételezik, hogy az összeolvadt poliaromás széngyűrűkből álló szénrácsszerkezet a kulcsfontosságú tulajdonság, amely ellenáll a mineralizációnak, a szénhidrogéneket élelmiszerként hasznosító talajmikrobáknak (LEHMANN et al. 2010).

2.5.3. Bioszén hatása a légkörre

A 26. ábra is szemlélteti a **szenet előállító pirolízis rendszer környezeti hatását:**

- 1,0 kg biomasszából 500g CO₂ a szénben tárolva, hosszabb ideig a talajban marad.
- A természetes lebomlástól eltérően 900 g CO₂ helyett csupán 400g CO₂ tér vissza a légkörbe (tehát ennyit „kivonunk” a légkörből), miközben 1,0 kWh energiát is nyerünk.

- A növényzet által megkötött széndioxid 50% a talajban marad, és elmarad a metán kibocsátás is.
- Végül is jóval kevesebb a talajban képződő üvegházi gázok mennyisége.
- A pirolízissel előállított bioszén szerepe a növényi életben betöltött előnyei mellett energiát (pl. villamos) nyerünk és mérsékeljük az üvegházi gáz kibocsátást is.



26. ábra A szén előállító pirolízis rendszer környezeti hatása⁸

MINXING GUO et al. (2015) a munkájukban széles körben tárgyalják a bioszén-kutatásban elért eredményeket és a bioszén alkalmazásának meglévő akadályait. A jellemzésével és felhasználásával kapcsolatos kutatások azt mutatják, hogy a bioszén jó a környezetvédelemben, a talajfunkciók javításában, az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésében, a szennyezés mérséklésében és az élőlények egészségének javításában (MYLAVARAPU et al. 2019; DOWNIE et al. 2009; YAASHIKA et al. 2020; CHA et al. 2016).

Az újabb tanulmányok szerint a bioszén talajba bevitele csökkenti a dinitrogén-oxid (N_2O) kibocsátását (ami a légtérben ~300-szor nagyobb UHG hatású, mint a CO_2) és növeli a növényzet metán (CH_4) felvételét a talajból. A metán több mint 20-szor hatékonyabban köti meg a hőt a légkörben, mint a CO_2 , míg a dinitrogén-oxid globális felmelegedési potenciálja 310-szer nagyobb, mint a CO_2 . A bioszén szinte minden biomassza-anyagból hőkezeléssel előállítható. A bioszén minősége azonban a nyersanyag típusától, a karbonizációs körülményektől és az kezelésétől függően változik.

⁸ Forrás: <https://biochar-international.org/about-biochar/> International Biochar Initiative (IBI)

A bioszén-módosító hatása a minőségétől, a kijuttatott mennyiségtől, a termőhelyi adottságoktól és a kijuttatást követő időtől függően változhat (ENDERS et al., 2012). A talajművelés miatt a szénben leszegényedett talajok színe a bevitt bioszén hatására sötétebbre változik és ezáltal csökken a napfény visszaverődés mértéke, javul a termelékenység.

2.5.4. A bioszén hozzáadása a talajokhoz

A talaj fő jellemzője a termelékenysége, azon képessége, hogy megfelelő időben vizet és tápanyagokat szolgáltatson a rajta élő növényzet számára és ezáltal lehetővé tegye az elsődleges biomassza előállítását (STEFANOVICS et al. 2010).

A talajok degradációja, romlása egyidős a mezőgazdasággal. Napjainkban a talajminőség kímélés és javítás feladata a klímakárok súlyosságának csökkentésével egészül ki. Az előrehaladást alátámasztó tényezők között legfontosabbak a talajállapot tartós javulása és a klíma eredetű károk enyhítése, továbbá a termés biztonság megtartása és javulása (BIRKÁS et al. 2022). Gyakori ellentmondás, hogy rövid távú haszon érdekében, hosszútávú károk jelentkeznek.

Eredményes felhasználása, adagolása csak a talajok és a bioszén fajták kölcsönhatásának vizsgálata alapján lehetséges. A Világban a mezőgazdasági fejlesztési célok között szerepel a szén visszaállítása a szénszegény talajban.

A szerves anyagokból előállított bioszén elősegíti a tápanyagok abszorbeálását, a nyomelemek megkötését, megakadályozva a kimosódásukat, miközben javítják a tápanyagok hozzáférhetőséget a növények számára (LAL et al. 1990)

2.5.5. A bioszén gazdálkodásra gyakorolt hatása

A leromlott, száraz földek és a rossz termőképességű és alacsony szervesanyag-tartalmú talajok javulnak, hasznosabbak lesznek a bioszén adta módosítások által. További előnyökkel jár a bioszén azon képessége, hogy felszívja a kimosódó vizekben lévő szervesetlen és szerves szennyeződések (MINXING et al. 2015).

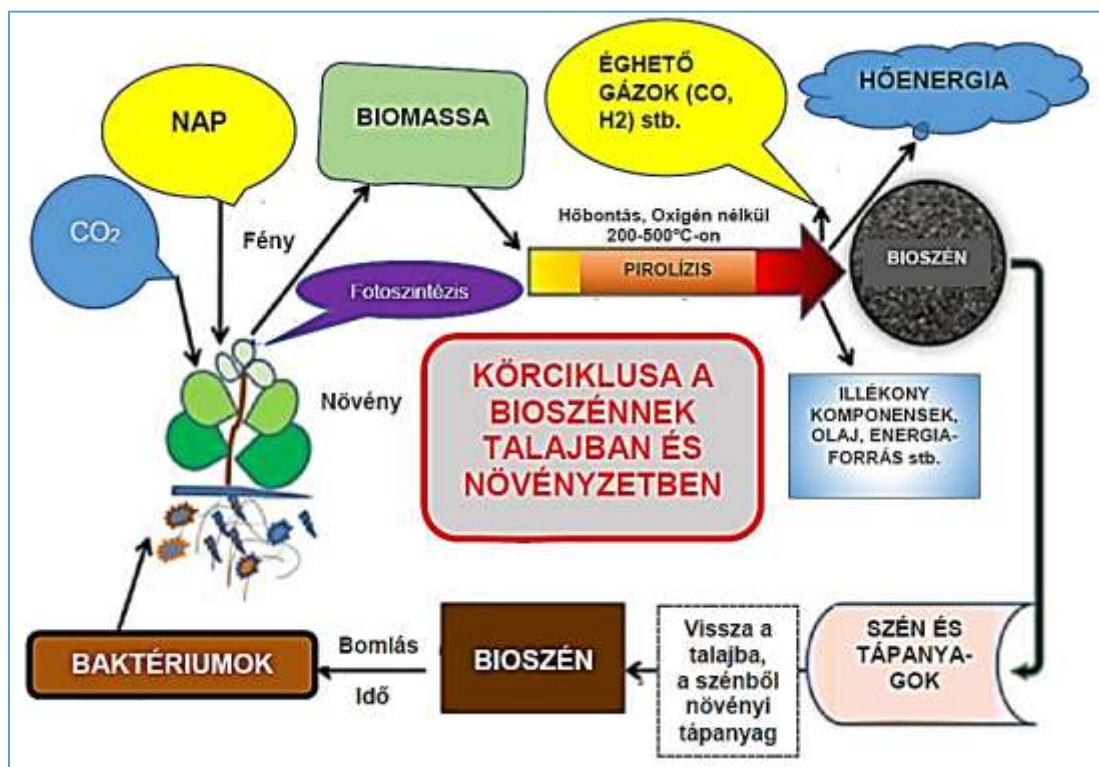
Az egyértelműség kedvéért különbséget kell tenni a bioszén és a komposzt között. A bioszén abban különbözik a mezőgazdasági termelés céljára a talajhoz szokásosan hozzáadott komposztoktól, hogy a **komposzt közvetlen tápanyagforrás, az egyéb tápanyagokkal együtt lebomlik** (MAJOR et al. 2010).

DI BLASI (2000) szerint „biochar egy minőségi műtrágya”, amely: felgyorsítja a növények növekedését és fejlődését, mivel a talaj gyorsabban és egyenletesebben melegszik fel.

megőrzi és fenntartja a talajok szükséges nyomelemekkel és tápanyagokkal való telítettségét, megszünteti kimosódásuk problémáját (DI BLASI 2004).

A bioszén hosszabb idő alatt sem bomlik le, ezért nincs szükség újabb és újabb alkalmazására. SPOKAS et al. (2009) nagyszámú bioszénrel foglalkozó cikkből készítettek összefoglalót és az értékelés során arra a következtetésre jutottak, hogy *a bioszén alkalmazása pozitív eredményekhez vezet a mezőgazdasági termelésben.* LAIRD (2008) erősen mállott és terméketlen talajokba vitt be bioszenet. A kísérletekben során az előnyeit gyakran észlelte is: pl. Florida alacsony termőképességű homokos talajain. Termékeny talajokon a bioszén kijuttatásának csak alacsony aránya indokolt (KOCSIS 2018).

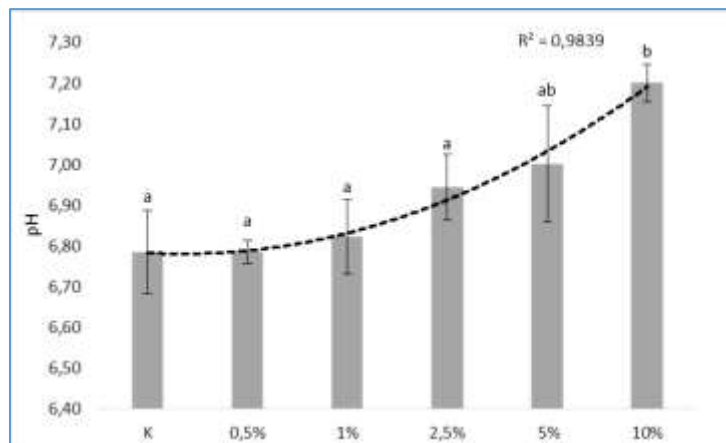
A talajban a szén a körforgása során fontos szerepet játszik a különböző kémiai és biológiai reakciókban (YAASHIKA et al. 2020; LAIRD 2008). A növények szénforrása a talaj és a légkör, ahonnan a szén CO_2 formájában veszik fel (27. ábra).



27.ábra A szén körforgása a biológiai folyamatban

(GROSS et al. 2019)

KOCSIS (2018) a kísérletben használt bioszenet fabrikettből állította elő, amelynek a pH értéke 9,79 volt. Az adagolás mennyiségétől függően a talaj pH értéke változik. Amikor az adag mennyisége 10 m/m%-os értéket elérte a pH 0,4 értékkel növekedett, (28. ábra).



28. ábra Növekvő bioszén dózisok (%) hatása a talaj kémhatására
(KOCSIS 2018)

Végül is a bioszenek hatalmas méretű pórusai (azok felülete) kedvező élő helyet biztosítanak a fontos mikroorganizmusoknak, jó a vízmegtartó képességük. Használatával a talaj pH-értéke javul, pl. a savasság mértéke csökken, a negatív töltése révén magához vonzza és puffereleli a tápanyagokat. A CEC⁹ képessége kifejezetten olyan növényi tápanyagokra vonatkozik, mint a kalcium (Ca²⁺), kálium (K⁺), magnézium (Mg²⁺) stb., amelyeket a növények a gyökereiken keresztül vesznek fel, azáltal, hogy ellentétes, negatív töltésű felületeik vannak.

2.5.6. Az irodalom megismerése alapján a közvetlen célok

- 1) A témakörhöz (a bioszén előállításához, használásához) tartozó tudományos kutatások, tapasztalatok értékelése és felhasználása.
- 2) A tervezési paraméterek pontosítása végett a célomnak megfelelő laboratóriumi egységek elkészítése, laboratóriumi mérések kivitelezése.
- 3) Kisebb vidéki településen is megvalósítható és konténerbe is telepíthető,
- 4) egyszerű konstrukciójú, program vezérelt,
- 5) jó termékminőséget adó kísérleti berendezés megtervezése.
- 6) A tervek alapján legyártott kísérleti egységgel mérések végzése, majd a kapott paramétereinek elemzése.
- 7) A rendszer legyen alkalmas a termelési folyamat környezeti hatásainak minimálisra mérséklésére.
- 8) A rendszerrel szerzett tudományosnak számító megállapítások összefoglalása és publikálása.

⁹ Kation cserélő kapacitása

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A rendelkezésre álló főbb biomasszafélék

3. táblázat Biomasszák felosztása tulajdonságaik szerint (TÓVÁRI 2016)

Biotüzelőanyagok							
Kéreg	Biomassza hulladék	Energianövény	Pelyva/héj	Fa	Szalma	Fű/Széna	Egyéb
Különböző fák	Elpusztult fa	Lágyszárúak	Gabona	Akác	Gabona	Különböző növények	
Nem kategorizált	Papír	Fásszárúak	Gyümölcs	Fenyő	Egyéb növények		
	Fafeldolgozás hulladéka			Nyár			
	Hulladékfa			Fűz			
				Éger			
				Tölgy			



29. ábra A legjellemzőbb mezőgazdasági eredetű biomasszák megjelenési formái
(saját összeállítás)

A 29. ábra szerint a mezőgazdasági biomasszák és hulladékaik fizikai megjelenésben igen sokfélék. LIANG (2016) szerint az alapanyagoknak nagy jelentősége van a bioszenek morfológiai jellemzőire. A pirolizáláshoz megfelelő anyag struktúra kell, ezért a célnak megfelelően feldolgozás szükséges.

Aprítás után az anyagok energiatakarékosabban száríthatók. A pellet (tömörítés, préselés) kisebb helyet igényel és nagyobb az anyag energia sűrűsége.

3.2. A vizsgálatoknál használt eszközök és műszerek

3.2.1. Többcélra megfelelő mérőeszközök

A vizsgálataimat legnagyobb részt a **NAIK Mezőgazdasági Gépkísérleti Intézet** akkreditált laboratóriumában végeztem (BÁCSKAI et al. 2018). A műszerek legnagyobb részt rendelkezésre álltak, de új vizsgáló egységek tervezésére és legyártására is sor került. A pirolízis folyamat mérésén túl a kiinduló és a keletkezett anyagok vizsgálata is szükséges.

A folyamatok megítéléséhez fontos anyag jellemzők:

- nedvességtartalom,
- égéshő, fűtőérték,
- hamutartalom,

Nedvességtartalom mérése:

METTLER TOLEDO termo-gravimetrikus (TG) mérleg (30. ábra). A teljes mérési protokollt az MS EN ISO 18134-1:2016 és MSZ EN ISO 18134-3:2016 jelzetű szabványok írják le.



30. ábra METTLER TOLEDO nedvességmérő

Mérőeszköz mérési pontossága:

- 0-110 °C hőmérséklet tartomány, 0,1 °C.
- 0-71 g tömeg esetén, 0,001 g.

Égéshő meghatározása:

A mintából ~ 1,0g adagot kell kimérnem a kalibrált Mettler Toledo MX-5 típusú precíziós mérleggel. Az adagokat a tömörítő berendezés (31. ábra) pelletekhez hasonló mintákká sűríti.



31. ábra Tömörítő

Ez az anyag az IKA-WERKE C2000 (32. ábra) égéshő vizsgáló un. mérőtartójára helyezhető (vékony fonállal rögzítése szükséges). A mérőtartó (mérőbomba) vastag falú menetes tetejű, szeleppel ellátott nyomástartó edény, amelyet zárt rendszerben hűtővíz vesz körül. Az égést oxigén segíti (oxigénpalackban tárolva). A betöltéseket követően a mérés automatikus. Mérés pontossága:

- a közepes, relatív hiba $< 0,2 \%$ (MRF %),
- a százalékos szórás $< 0,45$ (Diff %).

A vizsgálati protokoll: MSZ EN ISO 18125:2017 jelű szabvány szerint.

IKA-WERKE C2000 kaloriméter

A kaloriméter szilárd, vagy cseppfolyós anyagok energiatartalmának meghatározására lehet használni. A minta elégetése során keletkező hőmennyiséget méri. Az égés teljes mértékben szabályozott körülmények között zajlik oxigéndús környezetben, zárt nyomásálló tartályban, amelyet víz vesz körül. Megközelítőleg 1g anyag van a téglébe, amely zárható tartóban van (égetőcella), majd ez töltődik fel 30 bar nyomású oxigénnel. Az égési folyamat során keletkező hő átadódik a cellát körülvevő víznek.



32. ábra IKA-WERKE C2000 kaloriméter

Az anyagok elemi összetétele

Ezzel meghatározható a minták fontosabb kémiai összetevőit, így: C, H, N, S, O és Cl. Ezek befolyásolják az égést, a pirolízis-folyamatot és az emissziót. A vizsgálatokhoz az ELEMENTAR VARIO MACRO műszer állt rendelkezésre (33. ábra).



33. ábra ELEMENTAR VARIO X műszer

Gázmennyiség mérése

A csövekben áramló gáz sebességét a műszerhez csatlakozó Prandl-csővel határozható meg és a keresztmetszet ismeretében számítható az átáramló gáz időegység alatti mennyisége. A méréshez hagyományos gázmennyiség mérőket is használtam. Ennél a műanyag membránok által elválasztott mérőkamrák periodikus töltését és ürítését és e mozgásokat tolattyús hajtómű viszi át a számlálóműre.

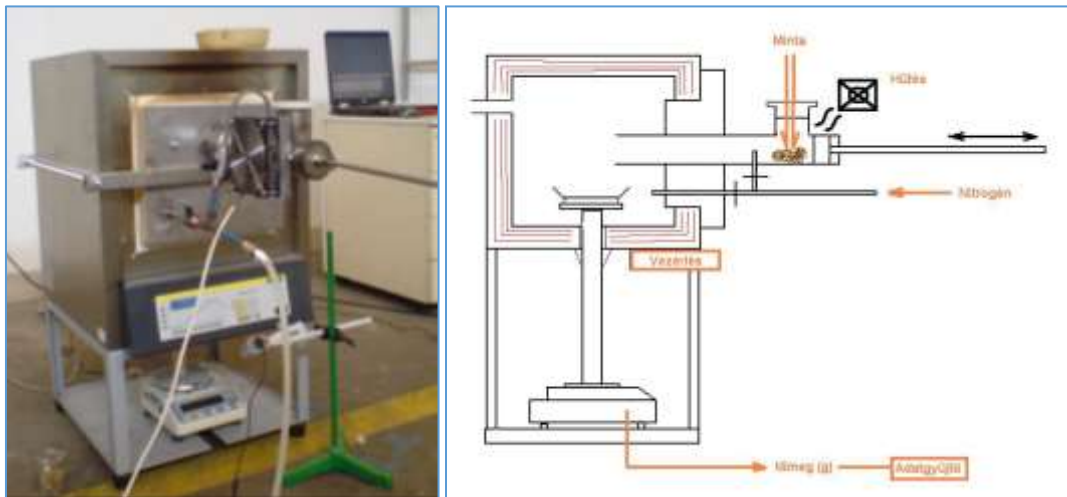


34. ábra **TESTO 510 - differenciál** nyomás mérő és a csatlakozó

Prandtl-cső, (D=7, L=500 mm, 600 °C

Hamutartalom és kismintás lebontási folyamat meghatározás

Az égetőkemence elsősorban a tüzelőanyagok hamutartalmának meghatározására szolgál, de kisebb módosítással alkalmassá tettük kismintás lebontási folyamat mérésére is. A minta beméréséhez analitikai labormérleggel folyt. A mérési folyamat végén a visszamérés szobahőfokon történt.



A

B

35. ábra Hevítőkemence (Nabertherm¹⁰) és átalakítása

a gravimetrikus mérés kivitelezéséhez (B) kismintákhoz

A kemence optimális térfogata 9,0 dm³, ami lehetővé tette mind a hőmérséklet, mind a nitrogén homogén eloszlását, ezzel a kismintás lebontás mérést.

¹⁰ www.nabertherm.com

Az ajtó átalakításával lehetővé vált a minták folyamatos, légmentes bejuttatása, valamint a kapcsolt hűtővel elkerülhetővé vált a mérésnél a minták idő előtti felhevülése.

A gáz vizsgálata

A VISIT 03H típusú gázanalizátor (36. ábra) kifejezetten biogáz minták vizsgálatára lett fejlesztve.



36. ábra Hordozható típusú gázanalizátor (VISIT 03H)

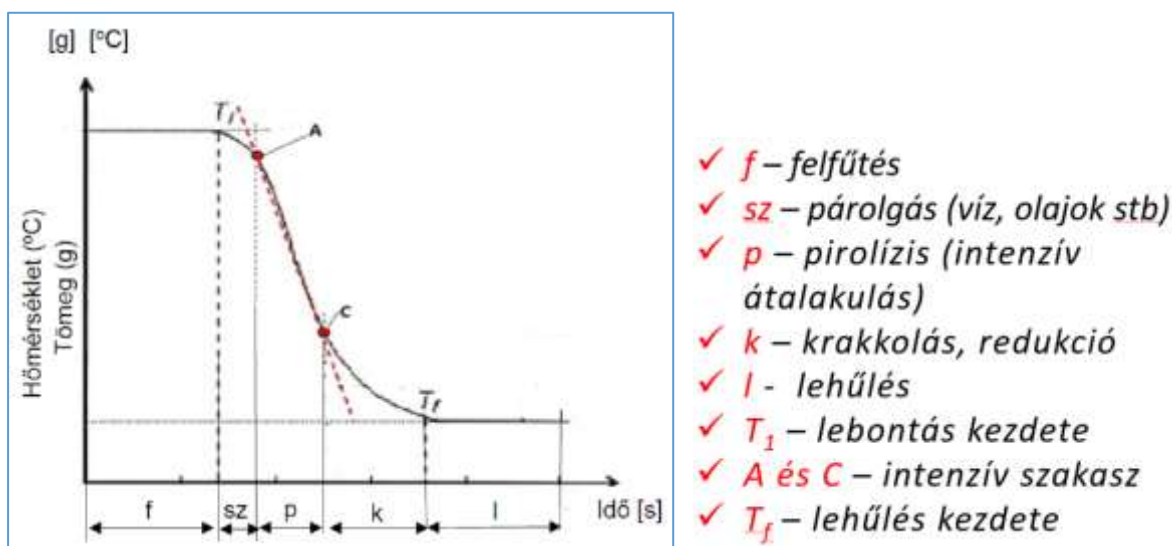
4. táblázat Mérési jellemzők

Megnevezés	Tartomány	Mértékegység
CO	0-60	V/V %
H ₂	0-50	
CH ₄	0-25	
CO ₂	0-100	
O ₂	0-25	
Léghőmérséklet	-30 – +300	°C
Gáz hőmérséklet	-30 – +1200	
Nyomás különbség	-100 – +100	hPa

A CO, CH₄, CO₂ koncentrációjának mérésérét infravörös érzékelők végzik. A H₂ koncentrációt hővezetőképesség-érzékelő adja meg. Az O₂ tartalmat elektrokémiai érzékelő végzi. A hőmérsékletet és a nyomás kiegyenlítést a rendszer folyamatosan aktualizálja.

3.2.2. Hőmérséklet hatása a tömegváltozásra

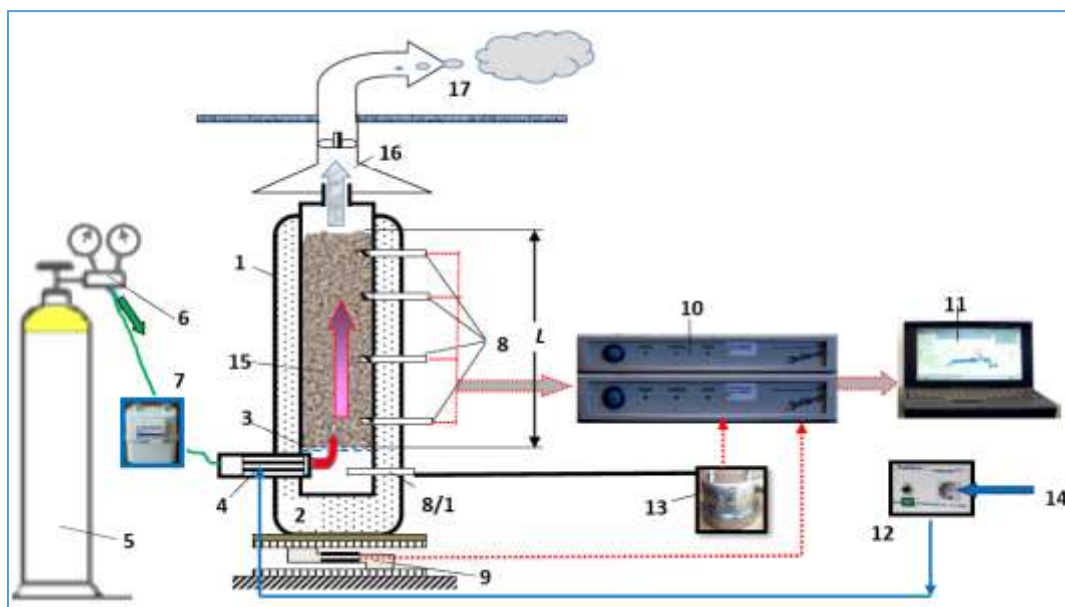
Általában a legalapvetőbb termoanalitikai módszert, a termogravimetriát (TGA) alkalmazzák a pirolízis jelenségének mérésére, modellezésre (FLYNN et al. 1966; LEHMANN et al. 2015). A szerzők (nagyon leegyszerűsítve) a mérés során kapott diagram három szakaszát különböztetik meg (37. ábra).



37. ábra. A TGA diagram jellemző pontjai (saját ábra)

3.2.3. Saját fejlesztések a TGA mérés elvégzéséhez

A különféle anyagok lebontásait az MGI-ben összeállította kísérleti laboratóriumi egységben végeztem (38. ábra). A szigetelt falu egység belső átmérője 100 mm. Egy - egy mérés alkalmával 300-550 g anyag fért el a reaktortérben az alkalmazott anyag sűrűségétől függően. A folyamathoz szükséges energiát 2,0 kW teljesítményű fűtőpatron szolgáltatatta, amelynek a vezérlése a PC egységről történt.



38. ábra Nitrogén gázfűtéssel működő laboratóriumi egység

Ábrák jelei:

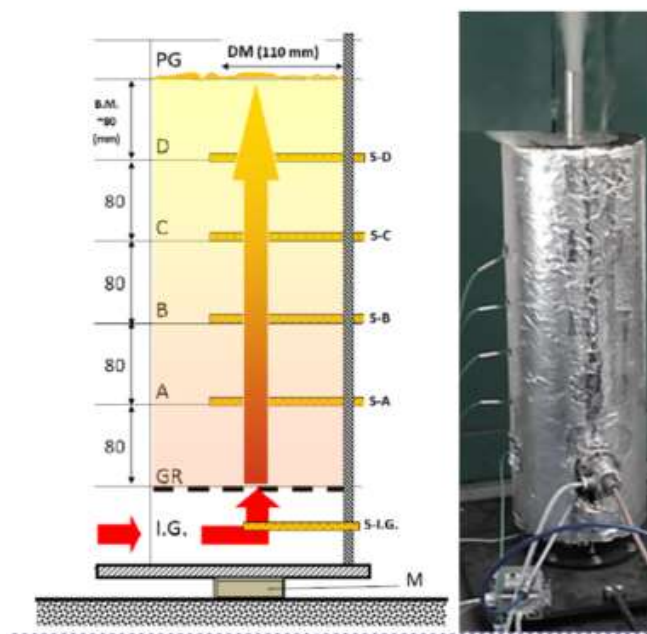
- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1- generátor test, | 9- tömegmérő érzékelő (Hottinger), |
| 2- szigetelés, | 10- adatgyűjtő (több csatornás), |
| 3- anyag rács, | 11- PC, |
| 4- fűtőtest, | 12- fűtésszabályzó, |
| 5- N gázpalack, | 13- gáz nyomásérzékelő,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

A reaktor hossz tengelye mentén 5 db hőelem van, amelyek közül a legalsó (8) a fűtőpatron utáni gáz hőmérsékletét méri, és egyben vezérli a fűtő egységet is a megfelelő hőmérséklet eléréséhez. Ehhez csatlakozik a nyomásmérő (8/1) a kezdeti nyomás meghatározásához.

A reakció során a tömeg csökkenést a reaktor és talpazat közé elhelyezett tenzometrikus mérőcella érzékelt. A berendezéssel maximálisan 600 °C hőmérséklet érhető el.

Függőlegesen fölfelé haladva még négy hőelem lett elhelyezve egyenlő távolságokra (80 mm), melyekkel a kigázosodási hőmérsékleteket vizsgáljuk az idő és a tömegcsökkenés függvényében. A fűtőpatronon keresztül, nyomásszabályzó segítségével nitrogén gázt eresztünk a reaktortérbe, ami az inert atmoszférát biztosítja az oxidáció elkerülése végett. Az átáramló nagy mennyiségű gáznak és a nagy tömegű töltetnek erős hűtő hatása van a rendszerre. Ezért esett a választás egy 2 kW-os fűtőpatronra, melynek teljesítményével ezt a hatást

kompenzálni lehetett, így a 600°C gázhőmérsékletet is elérhetjük. A keletkező termékázt a szabadba vezettük.



39. ábra A szenesítő cső részletesebben és a kiviteli ábrája

Főbb jellemzők az ábra szerint: – I.G. – fűtött inert gáz benyomása a GR tartórács alá, ahol – S-I.G. – a hőmérséklet érzékelőt is van. – A, B, C és D magasságokban (S-A) – (S-D) hőmérséklet-érzékelők. – Az S-D szenzor felett további 80 mm tömegmagasság található, amely felett a PG gáz kivezető nyílása (mintavételnél is használt) található. – M – precíziós mérleg

Az ilyen berendezés kiváló lehetőséget biztosított a különféle anyagok eltérő fizikai tulajdonságainak a mérésére és az összehasonlításokra (LETTNER et al. 2007). Megbízható adatokat adott a fizikai állapotból következően a kezdeti, majd a szén állapot gázáteresztő képességére. A keletkező gáz meghatározásához nem adott pontos értéket, mivel a VIZIT 3H műszer a nagy mennyiségű hidrogén miatt, az egyéb anyagokat nem volt képes pontosan meghatározni.

Ezekre mérésére csak úgy nyílt lehetőség, ha egy újabb berendezést is összeállítunk, amely ehhez viszonyítva eltérő fűtéssel rendelkezett. Ennél gyakorlatilag a szenesedés légmentes környezetben, illetve ismert légbevezetés mellett folyt. A berendezés kivitelét, a 40. ábra mutatja.



40. ábra A közvetlen villamos fűtésű, gázvisszavezetésre alkalmas egység
(1300 °C-ig működtethető)



41. ábra A készülékből kisserelt fűtőtest és az 1000 °C-ra felfűtött állapota.

3.3.A méréseknél használt jellemzők és fogalmak meghatározása

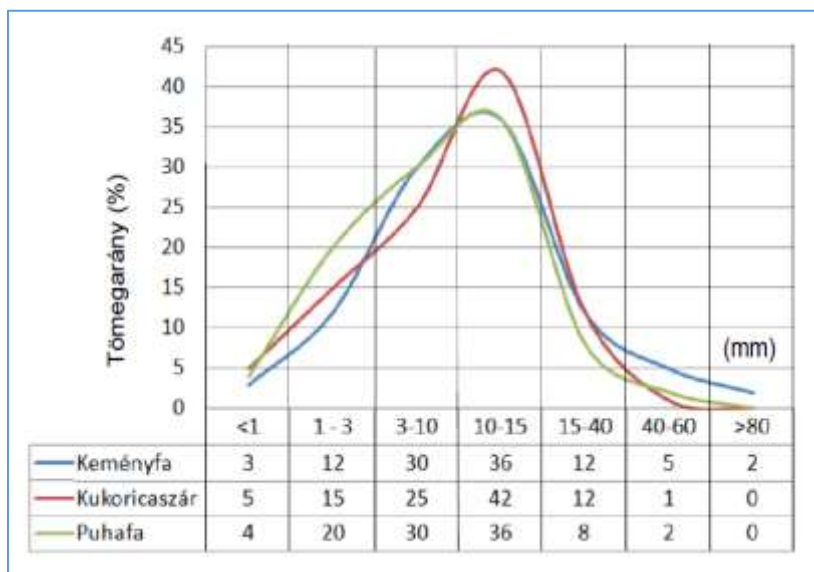
3.2.1. Az aprítás és a célja

A biotömegtömeg anyag aprítását célgépekkel végzik (rendszerint darálók). 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:

$$F_n = F_0 \frac{x_0}{x_n}$$

Az apríték darabok aprítás előtti (x_0) és -utáni (x_n) méretarányai változnak. Ha az apríték darabok méretéből méretosztályokat képezünk, akkor eloszlásfüggvényt rajzolhatunk fel. Három gyakori és vizsgált anyag aprítás utáni rostvizsgálatát szemlélteti a 42. ábra. A

keresztmetszet elsősorban a keményszárú energianövényeknél lényeges, különösen akkor, ha egzakt szecskázó berendezést alkalmaznak. Mulcsozott anyagokból csak speciális aprító berendezéssel lehet kedvezően kiegyenlített hosszúságú aprítékot előállítani.



42. ábra Az aprítékok szemcseméret eloszlásának tömegarányos gyakorisági görbéi

(Saját ábra)

Kirk törvénye (TÓTH et al. 1998) szerint a biomasszák aprítása is jelentős energiaigénnyel jár. Az energia igény az aprítás előtti (x_0) és az aprítás utáni (x_n) apríték darabok méretarányának logaritmusa és az anyag k_a tényezőjétől függ (Ennek értékét az anyagok szilárdsági értékei adják. Meghatározásához pl. a légszáraz anyagnál darabolás során meghatározzuk a darabolás mértékét és megmérjük a felhasznált energiát. Így kiszámíthatjuk az adott anyagra vonatkozó (Kirk - állandó) k_a értéket.

Tehát:

$$W = k_a \ln \frac{x_0}{x_n} \quad (J)$$

A felületek, az aprózottság és az energiaigények arányai:

Felületek és aprózottság:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{x_m}{x_n}$$

Felületek és energiaigény:

$$\frac{A_n}{A_m} = \frac{W_n}{W_m}$$

Ahol:

- A = a szemcsék felülete (m^2)
- n és m = a szemcsék mérete a darálás előtt és darálás után.

Az aprítás energiaszükséglete arányosan nő a szemcsék számának növekedésével, de ebből fakadó felületnövekedés révén nagyobb a szárítás és a lebontás hatékonysága.

3.2.2. A tüzelőanyag sűrűsége

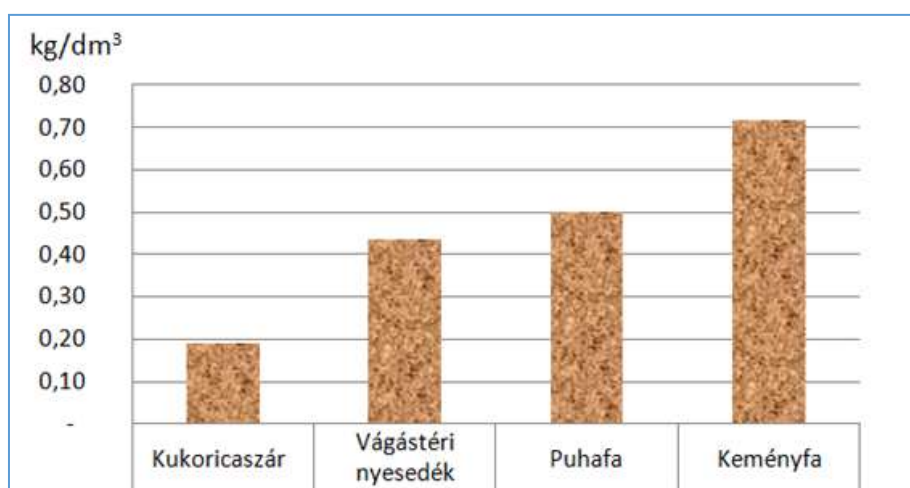
Az anyagok sűrűségében igen jelentős eltérések vannak, amelyek függenek az alapanyag biológiai jellemzőitől, a nedvesség tartalmától és az aprítottság és a tömörítettség fokától.

Például, a fa esetében meg lehet különböztetni a törzs, a kéreg és a tuskó sűrűségét eredeti állapotában is. Ennek megfelelően számottevő eltérések vannak a cellulóz, a hemicellulóz és a lignin tartalomban is. Ezek kihatása jelentős az energia tartalomra és a hamu mennyiségére is. Ezt igazolja a K és Si és Mg tartalomban jelentkező eltérés.

Amíg a fa belsejében és a tuskóban közel azonosak az arányok, a fa kéreg ezeket az anyagokat 4-10 szeres mennyiségben is tartalmazza. Ezeket a részeket tisztán lebontva a hamu mennyisége 200%-al nagyobb lehet.

A tüzelőanyag tömegsűrűsége általában arányos a tüzelőanyag energiasűrűségével. Ezért is a kis halmazsűrűségű anyagokat préssel tömörítik, így nagyobb „anyag-sűrűséget” érnek el.

Préselés nélkül a különféle aprított anyagok sűrűségei jelentősen eltérnek (43. ábra).



43. ábra Néhány vizsgált apríték sűrűsége (~ 15% nedvességtartalomnál)
(BÁCSKAI et al. 2019)

A mezőgazdaság és élelmiszeripar hulladékai strukturálisan igen sokfélék. A pirolízishez fontos a belső energiatartalom ismerete, mivel a lebontás leginkább a saját energiával (hővel) történik.

5. táblázat A jellemzőbb magyarországi alapanyagokenergiatartalma

Alapanyag (apríték)	Fűtőérték (MJ/kg)
Akácfa	18,2
Nyárfa	18,8
Fűzfa	18,4
Gabona szalma	16,7
Repce szalma	17,9
Nád	17,2
Kender	17,3
Kukoricaszár	17,1
Napraforgósár	16,6

Az 5. táblázat szerinti felsorolást még lehetne folytatni, pl.: egyéb faüzemi hulladékok, gabona és élelmiszer feldolgozás-, szennyvízkezelés-, biogáz előállítás maradékai (stb.).

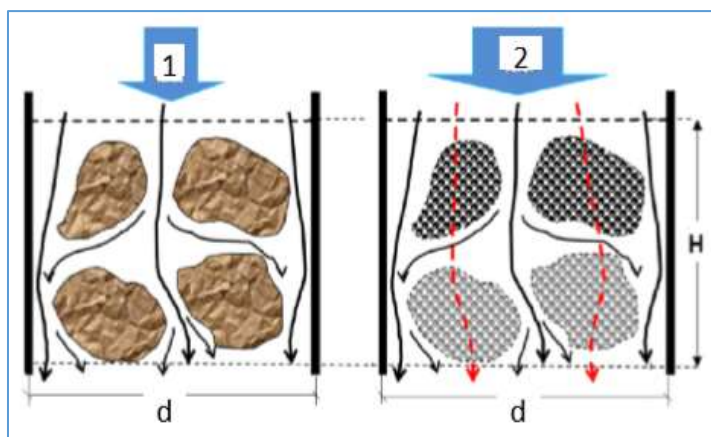
Az anyagokat a felhasználás előtt meg kell vizsgálni, s ha ömlesztett állapotban alacsony az energiatartalmuk, akkor szárítással, aprítással, a lágyszárúaknál pedig apróra szemcsézés után préseléssel (pelettálással) megfelelő állapotra kell hozni.

3.2.3. A szemcsés szén gázáteresztő képessége

3.2.3.1. Az anyagok porozitása

A pirolízis mechanizmusa nagyon összetett, de a folyamata az anyagrészecskék méretétől és a fűtési sebességtől alapvetően függ. A reaktorokba a száradási zónába betáplált anyagon, majd végtermék szénen gáz és levegő keverék áramlik, jelentősen meghatározva a folyamat sebességét és végső soron a minőséget.

Az eltérő geometriai alakú anyagszemcsék egymásmelletti elhelyezkedése (porozitása), a hézagok mérete, az anyag „tömörsege” határozza meg a halmaz gázáteresztő képességét. Eltérés van a szárított kezeletlen biomassza apríték gázvezető képessége és a porózus bioszén között, mivel a bioszén a sok nyitott pólusa miatt a gáznak „átjárható”.



44. ábra A gáz áramlás a fa és a bioszén szemcséknél
(1- fa szemcséknél, 2 – szén szemcséknél) (saját ábra)

A porozitás meghatározásához térfogatokat, és/vagy sűrűségeket kell mérni.

A **relatív hézagtérfogat (porozitás - ε)** a szemcsék közötti hézagtérfogatnak az összes térfogathoz viszonyított értéke (AHMED 2010):

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

ahol:

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

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

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

A szemcsézett közegen át a gáz átáramlásának intenzitása, a rendszer nyomás-gradiensével arányos (*Darcy - Klinkenberg-törvénye a ritkított rendszerben fejezi ki a gáz átteresztését,*

vagyis amikor a molekula 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):

$$q_h = \frac{\Delta p}{h}$$

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

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

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

ahol:

- $\varepsilon =$ a szemcsés halmaz porozitása,
- $\rho =$ a gáz sűrűsége [kg/m^3],
- $\mu =$ 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, szálal apríték 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. Leginkább homogén szemcsézettnek a kemény pelletek számítanak, amelyeknél a vezetőképesség közel állandó lehet a teljes rétegvastagságában. Pirolizálódás során az erősen inhomogén anyagoknál az alsó és felső rétegek ellenállása eltérő. Erős hamuképződéssel a vezetőképesség romlik. A sok homokot, port tartalmazó anyagok is hasonló jellemzőket adnak.

3.2.3.2. Áramlási intenzitás és vonal menti sebesség

Az inhomogén anyagoknál az áramlási intenzitás matematikai formulákkal körülményesen írható le. Sokféle elmélet ismeretes. Az általános Darcy - Klinkenberg törvényéből¹¹ kiindulva a folyamat egyszerűbben magyarázható:

¹¹ Darcy- Klinkenberg törvénye, ami a porózus zóna nyomás gradiensét írja le lamináris áramlású közeg esetén. A kalkulációnál a csak a könnyebben áttekinthető egydimenziós alak szerepel.

<https://hu.wikipedia.org/wiki/Darcy-t%C3%B6rv%C3%A9ny>

$$q_i = -\kappa \frac{\Delta p}{h}$$

A negatív előjel arra utal, hogy a rétegben a nyomáskülönbség felfelé haladva fokozatosan csökken, tekintve, hogy a gázáramlás az alsó nagyobb nyomású helytől a felső, ~ atmoszférikus nyomású tér felé irányul. Lefele irányuló áramlásnál értelemszerűen hasonló a helyzet, mivel ekkor a felső szint van nyomás alatt. Abból indultam ki, hogy a két oldalról zárt ágyban lévő porózus rétegen a közeg csak nyitott felületekre merőlegesen áramolhat keresztül.

A rétegvastagság és a gázvezetés teljes felületi mérete (a kettő viszonya) a teljes tömegáramot meghatározza ($\dot{Q}$):

$$\dot{Q} = -\kappa A \frac{\Delta p}{h}$$

Például a kísérleti modell felső végén kiáramló gázhozam $\dot{Q}$ nagysága [m^3/s , ill. kg/s] függ a bent lévő anyag vezetőképességétől, az áramlási keresztmetszetből és a nyomás gradienstől.

Tehát, q_i az áramlási intenzitás sebesség dimenziójú.

$$q_i = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (\text{m/s})$$

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

Makroszkopikusan szemlélve átlagos gázsebesség értékét (felületi átlagértéket ad). Az anyagalmaz 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 halmazon 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. Még pelletteknél ennek elvi lehetősége adott,

de a pelletszemcsék bomlási reakciója közbeni az alakváltozás kisebb, különösen akkor, ha a nyomásváltozás állandó.

Általánosan elfogadott, hogy ezek:

- kihatnak a kémiai reakcióra,
- a hőközlés intenzitásával pedig a tömegátadás (szilárból-gőz,-gáz) szabályozható.

Végül is (egyszerűsítve): mennyiségi szempontból a pirolízis a fizikai és kémiai folyamatok közötti kölcsönhatás.

A hőenergia, főleg a hővezetés révén a részecskékbe áramlik. A szilárd anyag által felvett, majd keletkező hő és hőáramlás révén az exotermikus másodlagos reakciók befolyásolhatják a bomlást. De az illékony anyagok kiáramlásából származó konvekciós hő gátolja a befelé irányuló hőáramlás. Az illékony anyagok egy részét is vissza lehet kényszeríteni (a létrehozott vákuummal), ami újabb kémiai reakciókat vált ki. Mindezeket a szemcsék mérete jelentősen meghatározza.

Az egészen kicsi anyag részecskékben a hő és a tömegátvitel nehezen különíthető el. Nagyon nagy részecskéknél a pirolízis csak egy vékony reakcióba lépő rétegben fordulhat elő, amely az anyag belseje felé mozog, és ezzel egy zsugorodó magmodell írható le. Az eltérő sűrűségtől és az adott pont hőmérsékletéről függ, hogy valójában a pirolízis hogyan megy, vagy nem megy végbe. Az utóbbit közbelső termékek jellemzik, és eltérő a viselkedés. Az aprított biomasszáknál ezért is van előírás az aprózottság mértékére (akár égetésről, akár pirolízisről van szó).

6.táblázat Méretre vonatkozó előírások, ha kereskedelmi forgalomba kerülnek az anyagok*

Apríték	Megengedett méretek				Megengedett szélsőértékek	
	max. 4%	max. 20%	60-100%	max. 20%	max.	
Osztály	Apríték méret mm				Keresztmetszet cm ²	Hossz cm
G30	<1,0	1-2,8	2,8-16	>16,0	3	8,5
G50	<1,0	1-5,6	5,6-31,5	>31,5	5	12
G100	<1,0	1-11,2	11,2-63	>63,5	10	25

*Megjegyzés: Faapríték méret szerinti besorolása ÖNORM M7133 szerint

(MADÁR et al. 2014)

4. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

4.1. Anyagi jellemzők

4.1.1. Nedvességtartalom és fűtőérték

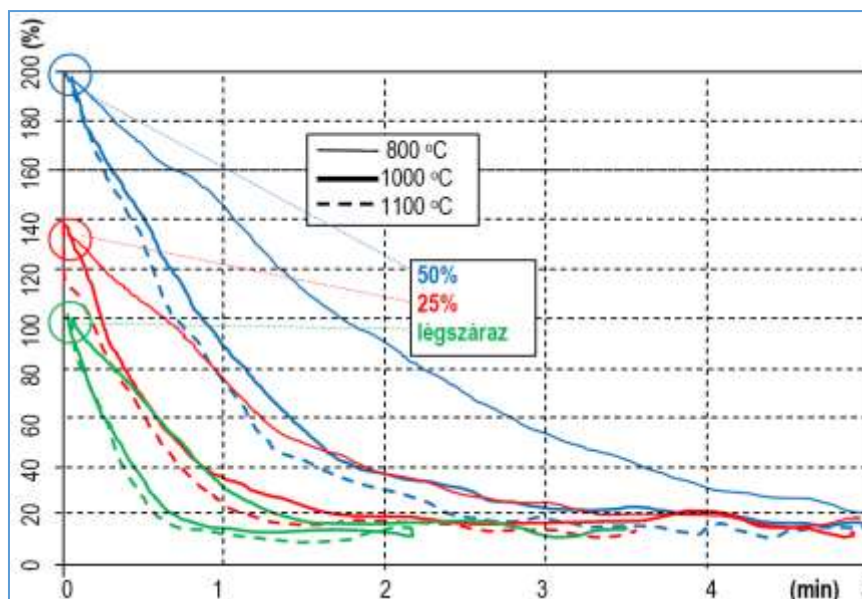
A nedvesség meghatározását fontosnak tartottam, mivel a víz éghető gázokká válik, és ronthatja a folyamat hatásfokát. A megkötött állapotban lévő víz csak szárítással, vagy kigőzöléssel távolítható el, ami energiát von el a folyamatból. Az illóanyagoknak kipárolgása már alacsony hőmérsékleten elkezdődik.

7. táblázat A fűtőérték nagysága a vizsgált anyagoknál, az adott nedvesség mellett

Apríték	Nedvesség (%)	Fűtőérték (MJ/kg)
Kukoricaszár	6,22	16,51
Vágástéri vegyes nyesedék	23,94	13,77
Puhafa	18,58	15,74
Keményfa	12,73	16,86

4.1.2. A tömegcsökkenés a hőmérséklet függvényében (a rendszer fontos jellemzője)

Kaloriméterben a légszáraz anyagot 100%-nak véve a nedvességtartalmat 25 és 50%-ra növeltük. A fa tömegcsökkenés arányát az időtartam függvényében mértük három magas hőmérsékleten (45. ábra).

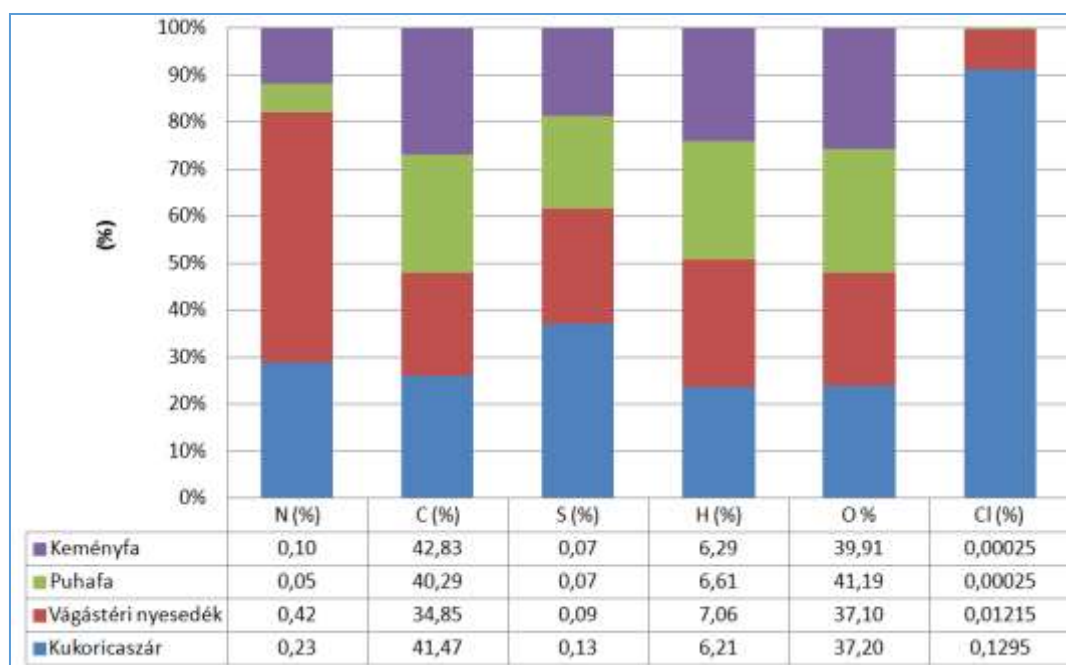


45. ábra Tömegcsökkenés aránya az időtartam függvényében eltérő hőmérsékleten és nedvességtartalomnál

Megállapítható, hogy a nedvességtartalomtól függetlenül a visszamaradó anyag mennyiségében az eltérés nem számottevő, viszont a szükséges időtartam nagymértékben függ az anyagok nedvességtartalmától, de még nagyobb mértékben a fűtési hőmérséklettől.

4.1.3. A biomasszák belső összetétele elemek szerint

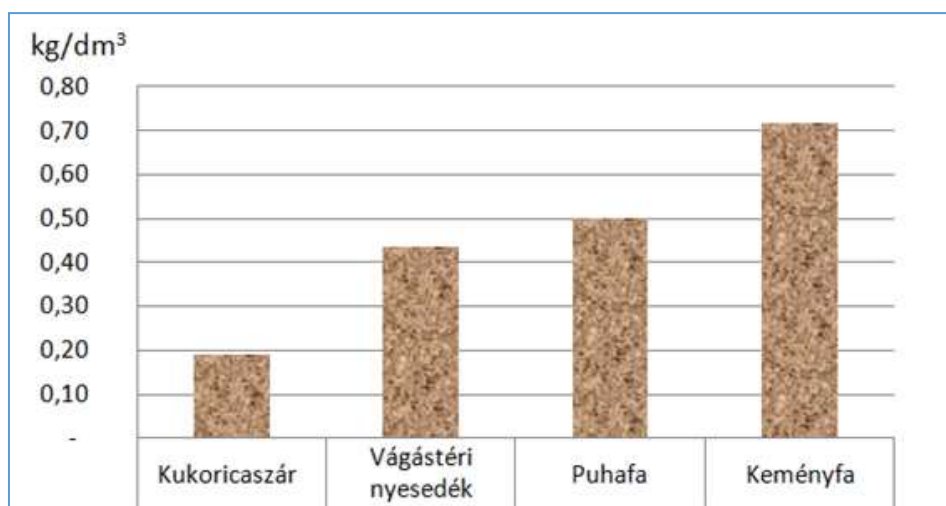
Vizsgálatokat azokra a biomassza félésekre végeztünk, amelyekkel a későbbiekben további más célú vizsgálatokat is folytattunk. A kezdeti elemi összetétel lényeges hatással van a lebontás során keletkező (átalakuló formátumok) összetételére (46. ábra).



46. ábra Néhány biomassza anyagi összetétele (MGI labor)

4.1.4. Az aprított biomasszák sűrűsége

Az anyagok sűrűségében igen jelentős eltérések vannak, amelyek függnak az alapanyag biológiai jellemzőitől, a nedvesség tartalmától és az aprítás és a tömörítés mértékétől (47. ábra). A tüzelőanyag tömegsűrűsége általában arányos a tüzelőanyag energiasűrűségével. A kis halmazsűrűségű anyagokat préssel tömörítettük. Tapasztaltam, ha a fafélék nagyobb részeit tovább daraboljuk, aprítjuk, megváltozott a térfogatra vetített tömegük aránya. A darabolás mértékétől függően 30-50% sűrűség változás a jellemző (a gyakorlati értékekre) légszáraz állapot esetén.

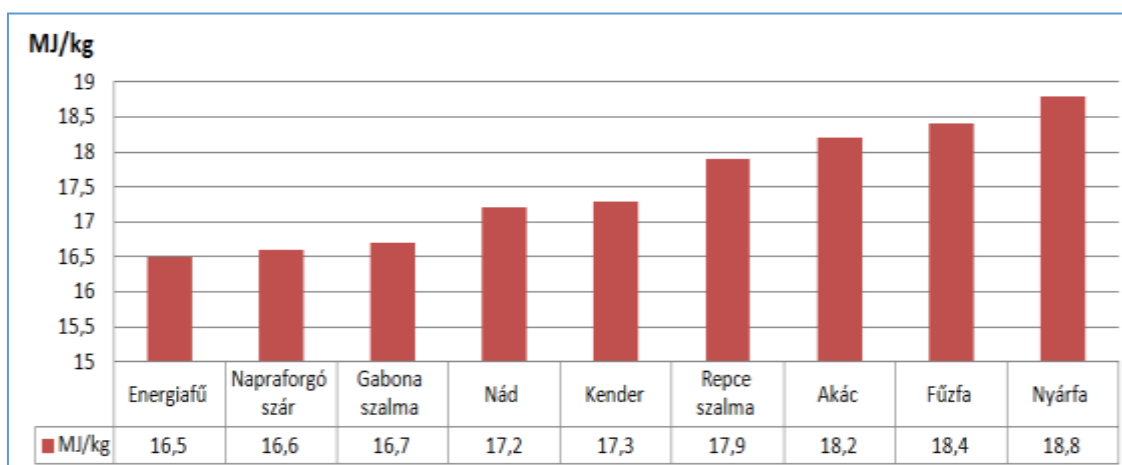


47. ábra A vizsgált aprítékok sűrűsége (~ 15% nedvességtartalomnál)

(Készült: az MGI labor berendezésével)

4.1.5. A sűrűséggel megváltozó energiatartalom

A darabolást követően az anyagot préseltem, a sűrűség 40-100 %-al növekedett. Ennek mértéke a sűrítés mértékétől és pl. a pelleték átmérőjétől és hosszúságától függ. E kettő aránya is változó, 1,5-3,5 értékű is lehet. Különböző aprított (általában vizsgált) anyagok energiatartalmát a 48. ábra szemlélteti.



48. ábra A tömegre vetített energiatartalma aprítás után (MGI labor)

A fa aprítékból készült pelleték belső jellemzői közel azonosak (MGI laborban végzett vizsgálatok, 8. táblázat).

8. táblázat Faaprítékból készült pelletek belső jellemzői

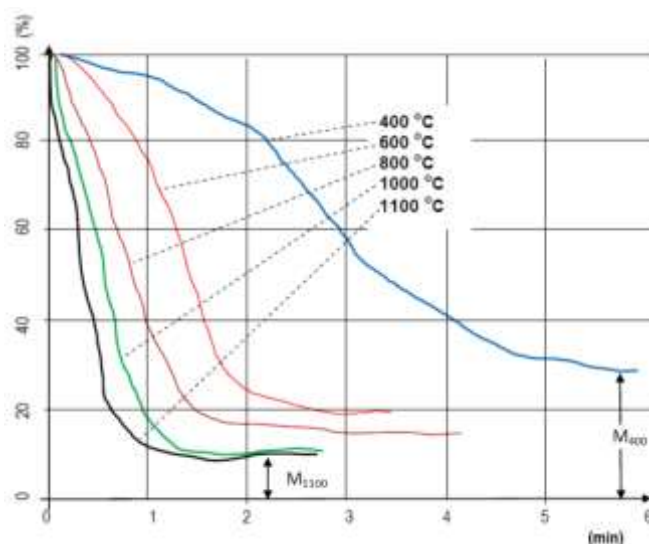
A pellet anyaga	C	S	H	O	Cl	Víz	Hamu	N	Fűtőérték (10 % W)
	(%)								(MJ/kg)
Puhafa	45,61	0,11	4,76	41,19	0,00	6,40	1,75	0,18	18,06
Keményfa	45,84	0,06	5,62	39,91	0,00	7,80	0,58	0,18	19,02
Fenyő	48,35	0,10	5,33	39,72	0,01	6,23	0,17	0,10	19,10
Fűzfa *	44,64	0,12	4,67	37,99	0,03	7,46	4,32	0,78	18,10

*Megjegyzés: vékonyzárú un. energiaültetvényből készült (BÁCSKAI 2018)

4.2. Hőmérséklet hatása a tömegváltozásra

4.2.1. A fűtési hőmérséklet hatása a tömegcsökkenésre

Általában a legalapvetőbb termoanalitikai módszert, a termogravimetriát (TGA) alkalmazzák a pirolízis néhány¹² jelenségének mérésére, modellezésre. Az FVM INAIK laboratóriumában felvett görbék (49. ábra) jól mutatják a hőmérséklet hatását a tömegcsökkenés mértékére.



49. ábra A TG görbék alakulása a fűtés idejétől és - hőfokától függően

Mérés az átalakított Nabertherm kemencével történt, MGI.

A vizsgálandó anyag a hevítő kemencében lévő az analitikai mérleg mérőegységére lett helyezve. A hevítés közben a tömegváltozás pontosan rögzíthető a hőmérsékletváltozás függvényében. A minta állandó hőmérsékleten tartásához a kemence fűtését a pásztázó érzékelő

¹² Pl: (Flynn J.H, et al.: 2015; Lehmann J., et al.: - 1966).

szabályozza. Figyelemre méltó, hogy a magas hőfokokon az un. száradási szakasz hiányzik, mivel az anyag a hirtelen hősök hatására azonnal megszabadul a nedvességtől.

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

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

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

– Ahol $x = 400 - 1100 ^\circ\text{C}$.

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

4.2.2. A fűtési sebesség ($^\circ\text{C}/\text{min}$) hatása a tömegcsökkenésre

E hőbontási folyamatot (a lebontási sebességet) a *kutatócsoportunk is modellezte*¹³ a következő összefüggésből kiindulva:

$$dX/dt = k(T)f(X),$$

Az összefüggésben:

- $X = (m_0 - m_t) / (m_0 - m_r)$ - az anyag lebomlása (konverziója):
- m_0 - a kiindulási anyag,
- m_t - az átalakulás pillanatnyi helyzete és
- m_r - a maradék anyag
- A reakció (konverzió) modellje az $f(X)$
- A konverzió hőfüggő tényezője pedig a $k(T)$

A k sebességi állandó:

$$k = A_g \exp\left(\frac{-E_{\text{ü}}}{RT}\right)$$

ahol:

- $-E_{\text{ü}}$ – az aktiválási energia (kJ mol^{-1})
- T - hőmérséklet (K)
- R - gázállandó ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)
- A_g – gyakorisági tényező (min^{-1})

FLYNN (1966) szerint az $f(X)$ olyan reakciómodell, amelyben az

n - a tömeghányad fennmaradó részének kitevője

$$f(X) = (1-X)^n$$

A fentebbiek beírásával az anyag lebomlási sebessége:

$$\frac{dX}{dt} = A (1 - X)^n \exp\left(\frac{-E_{\text{ü}}}{RT}\right)$$

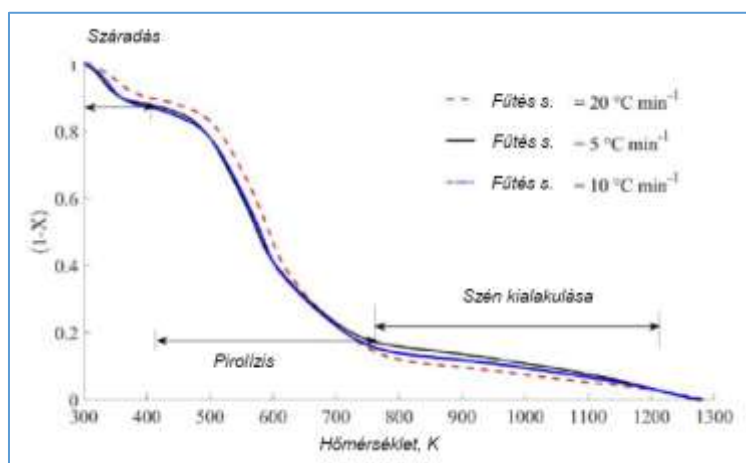
¹³ Alok DHAUNDIYAL, Laszlo TOTH.: 2018 : *Determination of Kinetic Parameters for the Thermal Decomposition* Szent Istvan University Mechanical Engineering Doctoral School, ,
<https://www.degruyter.com/view/j/rtuect>

A tömegváltozás azonos anyagnál is eltérő, mivel a fűtési sebesség az aktiválási energiától függ.

Egy adott anyagnál a konverzió három szakaszból áll (50. ábra):

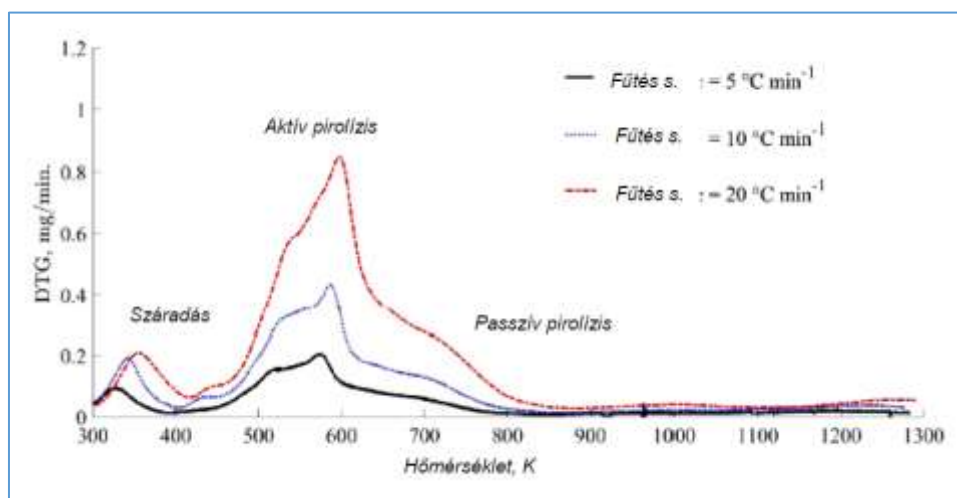
1. Száradás (szárítás)
2. Illó anyagok elpárolgása és gázképződés
3. Gázképződés és szenesedés

Ez nem csak a kismintákban inert gázos vizsgálatoknál, hanem a vastagabb rétegű fixágyas pirolízisnél is igaz (lásd később).



50. ábra A vizsgálat során, egy adott anyagnál kapott konverzió, 3 fűtési sebességek esetén

Ezt a tömegváltozást a lebontási intenzitásra (mg/min) kiértékelve és a hőbontási hőmérsékletek függvényében ábrázolva, a 51. ábra szerinti jelleggörbe adódott.



51. ábra A tömegváltozás sebessége (inert gázban) különböző fűtési intenzitás mellett
 Különböző szakaszok: dehidratáció (száradás), aktív (gázképződés) és passzív (szénképződés) pirolízis.

A bemutatást (a teljesség igénye nélkül) azért tartottam szükségesnek, mivel a kísérleti berendezésünknel (labor és valós) is hasonló jelenség tapasztalható, de azok közelebb állnak a gyakorlati folyamathoz, mivel az anyagi struktúrák is hatást gyakorolnak. Ennek a folyamatnak az elemei az általunk kapott diagramokon is megjelennek, holott a mérések célja eltérő volt, figyelemmel arra, hogy az alap összefüggés nem más.

4.3. Anyagrétegek mértékének hatása a lebontásra (TG jellegére)

E mérésekhez a saját készítésű kísérleti egységet használtuk. A hengeres mérőtartályba helyeztünk be a 300-500 g mennyiségű anyagot. Az eltérő tömegsűrűség miatt annyi anyagot helyeztünk be, hogy a felső hőmérsékletérzékelő fölött az anyag legalább 10 mm legyen. A mérést nitrogéngáz fűtésével végeztük. Rövid időtartamú (1,0 s) mintavételezéssel lehetőség nyílt a tömegváltozás értékein túl az idő szerinti trendek a meghatározása is. A mérés során rögzítve lett a maradék anyagmennyiség és a hőmérséklet változása is az anyagghalmaz különböző pontjain (fűtési sebesség).

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 paraméterek

- Idő függvényében a tömegváltozás (s - g)
- Idő függvényében a hőmérsékletváltozás a mérési pontokon (s - °C)
- Idő függvényében a nyomásváltozás a biomassza alatt (tartó rács alatt) (s - kPa)
- Idő függvényében gázáram (s - liter/min)

A mérés folyamata

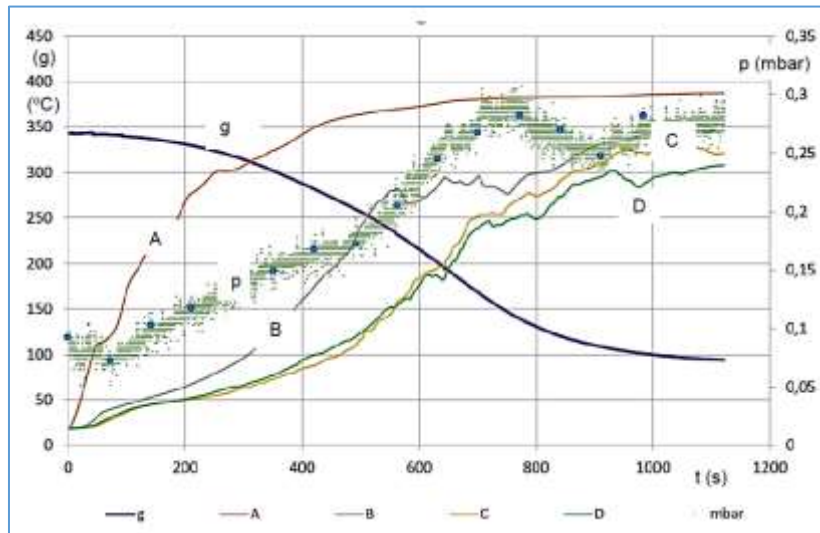
- 1) A mintavétel gyakoriságának beállítása: 1,0 s
- 2) Mérleg tárazása
- 3) Az anyag betöltése
- 4) Anyag tömeg megállapítása
- 5) Mérési hőfok beállítása (pl. 400°C) a villamos fűtésű kerámia testen.
- 6) Gázszelep kinyitása
- 7) A nyomás beállítása és rögzítése
- 8) A gáz áramlási intenzitásának meghatározása (~ 130-170 liter/min)

9) A fűtés indítása, a gáz szeleppel és a villamos vezérléssel

10) A tömegváltozás mérését a stabilizálódásáig végeztük

A mérések során igen nagy excel formátumú adatbázisokat (10000-20000 adat/mérés) kaptunk. A hőbontás során kapott változások jellegét az 52. és 53. diagrammokon, az adatokat a 9., 10. és 11. táblázatokban mutatom be.

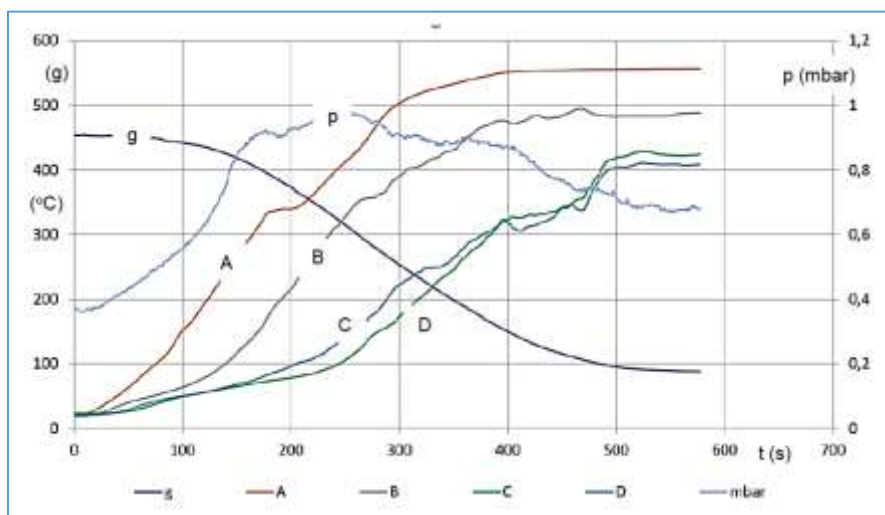
4.3.1. Keményfa szenesítése (mintavétel sűrűsége: 1,0 s)



52. ábra Keményfa (G30) szenesítése (400°C)

Az ábrák jelei:

g = Tömeg, $^{\circ}C$ = Hőmérséklet, A - Felső hőérzékelő, B és C = Középső érzékelő, D = Alsó érzékelő, p = Az átáramlás során mért nyomásváltozás



53. ábra Keményfa (G30) szenesítése (600°C)

9. táblázat Keményfa szenesítésére jellemző adatok (400-600 °C) (a 37. ábra szakaszainak megfelelően)

		Jel	Idő (s)	Tömeg m* (g)	Idő (s)	Tömeg Δm (g)	Lebont. intenzitás (g/s)	Maradék (%)
400 °C	Kezd.	T ₁	20	630	2780	380	0,136	39,6
	Vég	T _f	2800	250				
600 °C	Kezd.	T ₁	0	660	1000	480	0,48	27,2
	Vég	T _f	1000	180				

*m = kezdeti tömeg,



54. ábra Keményfa apríték szenesítés előtt és után

4.3.2. Puhafa apríték szenesítés

10. táblázat Puhafa apríték szenesítése, jellemző adatok (440-600 °C) (a 37. ábra szakaszainak megfelelően)

		Jel	Idő (s)	Tömeg m* (g)	Idő (s)	Tömeg Δm (g)	Lebont. intenzitás (g/s)	Maradék (%)
400 °C	Kezd.	T ₁	0	475	2980	335	0,11	29,4
	Vég	T _f	2980	140				
600 °C	Kezd.	T ₁	20	515	880	485	0,55	25,2
	Vég	T _f	900	130				

*m = kezdeti tömeg,



55. ábra Puhafa szénésítés előtt és után

A fenti mérésekből megállapítható, hogy a keményfánál nagyobb mennyiségű a maradék a magasabb és alacsonyabb hőmérsékletnél egyaránt.

11.táblázat Tömeg változás intenzitása az idő és a hőmérséklettől függően

Szakasz	Jel	Idő (s)	Tömeg (g)	Idő (s)	Tömeg változás (g)	Lebont. intenzitás (g/s)	Maradék tömeg (%)	Tömeg arány p szakasz. (%)
400 °C								
sz + p + k	T ₁	101	470	sz + p + k	325	0,112	30,85	
	T _f	3001	145	2900				
A - C	p	1120	406		166	0,227		59,11
		1850	240	730				
600 °C								
sz + p + k	T _i	20	515	sz + p + k	375	0,425	27,18	
	T _f	901	140	881				
A - C	p	401	450		270	0,9		40
		701	180	300				

Ebben a vizsgálatból azt állapítottuk meg, hogy az alacsonyabb 400°C hőmérsékletnél, mind az intenzív lebontási, mind a teljes szakaszban nagyobb a maradék mennyisége. Ebből következik, hogy szénkészítésnél célszerű az alacsonyabb hőmérséklet irányában kezdeményezni. 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 redukciót is) a jellemző összefüggés kemény fánál:

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

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

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

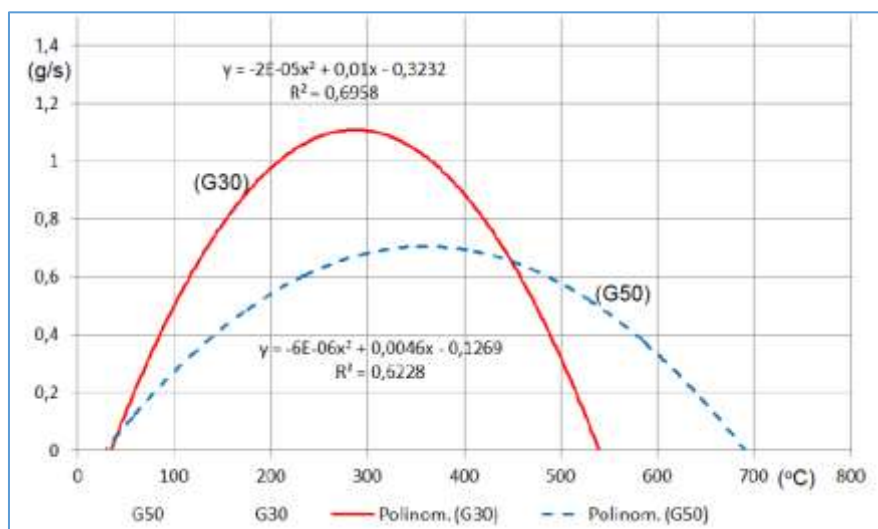
A jellemző összefüggés csak az intenzív lebontási szakaszra:

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

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

A magasabb hőfokon a maradék ~10%-al kevesebb.

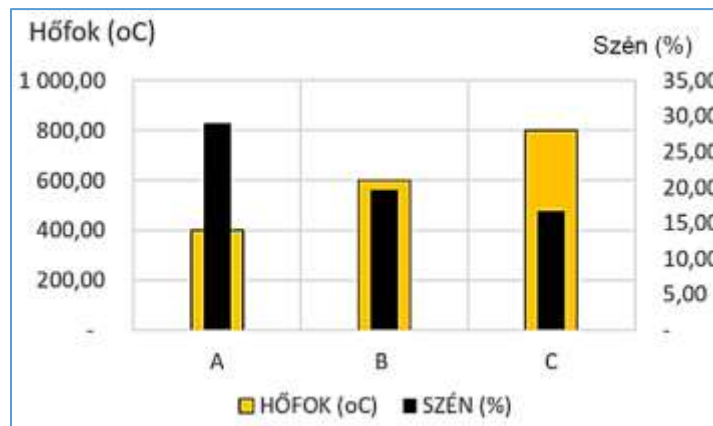
A kisebb szemcsézettségű G30-as anyagnál az intenzív fűtési szakasz alacsonyabb hőfokon kezdődik és ~ 37%-al nagyobb csúcserőten (56.ábra). Ebből következik, hogy a nagyobb aprítottságnál célszerű kisebb fűtési sebességet megválasztani.



56. ábra A fűtési hőfok és a lebomlás sebessége az intenzív szakaszban
(A-C szakasz deriváltjai, 53. ábra)

Hevítési hőfok és a szén mennyiségének aránya a szárazanyag függvényében

A laboratóriumi berendezésünkben azonos minőségű és nedvesség tartalmú fával három hőmérsékleten, háromszoros ismétléssel megvizsgáltam, hogy a maradék szén mennyisége milyen mértékben változik. Az eredményeket az 57. ábrán szemléltetem. Megállapítható, hogy 400 °C hőmérsékletnél a maradék anyag mennyisége még 30% volt (A), amely 800 °C-nál 16 (C) százalékra csökkent. E berendezésnél a lebontás légmentes körülmények között történik (a műszer tökéletesen le volt zárva), az égéshez csak az anyagban és a halmaz pólusaiban lévő levegő biztosított oxigént. Egyértelmű, hogy a hőmérséklet növekedésével a maradék anyag mennyisége csökken.



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

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 ($\text{kg/kg} \times 100$),
- $x = a$ mérési (fűtési) hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$).

4.3.3. Gáz visszavezetése

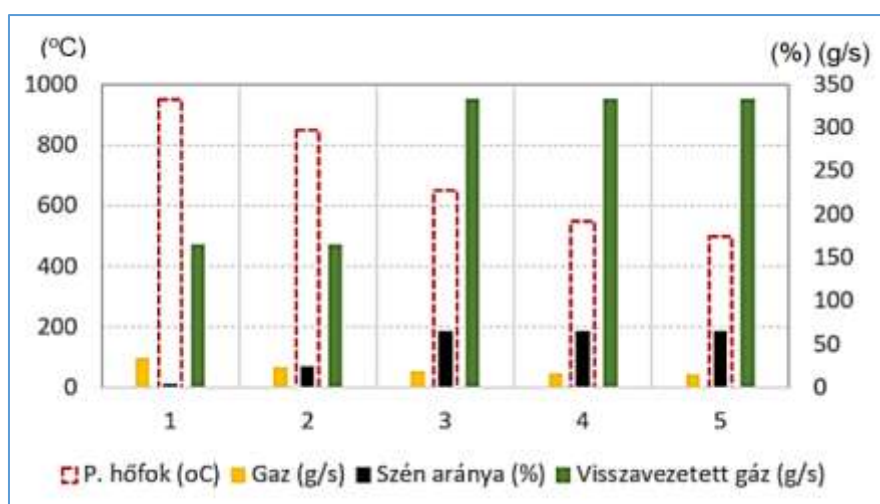
Az irodalmi források szinte egyértelműen arról szólnak, hogy az elsődleges gáz visszavezetése a redukciós szakaszban előnyös, mivel ezzel további átalakulások jönnek létre a gáz tisztaságára, de ez igaz a szén szerkezetére is. Ebből a célból a villamos fűtésű berendezéssel végeztünk kísérletet úgy, hogy a termelődött gázt visszavezettük az alsó égési zóna fölé, ~ 10 mm-rel. A gáz mennyiségét hagyományos gázmérővel igyekeztünk meghatározni. A gázmérő ugyan nem adott elfogadható pontosságot, de a trend megítéléshez alkalmasnak találtam (ezért a gáz keletkezését a tömegváltozásból következtettem),

Arra törekedtem, hogy a bevitt anyag nedvességtartalma minden mérésnél (az ismétléseknél is) azonos legyen: 17-22%. A mérésekből készült 61. ábráról és a 12. táblázatból következtetni lehet arra, hogy a hőmérséklet növelésével a gáz mennyisége növekedett (meglátásom szerint nagyobb mértékben, mint ami a mérés hibájából fakadhat), miközben a szenesedő anyag mennyisége csökkent.

Tekintve, hogy a mérést a teljes lebomlásig végeztem a legmagasabb hőmérsékleten már csak kis százalékban szénnel kevert hamu maradt vissza. E kísérlettel azt kívántam kimutatni, hogy a gáz visszavezetése nem okoz gátló változásokat az oxidációs tér és a redukciós tér határán.

12.táblázat Gázvisszavezetés hatása a szenes maradékra

Mérés jele	Fűtési hőfok	Gáz	Szén aránya	Visszavezetett gáz
	(°C)	(g/s)	(%)	(g/s)
1	950	35	4,9	166
2	850	24	24,5	166
3	650	19,2	65,6	333
4	550	16,7	65,7	333
5	500	15,5	65,7	333



58. ábra Gázvisszavezetés hatásaa a szenes maradékra

A diagramban szerellő tényezők trendjét az alábbi összefüggések jellemzik:

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

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

$$R^2 = 0,942$$

A szén %-os aránya a kivezetett gáz tömegáramától függően az ($x = 35 - 15,5$ g/s) tartományban:

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

$$R^2 = 0,8989$$

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

$$y = -0,1425x + 145,03 \quad (\%)$$

$$R^2 = 0,9204$$

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

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

$$R^2 = 0,8884$$

Ellenőrzés céljából, kifejezetten a fixágyas pirolízis rendszerek modellezésére készített szoftver felhasználásával vizsgáltam a gáz és szénképződést. A 13. táblázatban és 62. ábrán felismerhető tendencia egyértelműen az előzőkkel konvergál. Tehát **a hőmérséklet növelésével a gáz aránya növekszik, a szén pedig csökken.**

13. táblázat A szén és a gázhozam alakulásának arányai hőmérséklettől függően a REAKTÍV ZÓNÁKBAN (3x-os ismétléssel)

A mérés szakasz jele (x)	Hőmérséklet	Bioszén				Gáz			
	($^\circ\text{C}$)	(%)				(%)			
	Kezdeti: 23 $^\circ\text{C}$	7 (%) Víztartalom		Átlag		0 (%) Víztartalom		Átlag	
1	425	71	65	76	70,7	8	15	13	12,0
2	450	79	71	83	77,7	13	17	11	13,7
3	500	82	77	83	80,7	14	21	9	14,7
4	550	71	65	72	69,3	22	16	23	20,3
5	600	48	45	51	48,0	41	44	33	39,3
6	630	28	26	27	27,0	55	59	52	55,3

A **gáz** változása (az átlagok szerint, 59. ábra):

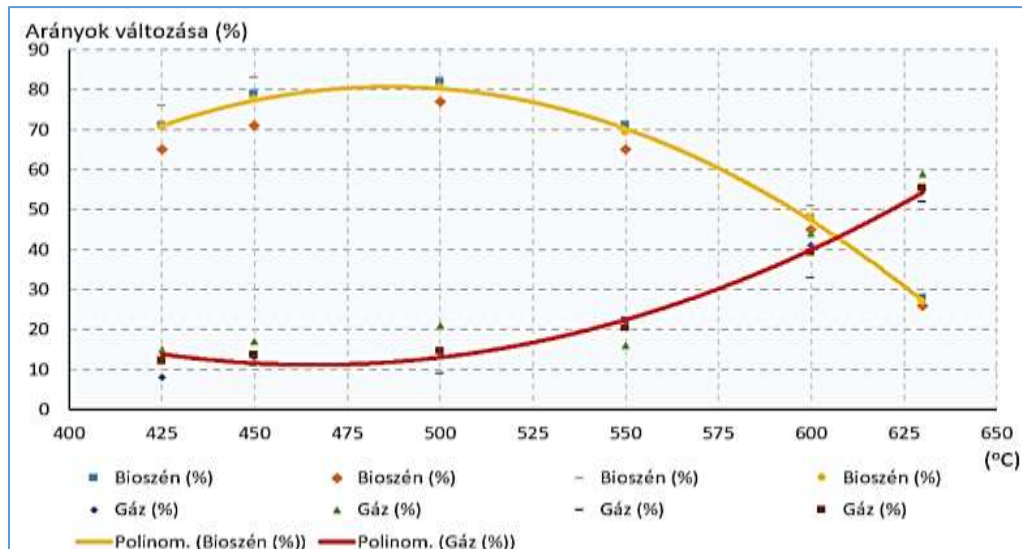
$$y = 0,0026x^2 + 2,524x - 533,16; \quad R^2 = 0,9992$$

$y = (\text{összes behelyezett anyag tömege/keletkezett gáz tömege}) \times 100$

A **szén** változása (az átlagok szerint):

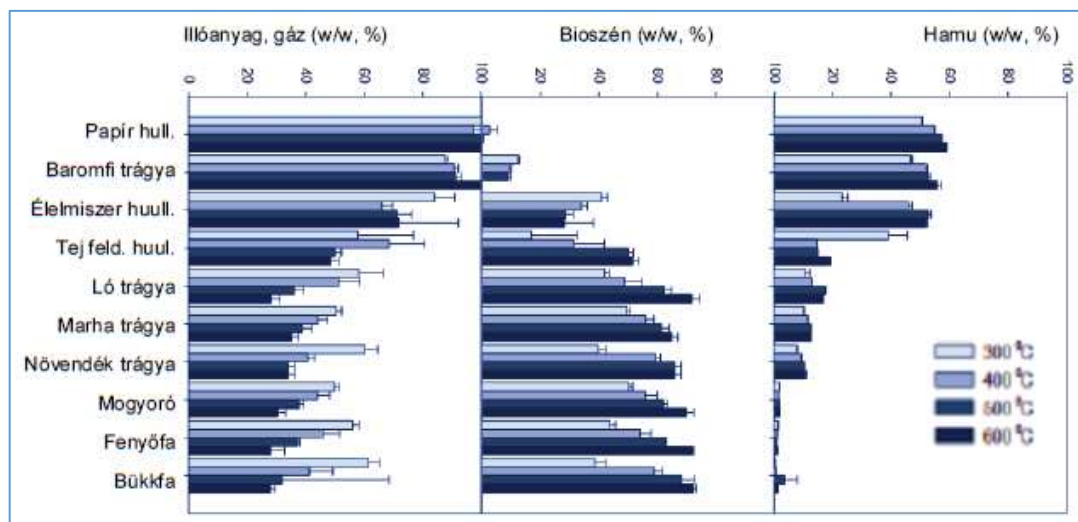
$$y = 0,0016x^2 + 1,4944x - 385,42; \quad R^2 = 0,9893$$

$y = \text{a szénmennyiség változásának százalékos arányai} \quad (\text{összes behelyezett biomassza tömege/keletkezett szén tömege}) \times 100$



59. ábra A szén és a gázhozam alakulásának arányai hőmérséklettől függően a reaktív zónában¹⁴

Tendenciában hasonlóak ENDERS et al. (2012) eredményei (60. ábra), akik a hőmérséklet változtatásánál többféle anyag termékeinek százalékos arányát (w/w) vizsgálták. A vizsgált anyagok termékeinél a nagyobb hőfokon a hamu aránya és a szén aránya nőtt, az illóanyag és gáz (általában) együttesen csökkent.



60. ábra Különbféle anyagok pirolízisének a termékek arányának (w/w) %- os változásai a hőmérséklettől függően

¹⁴ (Saját ábra. Készült az KLEIN et al. 2002 fix ágyas rendszerre készített szoftvere alapján).

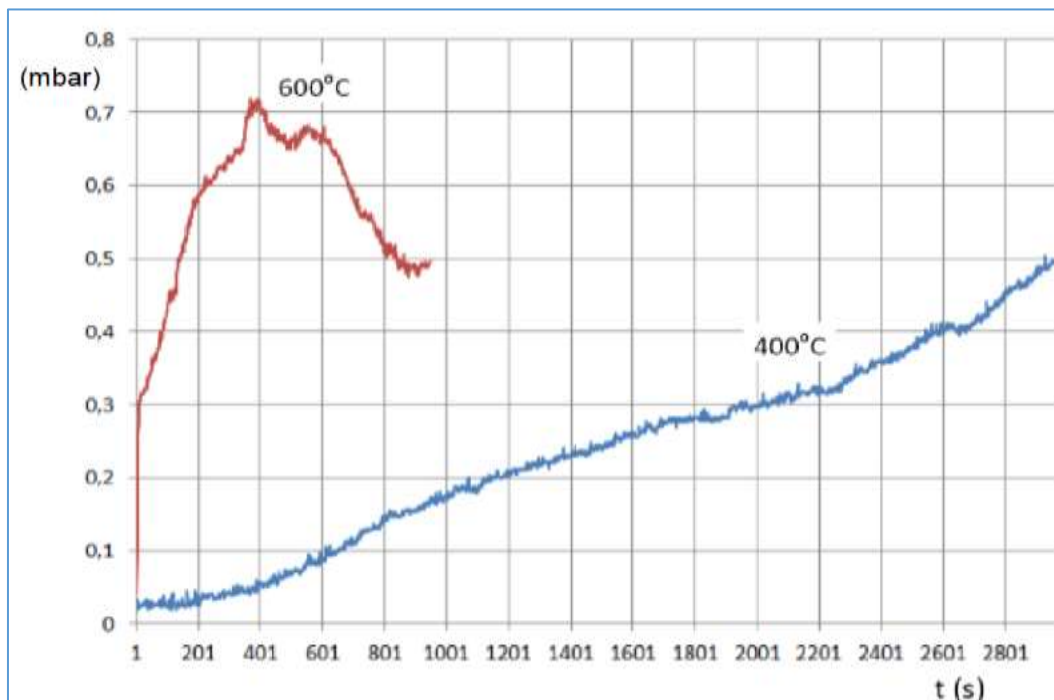
4.3.4. Az anyagalmazok hatása a gázáramlásra

Az inertgázos vizsgálatoknál is megállapítható volt, hogy a magasabb hőmérsékleten és nagyobb közlési sebesség hatására a gáz átáramoltatásánál a nyomás értékek számottevően megnövekedtek. A növekedés mindaddig intenzív, amíg az anyag illóanyag tartalmát, beleértve víztartalmát is el nem veszítette.

Ezt követően az anyag égni kezd és a kiáramló gáz mennyisége csökken, tehát azonos áramlati méretet tekintve a nyomás is csökken. Alacsonyabb hőmérsékleten, amely megfelel az illó anyagok kiáramlási hőmérsékletének, a nyomás egyenletes és közel lineárisan változó.

A 61. ábra keményfa apríték szenesítéséből az inert gáz (VISIT 03H labor vizsgálónál) nyomásértékeit szemlélteti az idő függvényében. A nagy nyomású nitrogén palackból a gáz állandó nyomáson és tömegárammal jut a fűtőegység utáni térbe. Az ott lévő szenzor méri a megváltozott értékeit a teljes szenesítési ciklus alatt az idő függvényében.

E jelenségek igen lényegesek a fixágyas, függőleges, felülről táplált és alsó légbevezetésű generátoroknál, különösen, ha nem csak szén, hanem hő és villamos energia előállítása is cél.



61. ábra A gázátáramláshoz szükséges nyomás a szenesítés során eltérő fűtési hőmérsékleten; Tengelyek: y -nyomás (mbar), x -időtartam t (s)

4.3.5. A szemcsés szén gázáteresztő képessége

Az előbbieken a szemcsézett anyagon a gázátáramlás nyomásigényét kisebb modelleken vizsgáltuk. A szénkészítő rendszer tervezése miatt, a megbízhatóbb adatok érdekében külön berendezést készítettünk, hogy a szemcsehalmaz vastagságának a hatását megismerjük.

A rendszeren belüli áramlás nyomásigényének meghatározása céljából a méréseket kétféle szabványos anyagból készült bioszén szemcseméretnél végeztük és kétféle szemcse magasságot állítottunk be, amelyekkel a reaktív szén képző rétegek kívántuk modellezni.

Porozitás elemző összefüggésekből kitűnik, hogy az alkalmazott nyomásnak jelentős hatása van a gáz átáramlás mennyiségi és sebességi értékeire.

A korábban ismertetett fix ágyas rendszereknél kétféle áramlási irány van, amelyek felfele, vagy lefele tartanak. A konstrukció kialakítása előtt ismerni kívántuk, hogy milyen nyomás és szállítási értékekre kell számítani a szivattyúk kiválasztásánál.

A 153 mm átmérőjű csőmodellbe helyezett faszén jellemzőit a 62. ábra és a 14., 15., 16., 17. és a 18. táblázatok tartalmazzák.

14.táblázat A modell jellemzői

Felület	Magasság	Sűrűség	Tömege
(m ²)	(m)	(kg/m ³)	(kg)
0,018	0,25	220	1,01
0,018	0,50	220	2,02

15.táblázat Áramoltatás felfele 0,25 m vastagságú halmazon

Térfogatáram	Sebesség	Ellenállás	Felhajtó erő
(m ³ /s)	(m/s)	(Pa)	(N)
3,50	0,05	110	2,0
6,43	0,10	250	4,6
8,18	0,12	330	6,1
18,95	0,29	400	7,4
25,26	0,38	470	8,6

Végül fluid állapot alakult ki

16.táblázat Áramoltatás felfele 0,5 m vastagságú halmazon

Térfogatáram	Sebesség	Ellenállás	Felhajtó erő
(m ³ /s)	(m/s)	(Pa)	(N)
3,79	0,06	230	4,2
5,81	0,09	440	8,1
8,57	0,13	650	11,9
15,00	0,23	880	16,2
18,95	0,29	1680	30,9

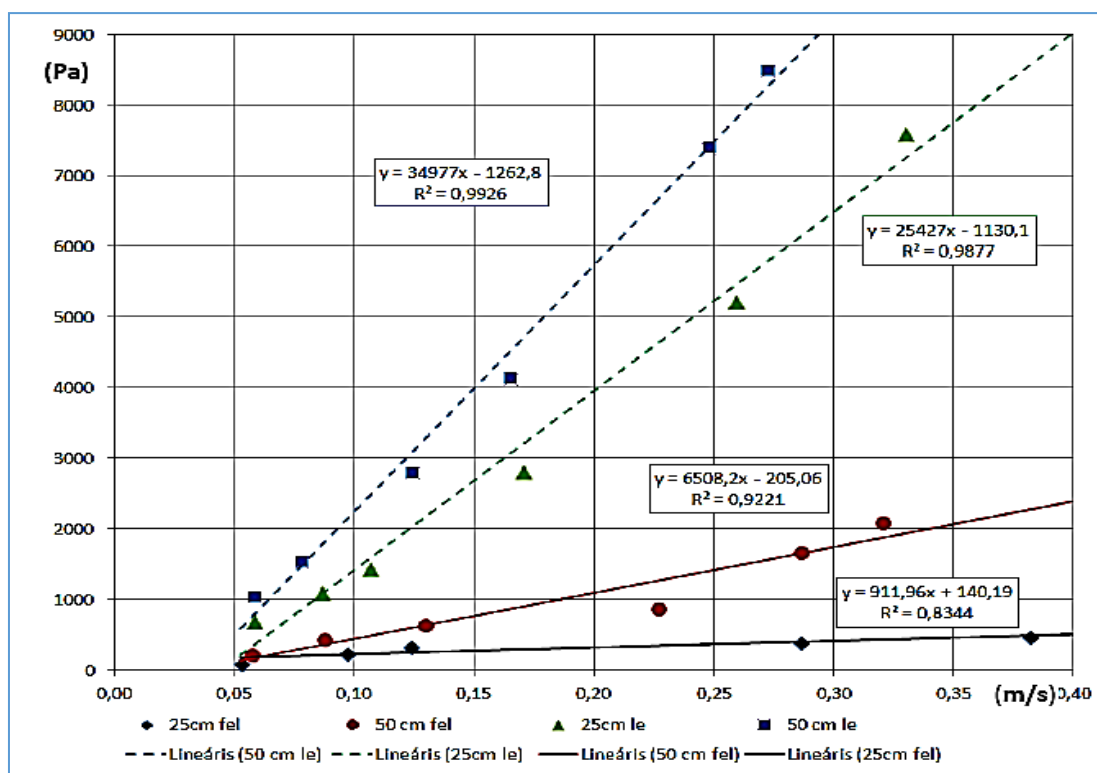
Végül fluid állapot alakult ki

17.táblázat Áramoltatás lefele 0,25 m vastagságú halmazon

Térfogatáram		Ellenállás	Felhajtó erő
(m ³ /s)	(m/s)	(Pa)	(N)
3,83	0,06	700	12,9
5,71	0,09	1100	20,2
7,06	0,11	1450	26,6
11,25	0,17	2820	51,8
17,14	0,26	5230	96,1

18.táblázat Áramoltatás lefele 0,5 m vastagságú halmazon

Térfogatáram	Sebesség	Ellenállás	Felhajtó erő
(m ³ /s)	(m/s)	(Pa)	(N)
3,83	0,06	1050	19,3
5,14	0,08	1540	28,3
8,18	0,12	2800	51,5
10,91	0,16	4140	76,1
16,36	0,25	7400	136,0



63. ábra Az átáramoltatási a gáznomás a gázsebesség függvényében a táblázatok adatai alapján.

A tengelyek: Nyomás (Pa), gázáramlás sebessége (m/s)

E folyamatok ismerete különösen fontos lefelé áramoltató gázgenerátorok esetében, mivel ezeknél a pirolízis, az égési és a redukációs rétegeken is átáramlik a levegő, ill. a gázok keveréke.

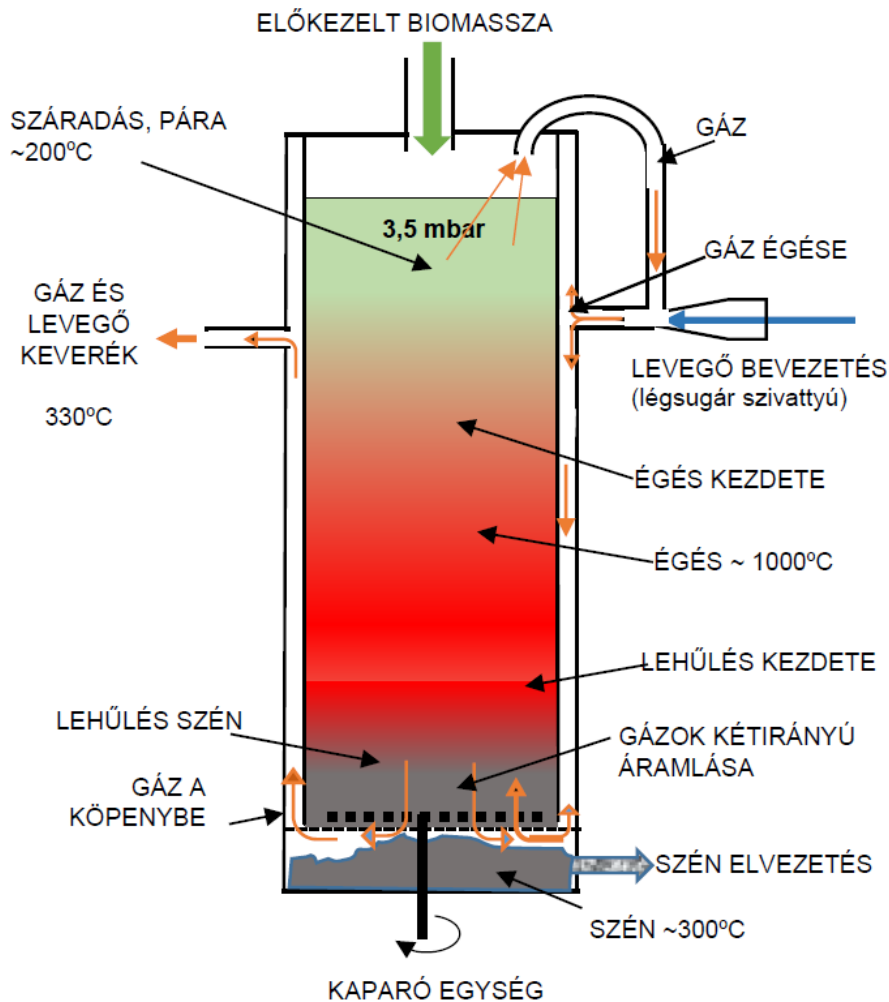
4.4. A szénkészítéshez kialakított üzemi berendezés

4.4.1. A fejlesztett szenesítő vázlata

Az irodalmi források és saját elemző méréseink alapján a vállalkozásomban (Pyrowatt Kft.) készítettük el az **egyedülálló gázvisszavezetéssel működő** szenesítő berendezés fő terveit és gyártottuk le a berendezést (MADÁR et al. 2018).

A korábbi kísérletek megállapításához ragaszkodva fixágyas berendezést terveztünk és ahhoz illesztettük a különféle előkészítő részeket és az energia rekuperáló egységet.

A generátor elvi képét a 64. ábra szemlélteti.



64. ábra A reaktor működési vázlata

Az anyag beáramlása a reaktor felső részén történik. A szárítás miatt az anyag előmelegített állapotú, amelyhez a hőenergiát a visszavezetett gáz és levegő ad át. A bioszén a reaktor alsó részén lévő rácson elhelyezett kaparó egységgel kerül eltávolításra és csigás felhordó továbbítja, a lerakat felé. A köpeny hőmérsékletét az égés szabályozásához szükséges levegő befolyásolja. A levegő és a „nyers gáz” bevezetése légsugár szivattyún át a dupla falú köpenybe történik. A nyomáskülönbség hatására az égő keverék lefele áramlik a köpeny fala mentén, a redukciós zóna felé és egy része abba be is áramlik. A gázkeverék a kaparó egységnél kihulló szén hőjéből is átvesz és a köpeny ellenkező oldalán lévő csatlakozón keresztül távozik az anyagot behordó cső duplafalú terébe. A behordó cső palástja mentén áramolva a beérkező anyag előmelegítését szolgálja. A teljes rendszert nézve a fixágyas rendszer került megvalósításra, amelynél a nyers gáz visszavezetése is létrejött, segítve a stabil szén kialakulását a redukciós térben.

A komplett rendszer működési vázlatát a 65. ábra szemlélteti.

A nyitott tüzelőanyag tároló felső részén rosta található, a durvább nagy szemcsék (anyagdarabok) leválasztása céljából. A tüzelőanyag kihordását a tároló alsó részén lévő villamos hajtású (0,75 kW) kaparószerkezet végzi és továbbítja, a tartályhoz csatlakozó frekvenciaváltós motorral hajtott cellás adagolóhoz. Az adagoló a központi egységről vezérelhető annak megfelelően, hogy a rendszer milyen mennyiségű anyagot képes feldolgozni. Az anyagot a csigás felhordó továbbítja a szárító berendezéshez.

A géppel darabolt anyagokból a G30 - G50 méretosztályok (ÖNORM M7133) megfelelőek.

A tároló fő méretei:

- Szélessége: 1,5m
- Hosszúsága: 1,0 m
- A tüzelőanyag maximális magassága: 1,0 m
- Névleges térfogat: 1,5 m³
- A kihordóval elérhető legnagyobb tömegáram: 400 kg/h.

A szenesítő reaktor üzeméhez a 18% nedvességtartalmú anyag a leginkább megfelelő, Ha kezdetben néhány százalékkal nagyobb, akkor a beépített szárítóval a nedvességtartamot csökkenteni kell. A szárító forgódobos technikát valósít meg, a szárító levegő keresztirányú áramoltatásával. A szükséges energiát a szenesítőből kikerülő 300-400 °C hőmérsékletű füstgáz- levegő keveréke biztosítja. E kevert gázt radiál ventilátor kényszeríti át a dobban mozgásban lévő anyagon. A szárító teljesen zárt acélszerkezet, a külső felülete szigetelt. A legmagasabb felületi hőmérséklete 65°C. A szárítás teljesítménye a szárító gázzal kevert levegő hőmérsékletével és térfogatáramával szabályozható. A szárítócsatorna végénél lévő adagoló a kihordócsigára juttatja az anyagot, amely szenesítőbe (generátorba) továbbítja. Ha szárításra nincs szükség, akkor a forró gázkeverék külön ágon jut közvetlenül a gázmosóhoz. A szabályozott csappantyú csak akkor működik, ha hőfelesleg jelentkezik a rendszerben a kisebb szárítási igény miatt.

4.4.2.A reaktor (szenesítő) elvi kialakítása (65. ábra)

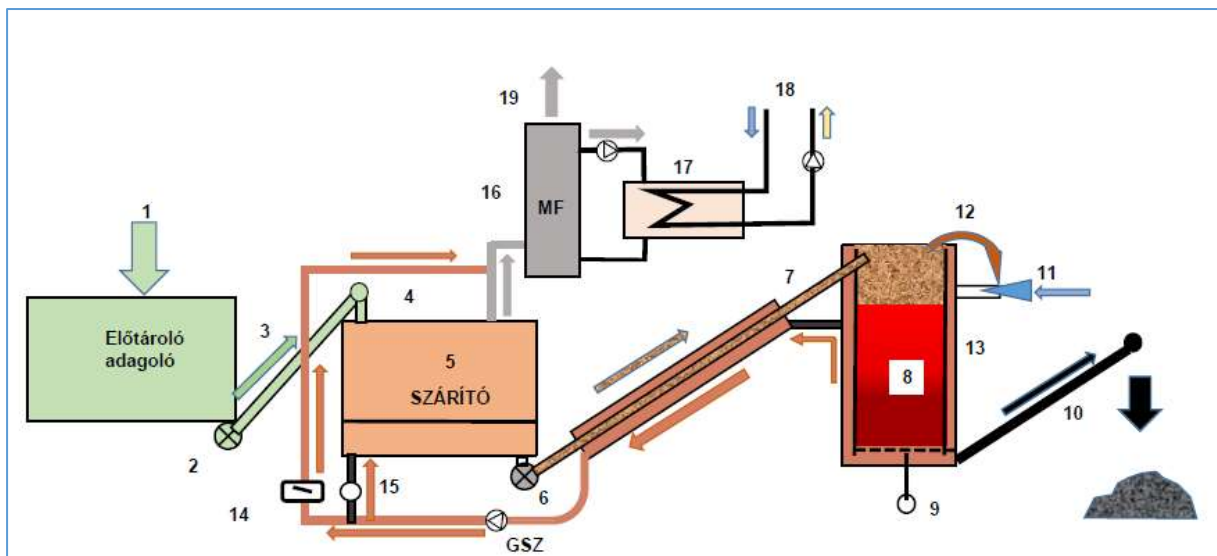
A szárító tervezett hőteljesítmény igénye:

- 200 kW (a legnagyobb tömegáram esetén, száraz anyagra vetítve)
- A szárító teljesítménye 240,0 kg/h (35% nedvességtartalomról 15%-ra)
- Szárítási hőmérséklet: 180-230 °C.
- A szárító villamos teljesítményigény: 3,0 kW.

- A szárítás és „előkezelés” közvetlen hőközléssel valósul meg. A bolygatókaros anyagmozgatás révén a belső térben folyamatosan átforgatásra kerül a száradó - előkezelt anyag. A mozgatás révén kiegyenlített a kijövő anyag minősége. A jobb hőátadást és az egyenletes hőenergia eloszlást a teret kitöltő gáz keringtetése segíti. A magas hőmérsékletű gázt gázsugár szivattyú juttatja be.

A szenesítő (reaktor, 65. ábra):

- A beállítható legnagyobb hőmérséklet 600-1000 °C.
- A bioszén előállító teljesítmény: 50-100 kg/h.
- Kilépő füstgázhőmérséklet: 110-130 C°.
- A működés teljes elektromos teljesítmény igény: 5,0 kW.
- A szenesítő fő méretei: 6,0 x 2,4 x 3,6 m.
- A teljes tömege: 3400 kg.
- Kilépő bioszén hőmérséklete: 180 C°.
- A kilépő füstgáz hőtartalmának visszanyerésével létrejövő teljesítmény: ~100 kW



65. ábra A rendszer folyamat ábrája

Az ábra jelölései:

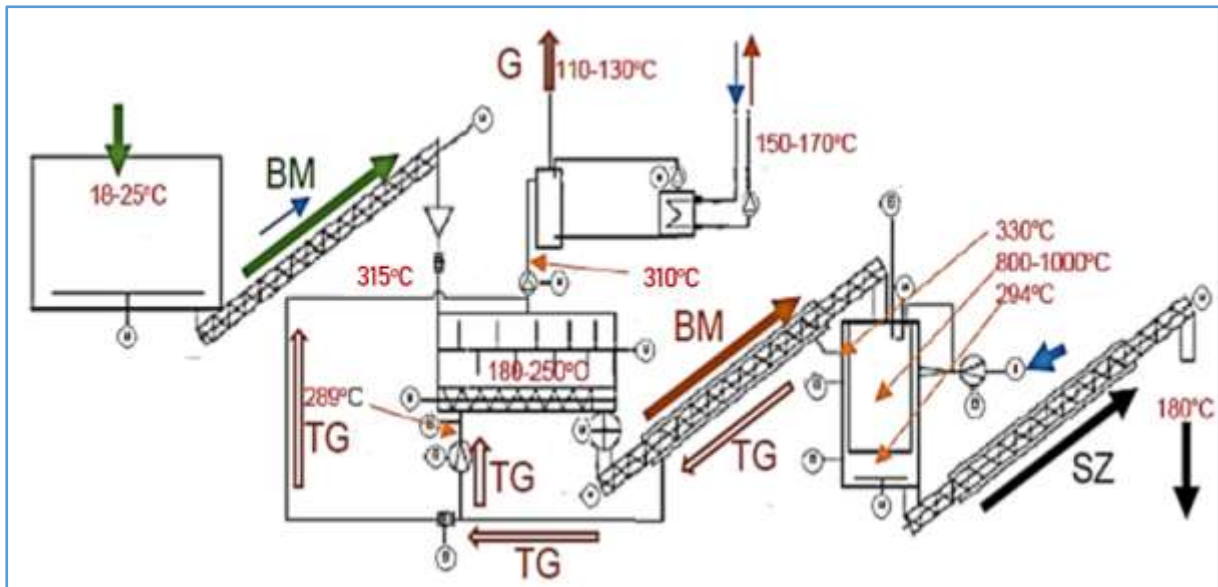
1. biomassza az előtároló-adagoló garatba
2. cellásadagoló
3. ferdefelhordó
4. anyag adagolása a szárítóba
5. kétrészes szárító (lapátos keverő és csigás kihordó egység)
6. cellásadagoló

7. felhordócsiga
8. reaktor
9. mozgató- és kaparó szerkezet (meghajtó motorral)
10. bioszén kitároló csiga (és a felhalmozott anyag)
11. levegő bevezetés (légsugár szivattyú)
12. elsődleges gáz ki- és bevezetése a légsugár szivattyúhoz)
13. köpeny (falközötti keverő és égőtér)
14. szabályzó (kiegészíthető hőcserélővel)
15. levegő gázkeverék bevezetése a szárítóba
16. szárítóból kiáramló gáz bevezetése a mosó egységbe
17. hőcserélő (hővisszanyerő rekuperátor)
18. rekuperált hő kinyerése, külső levegő bevezetése
19. tisztított füstgáz
- MF. léghmosó tartály
- GSZ. gáz szivattyú

4.4.3.A szenesítő működése, energetikai rendszere (66. ábra)

A gépbe beadagolt G50-es rostált keményfa szenesítését végeztük. Vizsgáltuk a keletkező szén szemcsék méreteloszlását.

E vizsgálat fontosságára hívja fel a figyelmet az INTERNA továbbá BREWER et al. (2014), miszerint a bioszénben különböző mikro méretű (<2 nm), mezo (2-50 nm) és makro (>50 nm) pórusok vannak. A kisebb pórusméretű bioszén nem képes adszorbeálni a növényvédő szert. A bioszén termelés során az aktiválási folyamat a meghatározó, ami meghatározza a bioszén porozitását és felületét.



66. ábra. A vizsgálatnál mért hőmérsékleti értékek és az anyagáramlás iránya

Ábra jelei: BM – biomassza, TG – termék gáz, SZ – bioszén, G – lehűtött, tisztított gáz

A kiáramló gáz tisztítása: 318 kg /h = ~276 m³/h

A gáz a víztartályos gázszűrőn, átbuborékolással kerül megtisztításra.

A gáz lehűtésének érdekében a hőmérleg alapján végeztem számítást azért, hogy a méretek megközelítőleg kedvező értéken készüljenek el (69. ábra).

$$W_f (t_{f,ki} - t_{f,be}) = m_g (i_{g,be} - i'') + m_g (i'' - i') + W_g (t' - t_{f,ki}) \quad (W)$$

Az egyenlet jobb oldalán szerepel a gőz hője, majd a kondenzációval átadott hő és a hőfokcsökkenésből származó hő.

A kilépő hőmérsékletet a következő összefüggéssel számítottam ki:

$$t_{f,ki} = \frac{m_g (i_{g,be} - i'') + m_g (i'' - i') + W_g t' + W_f t_{f,be}}{W_f + W_g} \quad (^\circ C)$$

A szükséges tartálméret:

$$Q = k_v V \Delta t \quad (W)$$

A mérések és a számítások alapján 0,3 órás vételezés kimaradásnál a tartály térfogata:

~375 liter (400 l-es tartályt választottunk).

A kilépő gáz -gőz keverék hőfokát 110°C fölé kívántam meghatározni, hogy a környezetbe elpárologjon, tekintve, hogy káros anyagot nem tartalmaz.

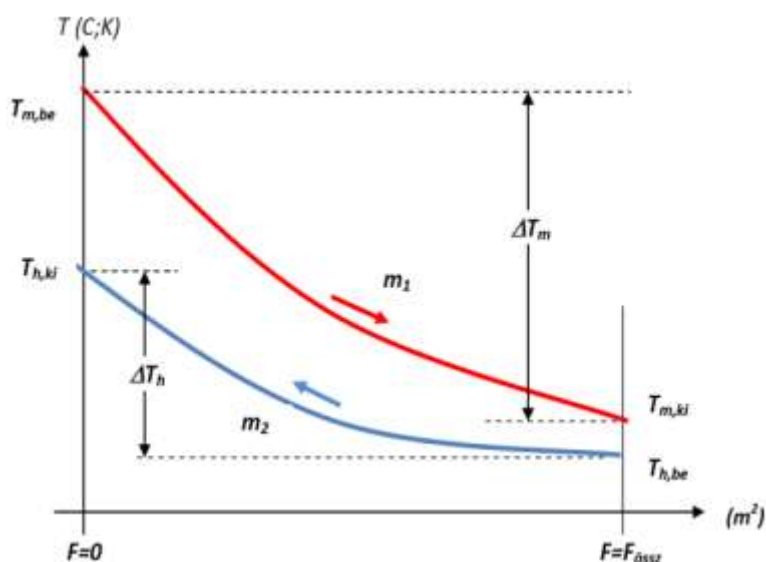
A szárító után amennyiben csak az elkerülő ágon megy be gáz a hőfok 250°C fölötti is lehet.

Szárítás alkalmával az anyag igényétől függően alacsonyabb az érték.

Tiszta ellenáramú hőcserélők esetén a közepes hőmérséklet különbség a logaritmikus középértékkel egyezik meg:

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{mbe} - T_{hki}) - (T_{mki} - T_{hbe})}{\ln \frac{(T_{mbe} - T_{hki})}{(T_{mki} - T_{hbe})}} \quad (^\circ\text{C})$$

Az összefüggés jelei a 67. ábrán láthatók (lásd az ábra jelöléseit)



67. ábra A köpeny ellenáramú hőcserélő hőmérsékletének lefutása.

Hűtési szakaszban a hőcserélő két oldalának hőtechnikai egyensúlya, energia áramai (kJ/h, W):

$$\dot{Q} = c_m \dot{m}_m (T_{mbe} - T_{mki}) = c_v \dot{m}_v (T_{vki} - T_{vbe}) \quad (\text{W})$$

Ahol:

- $\dot{m}_v$ = a víz tömegárama (kg/s)
- $\dot{m}_m$ = a gáz tömegárama (kg/s)
- c_v = a víz fajhője (MJ/kg°C)
- c_m = a termékgáz fajhője (MJ/kg°C)

A 400 literes légmosó tartály esetén a benne lévő víz hőfokát 85-98 °C tartományban megtartva a keringtető inverterrel szerelt szivattyú közepes szállító kapacitása 27,2 m³/h kell, hogy legyen (20 - 35 m³/h között szabályozható egységet választottam).

A csöves hőcserélőhöz tartozó szivattyúnak pedig ($\Delta t = 25^\circ\text{C}$ esetén) 16,3 m³/h közepes szállító kapacitással kell rendelkezni (ugyancsak inverterrel felszerelt egységnél 14 – 20m³/h teljesítményűt választottam).

Így a gázmosó víztartályában lévő folyadék hőfoka közelítőleg stabil marad, de függ a külső hőfelhasználás mértékétől. Ezért erre a körre egy léghűtőt is célszerű csatlakoztatni. Ezzel vételezési kimaradás esetén megakadályozható a mosó túlmelegedése, esetleg felforrása. A hűtőkört működtető szivattyúinak szabályozása a vezérlése a központi egységről történik.

A villamos vezérlésre mindenképpen szükség van, hiszen a rendszer folyamata, paraméterei állandóan változnak. Függnek a beérkező anyag hőmérsékletétől és nedvességtartalmától, amely kihat a pirolizáló működésére, az ott uralkodó hőmérsékletekre, amelyek végül is alapvetően meghatározzák a rendszer működését.

A rendszer összes hatásfoka a bioszén szempontjából:

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

A keletkezett bioszén energiatartalmának és a bevitt biomassa energiatartalmának a hányadosa (az érték a mérési példánkból származik).

Általában a bevitt anyag és a kapott szén százalékos aránya 19 - 44 % értéket mutat.

Ezeket az eredményeket mind a számítás, mind a nemzetközi tapasztalatok igazolják. Amint az irodalom is megjegyzi a keletkező szén belső szerkezete, főként a szén mátrix szilárdsága, nagymértékben függ a kiindulási anyagtól.

Ezek után mérésekkel határoztam meg a rendszer energia egyensúlyát (70. ábra)

A mérés alkalmával a kiinduló adatok: ~205 kg fa/h, melynek energiatartalma átlagosan ~18,0 MJ/kg volt.

A kapott és lehűtött szén tömegárama:~50 kg/h, energiatartalma 25 MJ/kg.

A egyes helyeken a hőmérsékletek és egyéb kiegészítő mérések alapján kapott értékeket a 19. táblázat tartalmazza:

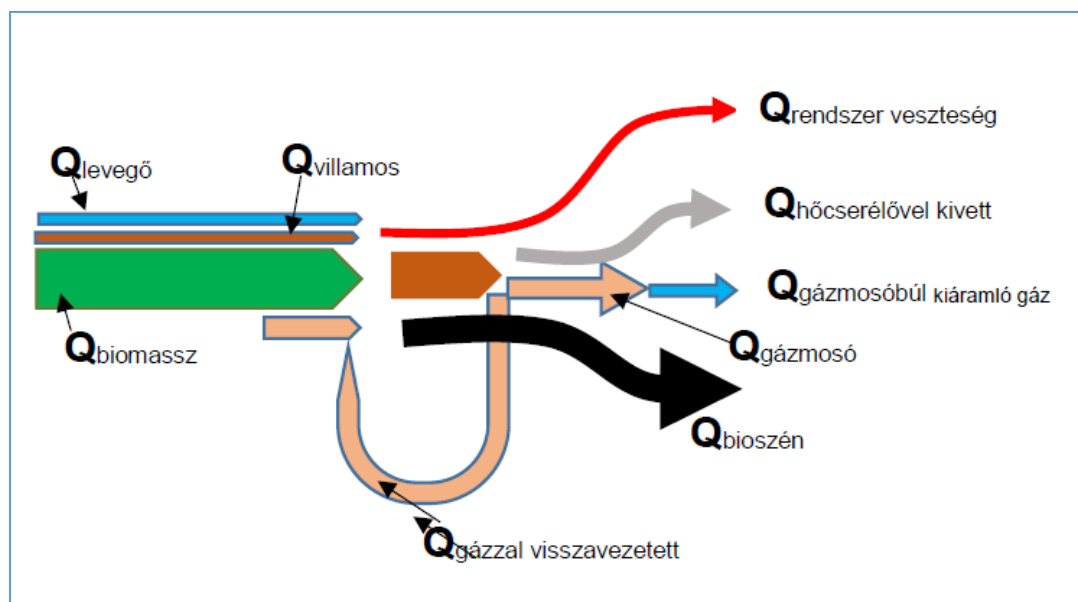
19. táblázat A rendszer energia mérlege

Megnevez	MJ	(%)
Hőcserélővel kivett	195	5,3
Veszteség	143	3,9
Gáz a generátor után	1683	45,6
Szén	1250	33,9
Anyaggal és levegővel	419	11,4
Összesen	3690	100

Végül is, két helyen történik a keletkezett energia rekuperálása:

- a szárításnál és az anyag előmelegítésénél, ill.
- a gázmosónál elhelyezett hőcserélőnél.

A rendszer energetikai folyamatát a 68. ábra szemlélteti.



68. ábra A rendszer energetikai folyamata

A generátor után a szállító csövekre készített furatokon át behelyezett Prandtl csővel a gáz sebességét mértük és határoztuk meg a gáz tömegáramát. Ugyanígy mértem a szabadba kiáramló gázt is. A Prandtl-csőnek készített furaton keresztül az gázból mintát vettem és alumínium fóliával védett zsákban tároltam. A VISIT 03H műszerrel határoztuk meg a gáz összetételét. Az anyaggal és a levegővel bevitt energiátartalmat hozzávetőlegesen határoztuk meg, holott a beviteli anyag mennyiséget mértük, de a vele érkezett légmennyiség és az azzal

bevitt energiát csak becsülni tudtuk (az többi értékhez mérten elhanyagolható, a vezérléssel a hiba korrigálható).

20. táblázat A szárítóba érkező gáz összetétele

Syngas	280-350 (°C) Vol: ~ (%)
CH ₄	9
H ₂	11
CO ₂	22
CO	28
H ₂ O (vízgőz)	23
Egyéb + C _x H _x	1
N ₂	6

Összességében megállapítható, hogy a **berendezéssel hozzávetőlegesen 38-45 kg/h bioszén készíthető**. A minősége jelentős függ a bevitt anyagtól és annak nedvességtartalmától. Magasabb nedvességtartalmú anyagok érkezésekor csigás szállító egységben a kiszállítás mértéke pontosan nem határozható meg, mivel a szállításával a párhuzamosan folyamatos a betáplálás is a generátor irányába. De a hőmérséklete a felhordó cső köré épített hőcserélőből átvett energia révén még tovább változik, amely függ a generátortól érkező gáz hőmérsékletétől és a tömegáramától. A tömegáram számottevően szabályozható a bevezetett levegővel.

A víztartályon átáramló gáz leginkább csak vízgőzt tartalmaz. Az összetételt befolyásolja a bevezetett levegő-, az elkerülő ágon érkezett gáz mennyisége és a tartályban lévő víz állapota is. A kiáramló gőznek nincs számottevő kellemetlen aromája.

21. táblázat Víztartályon átáramlott (szabadba távozó) gáz összetétele

Anyag	Térfogat (%)
H ₂ O (gőz)	80 - 87
CO ₂	7,5 - 11
NO _x + NH _x és egyéb...	0, 1 - 0,5
N ₂	4 - 5

4.4.4. Termék szemcsézettsége

A gépbe beadagolt G50-es rostált keményfa szenesítését végeztük és szita-analízissel meghatároztam a keletkező szén szemcsék méreteloszlását.

A kapott eredményeket a 22. táblázat és a 72. ábra szemlélteti. A szemcse elosztás jó közelítéssel másodfokú görbével jellemezhető, amelynek a csúcspontja az 1,0 és 1,6 mm-es tartományban van. A felületi értékelés szempontjából kedvezőnek ítéltető.

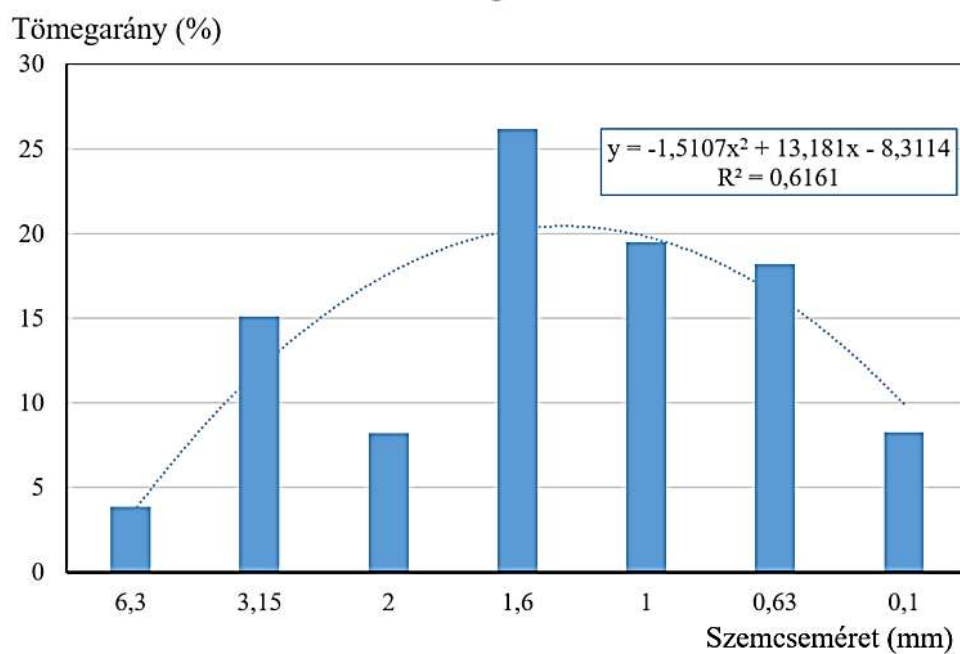
Akkreditált laboratóriumban vizsgáltuk az anyag összetételét, elsősorban a különféle mikroelem tartalom szempontjából. A kapott értékeket a 22. táblázat tartalmazza. A létrejött bioszén igen sokféle elemet tartalmaz, melyek közül a nehézfémek jóval a megengedett érték alatt fordulnak elő.

22. táblázat A kapott bioszén szemcsék a méretük szerint 7 osztályba sorolva

Osztály	Szemcse méret [mm]	Tömeg [%]
1	3,15-6,3	3,9
2	2,0 - 3,15	15,1
3	1,6 – 2,0	8,2
4	1,0- 1,6	26,2
5	0,63 -1,0	19,5
6	0,1 - 0,63	18,18
7	0,05	8,3

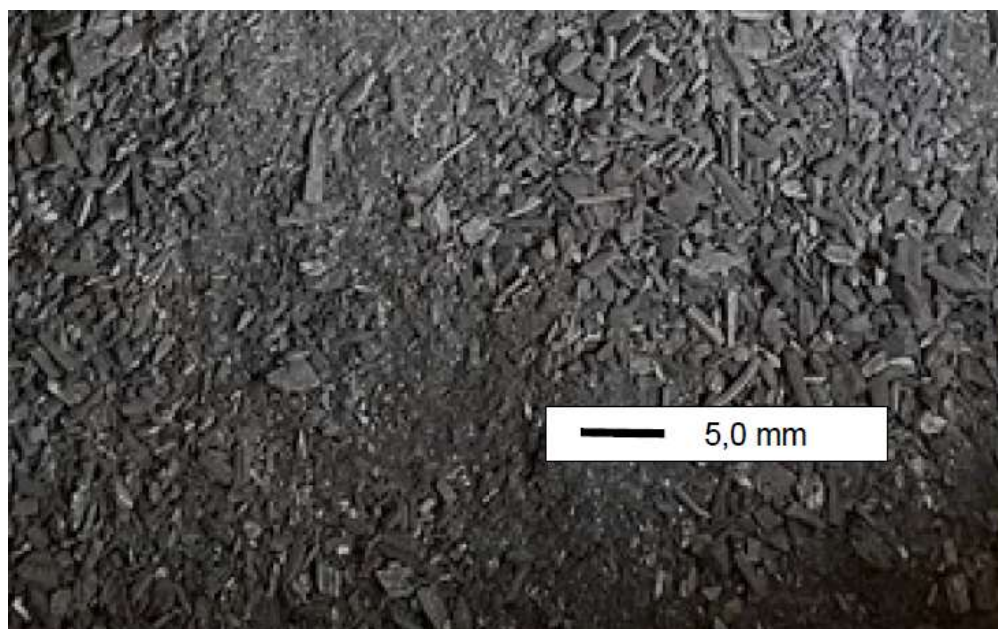
A táblázat eredményeit diagramban a 69. ábra szemlélteti.

Az összefüggés gyengén szignifikáns, és csak erre a vizsgálatra érvényes, viszont a rendszerre vonatkoztatva azt mutatja, hogy a közepes méretű szemcsék a leginkább meghatározók, amelyek talajban való eloszlás kedvezőbb, s az adott körülmények között nagyobb fajlagos felületet adnak.



69. ábra A táblázat szerinti hét osztályba sorolt szemcsék %-os eloszlása

A készített termék megjelenési formája:



70. ábra A berendezéssel készített anyag

4.4.5. A gyártott faszén beltartalmi jellemzői

23.táblázat A faszén szárazanyagra vonatkoztatott kémiai elemi jellemzői (400, 600 és 900°C-on)

Kiindulási apríték anyagok	Kezelési hőfok (°C)	w(C)d (%)	w(H)d (%)	w(N)d (%)	w(S)d (%)	w(O)d (%)	w(Cl)d (%)
Vegyesfa	400	75,860	3,082	0,294	0,033	16,827	0,000
Vegyesfa	600	86,369	2,779	0,349	0,030	6,041	0,000
Vegyesfa	900	86,303	1,226	0,463	0,066	7,987	0,000
Fenyő	400	77,161	3,224	0,335	0,029	17,202	0,000
Fenyő	600	86,010	2,755	0,353	0,031	8,211	0,000
Fenyő	900	88,103	1,011	0,431	0,029	4,904	0,000

24.táblázat A faszén szárazanyagra vonatkoztatott energetikai elemi jellemzői (400, 600 és 900°C-on)

Kiindulási apríték anyagok	Kezelési hőfok (°C)	A _d (%)	q _{vgr,d} (MJ/Kg)	q _{pnet,d} (MJ/kg)
Vegyesfa	400	3,903	28,037	27,369
Vegyesfa	600	4,432	32,225	31,631
Vegyesfa	900	3,955	31,432	31,165
Fenyő	400	2,050	28,308	27,610
Fenyő	600	2,641	32,631	32,040
Fenyő	900	5,522	31,288	31,069

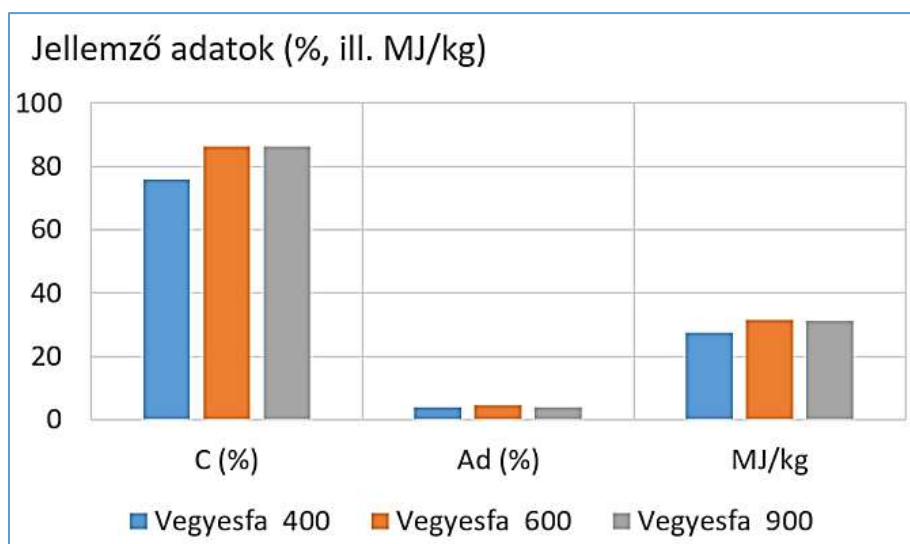
M – Nedvességtartalom

A_d – Száraz hamutartalom

q_{v,gr,d} – Számított égéshő

q_{p,net,d} – Számított fűtőérték

A hőmérséklet hatására 600 °C-ig az energia-, a hamu és a széntartalomban is növekedés tapasztalható, majd a magasabb értéknél változatlan ill. csökken. (Példaként lásd a 71. ábrát).



71. ábra A pirolízis után az anyag tüzeléstechnikai szempontból mért néhány jellemzője (400, 600 és 900°C-on)

4.4.6. A termék anyagi összetétele

A felhasználóknak fontos ismerni a bioszén belső összetevőit, a különféle ásványi anyagtartalmakat és a pH értékét. Különösen fontos a nehézfémeknél a megengedett határértéke és a PAH tartalom. A méréseket akkreditált laboratóriumok végzik (23. 24. és 25. táblázatok).

25. táblázat Az anyag belső jellemzői¹⁵

Vizsgált paraméter	Mértékegység	Minta értéke
pH		10,1
Vezetőképesség 25 fokon	mS/cm	3980
Nitrit	mg/kg (L/S=10)	<0,5
Klorid *	mg/kg (L/S=10)	3310
Ammónium	mg/kg (L/S=10)	<1
Nitrát	mg/kg sz.a.	<50
Szulfát	mg/kg sz.a.	<250
TC	m/m% sz.a.	50,2
TOC	m/m% sz.a.	44,6
CEC *	cmol+/kg	9,34

¹⁵ A méréseket végezte:

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

Laza halmazsűrűség	kg/m ³	160
Hamutartalom	m/m% sz.a.	39,3
Szilícium	mg/kg sz.a.	6060
Magnézium	mg/kg (L/S=10)	127
Kalcium	mg/kg (L/S=10)	24
Foszfor	mg/kg (L/S=10)	1070
Kén	mg/kg (L/S=10)	52
Molibdén	mg/kg (L/S=10)	<0,5
Bór	mg/kg (L/S=10)	<2
Vas	mg/kg (L/S=10)	0,5
Szilícium	mg/kg (L/S=10)	1230
Kálium	mg/kg (L/S=10)	12700
Arzén	mg/kg sz.a.	<1
Bór	mg/kg sz.a.	<50
Foszfor	mg/kg sz.a.	2770
Higany	mg/kg sz.a.	<0,1
Kadmium	mg/kg sz.a.	<0,3
Kalcium	mg/kg sz.a.	1760
Kálium	mg/kg sz.a.	19500
Kobalt	mg/kg sz.a.	<1
Króm	mg/kg sz.a.	3
Magnézium	mg/kg sz.a.	1540
Molibdén	mg/kg sz.a.	<1
Nikkel	mg/kg sz.a.	2
Ólom	mg/kg sz.a.	<1
Réz	mg/kg sz.a.	6
Szelén	mg/kg sz.a.	<0,3

26. táblázat A termék kémiai összetétele

Vizsgáltparaméter	Mértékegység
	mg/kg sz.a.
Vas	430
TEOC (Összes extrahálható	1300
Naftalin	0,59
1-Metilnaftalin	0,12
2-Metilnaftalin	0,16
Naftalinok összesen	0,87
Acenaftilén	<0,02
Acenaftén	0,03
Fluorén	<0,02
Fenantrén	0,09
Antracén	<0,02
Fluorantén	0,03
Pirén	0,04
Benzo antracén	0,06
Krizén	0,06
Benzo fluorantén	0,04
Benzo fluorantén	<0,02
Benzo pirén	0,02
Benzo pirén	0,03
Indeno pirén	<0,02
Dibenzo antracén	<0,02
Benzo perilén	<0,02

27. táblázat Az anyag PAH tartalma

Vizsgáltparaméter	Mértékegység
	mg/kg sz.a.
Összes PAH	1,27
PCB 28 19	<0,01
PCB 52 19	<0,01
PCB 101 19	<0,01
PCB 138 19	<0,01
PCB 180 19	<0,01
Összes PCB	<0,01

Az európai bioszén-tanúsítvány (EBC) előírja, hogy a PAH-tartalom 4-12 mg/kg szárazanyagra vetített tartalma lehet. A minősítések kiadásánál különös figyelmet fordítanak a módszertani eljárásokra a mintavétel, a mintafeldolgozás és a szennyezőanyag mennyiségi meghatározásának terén. Az előállított anyagunk az EBC (European Biochar Certificate) előírásainak eleget tesz, felhasználható az anyag.

Megjegyzés¹⁶: Az IBI kezdetben 6–20 mg/kg-ban határozta meg a bioszénben található PAH határértékét (IBI, 2013), de a maximálisan megengedhető küszöbértékeket 20 mg/kg-ról 300 mg/kg-ra emelték (IBI, 2015).

4.5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Pirolízis jelentősége

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

- a hulladékok a feldolgozásuk révén nem terhelik a természeti környezetet, sőt a kereskedelemben értékesíthető hasznos anyagokká alakulnak,
- a gyártás során keletkező gázok felhasználhatók energia előállításra, de keletkező hulladékhó is rekuperálható hasznos célokra,

A biomasszák pirolizálással (hőbontással) történő átalakításához, a jó minőségű termékek készítéséhez és a káros anyagok keletkezésének elkerüléséhez **csak pontosan vezérelt, szabályozott gyártó berendezések lehetnek alkalmasak.**

2. A pirolízis folyamata

A biomasszák termokémiai átalakítása - a pirolízis - soktényezős, összetett folyamat. A berendezésem tervezés érdekében – figyelemmel az irodalmakban szereplő tanulságokra – laboratóriumi kísérleti egységeket készítettem, melyekkel adott biomassza féleségeknél a folyamat paramétereit vizsgáltam és elemeztem. A laboratóriumi kismintás berendezéssel megállapítottam, hogy a nedvességtartalomtól (~0,0 -25% között) és a lebontási hőmérsékletektől (800-1100°C tartományban) függően megközelítőleg kétszeresére nő a teljes lebontás időtartama. Az anyagokban a szén és hidrogén aránya megközelítőleg azonos marad, de nagy eltérés van a Cl és N tartalomban.

Az inertgázzal fűtött berendezésnél (oxigén mentes állapotban) a lebontási (fűtési) hőmérséklet ($x = ^\circ\text{C}$) és a fűtési idő ($y = \text{min}$) viszonya:

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

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

- Ahol: $x = 400 - 1100 ^\circ\text{C}$. tartományban

¹⁶ <https://biochar-international.org/>

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 ($\text{kg/kg} \times 100$),
- $x = a$ mérési (fűtési) hőmérséklet ($^{\circ}\text{C}$).

A hőmérséklet növekedésével a maradék anyag mennyisége csökken.

3.- A lebontási maradék (a szén és ásványi anyag –hamu- mennyisége) Thermogravimetrikus (TG) laboratóriumi méréseket, mind az inert gázos fűtésű, mind pedig a villamos fűtésű egységeknél oxigénmentes (ill. szegény) környezetben végeztem.

Keményfánál 400°C-os és a 600°C-os tartományban, ha a trendet vizsgáljuk a lebontási intenzitás ($x = \text{g/s}$), 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:

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

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

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

A csak az intenzív lebontási szakaszra jellemző összefüggés:

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

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

A magasabb hőfokon a maradék ~10%-al kevesebb.

A kisebb szemcsézettségű G30-as anyagnál az intenzív fűtési szakasz alacsonyabb hőfokon kezdődik és ~ 37%-al nagyobb a csúcserőre:

$$y = -6E - 06x^2 + 0,0046x - 0,1269 \quad (\text{g/s})$$

Tehát a nagyobb aprózottságnál célszerű kisebb fűtési sebességet választani.

4.- Az elsődleges gáz visszakeverése:

A szén %-os aránya a visszavezetett gáz tömegáramától függően az $x = 166 - 330 \text{ g/s}$ tartományban:

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

$$R^2 = 0,942$$

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

$$y = -0,2612x + 33,907 \quad (\%)$$

$$R^2 = 0,8989$$

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

$$y = -0,1425x + 145,03 \quad (\%)$$

$$R^2 = 0,9204$$

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

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

$$R^2 = 0,8884$$

A gáz visszavezetése, energetikai és a termék minősége szempontjából is előnyös.

5. – Szénrétegen a gáz átvezetésének teljesítmény igénye (felfelé és lefelé áramlás esetén)

Új megodás, hogy a generátor aljáról gáz és levegő keveréket áramoltatok felfelé a redukációs térbe a krakkolási tér alsó határáig.

Az 50 cm vastag rétegben $x = 0,1-6,3$ mm-es szemcsetartományba 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:

$$y = 6508,2x - 205,06 \quad (\text{Pa})$$

$$R^2 = 0,9221$$

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

$$y = 34977x - 1260,8 \quad (\text{Pa})$$

$$R^2 = 0,9926$$

Az értékek meghatározóak a légsugár szivattyú paramétereinek meghatározásánál. 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.

6 Az új gép és a kapott szén jellemzői

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):

$$y = -1,5107x + 13,181 - 8,3114 \quad (\%)$$

$$R^2 = 0,6164$$

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 policiklikus aromás szénhidrogéneket tartalmazó elsődleges termék gázt légkeveréssel visszavezettem a redukációs térbe.**

Ezt először alkalmaztam a PAH típusú alkotók lebontása céljából. Így az összes PAH tartalom 1,27 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) 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:

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

A bioszén a nagy porozitása és fajlagos felülete révén segíti a talajéletet, a pólusok 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 berendezést olyan méretűre terveztem, hogy 20'HC konténerben is elhelyezhető. Ennek révén **áttelepíthető és ezáltal követhetők a biomassza termelő helyek,** tehát jól kihasználható.

5. 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 tisztítással alkalmaznak (víz, 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 olajat hajtóanyagként, mechanikai- és villamosenergia előállítására használhatjuk.

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

A pirolízis az égetéshez az eljárástól abban különbözik, hogy a keletkező széndioxid mennyisége legalább 40 %-al kevesebb, ezzel „a felmelegedést okozó üvegházi gáz kibocsátást mérsékeli”.

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

A bioszén pótlása a talajban, a termesztő 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 egy zárt környezetre számottevően nem ható rendszer, **ami lehetővé teszi a biológiai hulladékok körkörös természeti modellben való alkalmazását.**

Az irodalmi munkák adatainak felhasználásával és számos megelőző laboratóriumi kísérlet elemzése alapján készítettem el a kísérleti, de üzemi 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 a z egyszerű áttelepítéssel követhetőek a jelentősebb mennyiségű anyaggal rendelkező területek (vállalkozások)

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 az elsődleges nyers gáz visszavezetését levegővel keverve, amivel a bioszén PAH tartalmát minimálisra mérsékeltem.

A tervezett és kivitelezett berendezés kisebb üzemekbe is megfelelő, jó minőségű anyag állítására alkalmas.

Fontos tényező, hogy a felhasznált biomasszák az alapvetően a pirolízis követelményeknek feleljenek meg.

A bioszén minősége számottevően változik az alapanyag jellemzőitől (fizikai, kémiai stb.) és a pirolízis körülményeitől függően. A felhasználás megbízhatósága érdekében a termékek folyamatos minőségi vizsgálata indokolt, de a talajokhoz illesztése sem hanyagolható el.

A kutatócsoportok véleménye szerint bioszén felhasználásának a jövőben még számottevő fejlődése várható. 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 jelentősége egyértelmű.

A prototípus berendezésem jelenleg is üzemel (rizs pelyvából készít megfelelő anyagot).

7. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

- [1] AHMED S. (2010): Soil Definition, Classification and Properties SOIL Mechanics And Foundation Engineering ICE,
<https://priodeep.weebly.com/uploads/6/5/4/9/65495087/>
- [2] AMELOOT, N. et al. (2013): Interactions between biochar stability and soil organisms: Review and research needs. Eur. J. Soil Sci. 2013, 64, 379–390. [CrossRef]
- [3] ANTAL, M. J. et al. (1998): Cellulose pyrolysis kinetics, Industrial & Engineering Chemistry Research, a journal of the American Chemical Society. Revisited., Page 1 of 18
- [4] ANTAL, M. J. et al. (1998): Cellulose pyrolysis kinetics: revisited, Ind. Eng. Chem. Res., 37 (4) pp. 1267 – 1275
- [5] BABU, B.V., CHAURASIA, A.S. (2003): Modeling, simulation and estimation of optimum parameters in pyrolysis of biomass, Energ. Convers. Manage. 44 (2003) 2135–2158.
- [6] BÁCSKAI, I. et al. (2018): Biomassza-hulladékok hőbontásának mérés technikája Mezőgazdasági Technika 59 : 5 pp. 2-6. , 5 p. (2018)
- [7] BÁCSKAI, I. et al. (2019): Modeling of Some Operating Parameters Required for the Development of Fixed Bed Small Scale Pyrolysis Plant RESOURCES (BASEL) 8 : 2 Paper: 79 , 15 p.
- [8] BASU, P. (2013): Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Practical design and theory, Second edition, Elsevier, San Diego, p. 529.
- [9] BIRKÁS, M. et al. (2022): Hátráltató és előrevivő tényezők a hazai talajművelésben. Agrokémia és Talajtan 70(2):155-170 DOI: 10.1556/0088.2021.00102
- [10] BOLHAR-NORDENKAMPF, M. et al. (2002): 100kWth pilot FICFB-gasifier to a 8 MWth FICFB-gasifier demonstration plant in Güssing (Austria) AE Energietechnik, Letöltve 2011 <https://citeseerx.ist.psu.edu/document>
- [11] BREWER, C. E. et al. (2014): New approaches to measuring biochar density and porosity, Science Direct, Biomass and Bioenergy, Volume 66, Pages 176-185
- [12] CÉGÉNY, Zs. et al. (2017): Impact of torrefaction on woody biomass properties, Energy Procedia Elsevier, Volume 105 Pages 1149-1154

- [13] CHA, J. S. et al.: (2016) Production and utilization of biochar: a review, J. Ind. Eng. Chem. 40 (2016) 1–15.
- [14] CHA, J. S. (2016): Production and utilization of biochar: A review Journal of Industrial and Engineering Chemistry Volume 40, 25 August 2016, Pages 1-15
- [15] CHEN, B. L, YUAN M. X. (2011): Enhanced sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by soil amended with biochar. Journal of Soil and Sediments, 11:62-71 pp.
- [16] DADI, V. ; SURIAPPARAO, R. (2018): Effects of Biomass Particle Size on Slow Pyrolysis Kinetics and Fast Pyrolysis Product Distribution, Waste and Biomass Valorization, March 2018, Volume 9, Issue 3, pp 465–477
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12649-016-9815-7>
- [17] DARCY-KLINKENBERG-törvény: https://hu.frwiki.wiki/wiki/Loi_de_Darcy
Demirbas (2004): Combustion characteristics of different biomass fuels, Progress in Energy and Combustion Science, pp. 219-230
- [18] DHAUNDIYAL, A., TÓTH, L. (2021): Modelling of a Torrefaction Process Using Thermal Model Object, MDPI. Energies 14(2481):1-24, DOI: 10.3390/en14092481 April
- [19] DHAUNDIYAL, A.; TOTH, L. (2020): Modelling of Hardwood Pyrolysis Using the Convex Combination of the Mass Conversion Points, International Journal of Energy and Power Engineering ISSN Online: 2326-960X, ISSN Print: 2326-957XOpen Access Policy (OA)
- [20] DI BLASI, C. et al. (2000): Degradation characteristics of straw and washed straw, Thermochim. Acta, 364, pp. 133 – 142
- [21] DI BLASI, C. (2004): Modeling intra- and extra-particle processes of wood fast pyrolysis, Environmental and Energy Engineering Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università degli Studi di Napoli “Federico II,” 80125 Napoli, Italy 16 April 2004
- [22] DOWNIE, A., CROSKY, A., MUNROE, P. (2009): Physical properties of biochar. In ‘Biochar for environmental management: Science and technology.’ (Eds J Lehmann and S Joseph) Earthscan: London. Sterling, VA, USA. 13-32pp.
- [23] ELNOUR, A. Y. et al. (2019): Effect of Pyrolysis Temperature on Biochar Microstructural Evolution, Physicochemical Characteristics, and Its Influence on

- Biochar/Polypropylene Composites *Appl. Sci.* 9(6), 1149;
DOI: 10.3390/app9061149
- [24] ENDERS, A., HANLEY, K., WHITMAN, T., JOSEPH, S., LEHMANN, J. (2012): Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*. 114, 644–653
- [25] FLYNN, J. H. et al. (1966): A quick, direct method for the determination of activation energy from thermogravimetric data, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters*, 4(5): 323-328, 1966. doi: 10.1002/pol.1966.110040504 [[Links](#)]
- [26] GRØNLI, M. G., et al. (2002): Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 41 (17), pp. 4201 – 4208
- [27] GROSS, C. D., et al. (2019): Soil Organic Carbon Storage, Dynamics, and Controls in Our Changing World *Soil Systems* 3(2): 28DOI: 10.3390/soilsystems3020028
- [28] HARDIE, M. et al. (2013): Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant Soil Springer Science+Business Media* 376:347–361 DOI 10.1007/s11104-013-1980-x
- [29] HUNT, J., DUPONTE, M., SATO, D., KAWABATA, A. (2010): The basics of Biochar: A natural Soil Amendment. *Soil and Crop Management, College of Tropical Agriculture and Human Resources*, 30:1-6 pp.
- [30] JEFFERY, S. (2017): Biochar boosts tropical but not temperate crop yields *Environmental Research Letters*, Volume 12, Number 5
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aa67bd> Letöltve: 2021
- [31] JOSEPH, S. et al. (2017): Basic Principles and Practice of Biochar Production And Kiln Design <https://biochar.international/guides/basic-principles-of-biochar-production/> Letöltve 2023.02.
- [32] KAUPP, J., GOSS, R. (1984): Small scale gasifier engine systems, *Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig*, pp. 1-286.
- [33] KHAN, et al. (2021): Biochar and environmental sustainability: Emerging trends and techno-economic perspectives, *Bioresource Technology*, Volume 332, July 2021, 125102

- [34] KLEIN, S. A. et al. (2002): Engineeiring Equation Solver Distributable Version 6.163. www.fChart.com
- [35] KLOSS, S. et al. (2012): Characterization of slow pyrolysis biochars: Effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. Journal of Environmental Quality DOI: 10.2134/jeq2011.0070 Corpus ID: 21446680, 41, 990–1000.
- [36] KOCSIS, T. (2018): Bioszén és bioeffektor kombinációk hatása homoktalajok biológiai tulajdonságaira, Ph.D. értekezés MATE Gödöllő https://archive.szie.hu/sites/default/files/kocsis_tamas_ertekezes.pdf (Letöltve: 2021)
- [37] KOCSIS, T., WASS-MATICS, H., KOTROCZÓ, Zs., BIRÓ, B. (2015): A bioszén kedvező hatása a talaj pszikrofil-és mezofil csíraszámára. Futó, Zoltán (szerk.) A hulladékgazdálkodás legújabb fejlesztési lehetőségei. Szarvas, Magyarország, SZIE Gazdasági, Agrár-és Egészségtudományi Kar. 126 p. 63–69.
- [38] LAIRD, A. D. (2008): The Charcoal Vision: A Scenario for Simultaneously Producing Bioenergy, Permanently Sequestering Carbon, while Improving Soil and Water Quality. Agronomy Journal 100:178-181 pp.
- [39] LAL, R. et al. (1990): Soil degradation : A global treat, in: Advinces in Soil Science 11. Springer Verlag New York, pp 13-17
- [40] LETTNER, F. et al. (2007): Biomass gasification – State of the art description Graz University of Technology - Institute of Thermal Engineering Inffeldgasse 25B, 8010 Graz Austria
- [41] LEHMANN J. et al. (2015): Biochars and the plant-soil interface, Plant Soil Springer International Publishing Switzerland 2015395:1–5 DOI 10.1007/s11104-015-2658-3
- [42] LIANG, H. et all. (2016): Surface morphology properties of biochars produced from different feedstocks College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100,
- [43] MADÁR. V., TÓTH, L., MADÁR, Gy., SCHREMPF, N. (2014): Kísérleti fagázgenerátor, Mezőgazdasági Technika, ISSN 0026 1890. 55. évf. Nr.4. pp. 2-5.
- [44] MADÁR, V., TÓTH L. (2012): Fagázgenerátor üzemű bio-kiserőmű (CHP) és öntözőberendezés, Mezőgazdasági technika, 09 Gödöllő

- [45] 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 (tud)
- [46] MAJOR, J., LEHMANN, J., RONDON, M., GOODALE, C. (2010): Fate of soil-applied black carbon: downward migration, leaching and soil respiration. *Global Change Biology*. 16, 1366–1379.
- [47] MASEK, O. et al. (2018): Consistency of biochar properties over time and production scales: Elsevier BV, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* DOI: DOI: 10.1016/j.jaap.2018.02.020 BV, Print ISSN: 0165-2370
- [48] MINXING, G. et al. (2015): *Agricultural and Environmental Applications of Biochar: Advances and Barriers* American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. SSSA Special Publications, (Letöltve: 2017)
<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaspecpub63.2014.0054>
- [49] MYLAVARAPU, R. et al. (2019): *An Introduction to Biochars and Their Uses in Agriculture. Agricultural and Food Systems*: DOI: 10.32473/edis-ss585-2013 <http://sfyl.ifas.ufl.edu/> (letöltve: 2021).
- [50] NÉMETH, K. (1998): *A faanyag degradációja*, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 1-102 o.
- [51] PERRY, J. et al. (2013): Preliminary laboratory production and characterization of biochars from lignocellulosic municipal waste *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Published by pp 71–78, Elsevier BV, DOI: 10.1016/j.jaap.2012.10.025
- [52] RAMAN, P. et al. (2013): A dual fired downdraft gasifier system to produce cleaner gas for power generation: Design, development and performance analysis In: *Elsevire, Energy* 54. sz., p. 302-314.
- [53] REHRAH, D. et al. (2014): Production and characterization of biochars from agricultural by-products for use in soil quality enhancement, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Published by Elsevier BV Print ISSN: 0165-2370, DOI: 10.1016
- [54] RÉKÁSI, M., UZINGER, N. (2015): A bioszén felhasználásának lehetőségei a talaj tápanyag-utánpótlásában. *Agrokémia és Talajtan*, 64:239-256 pp

-
- [55] RONSSE, F., VAN HECKE, S., DICKINSON, D., PRINS, W. (2013): Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy*. 5, 104–115.
 - [56] SIMENG, LI et al. (2020): Engineered Biochar Production and Its Potential Benefits in a Closed-Loop Water-Reuse Agriculture System *Water*, 12, (10) 2847, Letöltve 2022. <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/10/2847>
 - [57] SPOKAS, K. A, REICOSKY, D. C. (2009): Impacts of sixteen different biochars on soil greenhouse gas production. *Annals of Environmental Science*, 3:179-193 pp.
 - [58] STEFANOVICS, P. et al. (2010): Talajtan (Soil Science in Hungarian) Mezőgazda Kiadó, Hungary
 - [59] STEINER, C., GARCIA, M., ZECH, W. (2009): Effects of charcoal as slow release nutrient carrier on NPK dynamics and soil microbial population: pot experiments with ferralsol substrate. Springer, Berlin. 325-338 pp.
 - [60] SZILI-KOVÁCS, T., KÁTAI, J., TAKÁCS, T. (2011): Mikrobiológiai indikátorok alkalmazása a talajminőség értékelésében. 1. Módszerek. *Agrokémia és Talajtan*, 60:273-286 pp.
 - [61] TANUSHREE DUTTA, et al. (2017): Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in biochar and biochar-amended soil: *GCB Bioenergy* (2017)9, 990–1004, doi: 10.1111/gcbb.12363N.
 - [62] TÓTH, L. et al. (1998): (szerző, szerkesztő) Állattartási technika Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, ISBN 978-615-5224 Budapest, 788 p.
 - [63] TÓTH, L., MADÁR, V., BÁCSKAI, I. (2019): Pirolízis berendezés fejlesztését megelőző vizsgálatok *ENERGIAGAZDÁLKODÁS* 60 : 1-2 pp. 27-33. , 7 p. (tud)
 - [64] TÓVÁRI, P., MADÁR V. (2011): Gasification experiments on herbaceous biomass, Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food Industry, Gödöllő, Hungary, 9–15. October 2011
 - [65] WAMPLER, T. P. (2007): Applied pyrolysis handbook, Taylor & Francis, Secound edition, p. 285.
 - [66] Wolf D. et al: 2010 Sustainable biochar to mitigate global climate change *Nature communications*, Nature Publishing Group UK 2010/8/10. 1. cs. 56p

- [67] XUAN-HUYNH PHAM (2018): Oxidative pyrolysis of biomass pellets in a fixed bed
Universite de Perpignan via Domitia Environnement- ED 305 (Letöltve: 2021
<https://agritrop.cirad.fr/595603/1/ID595603.pdf>
- [68] YAASHIKA, P. R. et al. (2020): A critical review on the biochar production techniques,
characterization, stability and applications for circular bioeconomy Biotechnology
Reports, Letöltve 2021 www.elsevier.com/locate/btre
- [69] YAASHIKAA, P. R. et al. (2022): Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery
process and circular bioeconomy Online at MPRA Paper No. 112234,
<https://mpa.ub.uni-muenchen.de/112234/>
- [70] YUDKEVICH, Y. D. et al. (2013): Pyrolysis of Wood, GreenPower, International Bio-
Energy company <https://greenpower.equipment/teoreticheskaya-chast-uglezhzhenie/>
(Letöltve 2021 december)
- Az információgyűjtésnél felhasznált linkek (személyekhez nem köthető)
- [71] www.european-biochar.org EBC.: (2012). Versio 9.0E of 1st June 2020.
- [72] <https://biochar-international.org/about-biochar/>
- [73] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Darcy-t%C3%B6rv%C3%A9ny> Darcy-törvény.
- [74] <https://portal.nebih.gov.hu/-/a-policiklusos-aromas-szenhidrogenekrol>.
- [75] <https://www.allpowerlabs.com>
- [76] <https://www.biogreen-energy.com/pyrolysis-equipment>
- [77] <https://www.carrysun-tech.com/cpxqy>
- [78] [https://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/BioenNW_2015
0423_Symposium_PYREG.pdf](https://www.izes.de/sites/default/files/publikationen/Veranstaltungen/BioenNW_20150423_Symposium_PYREG.pdf)
- [79] <https://www.labaratuar.com/hu/testler/cevresel/polisiklik-aromatik-hidrokarbon-testi/>
- [80] <https://www.biogreen-energy.com/pyrolysis-equipment/processes>,

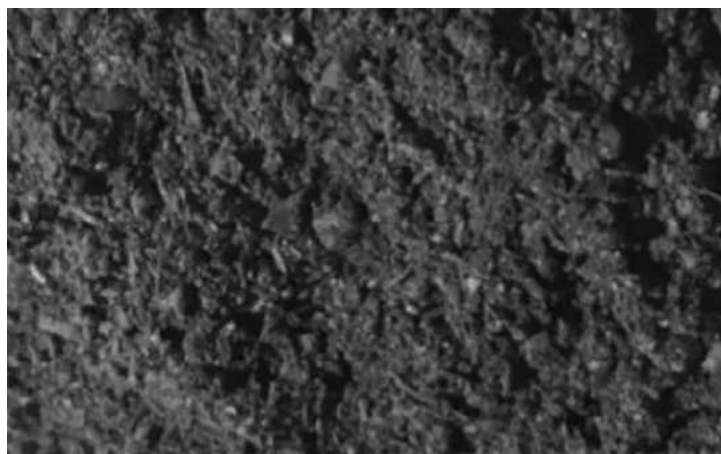
M2. A berendezés kiviteli példája (1.-3. ábrák)



1. ábra A berendezés kiviteli példája az *Agrofutura* ÁG üzemében



2. ábra A gyártott anyag (előtte és utána)



3. ábra A bioszén komposzttal keverve

M3. Táblázat. A fluidizált állapotra jellemző lebontási reakciók

Reakció kategóriák	Reakciók	Reakcióhő referencia hőmérsékleten 298 K ΔH (kJ/mol)	Reakciók neve
Szén égése	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394	Teljes égés
	$C + 0,5O_2 \rightarrow CO$	-111	Részleges égés
Szén gázosítása	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	+173	Metánosítás
	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	+131	Szén-széndioxid reakció
	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	+206	Gőz gázosítása
Illékony reakciók	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	+206	Metánreformálás
	$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	-41	Víz-gáz váltása
	$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$	-283	Szénmonoxid oxidációja
	$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$	-283	Metán oxidálása
	$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$	-242	Hidrogén oxidálása
Hamu reakció	$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (m/2)H_2$		Részleges oxidáció
	$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (m/2)H_2$		Száraz reformálás
	$C_nH_m + (2n - m/2)H_2 \rightarrow nCH_4$		Hidrogénezés
	$C_nH_m \rightarrow (m/4)CH_4 + (n - m/4)C$		Krakkolás

Forrás: WAMPLER, T. P. (2007).