



DECENTRALIZÁLT CHP PIROLÍZIS ERŐMŰ ENERGETIKAI VISZONYAI

Doktori (PhD) értekezés

BETOVICS ANDRÁS MÁTÉ

GÖDÖLLŐ

2025

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. Schrempf Norbert
egyetemi docens, PhD
MATE Műszaki Intézet

.....
az iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

.....
társ-témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS	7
1.1 A téma időszerűsége és jelentősége	7
1.2 Célkitűzések	8
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	9
2.1. Energia előállítás biomasszából pirolízissel	9
2.2. A kezelési módszertől függő jellemző végtermékek és tulajdonságaik	12
2.3. Fenntarthatóság és üvegházhatású gázkibocsátás csökkentése	15
2.4. Biomassza alapanyag tulajdonságai	15
2.5. Üzemi körülmények	16
2.6. A biomassza pirolízisének reakcióútjai, főbb összetevőinek bomlása	17
2.7. Eljárás típusok	19
2.7.1. Fix-ágyas generátorok	19
2.7.2. Fluidágyas generátorok	21
2.7.3. Forgódobos (rotary kiln) reaktorok	22
2.7.4. Kétfázisú rendszerek	23
2.7.5. Mikrohullámú vagy indukciós pirolízis reaktorok	23
2.8. Kapcsolt hő- és villamosenergiatermelés (CHP) folyamata pirolízissel	24
2.9. Biomasszából előállított villamosenergia kapacitás világviszonylatban	24
2.10. Különféle biomasszák és keverékeik energiatartalma	25
2.11. Faaprítékok nedvesség és méret szerinti besorolása	27
2.12. Fásszárú és lágyszárú biomassza alapanyagok felépítése	28
2.13. A fixágyas pirolízisreaktor működési zónái	29
2.14. Szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése	30
3. ANYAG ÉS MÓDSZER	31
3.1. A mérések során felhasznált eszközök, berendezések	31
3.1.1. Nedvességtartalom mérés	31
3.1.2. Égéshő meghatározása	32
3.1.3. Az anyagok elemi összetételének vizsgálata	33
3.1.4. Hamutartalom vizsgálata	34
3.1.5. Hamuolvadáspont meghatározás	35
3.1.6. Gázösszetétel vizsgálata	35

3.2. Mintaüzemi kísérleti berendezés	36
3.3. Különféle biomassza aprítékok és szemcse eloszlásuk	39
3.4. Anyagok porozitásának meghatározása	40
3.5. A hőbontásra kerülő anyagok szárítása	41
3.6. Szimuláció a rendszer paraméter változásainak elemzéséhez	45
4. EREDMÉNYEK	47
4.1. LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOK	47
4.1.1. Vizsgált biomasszák beltartalmi összetevői	47
4.1.2. Biomassza aprítékok sűrűsége	47
4.1.3. Szemcseméret hatása a tömegcsökkenésre, gázösszetétel változás	48
4.1.4. A TG görbék alakulása és nyomásváltozás a reaktorban	49
4.1.5. Vizsgálatok különböző kezelési hőmérsékleteken inert gázban	51
4.1.6. A hőmérséklet terjedésének geometriai alakulása	53
4.1.7. Az alapanyag nedvességtartalmának vizsgálata	55
4.1.8. Biomassza alapanyagok hamutartalma	56
4.2. ÜZEMI VIZSGÁLATOK	57
4.2.1. A rendszer elvi felépítése	57
4.2.2. A rendszer részegységeinek elhelyezkedése	58
4.2.3. A rendszerre jellemző hőfok és teljesítmény értékek	60
4.2.4. A működés ellenőrzése és a vezérlés	62
4.2.5. A 100 kW rendszer teljesítményének meghatározása	67
4.2.6. A rendszer csatlakozása a villamos hálózathoz	72
4.2.7. A keletkezett hőenergia és a hulladékhő felhasználása	76
4.2.8. A rendszer energetikai folyamatábrája a mérések szerint	77
5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	79
6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	82
7. ÖSSZEFOGLALÁS	84
8. SUMMARY	86
9. MELLÉKLETEK	87
M1: Irodalomjegyzék	87
M2 : Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk	91
M3 : Dolgozathoz kapcsolódó ábrák	93

JELÖLÉSJEGYZÉK

Rövidítések

CHP	Combined Heat and Power (Kapcsolt Hő- és Villamosenergia termelés)
TG	Termogravimetria (Hőkezelésnek alávetett minta tömegváltozása)
TGA	Thermogravimetric Analysis (Termogravimetriai Analízis)
CEC	Cation Exchange Capacity (Kationcsere Kapacitás)
ÜHG	Üvegházhatású gázok
PAH	Policiklusos aromás szénhidrogének
PLC	Programmable Logic Controller (Programozható Logikai Vezérlőegység)

Jelölések

C	szén	[-]
CH_4	metán	[-]
CO	szén-monoxid	[-]
CO_2	szén-dioxid	[-]
H	hidrogén	[-]
$H_{agáz}$	generátorgáz fűtőértéke	[kJ/m ³]
$H_{atü}$	tüzelőanyag fűtőértéke	[kJ/kg]
M	nedvességtartalom	[%]
N	nitrogén	[-]
NO_X	nitrogén-oxidok	[-]
O_2	oxigén	[-]
$q_{gáz}$	generátorgáz térfogatárama	[m ³ /h]
$q_{tü}$	tüzelőanyag tömegárama	[kg/s]
T	hőmérséklet	[°C]
η_{HG}	hideggáz hatásfok	[%]
t	idő	[s]
V	anyagtérfogat	[m ³]
V_h	hézagtérfogat	[m ³]
h	magasság	[m]
ε	porozitás	[-]
μ	dinamikus viszkozitás	[Pa s]

g	gravitációs állandó	[m/s ²]
v	sebesség	[m/s]
A	felület	[m ²]
δ_p	poros levegő sűrűsége	[kg/m ³]
A_{szf}	szűrőfelület	[m ²]
ΔP_{SZ}	szűrő nyomásvesztesége	[Pa]
K_C	szűrőszövet állandó	[1/m]
η_g	fagáz viszkozitás	[Ns/m ²]
F_n	apríték összes felülete	[m ²]
F_0	kiindulási felület	[m ²]
x_0	kiindulási darabszám	[db]
x_n	aprított darabszám	[db]
Δp	gáznyomáskülönbség	[Pa]
c	fajhő	[MJ/kg K]
$\dot{m}_g$	gáz tömegáram	[kg/s]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Napjainkban a megújuló energiaforrások hasznosítása kiemelten fontos feladat lett világszerte, s ezáltal a különféle biomasszák energetikai célú felhasználására is megnövekedett az igény.

A XXI. század egyik legnagyobb kihívása a klímaváltozás és az energiafüggőség kezelése, ami megköveteli a fenntartható és decentralizált energiatermelési módszerekre való áttérést. A fosszilis energiahordozók elégetése súlyos környezeti terhelést okoz, miközben az egyre növekvő globális energiaigény új, innovatív megoldásokat sürget. E problémákra kínál hatékony választ a kombinált hő- és áramtermelő (CHP) pirolízis erőművek fejlesztése, melyek a körforgásos gazdaság elveire épülve képesek a helyi biohulladék hasznosítására.

A CHP, vagy kapcsolt hő- és áramtermelés lényege, hogy az elektromos áram előállítása során keletkező hőenergiát nem engedjük el a környezetbe, hanem hasznosításra kerül. Ez a hőenergia felhasználható például épületek fűtésére, ipari folyamatokban, vagy melegvíz előállításra. A hagyományos, csak áramot termelő erőművek hatékonysága gyakran 40% alatti, míg a CHP rendszerek összteljesítménye, azaz az áram és a hő együttes hasznosítása révén, akár 80% feletti hatékonyságot is elérhet.

A megújuló energiaforrások, s ezáltal biomasszák hasznosítása így nem csak az energiaválságot enyhíti, hanem segít csökkenteni a fosszilis tüzelőanyagok környezetre gyakorolt hatását. A károsanyag kibocsátás mérséklése ugyancsak kulcskérdés a jövő energiaelőállítása során, ezért ezt a szempontot is figyelembe kell venni az új eljárások kidolgozásakor.

Az Európai Unió 2050-re kitűzött célja a klímasemlegesség elérése, 2030-ig pedig a megújuló energiaforrások arányának növelése legalább 42,5 %-ra.

E dolgozatban különös hangsúlyt kap a decentralizált modell, amely a nagyméretű, központi erőművekkel szemben a helyi erőforrások optimális kihasználását teszi lehetővé. Ez a megközelítés csökkenti a szállítási költségeket és a logisztikai lábnyomot, miközben erősíti a helyi gazdaságokat és energiabiztonságot.

A CHP pirolízis erőművek a nap- és szélenergia ingadozó természetével szemben állandó, alapterhelésű energiát képesek biztosítani, így kiegészítve és stabilizálva az energiahálózatot.

Ezenkívül a melléktermékként keletkező bioszén a mezőgazdaságban talajjavítóként és a szén-dioxid megkötésében is jelentős szerepet játszik, hozzájárulva a negatív szén-dioxid-kibocsátású technológiák elterjedéséhez.

A fenntartható és környezettudatos pirolízis CHP (kombinált hő- és villamosenergia termelő) rendszerekkel tehát a megtermelt energia helyben hasznosítható, villamosenergia többlet esetén pedig a megfelelő szinkronizálás után a közüzemi hálózatra táplálható.

A biomasszák előnyös tulajdonságai akkor használhatók ki a legjobban, ha valamilyen természetes eredetű hulladékhulladékanyag vagy melléktermék kerül felhasználásra, hiszen ekkor a megsemmisítés helyett energia nyerhető ki a folyamatból.

1.2. Célkitűzések

A decentralizált CHP rendszerek lényege, hogy az alapanyagokat helyben, kis vagy közepes méretű egységekben alakítjuk át hővé és villamos energiává, így csökkentve az energiaveszteségeket és az infrastrukturális igényt.

A biomassza pirolízis egy nagyon szerteágazó és összetett rendszer, melyet számos tényező befolyásol. A faapríték pirolízisen alapuló kombinált hő- és villamosenergia-termelésre történő hasznosítása egy olyan innovatív technológiai megközelítés, amely számos előnnyel jár, ugyanakkor jelentős műszaki és mérnöki komplexitást is hordoz.

A kutatás keretében elsősorban a biomassza előkészítésének, a pirolízis folyamatának, valamint a keletkező termékek energetikai hasznosításának vizsgálatára összpontosítottam, különös tekintettel a rendszer hatásfokára, működési stabilitására és környezeti hatásaira. A munka során interdiszciplináris megközelítést alkalmaztam, ötvözve a gépészeti, energetikai, anyagtudományi és környezetvédelmi szempontokat annak érdekében, hogy gyakorlati szempontból is életképes, fenntartható technológiai megoldások valósulhassanak meg.

Dolgozatomban a puhafa és keményfa aprítékok, valamint a vágástéri nyesedék, mint biomassza energetikai célú hasznosításával foglalkoztam, decentralizált környezetben. A bőségesen rendelkezésre álló alapanyag kiváló inputot jelent a kombinált villamos- és hőenergia előállításához.

A kutatás megvalósítását saját laboratóriumi mérések elvégzésével és egy, a kutatócsoportunk által létrehozott (MATE-Pyrowatt Kft.) 100 kW villamos teljesítményű üzemi CHP pirolízis kiserőmű validációjával valósítottam meg.

Célkitűzéseim voltak tehát a munka során:

- meglévő hazai és az igen jelentős nemzetközi szakirodalom megismerése
- új technológiai lehetőségek kutatása a fejlesztés céljából
- laboratóriumi kísérletek végzése minta fix-ágyas pirolizáló berendezéseken
- decentralizált energiaellátáshoz illeszkedő biomassza alapanyagok és tulajdonságaik meghatározása
- kutatócsoportunk (MATE - Pyrowatt Kft.) által fejlesztett és kivitelezett 100 kW villamos teljesítményű fix-ágyas CHP rendszer üzemi validációja
- új tudományos eredmények megállapítása és közzlése

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

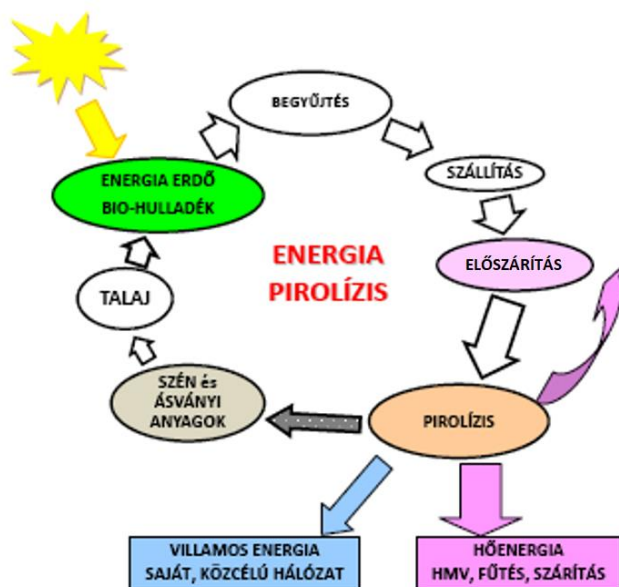
Ebben a fejezetben bemutatom a témához kapcsolódó legfontosabb szakirodalmi forrásokat, összefüggéseket a biomassza pirolízis és a kapcsolódó CHP energiatermelés vonatkozásában. Világszerte jelentős figyelemnek örvend a biomassza témakör, hiszen a megújuló energiaforrások használata nem csak divatos, hanem gazdaságilag is előnyös, illetve a fenntarthatóság jelképe is egyben. A dolgozat részeként ezért egy komplex kitekintés következik a jellemzőbb technológiai tudnivalókról.

2.1. Energia előállítás biomasszából pirolízissel

A biomassza eredendően növényekből vagy állatokból származó szerves anyag, mely elsősorban a fotoszintézis reakciójára vezethető vissza, ahol széndioxid abszorpció és oxigén felszabadulás megy végbe. A különböző biomassza típusok közül a leggyakrabban használtak főként ligninből, cellulózból és hemicellulóz összetevőkből állnak. (P. Basu, 2018)

Biomasszából történő energia előállításra többféle eljárás létezik, ideértve a hagyományos égetést, az erjesztéses biogáz technológiát vagy a pirolízist. Dolgozatomban én az utóbbival foglalkozom.

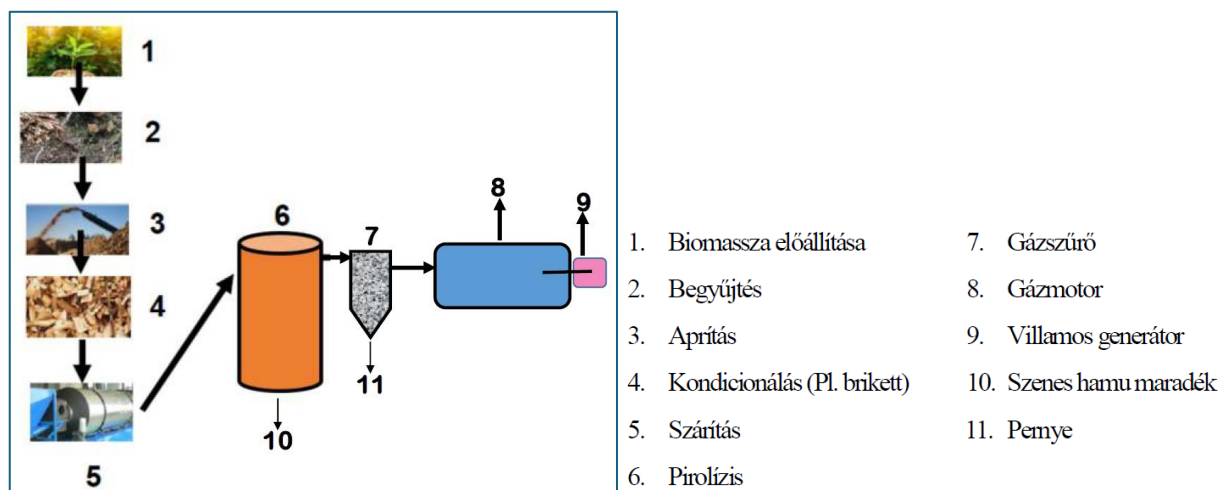
Az alábbi, 1. ábra a biomassza pirolízis körforgásos gazdaságba illeszthető modelljét mutatja be, ahol gyakorlatilag egy újrahasznosítási folyamat részeként a rendelkezésre álló biomasszát először begyűjtik, majd szárítás után feldolgozzák és felhasználásra kerül energetikai célra, majd a visszamaradt végterméket (bioszenet és ásványi anyagokat) visszajuttatják a talajba, ezzel javítva annak minőségét.



1. ábra A pirolízis folyamatának ökológiai körcirkulációja (Tóth L. Mg. Technika 2016)

A pirolízis folyamatokból kibocsátott üvegházhatású gázok (ÜHG) mennyisége nagyon csekély a hagyományos technológiákhoz képest. Ezáltal jelentős kutatási lehetőség nyílik előnyeinek kihasználására a környezeti szempontok figyelembevételével, melyhez a biomassza pirolízis során széles alapanyag-választék rendelkezésre áll.

A teljes biomassza feldolgozási folyamatát a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra A biomassza pirolízis technológiai folyamata (saját ábra)

A biomassza pirolízis egy termokémiai eljárás, amelynek során a szerves anyagokat oxigén hiányában vagy oxigénszegény körülmények között, hő hatására bontják le. Az elnevezés a görög "pyro" (tűz) és "lysis" (szétválasztás) szavakból ered, ami a termikus szétválasztás lényegét fejezi ki. Ez a folyamat szilárd (bioszén), folyékony (bioolaj) és gáznemű (szintézisgáz) termékeket eredményez. (Sharma et al. 2015; Raza M. et al. 2021)

A biomassza energiatermelésre való felhasználása kettős célt szolgál: az üzemanyag-biztonságot és a CO₂-kibocsátás csökkentését. (Sansaniwal et al. 2017) A jövőben a biomassza technológiák jelentős szerepet fognak játszani az energiabiztonság megteremtésében és a növekvő energiaigények kielégítésében. A rendelkezésre álló különféle megújuló energiaforrások közül a biomassza könnyen hozzáférhető, és szén-dioxid-mentes forrásnak tekinthető. (Raza. M. et al. 2021)

A biomassza alapanyag oxigén hiányában termikusan lebomlik. Ez a jelenség a reakciózónában zajló számos összetett folyamat eredménye. A biomassza anyag illékony komponensei melegítéssel szabadulnak fel, amelyek ezután részben bioolajjává alakulnak át. Az inert atmoszféra a biomasszát a termikus stabilitás határa fölé melegíti, ami stabilabb termékeket és szilárd maradékot eredményez. Az inert közeg fő előnye, hogy a biomassza anyagok égés nélkül melegednek fel. (Mubarak, N. et al. 2014)

A pirolízis folyamata jellemzően két fő részből tevődik össze: elsődleges pirolízisből és másodlagos pirolízisből. Az elsődleges pirolízis során a biomassza alapanyag szétesik különböző alkotóelemekre és az illékony anyagoktól mentesül. (Conesa J. et al. 1998). A fő átalakulási folyamat a másodlagos pirolízis során megy végbe, ahol a nehéz vegyületek szén és gázzá válnak.

(C, H₂, CO₂, CO és CH₄) bomlanak szét. A különböző végtermékek előállítása a pirolízis körülményeitől, például a hőmérséklettől, a tartózkodási időtől és a melegítési sebességtől függ. (Patwardhan, P.R. et al. 2011)

A biomassa CO₂-reformáló gázosítási folyamatának főbb kémiai reakcióit az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A biomassa CO₂-reformáló gázosítási folyamatának főbb kémiai reakciói

Reakció	Képlet
Pirolízis reakció	$\text{CH}_{1.591} \text{O}_{0.821} \rightarrow \text{C} + \text{CO} + \text{H}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4 + \text{Hamu}$
Kátrányt és CO₂-t reformáló reakció	$\text{CH}_x\text{O}_y + a\text{CO}_2 \rightarrow b\text{CO} + c\text{H}_2 + d\text{CH}_4 + e\text{H}_2\text{O}$
Metánt és CO₂-t reformáló reakció	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$
Víz-gáz reakció	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$
Boudouard reakció	$\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$
Víz-gáz reakció	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$
A szén reakciója metánná	$\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$

A különféle tüzelőanyagok pirogén bomlásakor összetett és bonyolult folyamatok zajlanak, az egymást követő reakciós szakaszok nem választhatók el teljesen egymástól. (Di Blasi, C., 1993)

Mind a pirolízis, mind a reformálás endoterm reakciók, és sok energiát igényelnek (Cheng, Y. et al. 2016)

Az egész folyamat a bemeneti energia, a pirolízis reakció és az elgázosítási reformáló reakció függvénye, ahol a rendszer teljes energiafogyasztásának (Q_{Total}) fő összetevői (Yung Gao et al. 2023):

- a pirolizálási energiafogyasztás (Q_P),
- a bioszén égéshője (Q_C),
- a szintézisgáz hulladékhő visszanyerése (Q_{RE}) és
- a külső energia (Q_R).

A teljes energiafogyasztás tehát:

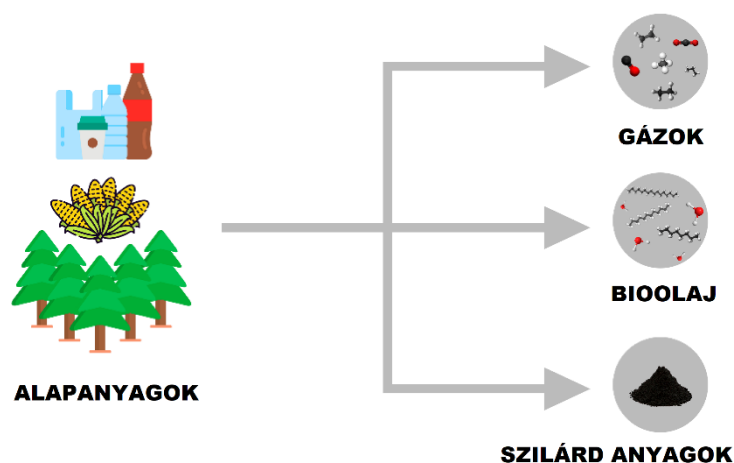
$$Q_{\text{Total}} = Q_R + Q_P - Q_C - Q_{RE} \quad (1)$$

2.2. A kezelési módszertől függő jellemző végtermékek és tulajdonságaik

A biomassza pirolizálás során elsősorban egy adott típusú végtermék előállítása a cél. A pirolízis termékeinek eloszlása és minősége azonban nagymértékben függ a folyamatparaméterektől. A folyamatparaméterek tehát befolyásolják a végterméket és a hozamra is jelentős hatással bírnak. (Tripathi M. et al. 2016)

Minden pirolízis típusnak különböző végtermékei vannak, és más-más összetevőkből állnak. (Ruiz, J.A et. al. 2013). Az alábbi 2. táblázatban a jellemzőbb típusok kerülnek bemutatásra a végtermékeikkel együtt. A pirolízis hatásfoka a pirolízis termékek teljes fűtőértéke és a minta feldolgozásához felhasznált teljes hőenergia különbségének arányaként kapott termikus hatásfok. (Weldekidan et al. 2019)

A pirolizálás főbb végtermékeit a 3. ábra szemlélteti.



3. ábra A pirolizálás főbb termékei (Rangel, M. et. al. 2023)

2. táblázat Jellemző hőmérsékletek (Joseph et al. 2017)

Módszer	Hőközlés sebessége	Hőfok (°C)	Végtermék
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%

A lassú pirolízis elősegíti a szilárd termékek, de leginkább a bioszén képződését, mivel az alacsonyabb hőmérséklet lehetővé teszi a lassabb és stabilabb széntartalmú szerkezetek kialakulását a biomassza bomlása során. (Boer, F.D, 2024)

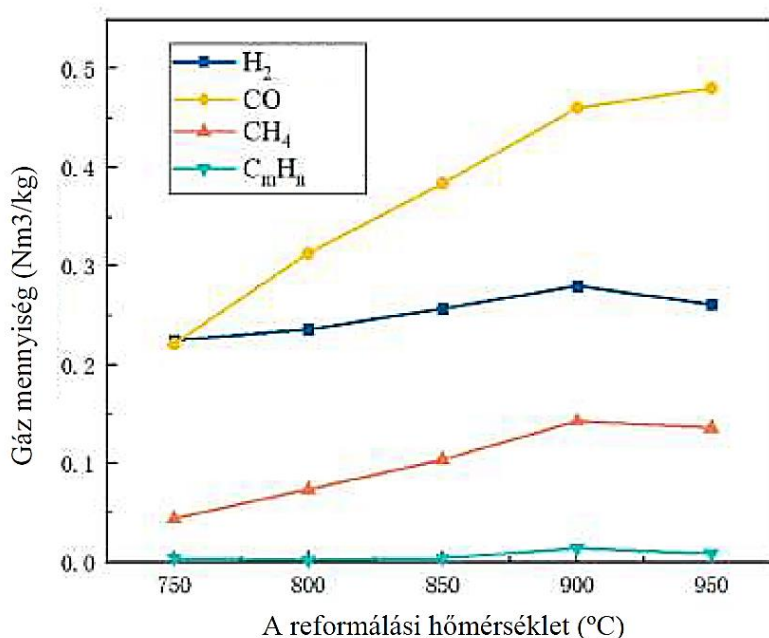
A szilárd és gázfázis közötti hosszabb érintkezési idő, amely a hosszabb reakcióidőnek tudható be, lehetővé teszi a kátránygőzök repolimerizációját, aminek következtében megnövekszik a bioszén hozam. (Babinszki B. et al. 2021)

A gyors pirolízis egy olyan eljárás, ahol a folyadékok maximalizálása a cél elsősorban, leginkább a bioolaj előállításra használható, míg a bioszén képződés minimálisnak tekinthető. (Nanda S. et al. 2016)

A pirolízálás előtt az anyag víztartalma kritikus tényező a keletkező bioolaj szempontjából, éppen ezért, hogy jó minőségű végterméket kapjunk, előszárítás szükséges, addig míg a víztartalom jelenléte minimális lesz. (Aboelela D., 2023)

Gázosítással szinte mindenféle biomasszát szintézisgázzá lehet alakítani. Jellemzően H_2 , CO , CO_2 és CH_4 keletkeznek az eljárás eredményeképp. Ezekből az összevökből különféle további energiaforrások vagy energiahordozók állíthatók elő. (Chen W-H et al. 2015)

Yung Gao (2023) kutatásai szerint magasabb hőfokokon az anyagok redukciója révén a gáz összetevők jelentősen változnak és ezáltal a véggáz minősége is eltérő. (4. ábra)



4. ábra A hőmérséklet hatására az összetevők változása (Yung Gao. et al. 2023)

Energia ellátási szempontból gazdasági és ökológiai vonatkozásban is fontos, hogy a nagy mennyiségben rendelkezésre álló, erősen vegyes összetételű, többnyire szilárd fázisú melléktermékekből termokémiai konverzióval éghető gázok keletkeznek, melyekből kogenerációs erőművekben hő-, és villamosenergiát tudunk termelni, mégpedig fenntartható módon.

A biomassza-gázosítási folyamatokban a bioszén gyakorlatilag melléktermék, amely szilárd formában képes energiát tárolni. (Mishra R. K. et al. 2023)

A bioszén tovább hasznosítható energetikai célokra vagy például a mezőgazdaságban talajjavításra. (Tóth L. et al., 2019; Madár V. et al. 2023)

Bridgwater AV. (2009) szerint a legtöbb szilárd végtermék 300- 500 °C kezelési hőmérséklet között keletkezik, úgynevezett lassú-torrefakciós és lassú-szenesedési folyamat eredményeképp.

A torrefakció egy enyhe hőkezelés, amely a lignocellulóz biomasszát szilárd anyaggá alakítja, amely nagyobb energiasűrűséggel, jobb őrlhetőséggel és alacsonyabb nedvességérzékenységgel rendelkezik, mint az eredeti biomassza. (Prins MJ et al. 2006)

A lignocellulóz biomassza termikus lebomlását szabályozó fő paraméterek a hőmérséklet, gáz- és szilárd halmazállapotú tartózkodási idők, valamint maga a reakciókörnyezet. A hemicellulóz, a cellulóz és a lignin, mint a három legfőbb alkotó komponens, egymástól eltérő termikus stabilitással rendelkeznek, különböző kezelési hőmérsékleten különböző végtermékekhez juthatunk. (Wild P. de et al. 2011)

A pirolízis jelenségek mérése és modellezése során a kutatók jellemzően a termogravimetriát (TGA- Thermogravimetric Analysis) alkalmazzák (Lehmann, J. et al. 2009)

A legjellemzőbb pirolízis termékeket és tulajdonságaikat a 3. táblázat foglalja össze.

3. táblázat Pirolízis termékek és tulajdonságaik

Termék	Tulajdonságok	Alkalmazások
Bioolaj	Sötétbarna folyadék; 20-30 wt% víztartalom; pH 2-3 (savas); 35-40 wt% oxigéntartalom; 1.10-1.30 g/ml sűrűség; 13-18 MJ/kg LHV; 15-35 cSt viszkozitás 40 °C-on; instabil, öregedésre hajlamos; nem elegyedik kőolajjal, de poláris oldószerekkel igen	Üzemanyag kazánokban, kemencékben, motorokban, turbinákban (hő- és villamosenergia-termelésre); speciális vegyi anyagok (pl. ragasztók, ízesítők, metanol) alapanyaga
Bioszén	Szilárd, szénben gazdag, porózus anyag; poliaromás szerkezet; N, P, K, Ca, Mg, S tápanyagokat tartalmaz	Talajjavító (javítja a termékenységet, vízvisszatartást, pH-t, CEC-t, mikrobiális aktivitást); szénmegkötés (hosszú távú CO ₂ eltávolítás); katalizátorhordozó, aktív szén, grafén, szén nanocsövek prekursora
Szintézisgáz	Gáznemű keverék; H ₂ , CO, CH ₄ , CO ₂ , könnyű szénhidrogének; éghető komponenseket tartalmaz	Hő- és villamosenergia-termelés (a pirolízis folyamatának hőellátására is felhasználható); kémiai alapanyag (metanol, ammónia, Fischer-Tropsch üzemanyagok, tiszta hidrogén)

2.3. Fenntarthatóság és üvegházhatású gázkibocsátás csökkentése

A világ népességének gyors növekedésével és az egy főre jutó energiaigény növekedésével kiemelkedővé vált az üvegházhatású gázok kibocsátásának mérséklésére és a hatékony hulladékgazdálkodásra irányuló innovatív stratégiák iránti igény. A pirolízis, mint termokémiai átalakítási folyamat, elősegíti a különféle biomassza-alapanyagok (pl. mezőgazdasági biomassza, erdészeti hulladékok, és más széntartalmú hulladékok), értékes bioüzemanyagokká, többek közt bioolajjá, bioszénré és szintézisgázzá történő alakítását. (Talwar P. et al. 2025)

A biomassza pirolízis fenntartható és környezetbarát módszer a szerves anyagok átalakítására. Jelentősen csökkenti az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátását azáltal, hogy a szerves hulladékot eltereli a hulladéklerakókból, megakadályozva ezzel a metánkibocsátást (metán az egyik legerősebb üvegházhatású gáz) az anaerob bomlásból. (Raza, M. et al. 2023)

A szerves anyagokból, például mezőgazdasági maradványokból, erdészeti hulladékból, és bizonyos energianövényekből származó biomassza-energia kulcsfontosságú megoldássá vált a globális fenntarthatósági célok elérésében. (Malay LC. et al. 2020)

4. táblázat Biomassza-átalakítási technikák összehasonlító elemzése (Mensah, P. et al. 2025)

Technológia	Hatékonyság (~%)	Szén-dioxid-kibocsátás (~kg CO ₂ /GJ)	Energiatermelés (~MJ/kg)
Égetés	15-40	90-110	10-18
Erjesztés	50-70	20-30	20-25
Pirolízis	40-75	50-70	25-35
Gázosítás	70-85	30-50	30-45

A 4. táblázatból megállapítható, hogy a pirolízist és gázosítást a forrás külön technológiaként kezeli, viszont hatékonyságuk a többi, hagyományosnak mondható technológiával szemben jóval magasabb, akár 85% is lehet. Környezetvédelmi szempontból vizsgálva a szén-dioxid kibocsátás pedig jelentősen alacsonyabb az égetéses és erjesztéses technológiákhoz képest.

2.4. Biomassza alapanyag tulajdonságai

A pirolízis termékhozama és összetétele nagymértékben függ mind a biomassza alapanyag tulajdonságaitól, mind az üzemi körülményektől.

- **Összetétel (lignocellulóz komponensek):** A biomassza egy komplex, többkomponensű alapanyag, amely elsősorban cellulózból (40-50%), hemicellulózból (25-35%) és ligninből

(15-20%) áll, valamint extraktív anyagokat, lipideket, fehérjéket és szerves hamut tartalmaz. Ezeknek a komponenseknek eltérő molekuláris szerkezete különböző bomlási mechanizmusokat eredményez a pirolízis során. A magasabb cellulóz- és hemicellulóz-tartalmú biomassza jellemzően több bioolajat termel, míg a ligninben gazdag biomassza hajlamosabb a bioszén képződésre a magasabb szerkezeti stabilitása miatt. Például a fa általában több illékony anyagot és kevesebb bioszén ad, mint a szalma vagy az olajbogyó-hulladék. A talaj, az életkor és az ültetési körülmények is befolyásolhatják ugyanazon biomassza összetételét, ami viszont hatással lehet a termelési folyamatra. (Rangel M. et al. 2023; Ranzi E. et al. 2017)

- **Részecskeméret:** Meghatározó tényező a pirolízis során, hiszen minél nagyobb és változatosabb geometriájú anyaggal üzemeltetjük a berendezést, annál egyenetlenebb és változékonyabb lesz az eredmény. Éppen ezért előnyös és célszerű minél apróbb, lehetőleg nem túl nagy méretű anyagot betáplálni.
- **Nedvességtartalom:** A pirolízis folyamata nagymértékben függ az alapanyag nedvességtartalmától, ideális esetben ez 10-15% körül van. A magas nedvességtartalom nagy mennyiségű víz képződéséhez vezet, ami gátolja a fűtőértéket. Előszárítás sok esetben szükséges.
- **Hamutartalom:** A magasabb hamutartalom, különösen a mezőgazdasági maradványokban, elősegíti a szénképződési reakciókat, és alacsonyabb folyékony hozamhoz, megnövekedett víz- és gázképződéshez, valamint szennyeződések bekerüléséhez vezethet. A hamu komponensei katalitikus hatással bírnak.

2.5. Üzemi körülmények

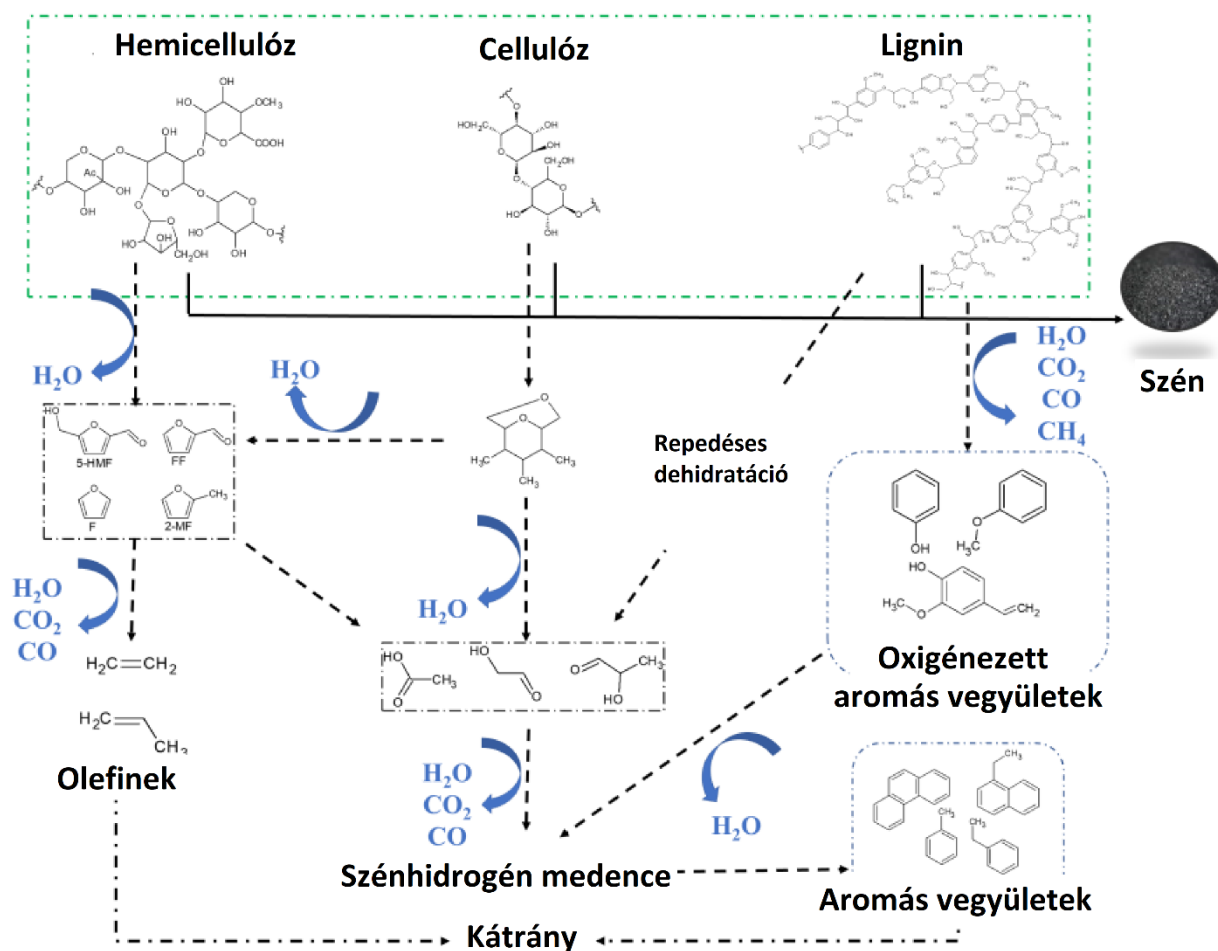
A hőmérséklet, a fűtési sebesség és a tartózkodási idő közötti kölcsönhatás komplex optimalizációs problémát jelent. Ezen paraméterek pontos szabályozása elengedhetetlen a termékhozam és a minőség testre szabásához, ami azt jelenti, hogy a reaktortervezés és a folyamatszabályozó rendszerek kulcsfontosságúak az ipari méretezhetőség és a gazdasági életképesség szempontjából.

- **Hőmérséklet:** Kulcsfontosságú paraméter, amely befolyásolja a végtermékek eloszlását. Az alacsonyabb hőmérsékletek (pl. <450 °C) a bioszén képződését segítik. A mérsékelt hőmérsékletek (400-600 °C) és a köztes körülmények maximalizálják a bioolaj hozamát. A magasabb hőmérsékletek (>800 °C vagy akár 1000 °C) gyors fűtési sebességgel elsősorban gázokat eredményeznek, mivel a bioolaj tovább bomlik.

- **Fűtési sebesség:** Közvetlenül befolyásolja a termékhozamokat. A gyors fűtési sebességek (gyors pirolízis, flash, azaz villanó pirolízis) elősegítik a folyékony és gáznemű termékek képződését a gyors illékonyanyag-képződés és a másodlagos szénképződési reakciók korlátozásával. A lassú fűtési sebességek maximalizálják a bioszén hozamát.
- **Tartózkodási idő:** A rövid gőztartózkodási idő jelentős szerepet játszik a gyors/flash pirolízisben a másodlagos reakciók (pl. gőzök gázokká való bomlása, kátrányképződés, kokszképződés) megelőzésére, amelyek csökkentik a folyékony hozamot. A hosszabb tartózkodási idő a lassú pirolízisben elősegíti a bioszén képződését.
- **Gázáramlási sebesség:** Az inert gázok (pl. nitrogén) áramlási sebességének optimalizálása elősegíti az illékony anyagok hatékony eltávolítását, megakadályozva a másodlagos reakciókat és javítva a termékminőséget.

2.6. A biomassza pirolízisének reakcióútjai, főbb összetevőinek bomlása

A biomassza alapanyagok jellemző összetevőit és ezeknek a pirolízis folyamat során végbemenő reakcióit az 5. ábra mutatja be. Megfigyelhető, hogy a cellulóz, hemicellulóz és lignin összetevők alapvetően más-más reakcióúton bomlanak le és alakulnak át.



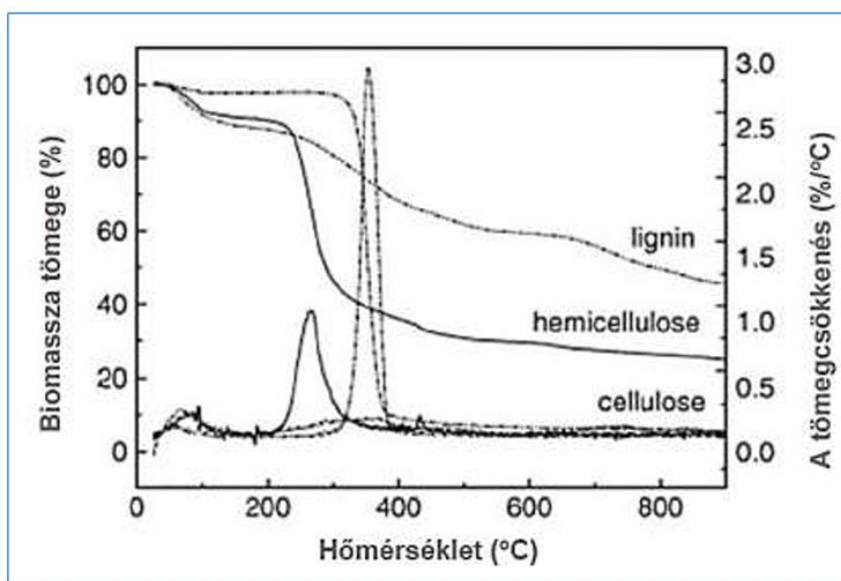
5. ábra A biomassza pirolízisének reakcióútjai (Rangel, M. et. al. 2023)

A biomassza komponensei különböző kémiai szerkezetűek, így eltérő stabilitással rendelkeznek hőhatásra. Ezért pirolízisük során nem egyszerre, hanem különböző hőmérséklettartományokban bomlanak le.

A hemicellulóz amorf, rövidebb láncú és heterogén poliszacharid, amely xilózból, arabinózból és más cukoregységekből épül fel. Hőérzékenysége viszonylag magas, így már 200–350 °C között megindul a bomlása. A hemicellulóz bomlása során keletkező termékek általában vízzoldhatóak és illékonyak.

A cellulóz egy jól rendezett, kristályos szerkezetű, hosszú láncú glükóz-polimer, amely jóval stabilabb hőre, mint a hemicellulóz. Bomlása jellemzően 300–400 °C között zajlik le, és hirtelen, gyors tömegvesztéssel jár. A bomlás fő terméke a levoglukozán, amely a lánctörések során keletkezik, de ezen kívül kisebb mennyiségben aldehidek, ketonok, CO, CO₂ és víz is képződnek.

A lignin egy térhálós aromás polimer, amely különböző fenil-propán egységekből épül fel (guaiacil, sziringil stb.). Termikusan a legstabilabb a három fő komponens közül, és bomlása egy széles hőmérsékleti tartományban, kb. 250–500 °C között, fokozatosan történik. Mivel szerkezete jelentősen eltér a poliszacharidoktól, bomlásakor főként fenolos vegyületek, aromás szénhidrogének keletkeznek, valamint jelentős mennyiségű szilárd szénmaradvány (bioszén).



6. ábra A biomassza főbb összetevőinek bomlása a hőmérséklet függvényében (Yang H. et al. 2007)

A biomassza pirolízise során tehát a hemicellulóz, a cellulóz és a lignin különböző hőmérsékleti tartományban és eltérő módon bomlik (6.ábra). A hemicellulóz már viszonylag alacsony hőmérsékleten, míg a cellulóz közepes, a lignin pedig széles és magas hőmérséklettartományban bomlik le. E bomlási sajátosságok ismerete lehetővé teszi a pirolízis folyamatainak célzott irányítását. Az eltérő bomlási viselkedés tehát kulcsfontosságú a biomassza energetikai és kémiai hasznosításában.

2.7. Eljárás típusok

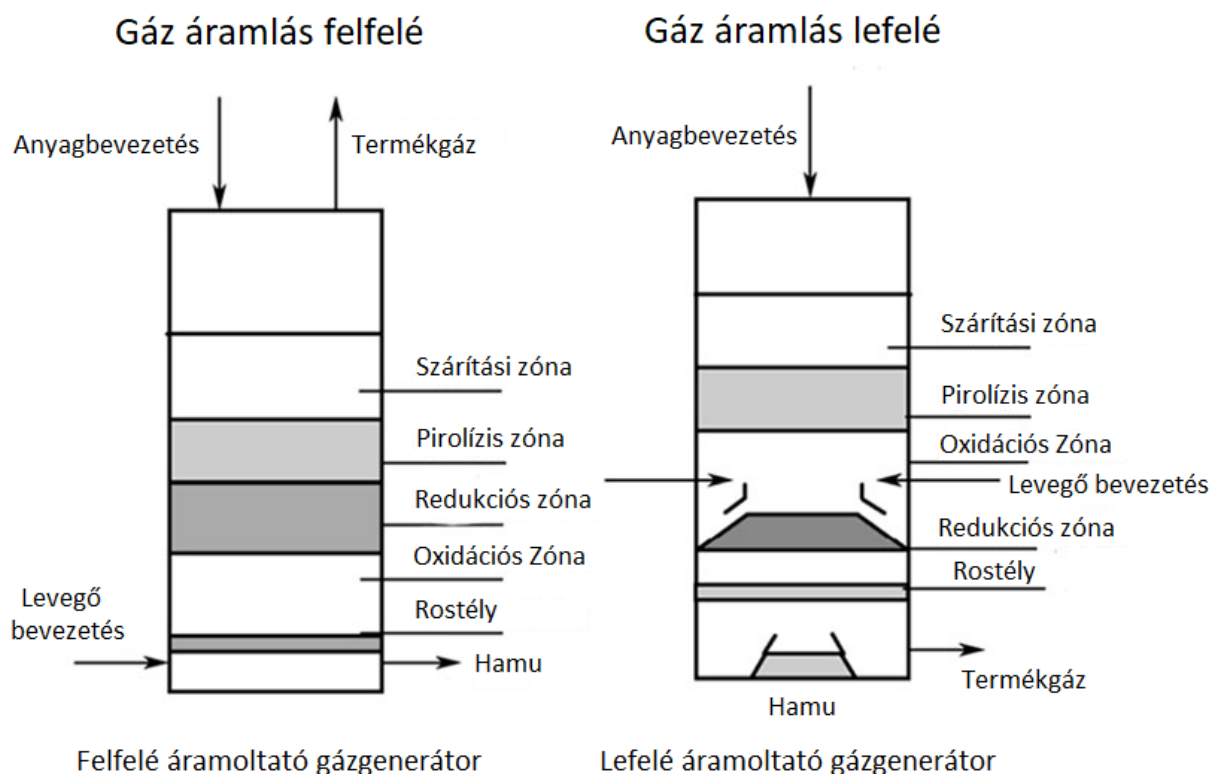
A biomassza pirolízisre többféle eljárás ismeretes, legismertebb változatok a fix-ágyas, fluidágyas, forgódobos, kétfázisú rendszerek, de léteznek mikrohullámú, illetve indukciós reaktorok is. Az adott technológia kiválasztása nagymértékben függ a rendelkezésre álló alapanyag fajtától, valamint a tervezett rendszer teljesítményétől. Alábbiakban bemutatom a legjellemzőbb eljárás típusokat.

2.7.1. Fix-ágyas generátorok

A fix-ágyas reaktorokra jellemző, hogy szélesebb hőmérséklettartományban képesek működni és magas szén-dioxid-átalakítási hatékonysággal rendelkeznek. Magasabb hamutartalmú alapanyagokat is fel tudnak dolgozni, és viszonylag alacsony kátránytartalmú gázt állítanak elő. Egy fix-ágyas reaktor alkalmazása optimalizálhatja a pirolízis folyamatparamétereit, beleértve a hőmérsékletet, a fűtési sebességet, a gőz tartózkodási idejét. (Brahma S. et al. 2022)

A fix-ágyas reaktorok előnyei közé sorolható a költséghatékony működés, egyszerű kezelhetőség, könnyű tisztíthatóság és az alacsony karbantartási igény. (Mong. G.R. et al. 2022)

A fix-ágyas gázgenerátorok legjellemzőbb típusai a felfelé- illetve lefelé áramoltató (7.ábra), valamint a keresztáramú (8.ábra) berendezések.

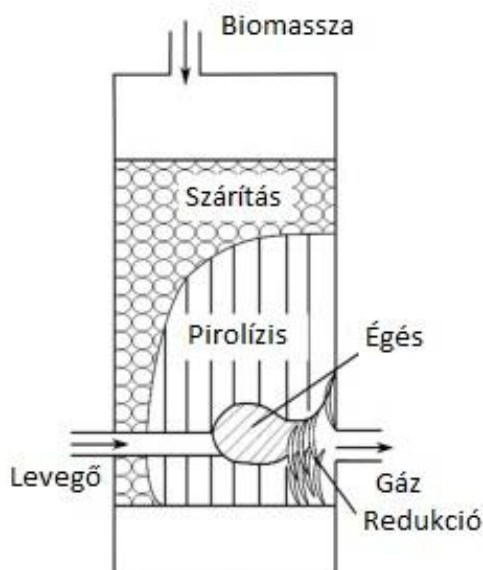


7.ábra Felfelé és lefelé áramoltató fix-ágyas generátorok (Bosmans A. et al. 2013)

A felfelé áramoltató, vagy angolul „updraft” típusú gázgenerátorban a levegőt az alsó részen vezetik be, és az felfelé áramlik a lefelé haladó tüzelőanyag-tölteten keresztül. Ebben az elrendezésben az alsó zónában zajlik az égés és a redukció, míg a pirolízis és a szárítás a felsőbb rétegekben történik, a felfelé áramló forró gáz hatására. A felfelé áramoltató rendszerek előnye, hogy nagyon hatékonyan hasznosítják a hőt, mivel az égési zónában keletkező hőenergia előmelegíti a felette elhelyezkedő tüzelőanyagot. Ugyanakkor jelentős hátrányuk, hogy a keletkező gáz a még el nem gázosodott biomasszán is áthalad, így magas kátránytartalmú lesz.

A lefelé áramoltató, azaz „downdraft” típusú gázgenerátorok a legelterjedtebbek, különösen olyan alkalmazásokban, ahol a cél a tiszta, alacsony kátránytartalmú gáz előállítása. Ezekben a rendszerekben az oxidálószer és a tüzelőanyagot is felülről juttatják be, és mindkettő lefelé mozog a reaktorban. Az égés zónája a rendszer középső részén helyezkedik el, és a keletkező gáz az izzó, forró szénrétegen halad keresztül, ahol a kátrányos vegyületek hőbontással nagyrészt lebomlanak. Ennek eredményeként a távozó gáz tisztább, és jobban megfelel gázmotorban történő felhasználásra.

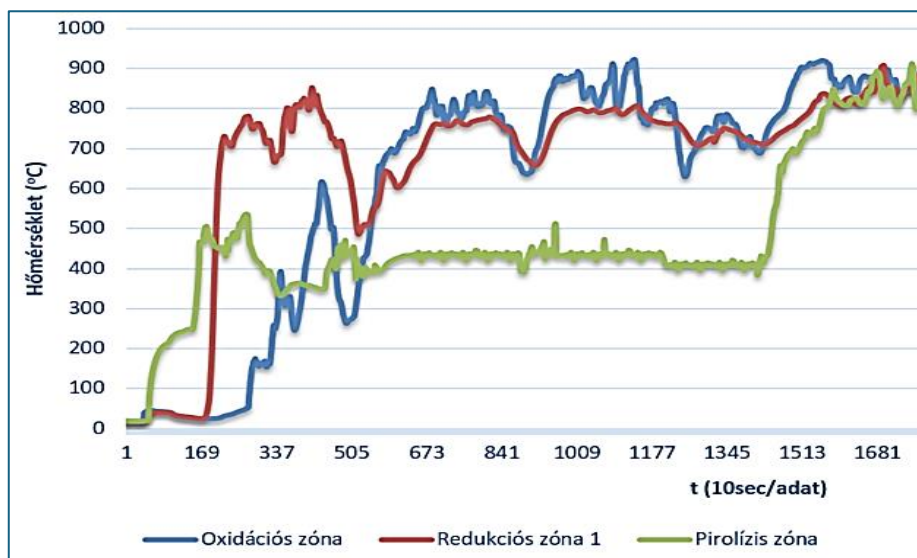
A keresztáramú, vagy „crossdraft” gázgenerátorok ritkábban alkalmazott típusok, ebben a konfigurációban az oxidálószer oldalirányból, vízszintesen vezetik be a reaktorba, míg a tüzelőanyag továbbra is függőlegesen lefelé mozog. Az égési zóna ebben az esetben a gázkivezetés közelében található, ezért a keletkező gáz nem halad át olyan hosszú reakciózónán, mint a lefelé áramoltató rendszerben, így a gáz kátránytartalma magasabb lehet.



8. ábra Keresztáramú fix-ágyas gázgenerátor (Nguyen, V. N. et al. 2024)

Tóvári és Madár (2011) kísérletei alapján (9.ábra) a fix-ágyas gázgenerátoroknál jellemzően három lényeges hőzóna rajzolódik ki. Az oxidációs valamint redukciós zóna főként a felfűtési szakasz esetében tér el, viszont a hosszabb hőn tartáskor kiegyenlítetten zajlik tovább a konverzió.

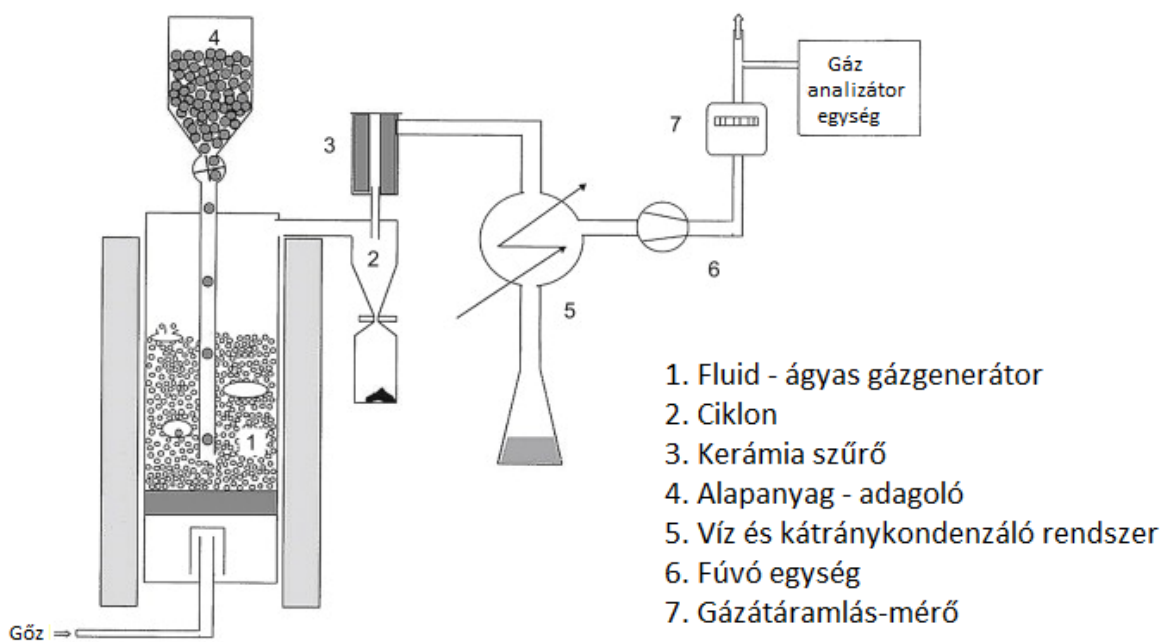
A tervezés során mindenképpen oda kell figyelni, hogy a reaktorban lévő különféle zónák minél jobban elkülönülhessenek egymástól, ezzel elősegítve a pontos szabályozhatóságot.



9. ábra Jellemző zónák a reaktortérben (Tóvári és Madár, 2011)

2.7.2. Fluidágyas generátorok

A fluidágyas generátorok (10. ábra) legfőbb jellemzője, hogy fluidizált (lebegő) állapotban tartják a betáplált anyagot. Előnyös tulajdonságuk közé tartozik többek közt az egyenletes hőeloszlás, s ezáltal a jó hőátadás biztosítása, valamint használható finom poros anyagokhoz is. A fluidágyas elgázosító tipikus üzemi hőmérséklete 800 és 1000 °C között van.



10. ábra Fluid-ágyas gázgenerátor (Rapagna S.et al. 2000)

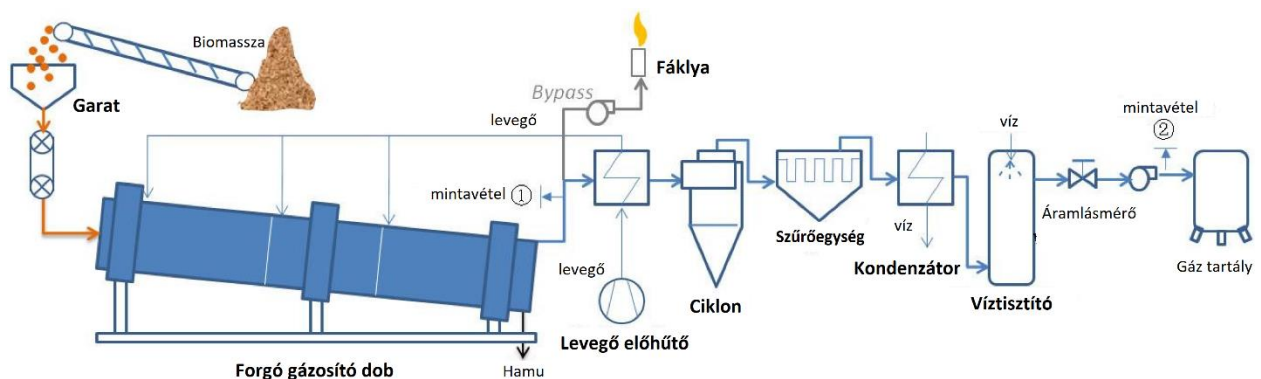
A fluidágyas reaktort jellemzően a gyors és flash (villám) pirolízis folyamatokhoz alkalmazzák. A reaktornak számos előnye van, mint például a felhasználóbarát működés, a hatékony hőmérséklet-szabályozás, a kiváló hőátadási sebesség és a skálázhatóság. (Wang J. et al. 2021)

A fluidágyas reaktor a bioolajok és üzemanyagok előállításához egyik leggyakrabban használt reaktortípus. (Luis G. G. et al. 2022)

A fluidágyas reaktorok esetében a pirolízis folyamat során fokozott hőátadási hatékonyság és megnövekedett reakciósebesség jellemző. A teljes reaktorközeget egyenletesen fűthető, miközben az ágy fluidizált állapotban van. Az eljárás hatékonysága szorosan összefügg a biomassza részecskék méretével és az alkalmazott fluidizációs közeggel. A szilárd részecskék fluidizált állapotban tartásához a vívőgáz sebességét a reaktoron belül pontosan szabályozni szükséges. (Zapater D. et al. 2024)

2.7.3. Forgódobos (rotary kiln) reaktorok

A forgódobos reaktor (11.ábra) egy hosszú, enyhén lejtős, hengeres acélcső, amely saját tengelye körül folyamatosan forog. A dob egyik végén történik az alapanyag betáplálása, míg a másik végén a pirolízisből származó szilárd és gáz/folyékony termékek távoznak. A henger külső vagy belső fűtésű lehet – ez azt jelenti, hogy vagy a dobon kívül, vagy a belső falak mentén biztosítják a szükséges hőenergiát.

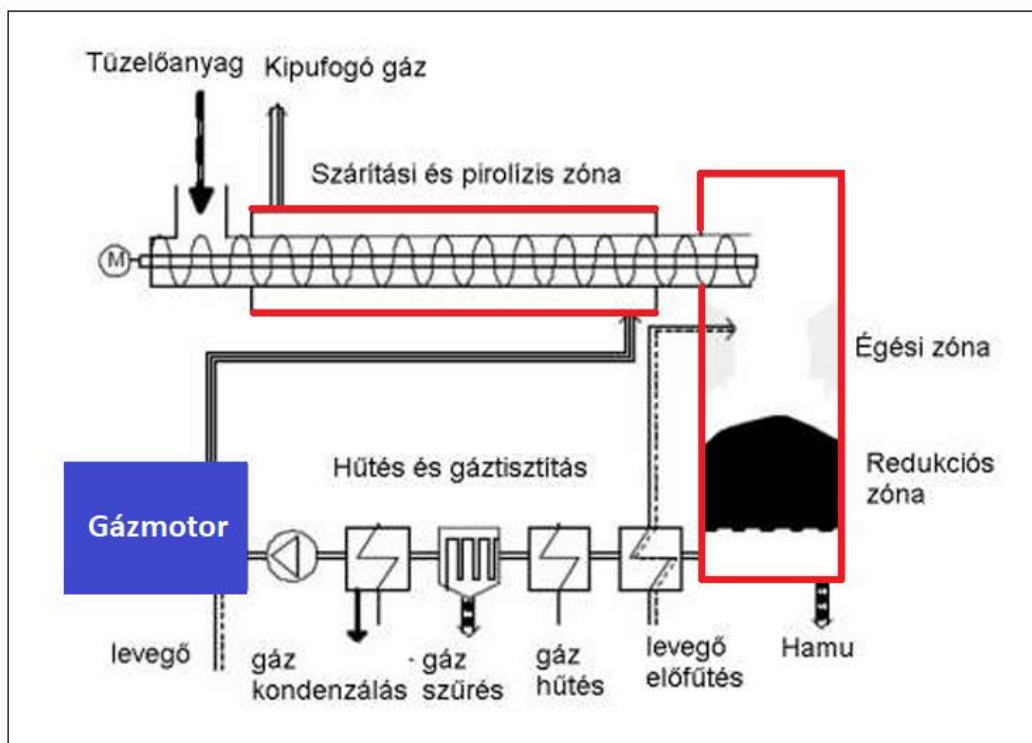


11. ábra Forgódobos gázgenerátor (Shi, H. et al. 2016. alapján szerkesztve)

A forgódobos reaktort leginkább a különböző biomassza hulladékok feldolgozásában használják. A reaktor tehát egy acél hengeres kamrából áll, ami lassan mozog, és körülbelül 450 °C üzemi hőmérséklettel rendelkezik. A forgódobos reaktor lassan működik, és az anyag lejtős pályán halad a kimenet felé, miközben a reaktortérben megtörténik az elgázosítás. A nyersanyagot a reaktor tetején adagolják, míg a reagenseket a kemence alján injektálják. (Molino A. et al. 2013)

2.7.4. Kétfázisú rendszerek

A 12. ábrán bemutatott VIKING rendszernél a két fázisból az első egy közvetett fűtésű csigás adagoló, amelyben a szárítás és a pirolízis valósul meg, a második zóna pedig egy kombinált reaktor a pirolízisgáz részleges oxidációjára (főként kátrányátalakítás) és a heterogén gáz-szénreakcióra (redukciós/eltérítési folyamat). Ezen kialakítás fő előnye a szintézisgáz 25 mg/Nm³ alatti kátrányvegyületekkel való szennyezettsége, ami lehetővé teszi a gáz felhasználására vonatkozó gázmotor-határértékeknek való megfelelést másodlagos gázkezelés és gáztisztítás nélkül. (Lettner F. et al. 2007)



12. ábra VIKING kétfázisú gázgenerátor (Gøbel B et al. 2004; Henriksen U., 2001 és Henriksen U. et al. 2003)

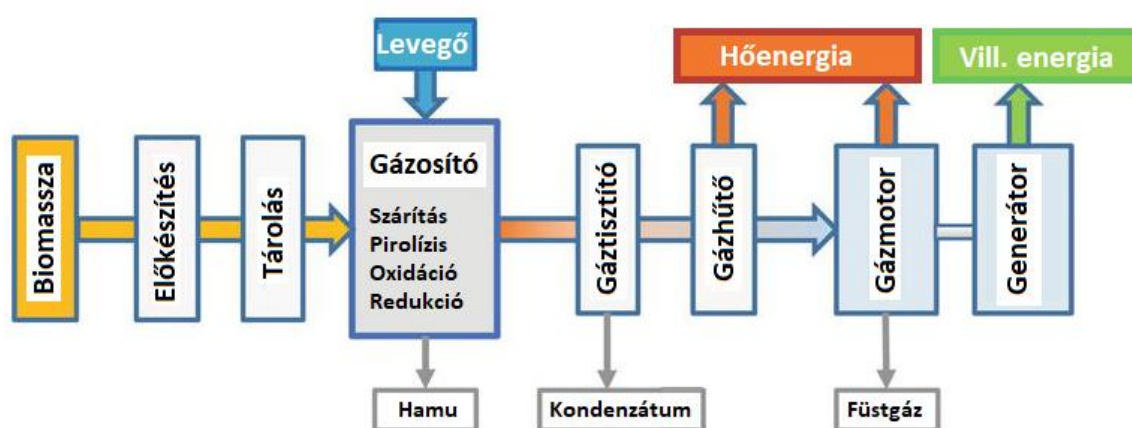
2.7.5. Mikrohullámú vagy indukciós pirolízis reaktorok

Mind a mikrohullámú, mind az indukciós pirolízisreaktorokat jellemzően kutatási, kísérleti és kisüzemi rendszerekben alkalmazzák, mivel az ipari skálázás technológiailag még kihívást jelent. A mikrohullámú pirolízis során a hőtermelés nem a reaktor falánál vagy külső fűtőelemeknél indul meg, hanem közvetlenül a biomasszában. A mikrohullámok elektromágneses rezgéseket keltenek, amelyek az anyag belsejében dielektromos veszteségek révén hővé alakulnak. Az indukciós reaktor esetében a fűtés az elektromágneses tér segítségével működik: nagyfrekvenciás váltakozó áram által generált mágneses mező egy fémes vezető (pl. fűtőcső, reaktorfal) körül örvényáramokat kelt, amelyek a fém belsejében ellenállási hőként jelennek meg. Ez az energia vezetés útján adódik át a biomasszának.

2.8. Kapcsolt hő- és villamosenergiatermelés (CHP) folyamata pirolízissel

A 13. ábrán egy biomasszával működő kapcsolt hő- és villamosenergia (CHP) pirolízis kiserőmű blokkdiagramja látható.

A bemutatott folyamatban a biomassza elgázosítása szabályzott levegőbevezetéssel valósul meg, a betáplálásra kerülő alapanyag pedig már előkészítve érkezik a gázgenerátorba. Ez elsősorban szárítást jelent, de indokolt esetben aprítás vagy pellettálás is szükséges lehet. A gázgenerátorban lejátszódó folyamatok eredményeképp a fő termékként kapott szintézisgáz megtisztításra kerül az esetleges szennyeződésektől, koromtól, ezután egy hőcserélő segítségével megtörténik a lehűtése. A visszamaradt hamu és egyéb szemcsés anyagok (a folyamat melléktermékei) pedig összegyűjtésre kerülnek további felhasználás céljából. A gázmotorba bevezetett tisztított gáz elégetésével mechanikai és hőenergia nyerhető, mely előbbi a kapcsolódó villamos generátor működtetésére, utóbbit pedig a beérkező alapanyag szárítására, vagy más hőenergiát igénylő folyamatokra lehet hasznosítani.

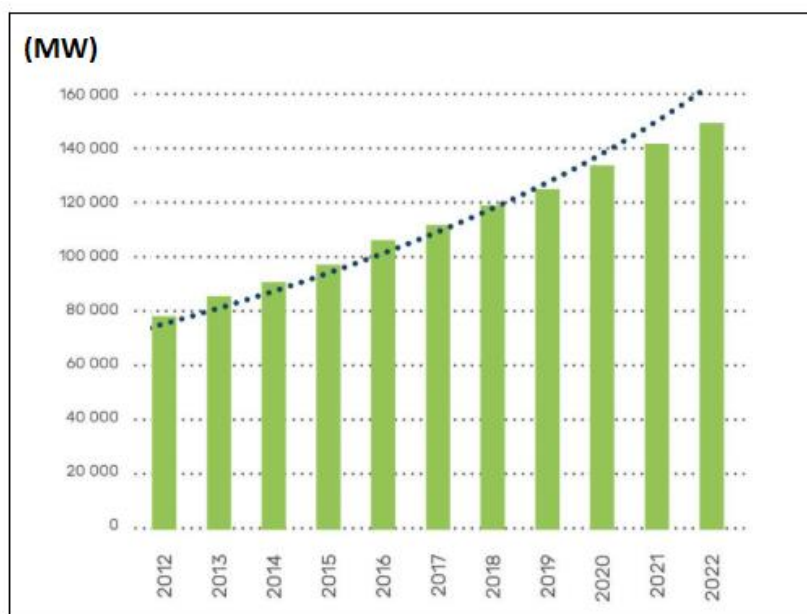


13. ábra Biomassza pirolízisből származó CHP energiatermelés folyamatábrája (Koido K. et al. 2018)

2.9. Biomasszából előállított villamosenergia kapacitás világviszonylatban

A 14. ábrán a biomasszából, mint megújuló energiaforrásból globálisan előállított villamosenergia kapacitás látható.

A kimutatás nem csak a pirolízissel előállított beépített teljesítményt szemlélteti, azonban megfigyelhető, hogy 2012 és 2022 közötti időszakban majd kétszeresére nőtt világviszonylatban a biomasszákból előállított villamosenergia kapacitás, így 2022-ben ez 150 GW körüli értéket jelentett.



14. ábra Villamosenergia kapacitás világszinten biomasszából (<https://saf.org.ua/en/news/1825/>)

2.10. Különféle biomasszák és keverékeik energiatartalma

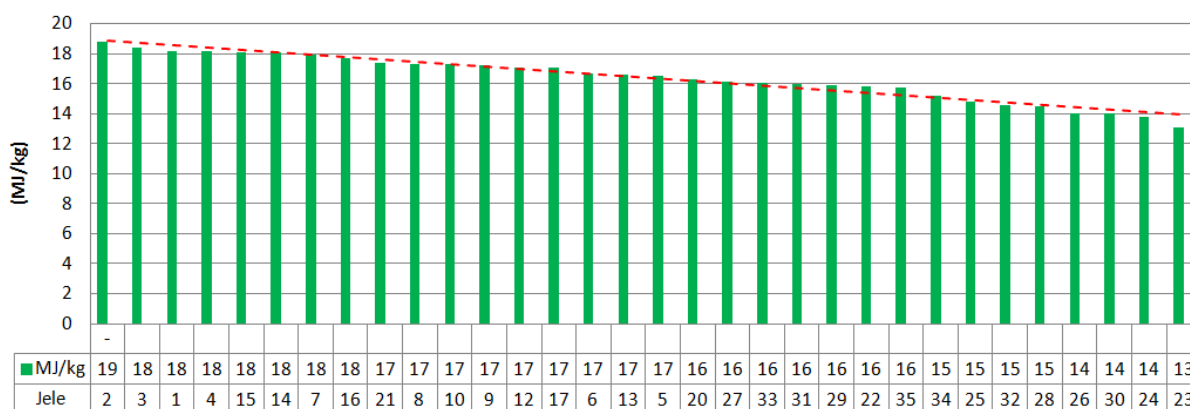
A hazánkban fellelhető legjellemzőbb biomassza alapanyagok energiatartalmát az 5. táblázat valamint a 15. ábra szemlélteti. Legnagyobb energiatartalom a különböző fafélékre jellemző.

5. táblázat Különböző biomassza alapanyagok és keverékeik (Tóvári P. et al. 2013)

BIOMASSZA	JELE	MJ/kg
Nyárfa apríték	2	18,8
Fűzfa apríték	3	18,4
Akác apríték	1	18,2
Pusztaszil apríték	4	18,2
50% fűzfa apríték - 50% gabona szalma	15	18,1
50% akác apríték-50% kukorica szár	14	18,05
Repce szalma	7	17,9
50% nyárfa apríték - 50% energiafű	16	17,7
75% nyárfa apríték - 25% szennyvíziszap	21	17,4

Kínai nád	8	17,3
Kender	10	17,3
Fertő-tavi nád	9	17,2
Kukorica szár	12	17,1
50% puszta szil - 50% repce szalma	17	17,1
Gabona szalma	6	16,7
Napraforgó szár	13	16,6
Energiafű apríték	5	16,5
50% nyárfa apríték - 50% szennyvíziszap	20	16,3
75% Fertő-tavi nád - 25% szennyvíziszap	27	16,1
75% kukorica szár - 25% szennyvíziszap	33	16,02
75% évelő rozs - 25% szennyvíziszap	31	15,95
75% kender - 25% szennyvíziszap	29	15,9
50% energiafű - 50% szennyvíziszap	22	15,8
75% napraforgó szár - 25% szennyvíziszap	35	15,7
50% napraforgó szár - 50% szennyvíziszap	34	15,2
75% gabona szalma - 25% szennyvíziszap	25	14,8
50% kukorica szár - 50% szennyvíziszap	32	14,6
50% kender - 50% szennyvíziszap	28	14,5
50% Fertő-tavi nád - 50% szennyvíziszap	26	14,05
50% évelő rozs - 50% szennyvíziszap	30	14,02
50% gabona szalma - 50% szennyvíziszap	24	13,8
75% energiafű - 25% szennyvíziszap	23	13,1

Jól látható, hogy a legkevésbé kedvező értékek a szennyvíziszappal kevert alapanyagoknál keletkeztek. Az iszap arányának növelésével a fűtőérték csökken, a 20. sorszámú keveréktől az átlagérték 16,4 MJ/kg alatti, kivéve a 21-es sorszámmal jelölt alapanyagot.



15. ábra Különböző biomassza alapanyagok és keverékeik (Tóvári P. et al. 2013 alapján)

2.11. Faaprítékok nedvesség és méret szerinti besorolása

A különböző faaprítékok nedvesség és méret szerinti besorolását az ÖNORM M7133 szabvány szerint az alábbi 6. és 7. táblázatok tartalmazzák. Ezek a nedvességtartalom és méretosztályok fontos szerepet játszanak a pirolízissel feldolgozásra kerülő biomassza alapanyagok jellemzésénél és egy adott technológia esetén a feldolgozhatóságuk, valamint az üzemi paraméterek meghatározásánál.

6. táblázat Faaprítékok nedvesség szerinti besorolása ÖNORM M7133 szabvány szerint

Apríték osztály	Nedvességtartalom %	Megnevezés
W20	<20	légszáraz
W30	20-30	tárolható
W35	30-35	korlátozottan tárolható
W40	35-40	nedves
W50	40-50	frissen vágott

7. táblázat Faapríték méret táblázat ÖNORM M7133 szabvány szerint

Apríték	Megengedett méretek				Megengedett szélsőértékek max.	
	max. 4%	max. 20%	60-100%	max. 20%		
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

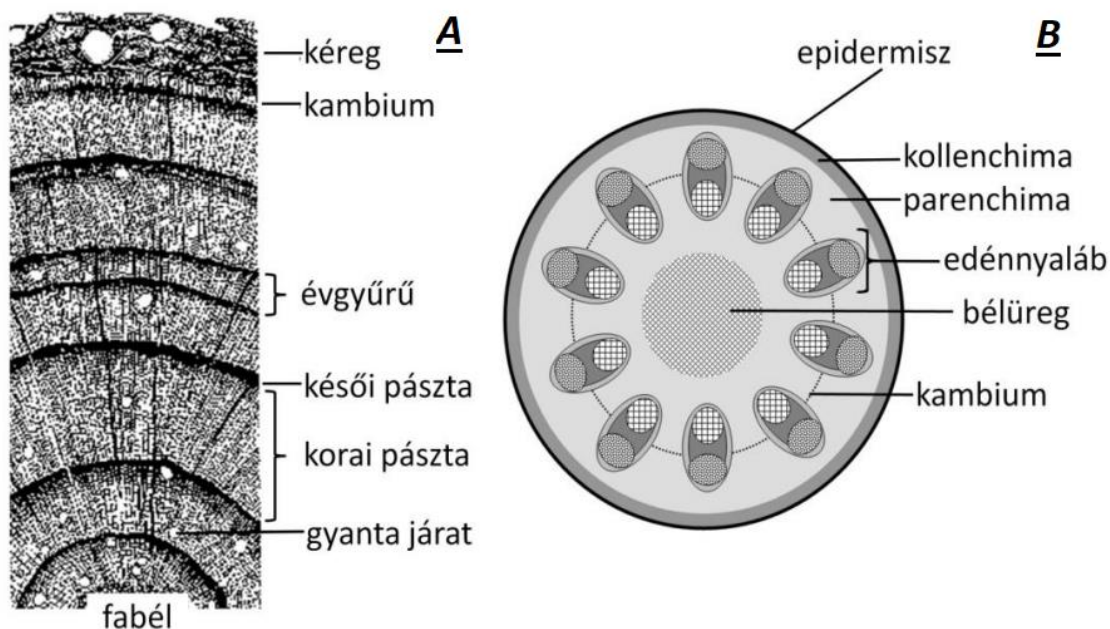
2.12. Fásszárú és lágyszárú biomassza alapanyagok felépítése

A fásszárú és lágyszárú növények jellemző felépítése az alábbi 16. ábrán látható.

A növényi szövet alapvetően három fő komponensből áll: cellulózból, hemicellulózból és ligninből. Ezeknek az anyagoknak az aránya fajonként, illetve egyedenként változó.

A fás biomassza magasabb lignin- és cellulóztartalma miatt energiadúsabb, de lassabban bomlik, míg a lágyszárú biomassza gyorsabban feldolgozható, viszont alacsonyabb energiatartalommal és magasabb szennyezőanyag-tartalommal rendelkezik.

A fásszárú biomassza (pl. tűlevelű és lombos fák, erdészeti hulladékok, fűrészpor, apríték) másodlagos növényi szövetekből, főként a szár és ágak xilem szövetéből épül fel. A sejtfalak vastagok és összetettek, sűrű, tömör szerkezet, és magasabb fűtőérték jellemző rájuk.

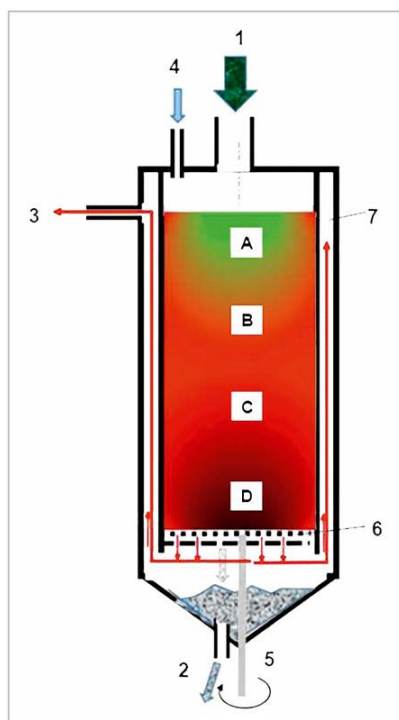


16. ábra Fásszárú és lágyszárú növények morfológiája (Sebestyén Z., 2014)

A lágyszárú biomassza a gyorsan növő, egyényári vagy évelő növények (pl. gabonaszár, kukoricaszár, napraforgó, energiafű, szalma, fűfélék) szárított föld feletti részeit foglalja magába. A szöveteik lazább szerkezetűek, kevésbé lignifikáltak, és általában magasabb nedvességtartalommal rendelkeznek.

2.13. A fixágyas pirolízisreaktor működési zónái

A fixágyas pirolízisreaktor (lefelé áramoltató változat) jellemző működési zónáit az alábbi 17. ábrán és 8. táblázatban foglaltam össze. A felülről érkező alapanyag gravitációs úton halad végig a különböző hőmérsékletű zónákon, miközben a szükséges levegő bevezetése szintén fentről történik, míg a megtermelt szintézisgáz a reakciótérből a rostély alatt távozik el.



1 – biomassza, 2 – kevés szénrel kevert hamu, 3 – gáz kivezetése a hűtőhöz, 4 – előmelegített égési levegő betáplálása, 5 – salak (hamu, maradék szénkaparó tengelye, 6 – kaparó, 7 – falközzötti tér, A – száradás, B – pirolízis, C – égés, D – krakkolás, hűlés

17. ábra A pirolízisreaktor elvi ábrája (saját ábra)

8. táblázat A reaktorban lezajló folyamat

Folyamat	Hőfok (°C)	Anyagjellemző	Jelölés
Beérkező anyag	25-70	Eredeti biomassza	A
Melegedés, gőzök	150-300	Vízvesztés	
Gőzök és gázok	400	Gőz	
Gázok	500	Égés kezdete	B
Gázok	600	Égés	
Gázok	700	Égés	
Gázok	750	Égés	
PAH anyagok lebontása	800-850	Izzó anyag	C
Kátrány lebontása	900-950	Krakkolás	
Szenes maradék és hamu	400-450	Hővesztés	D
Hajtógáz		Gáz	

2.14. Szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A hazai és nemzetközi szakirodalom részletes megismerése igazolta azt a feltételezést, miszerint a biomassza pirolízis egy nagyon összetett és bonyolult folyamat, melynek tervezéshez kiemelkedően fontos a minden részfolyamatra kiterjedő szabályozhatóság.

A pirolízis eljárások során kulcsfontosságú az anyagok beltartalmi összetétele, energiatartalma, valamint nedvességtartalma. Fizikai-geometria szempontból fontos továbbá a megfelelő aprózottság. Lényeges paraméter még a kezelési hőmérséklet és a reaktor típus, melynek eredményeképp különféle végtermékek kaphatók, úgy, mint bioolaj, szintézisgáz vagy bioszén.

Legelterjedtebb pirolízis reaktor típusok a fix-ágyas, fluid-ágyas, forgódobos, illetve kétfázisú rendszerek, de léteznek indukciós vagy mikrohullámú berendezések is. A különféle eljárástípusok azonban nem alkalmasak egyöntetűen mindenféle alapanyagra és teljesítményviszonyra.

Ahhoz, hogy a teljes CHP rendszer automatizáltan tudjon működni, szükségeszerű a rendszer minden egyes elemének pontos szabályozása, így a villamos generátor, a szikragyújtású motor és a hálózati csatlakozás összehangolása.

A lebontás során keletkező termék-gáz szűrése elengedhetetlen, hogy a gázmotorba kerülve fizikailag szennyezett anyagokat ne tartalmazzon.

A pirolizációs folyamat során, valamint a gázmotor működésénél keletkező hulladékhő jól felhasználható a biomassza alapanyag nedvességtartalmának csökkentéséhez (amennyiben indokolt).

A hazai és nemzetközi szakirodalmak alapján a munkám fókuszában álló mezőgazdasági folyamatok melléktermékeként létrejövő biomasszák (puha- és keményfa aprítékok, vágástéri nyesedékek) megfelelő kiindulási alapot jelentenek a CHP energiatermelés megvalósításához, magas hatásfok elérése mellett.

A fenti eljárások közül a kitűzött céljaimhoz – az előzetes feltételezéseknek megfelelően – leginkább a fix-ágyas lefele áramoltató berendezés felelt meg, ezért a kísérleteimet ebben az irányban folytattam tovább.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1. A mérések során felhasznált eszközök, berendezések

Méréseimet a Mezőgazdasági Gépesítési Intézet laboratóriumában kezdtem és a MATE Épületgépészeti és Energetikai Tanszék laboratóriumában fejeztem be.

3.1.1. Nedvességtartalom mérés

METTLER TOLEDO termo-gravimetrikus mérleg (18. ábra)

- 0-110 °C hőmérséklet tartomány, 0,1 °C-os pontosság
- 0-71 g tömeg mérési tartomány, 0,001 g-os pontosság



18. ábra METTLER TOLEDO nedvességmérő (MGI labor)

A nedvességmérés lépései:

1. Mintamérés (kezdeti tömeg)

- A minta bemérése egy beépített precíziós mérleggel.

2. Melegítés (szárítás)

- A készülék felmelegíti a mintát.
- A melegítés hatására a minta víztartalma elpárolog.

3. Tömegcsökkenés mérése

- A készülék folyamatosan figyeli a minta tömegének változását a szárítás során.

4. Szárítás vége

- A készülék automatikusan leállítja a szárítást, ha a tömeg már nem változik.

5. Nedvességtartalom számítása

- A nedvességtartalom a kezdeti és végső tömeg különbségéből adódik.

3.1.2. Égéshő meghatározása

Az égéshő méréshez elő kell készíteni a mintákat. Ehhez a legjobb megoldás laboratóriumi körülmények között egy tömörítőprés, amely a pellettáláshoz hasonló végterméket hoz létre.

Az előkészített mintákból $\sim 1,0$ g –os dózisokat képeztem, majd az említett tömörítőprés segítségével (19. ábra) letömörítettem a mintákat.



19. ábra Tömörítőprés (MGI labor)

Az elkészített mintákat az MSZ EN ISO 18125:2017 és az MSZ EN ISO 16993:2015 nemzetközi szabványok szerint vizsgáltam meg.

Az égéshő meghatározásához egy vékony cérnával rögzítve a mintákat az IKA-WERKE C2000 (20. ábra) mérőegységére helyeztem. A mérőtér a műszer bekapcsolása után feltöltődik oxigénnel, hogy a lehető legjobb hatásfokú égés jöjjön létre.

A mérés követelményei:

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



20. ábra IKA-WERKE C2000 kaloriméter (MGI labor)

3.1.3. Az anyagok elemi összetételének vizsgálata

Ezen eljárás során meghatároztam a minták legfontosabb kémiai összetevőit, úgy mint:

C, H, N, S, O és a Cl tartalom.

A vizsgálatot az ELEMENTAR VARIO X analitikai mérőműszer (21. ábra) segítségével végeztem el.



21. ábra ELEMENTAR VARIO X elemi összetétel vizsgáló készülék (MGI labor)

3.1.4. Hamutartalom vizsgálata

A hamutartalomra vonatkozó mérést a szilárd bio-tüzelőanyagok MSZ EN ISO 18122:2016 szabvány alapján végeztem.

A mérés lényege egy speciális égetőkamra segítségével a kívánt tüzelőanyag hamutartalmának meghatározása, ahol az alapanyag egy 0,01 mg pontosságú, 200 g méréshatárú labormérleggel kerül bemérésre.

1. A megvizsgálni kívánt alapanyag minta elhelyezésre kerül az égetőkamrába (22. ábra).
2. Első körben 250 °C- hőmérsékleten szárítom 60 percig a mintát.
3. Ezután 550 °C-on 120 percig égetem az anyagot.
4. Végül desszikatorban szobahőmérsékletűre lehűlve, megmérem a tömegét. Az eredményt a kivett és a bemért nettó tömeg hányadosa adja.



22. ábra Nabertherm égetőkamra (MGI labor)

3.1.5. Hamuolvadáspont meghatározás

HESSE Instruments 154 hevítő mikroszkóp (23. ábra) optikai úton vizsgálja meg az adott tüzelőanyag hamujának olvadási fázisállapotait. A mérés előtt a kívánt anyagot tömörítéssel elő kell készíteni, s az így létrehozott hamumintákból készített próbatest a tárgylapon a szoftver és az optika segítségével pozícionálásra kerül. A mérés inntől kezdve automatikusan lefut, az adatrögzítés a csatlakoztatott számítógépen megtörténik.



23. ábra HESSE 154 hevítőmikroszkóp (MGI labor)

3.1.6. Gázösszetétel vizsgálata

A 24. ábrán látható VISIT 03H gázelemző készülék kifejezetten biogázok összetételének vizsgálatára szolgál, mellyel pontosan megállapítható a gázösszetétel és energiatartalom.



24. ábra VISIT 03H gázelemző berendezés (MGI labor)

Mérési paraméterek

A VISIT 03 gázelemző készülék mérési paraméterei a 9. táblázatban láthatók. A készülékkel meghatározható a bevezetett termékgáz CO, H₂, CH₄, CO₂, O₂ tartalma, a lég- és gázhőmérséklet, valamint a nyomáskülönbség.

9. táblázat Gázelemző készülék mérési paraméterei

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

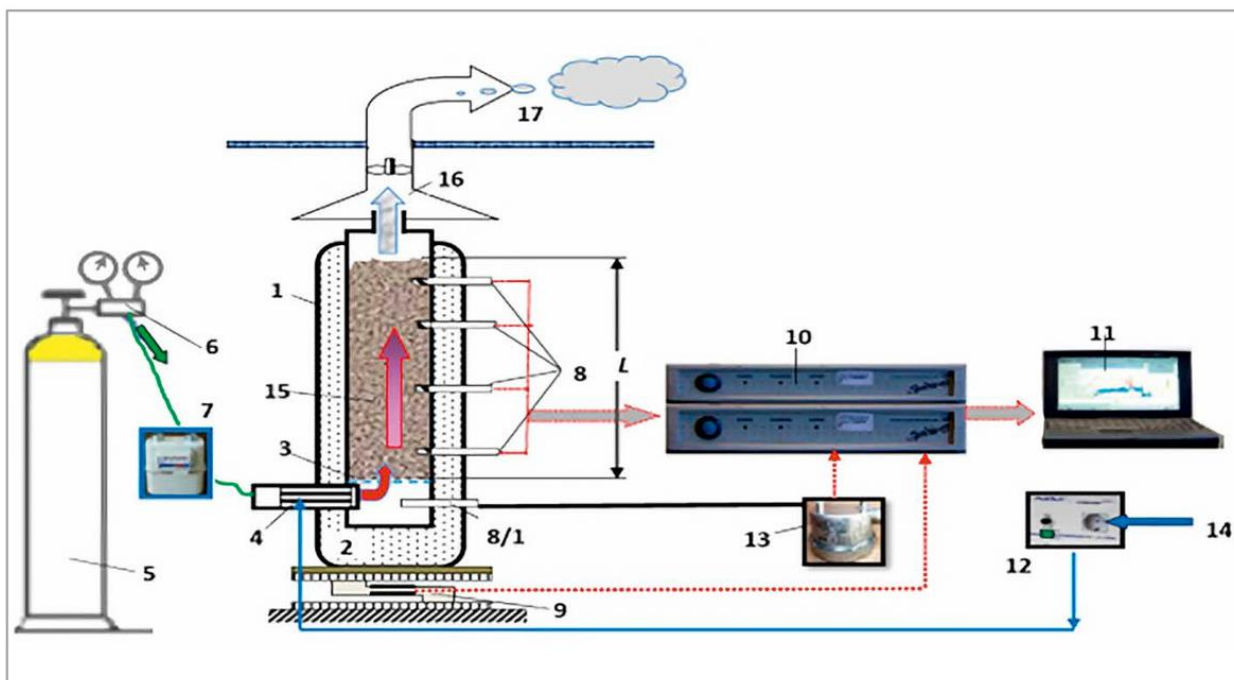
3.2. Mintaüzemi kísérleti berendezés

A kitűzött célok megvalósítása érdekében több különféle laboratóriumi kísérletet végeztem. Cél azon tényezők elemzése volt, melyek a nagyobb berendezéseknél meghatározók lehetnek a termék minőségére és mennyiségére. A kisminta egységek két kivitelben álltak rendelkezésre.

Az inert gázzal működő (25. ábra) egységgel az égés előrehaladását, terjedési sebességét és a TGA analízis egyes szakaszait lehet elemezni.

A villamos fűtésű (27. ábra) és teljesen zárt rendszerrel a TGA mellett a fűtött levegő bevezetésének hatásait lehet elemezni. A levegő hatását a véggáz összetételére, a kátrány típusú vegyületek csökkenésére.

A szigetelt falu laborreaktor belső átmérője 110 mm. Mérésenként kb. 300-650 g mennyiségű töltet fér el a reaktortérben. A rendszer fűtéséhez szükséges energiát 2,0 kW teljesítményű fűtőpatron biztosította, melynek vezérlését a számítógépes egység látta el. A felépítést a 26. ábra szemlélteti.



25. ábra Nitrogén gázfűtésű laborreaktor mérőkör (MATE labor)

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

A mérés paramétere:

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

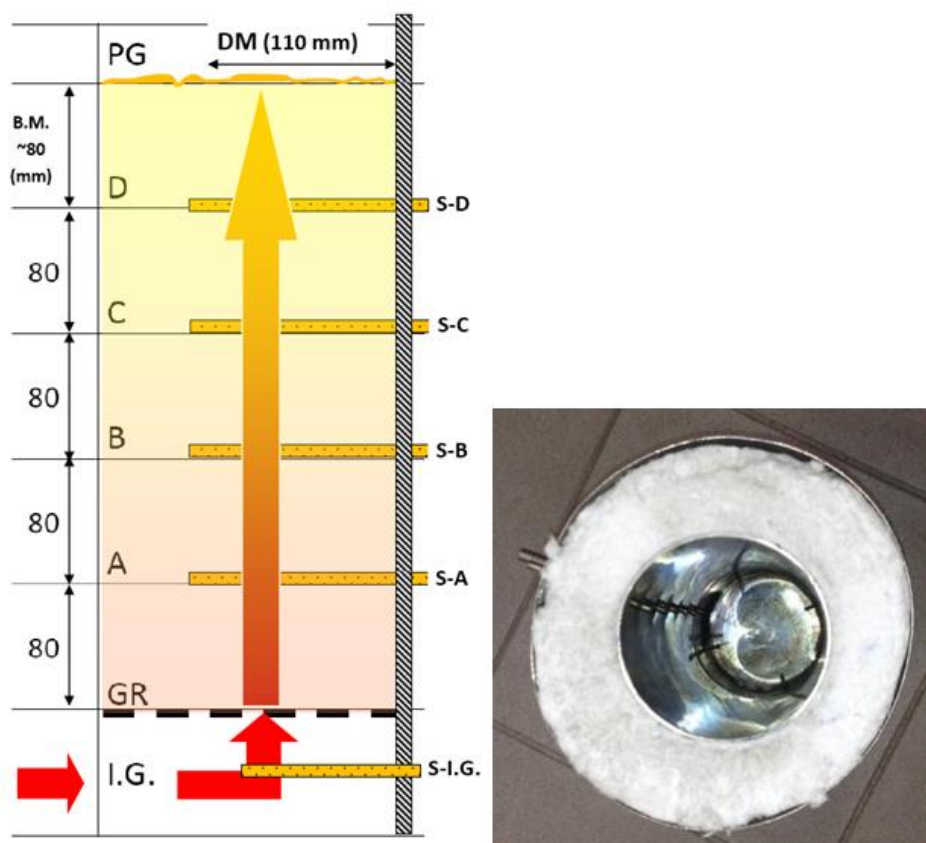
A mérés folyamata

- 1) Mintavételi gyakoriság: 1,0 s
- 2) A mérleg tárazása
- 3) A vizsgálandó anyag behelyezése
- 4) Az anyag tömegének megállapítása
- 5) A vizsgálati hőfok beállítása
- 6) A gázszelep nyitása

- 7) Nyomás fixálása
- 8) Térfogatáram meghatározása (~ 135-180 liter/min)
- 9) A felfűtés indítása (gáz szelep + villamos vezérlés)

Amint a tömeg stabilizálódott, leállítottam a mérést.

A rögzített adatokból feldolgozás után elkészítettem a diagramokat.



26. ábra A mérőegység főbb méretei, az érzékelők elhelyezkedése, illetve a berendezése felülnézeti képe (MATE labor)

- I.G.: itt kerül bevezetésre az inert gáz a GR – tartórács alá
- S-I.G: hőérzékelő a bevezetés helyén
- A, B, C és D magasságokban egy-egy hőérzékelő S-A – S-D jelöléssel
- A legfelső (S-D) érzékelő felett még 80 mm anyagmagasság található, melyet a pirolízisgáz (PG) kivezetése követ



27. ábra Direkt módon elektromos fűtésű, légbevezetésre alkalmas laborreaktor, maximális működési hőmérséklet: 1300 °C (MATE labor)

3.3. Különféle biomassza aprítékok és szemcseeloszlásuk

Különféle biomassza alapanyagok az alábbi 28. ábrán láthatók.

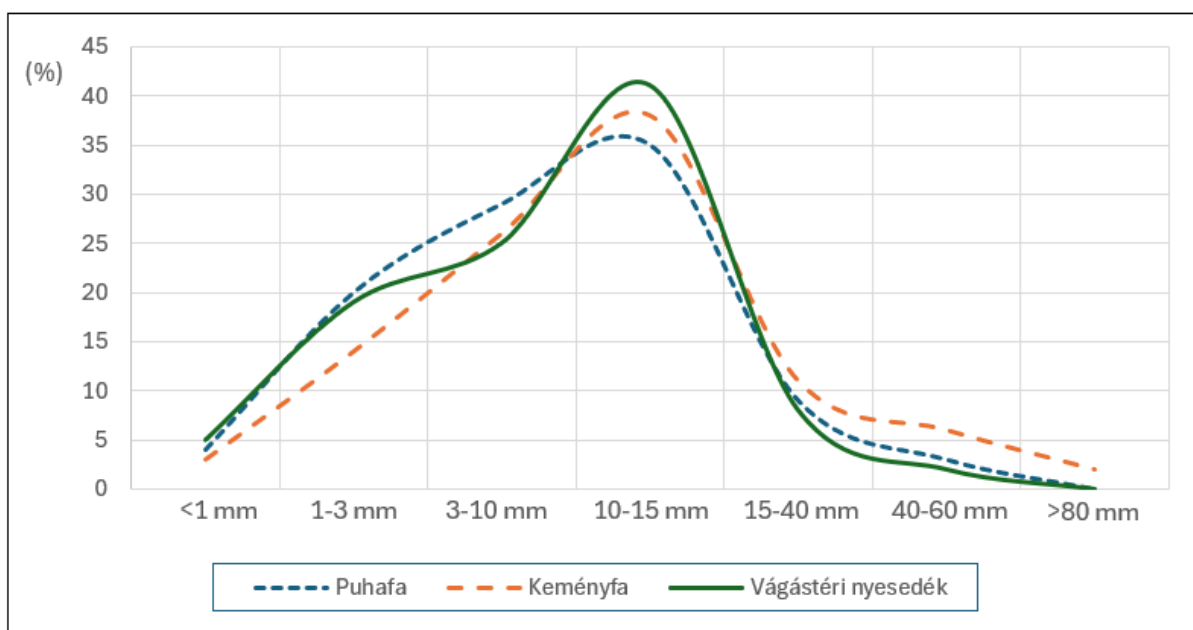


28. ábra Biomassza apríték alapanyagok (saját ábra)

Az alábbi 10. táblázatban és 29. ábrán bemutatott alapanyagok szemcseméretének vizsgálata kismintával történt, manuális számolással, jellemzően 4-6 mintavétel alkalmával a mérés átlagait figyelembe véve és kiértékelve, melyből a következő eredmények születtek. A kukoricaszár apríték eloszlása nem került megvizsgálásra ebben a fázisban, ugyanis az üzemi berendezés faaprítékra lett tervezve. Későbbi mérések során azonban bemutatásra kerül az említett anyag néhány jellemzője.

10. táblázat Biomassza aprítékok szemcse eloszlásának vizsgálata

	<1 mm	1 – 3 mm	3 – 10 mm	10 – 15 mm	15 – 40 mm	40 – 60 mm	> 80 mm
%-os arányok	(%)						
Puhafa	4	20	29	35	9	3	0
Keményfa	3	14	26	38	11	6	2
Vágástéri nyesedék	5	19	25	41	8	2	0



29. ábra Aprítékok szemcseeloszlása - gyakorisági görbék (Saját ábra)

3.4. Anyagok porozitásának meghatározása

A pirolízis folyamata rendkívül összetett, ugyanakkor alapvetően befolyásolja az anyagrészecskék mérete és a fűtés sebessége. A részecskék elrendeződése – vagyis az anyag porozitása –, a köztük lévő hézagok mérete és az anyag tömörsége határozza meg a halmaz gázáteresztő képességét, ami közvetlen hatással van a reakciók sebességére is.

Az vizsgált anyagok porozitásának meghatározásához térfogat, és/vagy sűrűség mérésekre van szükség.

Relatív hézagtérfogat:

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V + V_h} \quad (2)$$

ahol:

- V = anyagtérfogat [m^3]
- V_h = hézagtérfogat (szemcsék között) [m^3]

A porozitás kiszámítható a halmazsűrűségéből is, ilyenkor a szemcsék között levegővel kitöltött teret is számításba kell venni:

$$\rho_t = \frac{m}{V + V_h} \quad (3)$$

ahol:

- m = vizsgált alapanyag tömege (kg)

Így a porozitás összefüggése:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_t}{\rho} \quad (4)$$

ahol a

- ρ = a kiindulási anyag sűrűsége (kg/m³)

Pirolízis folyamat közben levegő és termék-gáz áramlik át az alapanyagszemcsék közt.

Itt a gáz átáramlásának intenzitása arányos a rendszer nyomás-gradiensével (Darcy- törvény alapján).

Homogén gradiens kiszámítható az alsó (p_k) illetve felső (p_o) szinteknél lévő gáznyomás különbsége és a mérési pontok távolságának hányadosaként (q_g):

$$q_h = \frac{\Delta p}{h} \quad (5)$$

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

3.5. A hőbontásra kerülő anyagok szárítása

A gázgenerátorok optimális működéséhez célszerű az alapanyagokat 18–22%-os nedvességtartalommal betáplálni, mivel ebben a tartományban alakul ki a legkedvezőbb energiaegyensúly a befektetett és a nyert energia viszonylatában. Magasabb nedvességtartalom esetén jelentős energiaráfordítás szükséges a víz elpárolgotatásához, ami különösen kritikus a felső anyag- és levegőbevezetésű, alsó gázelvezetéses rendszerek – az ún. nyugvóágyas reaktorok – esetében.

Ezeknél a rendszereknél a túl magas nedvességtartalom következtében a felső, hűvösebb rétegekben az alulról érkező meleg vízgőz kondenzálódik, ami visszanedvesíti az anyagot, tovább

növelve annak nedvességtartalmát. Ennek elkerülése érdekében a reaktort úgy kell kialakítani, hogy a keletkező hulladékhőt hasznosítva a betáplált anyag előszárítása még a reaktorba való bevezetés előtt megtörténjen.

A szárítás folyamata

A h-x diagramban (30. ábra) a $h_1=h_2=\text{állandó}$ (kJ/kg) melletti állapotváltozás jelzi. A levegőt csak a φ_2 relatív nedvességtartalomig használjuk ki. A melegítő zónából kilépő levegő állapotát az 1. pont jelzi.

A szárítóba közölt fajlagos hőmennyiséget az $x_o=x_l$ fölötti 1' pont jelenti. Amikor a:

$$q_{sz}=Q_{sz}/L \quad (6)$$

ahol

Q_{sz} – szárítási hőmennyiség (J)

L – a szárító levegő mennyisége (liter/min)

A veszteségként távozó fajlagos hőmennyiség pedig az 1' pont, mégpedig a:

$$q_v=Q_v/L \quad (7)$$

ahol

Q_v – a veszteség hőmennyiség (J)

L – légáram (liter/min)

A különféle veszteségekkel nem számolva az 1' és 1. pontok közötti entalpia segíti elő a szárítást. 1. pontból adódik $h_1=\text{áll.}$ mellett a φ_2 . A kilépő levegő a 2'. pontnak megfelelő. Végül is a szárítás az 1-2' folyamat.

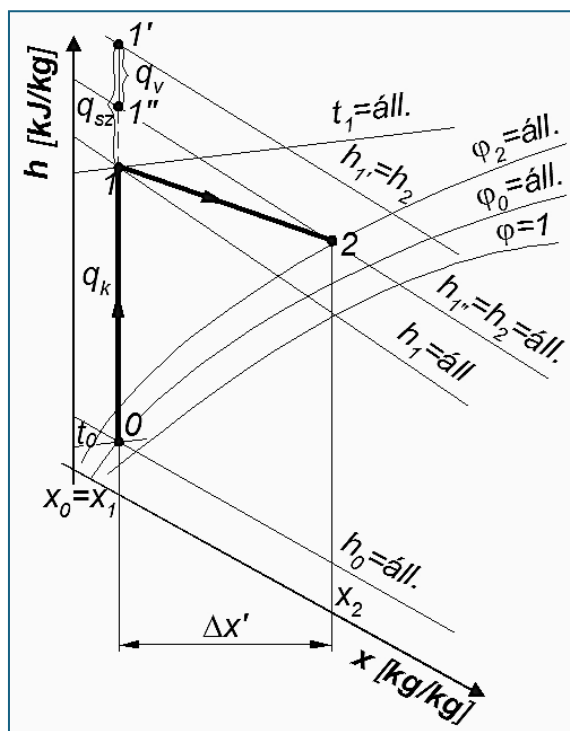
Az összes közölt hő (J):

$$Q = Q_k + Q_{sz} \quad (8)$$

ahol

Q_k – szárító közeg hőigénye

Q_{sz} – a szárítóban átadott összes hőenergia



30. ábra A szárítás folyamata (Beke J., 2000)

Az anyagtól elvont vízmennyiség

$$W = G_1 \cdot \frac{w_1 - w_2}{100 - w_2}; \quad W = G_2 \cdot \frac{w_1 - w_2}{100 - w_1} \quad (9)$$

ahol:

G_1 = nedves anyag tömege (kg)

G_2 = szárított anyag tömege (kg)

w_1 = kezdeti nedvességtartalom (%)

w_2 = vég-nedvességtartalom a száraz részben (%)

A számítások azt mutatják, hogy 24%-ot meghaladó nedvességtartalom esetén a szárításhoz szükséges levegőmennyiség már kritikus mértéket ölt, ezért ebben az esetben elengedhetetlenné válik a gázmotor hulladékhőjének hasznosítása is.

További kihívást jelent, hogy a fixágyas rendszerű reaktorokban a szárítás nem megy végbe egyenletesen, mivel a folyamat nem adiabatikus. A reaktor falai mentén a hővezetés miatt gyorsabb a száradás, míg a belsőbb rétegek lassabban melegednek fel. Amennyiben a reaktor falai hűtöttek,

az tovább növeli az energiaigényt, amit csak a betáplált anyag energiatartalmának rovására lehet fedezni.

$$\text{A szárítóközeg vízelvonó képessége: } W = L \cdot \Delta x \text{ (J/kg)} \quad (10)$$

ahol:

$$\Delta x = (x_2 - x_1) \text{ nedvességtartalom felvétel } (\sim 10 \text{ g/kg})$$

$$L = \text{légszállítás (kg/h)}$$

$$L = \frac{W}{\Delta x} \text{ (kg/h)} \quad (11)$$

A szárítás hőteljesítménye ($Q = \text{J/h}$):

$$Q = L \cdot \Delta i \quad (12)$$

ahol: L = a szárítólevegő mennyisége (kg/h),

$$\Delta i = (i_2 - i_1) \text{ kJ/kg}_{\text{sz.lev.}} \text{ (13) a szárítólevegő hőtartalom (entalpia) változása } (\sim 10 \text{ g/kg}).$$

A szükséges hőteljesítmény:

$$Q_T = G \cdot H \text{ (J/h)} \quad (14)$$

Ezen összefüggések felhasználásával került meghatározásra a szárító termo-ventilátorok légszállítási igénye a rendelkezésre álló 85-99 °C-os hőfokú fűtővízzel, amelyet a rendszer kapcsolódó hőcserélői biztosítanak. (lásd a vonatkozó résznél)

A légfűtési (szárítási) szakaszban a termoventilátor két oldalának, valamint a bemenő és kimenő melegvíznek a tömegárama. Egyensúlya, energia áramlatok: (kJ/h, W):

$$\dot{Q}_T = c_m \dot{m}_m (T_{mbe} - T_{mki}) = c_h \dot{m}_h (T_{hki} - T_{hbe}) \quad (15)$$

ahol:

- $\dot{m}_h$ = külső levegő tömegárama (kg/h)
- $\dot{m}_m$ = a fűtővíz tömegárama (kg/h)
- c_h = a levegő fajhője (kJ/kg°C)
- c_m = meleg víz fajhője (kJ/kg°C)
- T_m - a fűtővíz bemeneti és kimeneti hőfokai (°C)
- T_h - a ventilátorba bemenő és kimenő levegő hőfokai (°C)

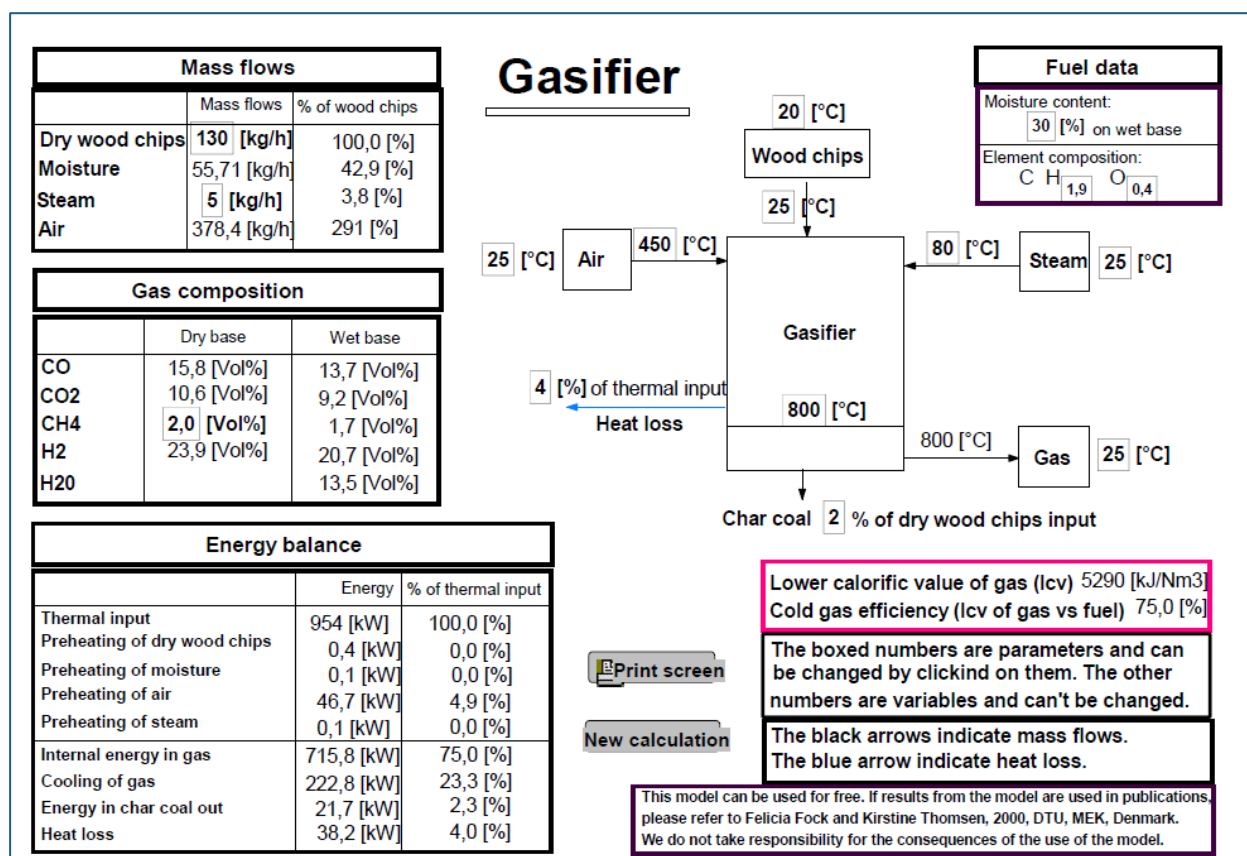
3.6. Szimuláció a rendszer paraméter változásainak elemzéséhez

A fixágyas rendszerhez használható programot többször lefuttattam, amely a bevitt anyagparaméterek és működési módok szerint alkalmas az optimális lehetőségek megközelítésére a kivethető teljesítményre és a várható gáz összetételére vonatkozóan. A kapott eredményeket a 31. és 32. ábrák szemléltetik.

A program készítői és verziószám: Klein S.A. and Alvarado, F.L., EES Distribute Version 6.163

A szimulációs program által alkalmazott gázgenerátor rendszer megegyezik az általam megfelelőnek tartott kivittel, azzal a különbséggel, hogy az indítási hőbevitelt a szimuláció gőzbevitellel oldja meg. Ettől függetlenül a működés során ez már nem játszik szerepet, ezért a modell jó megközelítéssel alkalmazható.

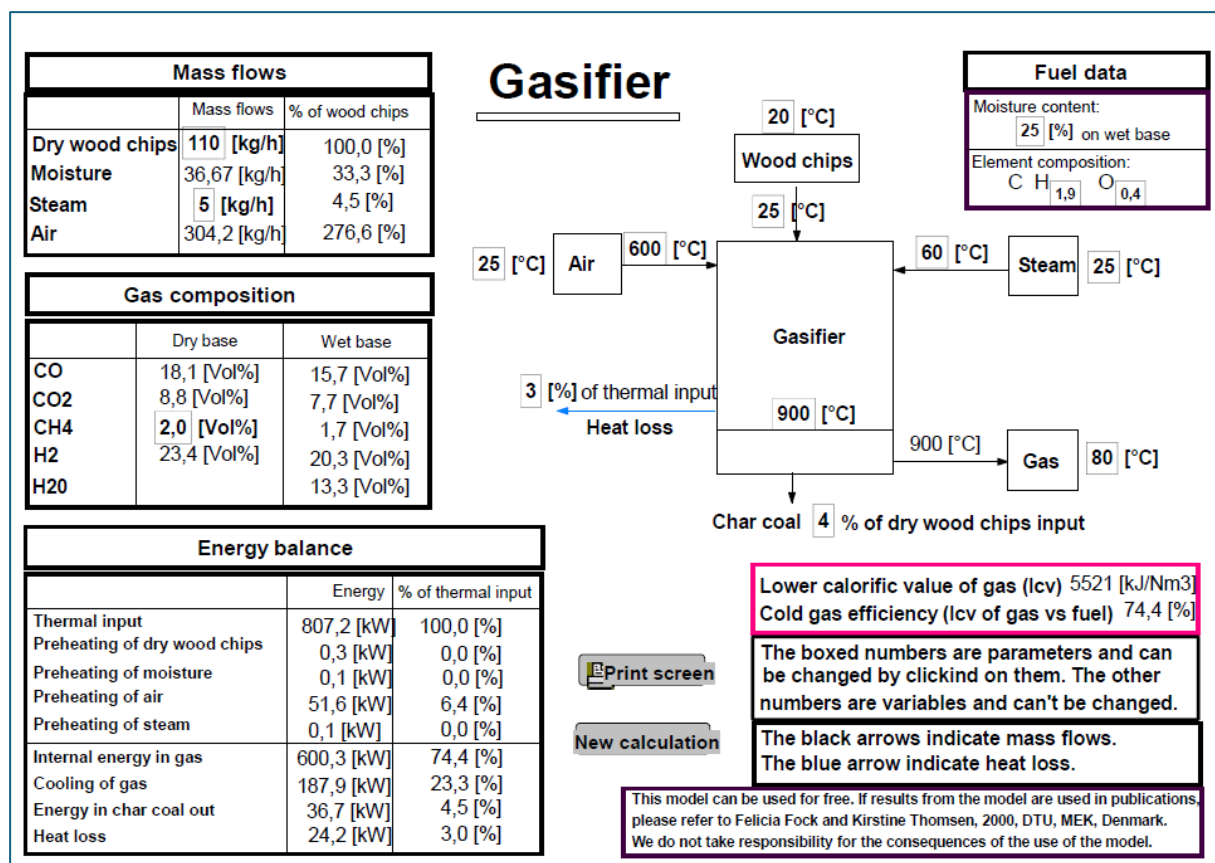
A bemeneti adatok, valamint a működés során végrehajtott módosítások megválasztása esetén a modell kiszámítja a várható gáz összetételét, a nyert teljesítményt adatait és százalékos összetételeket. Kiszámítja a gáz várható energiatartalmát (kJ/Nm³), valamint a hideg gáz hatékonyságát (hatásfokát). Az utóbbi két tényező, amelyek a rendszer működése szempontjából a legfontosabbak, mivel a generátor működés közbeni paramétereinek változtatásával más és más eredmények adódnak. A paraméterek beállításával a legkedvezőbb tendencia kikereshető.



31. ábra Szimuláció a rendszer paraméterek várható eredményeiről – 1. (Forrás: Risø Institute)

Egyéb irodalmi forrásokhoz hasonlóak az eredmények. Pl. kimutatható, hogy a gázosítás magasabb hőfoka a gáz összetételben milyen alkotók százalékos arányát változtatja meg és hogyan hat a várható kimeneti teljesítményekre. A modellezéssel kerestem a legmagasabb hideggáz hatékonyságot és a nyert gáz nagyobb energia tartalmát.

Kisebb bemenő anyagáramnál és kisebb nedvességtartalomnál



32. ábra Szimuláció a rendszer paraméterek várható eredményeiről – 2. (Forrás: Risø Institute)

A 2. jelű szimuláció során megfigyelhető, hogy az első esetben beállított paraméterek megváltoztatásával nőtt a gáz energia tartalma, de romlott a hideg hatásfoka. Nőtt a CO tartalom, de csökkent az összes teljesítmény.

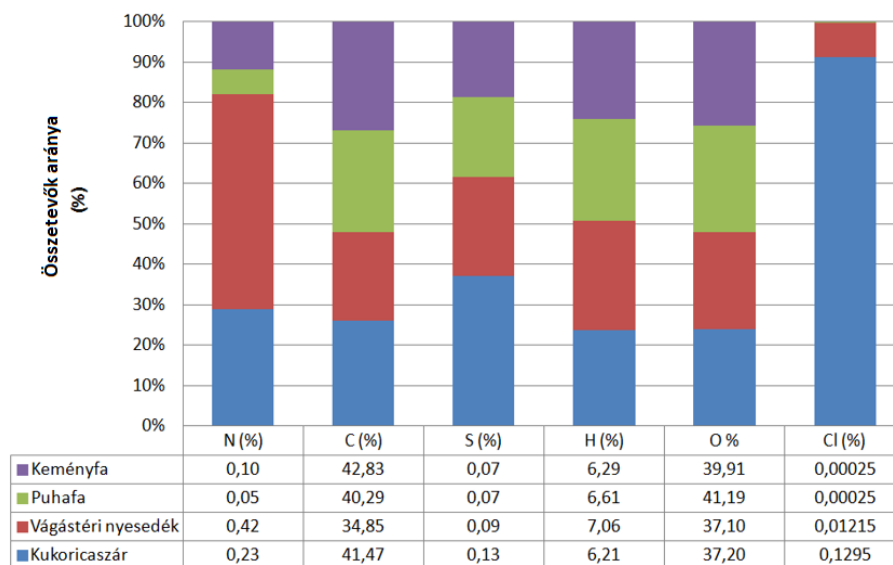
A változtatások jól jellemzik a rendszer teljesítményének változását és annak százalékos arányait is. A modellezés sok bizonytalanságot takar, de alapvetően előnyös, mivel megkereshetők azok a működési jellemzők, amelyek a végeredményeket leginkább befolyásolják és a tervezésnél megkülönböztetett figyelmet érdemelnek.

4. EREDMÉNYEK

4.1. LABORATÓRIUMI VIZSGÁLATOK

4.1.1. Vizsgált biomasszák beltartalmi összetevői

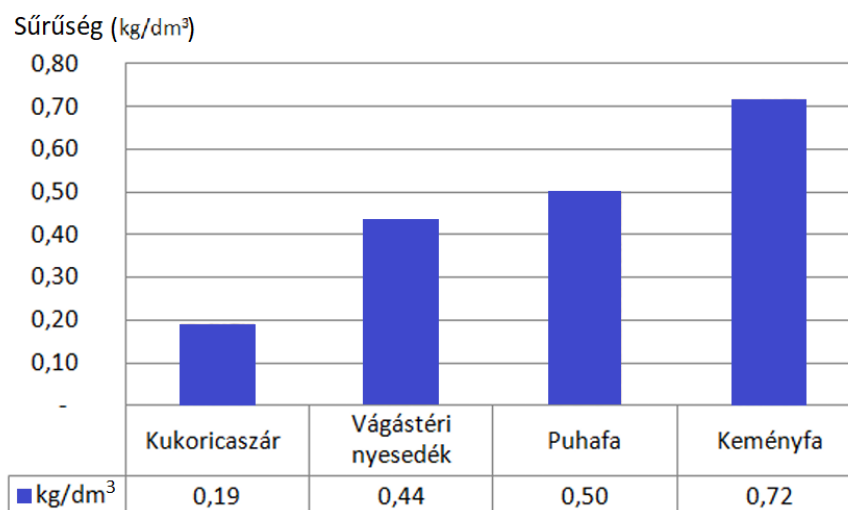
A vizsgált biomassza alapanyagok beltartalmi összetevőit a 33. ábra szemlélteti. Kitűnik, hogy a legmagasabb klórtartalom a vágástéri nyesedék illetve kukoricaszár esetében jellemző, azonban jelenléte még mindig csekély a többi összetevőhöz képest.



33.ábra Beltartalmi összetevők a vizsgált biomasszák esetében, víz és hamu nélkül (MGI labor)

4.1.2. Biomassza aprítékok sűrűsége

A különböző biomassza anyagok ömlesztett sűrűsége az alkotó részecskék sűrűsége alapján határozható meg. A vizsgált anyagok nedvességtartalma ~15-18% volt. A mérés eredményei a 34.ábrán láthatók.

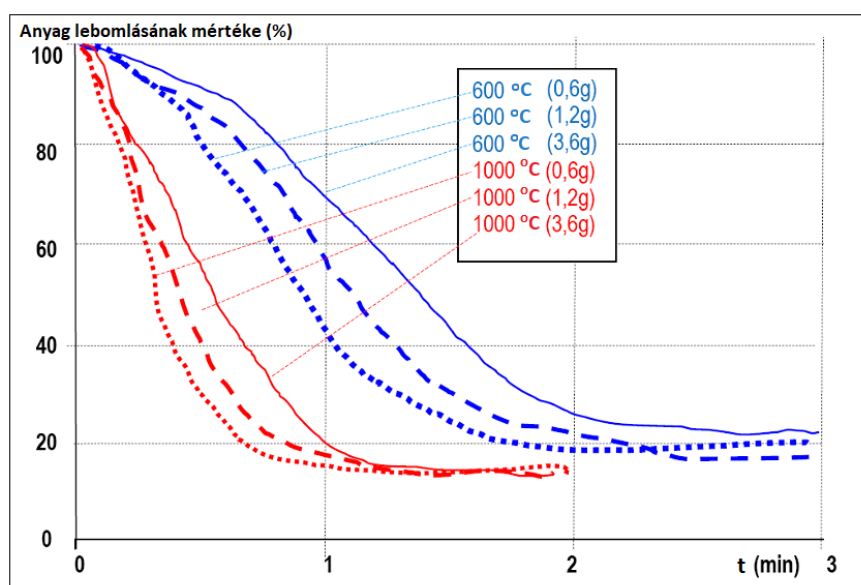


34. ábra Biomassza aprítékok sűrűsége (MGI labor)

4.1.3. Szemcseméret hatása a tömegcsökkenésre, gázösszetétel változás

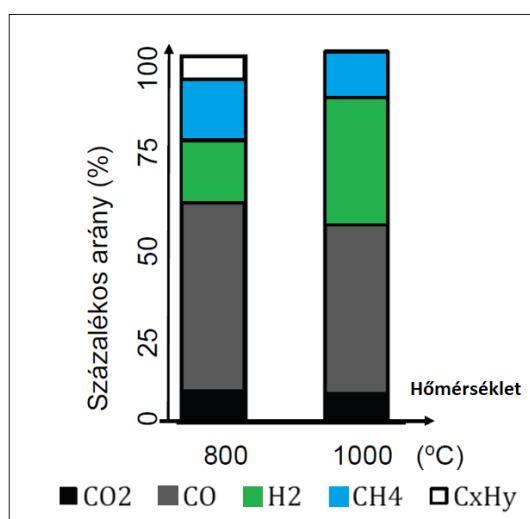
A pirolízis során a kiindulási anyag szemcsemérete jelentős hatással van a tömegcsökkenés ütemére és mértékére. Kisebb szemcseméret esetén nagyobb a fajlagos felület, ami gyorsabb hőátadást és egyenletesebb bomlást eredményez, így a termokonverziós folyamat gyorsabban és hatékonyabban megy végbe. Ezzel szemben a nagyobb szemcsék belseje lassabban melegszik fel, ami késlelteti a pirolízist.

A 35. ábrán látható mérés során két különböző kezelési hőmérsékleten (600/1000 °C-on) három féle szemcseméretű (és tömegű: 0,6g, 1,2g, 3,6g) anyagot vizsgáltam tömegváltozás szempontjából. Hőmérséklet és a tömeg mellett kiindulási paraméter volt a 100%-os állapot, és valamennyivel 20% alá csökkenésig folyt a mérés, ahol látható volt már, ahogy állandósul a lebomlás.



35. ábra Különböző szemcseméretetek esetében a tömegcsökkenés - G30 vegyes faapríték (MGI labor)

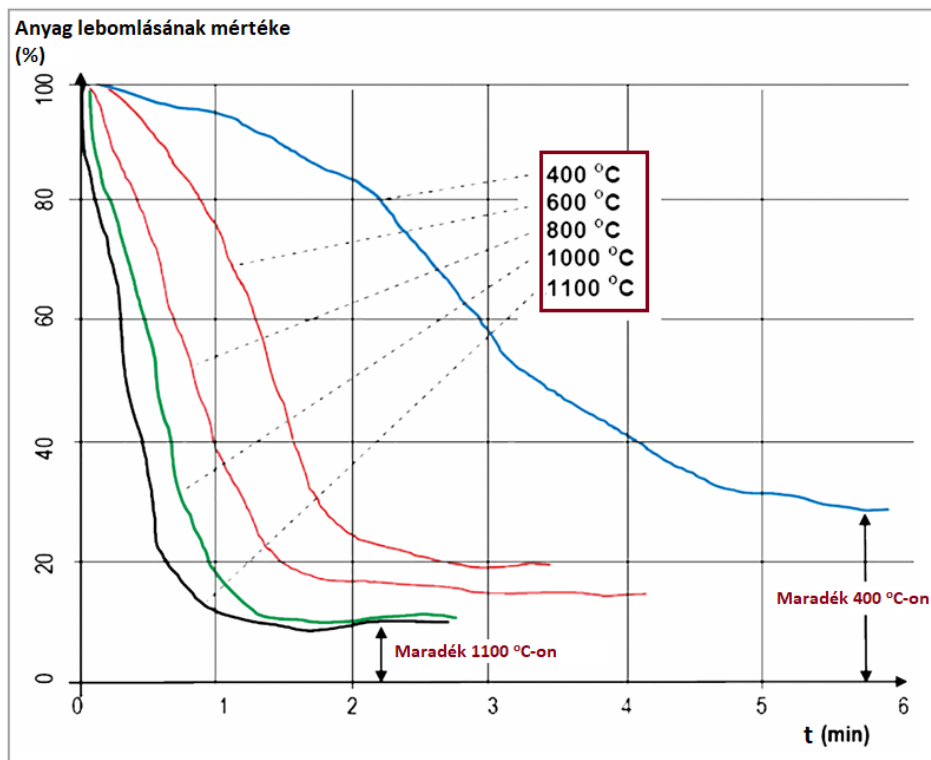
A 36. ábrán 800/1000 °C kezelési hőmérsékleten láthatók a kapott termék-gáz összetevői.



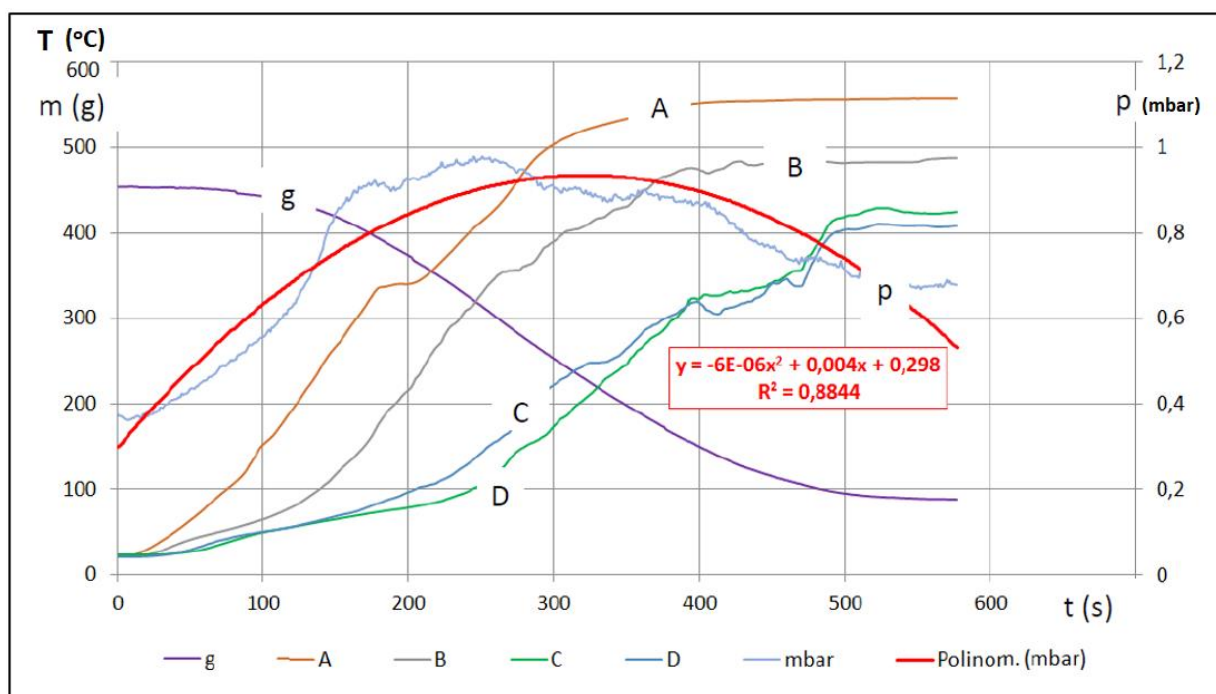
36. ábra Gázösszetétel változása 800/1000 °C-on, - G30 vegyes faapríték (MGI labor)

4.1.4. A TG görbék alakulása és nyomásváltozás a reaktorban

A 37. ábrán a Nabertherm égetőkemencével végzett vizsgálatok eredményei láthatók, ahol a 400-1100 °C tartományban végzett mérések lefutása jelentősen eltér időben és maradékanyagban.



37. ábra TG görbék alakulása a fűtés idejétől és hőfokától függően - G30 vegyes faapríték (MGI)



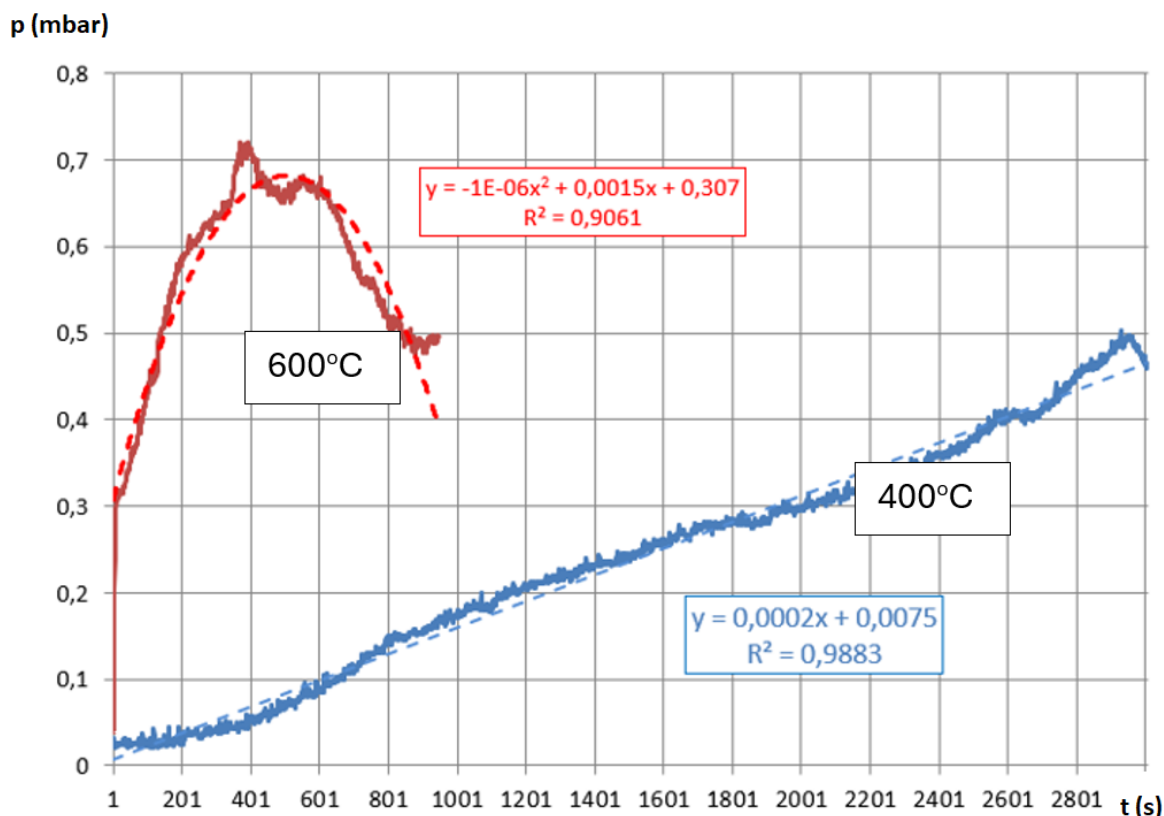
38. ábra G30 vegyes faapríték lebontása (600 °C) (mintavétel sűrűsége: 1,0 s)

g – tömeg, A – felső hőérzékelő, B és C – közbenső érzékelő, D – alsó érzékelő, p – az átáramlás során mért nyomásváltozás (MATE labor)

A 38. ábra a laboratóriumi modellreaktoron végzett vizsgálat eredményeit szemlélteti.

Nyomásváltozás a reaktorban 400/600 °C-on a minták lebontása közben

A 39. ábrán láthatók az eltérő hőmérsékleteken végzett pirolízis folyamat nyomásviszonyai. 400°C-os hőmérséklet esetében lineáris lefutás (nyomás növekedés) tapasztalható a teljes mérés időtartama alatt, míg a 600°C-os hőmérséklet esetén parabola-szerű lefutás figyelhető meg. Ennek oka az alapanyag egy adott ponton történő összeroppanása, ahol szemcsék közötti tér szabaddá válik s így a halmaz ellenállása lecsökken és a nyomás is esésnek indul.



39. ábra A nyomás változása a lebontási intenzitás függvényében - G30 vegyes faapríték (MATE labor)

A nyomás változása a lebontási intenzitás függvényében

600°C-on ellenállási csúcspont alakul ki, ahol az anyag összeroskad:

$$y = -1E-06x^2 + 0,0015x + 0,307$$

$$R^2 = 0,9061$$

400°C-on a kisebb intenzitású lebontásnál az ellenállás növekedése közel a folyamat végéig tart:

$$y = 0,0002x + 0,0075$$

$$R^2 = 0,9883$$

Ahol (mindkét esetben): x – lebontási idő (s)
 y – a nyomás változása (mbar)

4.1.5. Vizsgálatok különböző kezelési hőmérsékleteken inert gázban

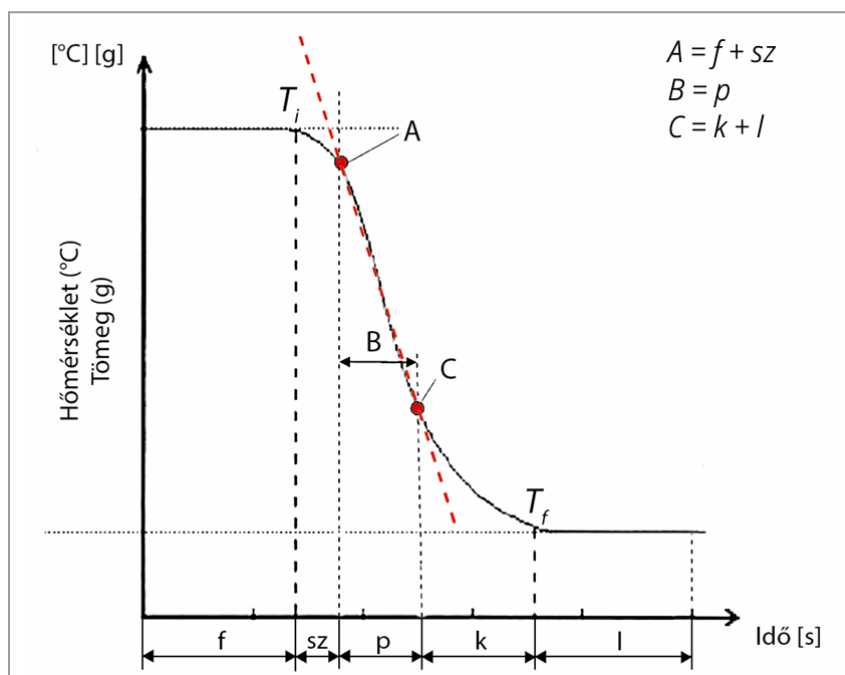
Az inertgázos laboratóriumi egységen végzett vizsgálatok eredményeit a 11. táblázatban foglaltam össze.

11. táblázat Tömegváltozás az idő függvényében 400/600 °C kezelési hőmérsékletnél*

Szakasz	Jel	Idő (s)	Tömeg (g)	Idő (s)	Tömeg- változás (g)	Lebontási intenzitás (g/s)	Maradék tömeg (%)	Tömeg arány p szakasz. (%)
400 °C								
sz + p + k	T _i	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				

*Megjegyzés: A jeleket lásd a TGA diagram jellemző pontjai című ábrán (40. ábra)

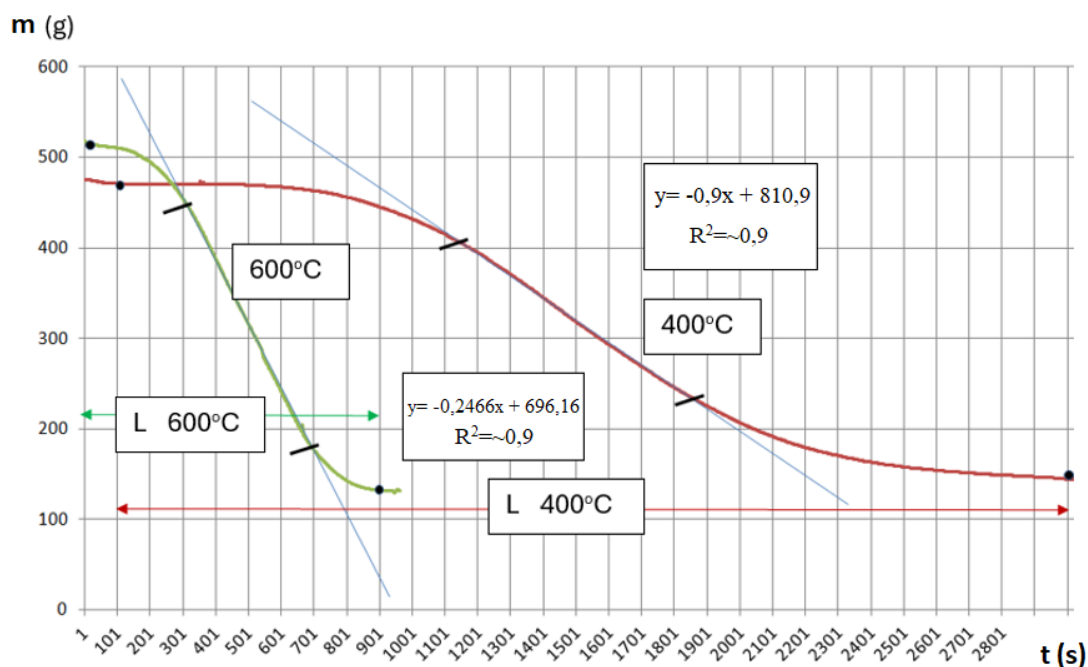
A vizsgálat során világosan látszik, hogy a maradékanyag mennyisége az alacsonyabb (400°C) kezelési hőmérsékleten magasabb, mint a magasabb hőfokú (600°C-os) kezelés során. A lefolytatott mérésekből egyértelműen kitűnik, hogy a magasabb gáz-, és kisebb szilárd anyag képződés elősegítéséhez a magasabb pirolízis hőmérsékletek kedveznek.



40. ábra TGA diagram (saját ábra)

f – felfűtés, *sz* – párolgás (víz, olaj,ok stb.) *p* – pirolízis (intenzív átalakulás),
k – krakkolás, redukció, *l* – lehűlés, T_1 – lebomlás kezdete, *A* és *C* – intenzív
szakasz, T_f – lehűlés kezdete

A tömegcsökkenés lefutása 400/600 °C-on a 41. ábrán látható.



41. ábra Tömegcsökkenés változása 400/600°C-on – G30 vegyes faapríték (MATE labor)

Az anyag lebomlása jól követte a (feltételezett elméleti) TGA jellegzetes lefutását, a középső intenzív szakaszt az alábbi lineáris függvény jellemzi.

Kisebb intenzitású lebontásnál, 400°C esetén: $y = -0,9x + 810,9$

$$R^2 \approx 0,9$$

Nagyobb intenzitású lebontásnál, 600°C esetén: $y = -0,2466x + 696,16$

$$R^2 \approx 0,9$$

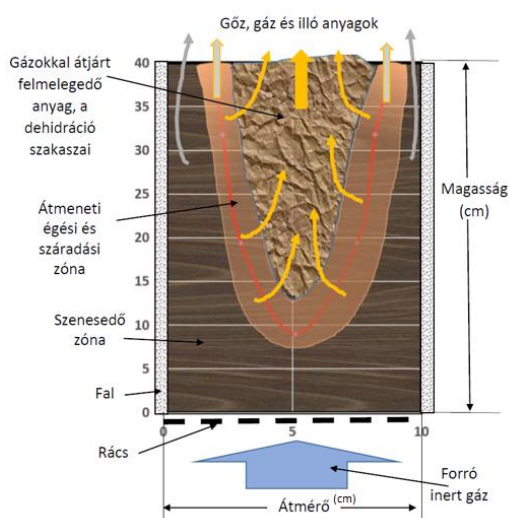
Ahol (mindkét esetben): x – időtartam (s)

y – a reaktortérben lévő anyag tömege (g)

4.1.6. A hőmérséklet terjedésének geometriai alakulása

Az inert gázos laboratóriumi modell reaktor közép síkjában vizsgáltam a lebomlás alakulását (42.ábra). A mérést akkor végeztem, amikor az anyagoszlop második érzékelőjénél is meghaladta a hőmérséklet a 350°C-os értéket, tehát a pirolizáció megkezdődött, vagy már végbement. Ezt követően megmértem, hogy H magasságban az anyag a faltól mérve milyen távolságban kezdte meg az átalakulást. A kapott értékeket a 12. táblázat tartalmazza.

A generátor egyik alkotójától sugárirányban mért távolság (FT) és a magasság (H)



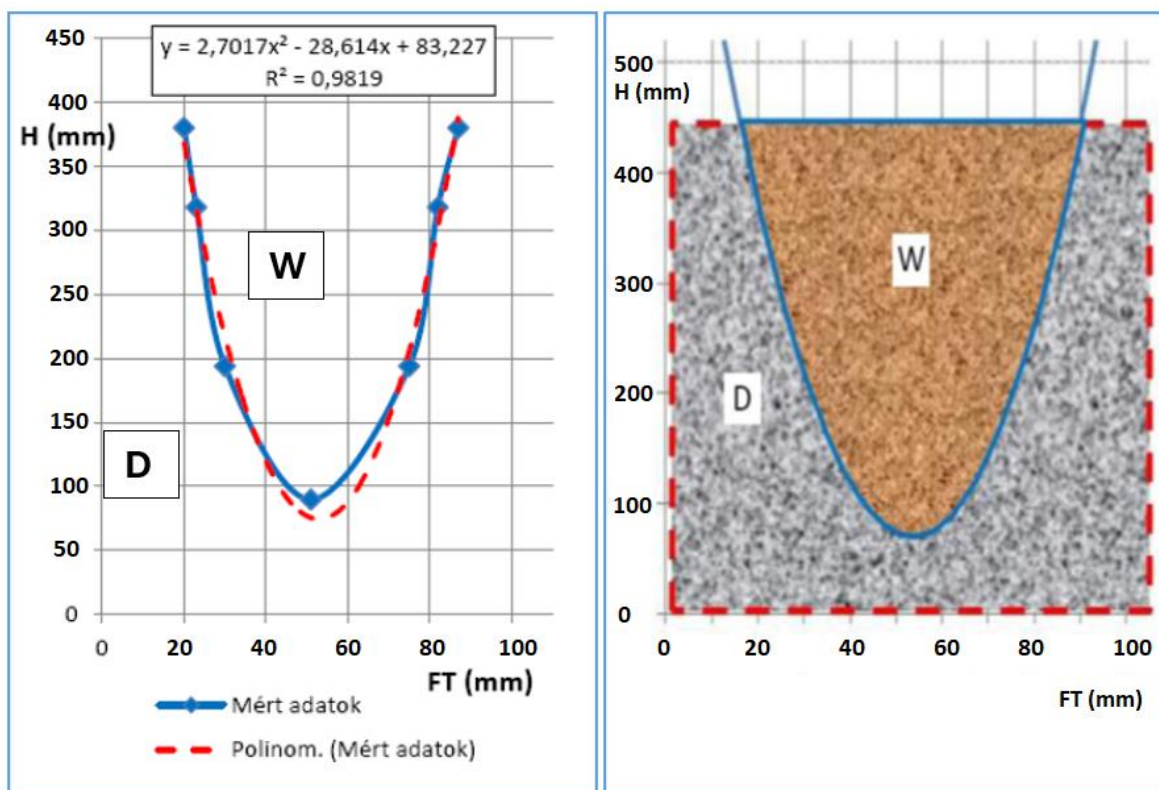
42. ábra Hőmérséklet terjedésének geometriai alakulása (saját ábra)

12. táblázat Mért távolságok sugárirányban (FT) és magasság értékek (H)

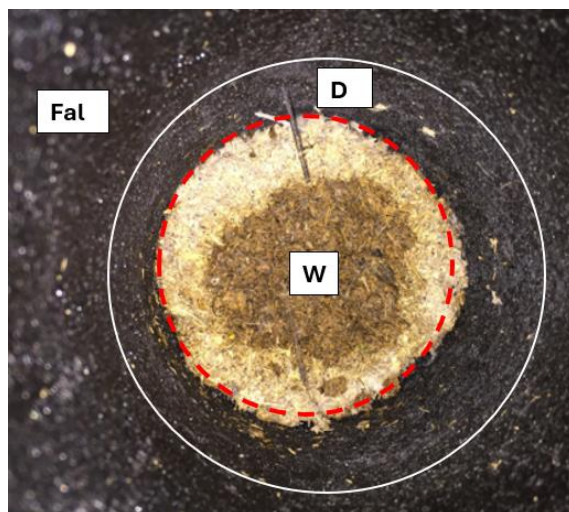
FT	H
(mm)	(mm)
20	380
23	318
30	194
51	90
75	194
82	318
87	380

A határértékeket függvény formájában ábrázoltam, majd megvizsgáltam, milyen függvény szerint zajlik a változás. A kapott parabola illeszkedése szoros, (de az egyes oldalakat megvizsgáltam exponenciális függvénnyel is, s az eredménynél az illeszkedés $R^2 > 0,9$ -nél.) Tehát a fix-ágyas

(zónás) reaktor modellben az anyag lebontásának előrehaladása (43. ábra) lefelé mutató parabolikus kúp-szerűen megy végbe. Felülnézeti kép a 44. ábrán látható.



43. ábra A fix-ágyas (zónás) reaktor modellben a hőmérséklet terjedésének haladása (MATE labor)



44. ábra Felülnézeti kép (saját ábra)

A laboratóriumi egységre a határoló felület keresztmetszeti kontúrja az

$$y = 2,7017x^2 - 28,614x + 83,227$$

$$R^2 = 0,9819$$

függvény szerint lakul.

Ahol: x – a reaktor átmérő (mm);

y – a reaktor magasság (mm)

4.1.7. Az alapanyag nedvességtartalmának vizsgálata

Különböző nedvességtartalmú anyagok különféle reakcióparamétereket eredményeznek, ezért kifejezetten fontos, hogy tisztán látható legyen a lezajló folyamat és ennek megfelelően lehessen tervezni mind a várható gázösszetétel, mind pedig később a leadott teljesítmények vonatkozásában.

Természetesen a hamutartalom és az esetleges kátránytartalom sem elhanyagolható. Nyilvánvaló, hogy a magas kátránytartalom nem kedvez a termékgáz felhasználásánál, főleg, hogyha energiatermelés a kívánt cél (gázmotorban történő elégetéssel).

A laboratóriumi berendezésen megvizsgáltam, hogy az alapanyag nedvességtartalma milyen befolyással bír a lezajló reakciókra. A mérések 850 °C redukciós hőmérsékleten valósultak meg.

Az eredmények a 13. táblázatban láthatók, melyből világosan kitűnik, hogy a magasabb nedvességtartalmú anyag rontja mind a konverziós hatásfokot, mind pedig a termékgáz energiataralmát.

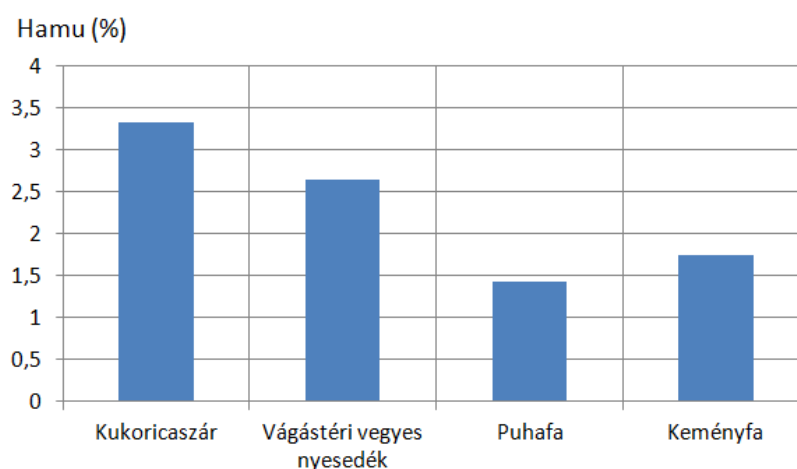
13. táblázat G30 vegyes faapríték nedvességtartamának befolyása a pirolízis reakcióra

Megnevezés	Mérték- egység	Értékek a nedves és száraz tartalomra vetítve			
Nedvesség tartalom	w _w %	15	o*	0*	25
Redukciós hőfok	°C	850	850	850	850
Környezeti hőfok (levegő)	°C	25	25	25	25
CO	%	16,7	19,6	12,5	15,2
CO ₂	%	9,9	11,6	11,9	14,5
CH ₄	%	1,7	2,0	1,6	2,0
H ₂	%	17,6	20,7	21,2	17,5
Termékgáz energia tartalma	kJ/Nm ³		5430,0	4925	
Konverziós hatásfok (összes)	%		74,85	70,9	
A felhasználható gáz	kJ/Nm ³		4030,0	3491	
Veszteség a gázra vetítve (hűtés, hamu, szén, hőv.)	kJ/Nm ³		1390,0	1433	
Maradék mennyiség	%		2-3	2-3	

*Megjegyzés: szárazanyagra vetítve

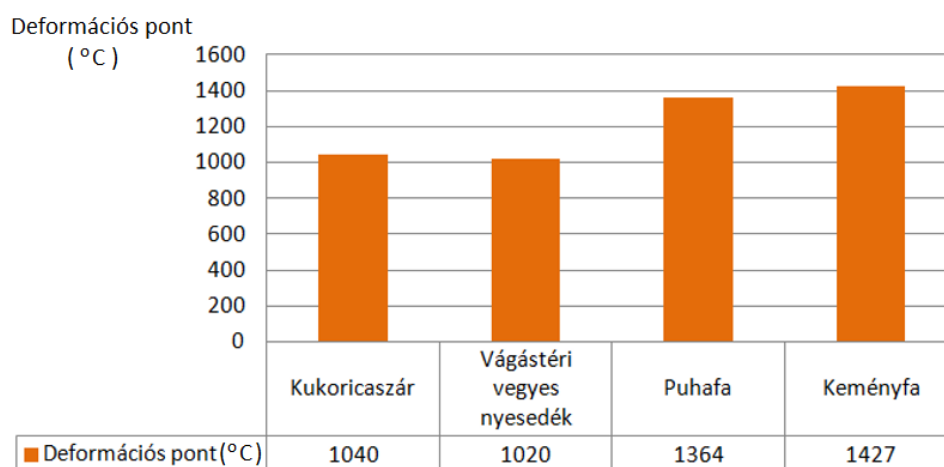
4.1.8. Biomassza alapanyagok hamutartalma

A gázgenerátor működése során végbemenő termokémiai folyamatok következtében keletkezik a hamu, amely főként a tüzelőanyagban található ásványi anyagok oxidációjának eredménye. A különböző biomassza-alapanyagok hamuképződési hajlama és az ahhoz tartozó hőmérsékleti jellemzők meghatározó tényezők a berendezés technológiai kialakítása és a hamueltávolítás módja szempontjából. Alacsony olvadáspontú hamu esetén fennáll a veszélye annak, hogy a hamu salakká olvad össze, ami eltömődést és üzemi problémákat okozhat. Emellett a keletkező hamuréteg lerakódhat a redukciós zónák felületén, ami rontja a szén–szén-dioxid reakció hatékonyságát, és így csökkenti a szénmonoxid-termelés mértékét. A vizsgált anyagok hamu mennyisége a 45. ábrán látható.



45. ábra Hamu mennyiség a vizsgált anyagoknál (MGI labor)

A rostélyokon való lerakódás és a salakképződés megelőzése szempontjából kiemelten fontos, hogy az adott tüzelőanyag milyen tulajdonságú hamut hagy maga után. Ezt a viselkedést jellemzi a hamu ún. deformációs hőmérséklete. Mivel a biomassza pirolízise során általában nem alkalmazunk 1000 °C-nál magasabb hőmérsékletet, a vizsgált anyagok többségénél a hamu alakváltozása csak e hőfok fölött indul meg. A vizsgálat eredményét a 46. ábra szemlélteti.



46. ábra Hamu deformációs pontja (MGI labor)

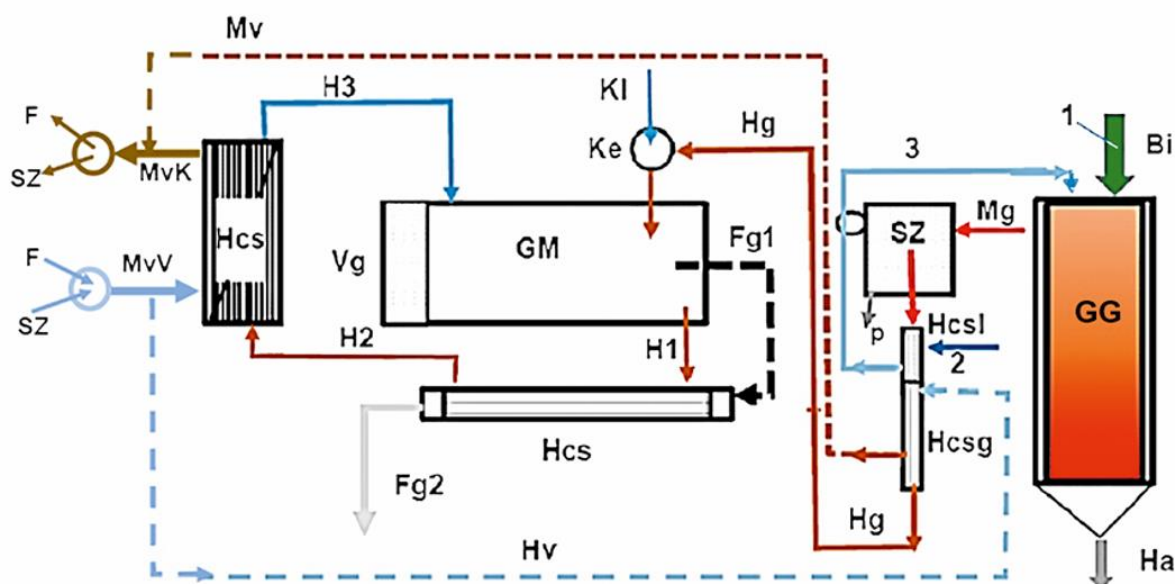
A kukoricaszár és a vágástéri nyesedék esetében szembetűnő a magasabb hamutartalom, amely elsősorban a szennyeződések — különösen a talajból származó ásványi részecskék — jelenlétére vezethető vissza. Ezek a szennyeződések hozzájárulnak a hamu alacsonyabb deformációs pontjához, ami növeli a salakképződés kockázatát az üzemeltetés során.

4.2. ÜZEMI VIZSGÁLATOK

Az üzemi vizsgálatokat a kísérleti berendezés telepítésének helyszínén, Zagyvarékason végeztem.

4.2.1. A rendszer elvi felépítése

A rendszer felépítése (47. ábra) úgy került kialakításra, hogy a működés során keletkező hulladékhő maximális mértékben hasznosítható legyen, amely vonatkozik a gázgenerátorra, a termelt gázra és a gázmotorra is.

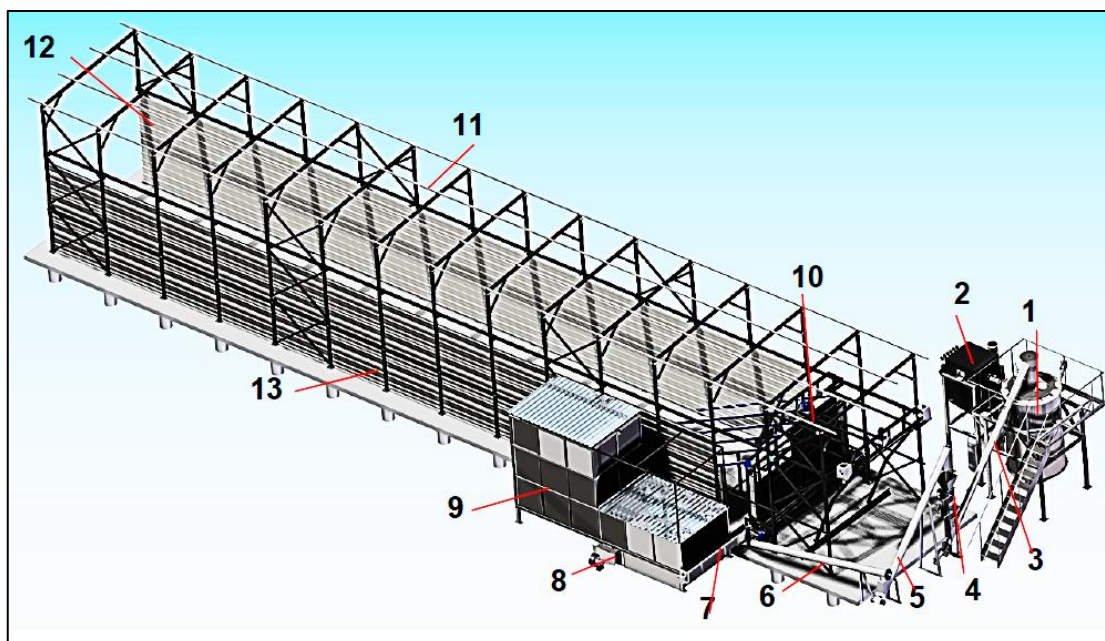


47. ábra A fejlesztett 100kW rendszer elvi felépítése (saját ábra)

Bi	Biomassza és levegő bejuttatása	Fg1	Füstgáz a motorból
1	Biomasszával bejutó levegő	Hcs	Köteges hőcserélő
2	Külső levegő átvezetése a hőcserélőn	H1	Motorköpeny-hűtő folyadék
3	Előmelegített levegő bevezetése a reaktorba	H2	Melegített hűtőfolyadék
KI	Környezeti levegő	H3	Lehűlt hűtőfolyadék
GG	Gázgenerátor	Hcs	Lemezes hőcserélő
Ha	Hamu és maradék szén	MvK	Kimenő melegvíz az osztóhoz
Mg	Forró gáz	F	Melegvíz a felhasználóhoz, illetve felhasználtól
SZ	Szűrőház és szűrők	Sz	Melegvíz a szárító termoventilátorhoz, ill. a visszatérő ág
Hcsg	Gáz/víz hőcserélő (gázhűtő)	MvV	Visszatérő lehűlt víz a hőcserélőbe
Mv	Melegvíz (gázhűtőből)	Hv	Lehűlt használt víz (a gáz hőcserélő hűtőhöz)
HcsI	Gáz/levegő hőcserélő		
GM	Gázmotor		
Hg	Lehűtött gáz		
Ke	Gáz és levegő beadagolása a motorba		

4.2.2. A rendszer részegységeinek elhelyezkedése

A gáz előállító rendszer (48. ábra) úgy lett kialakítva, hogy a folyamat szempontjából szervesen kapcsolódó gépegységek egymás mellett helyezkedjenek el. A nagyméretű tüzelőanyag tároló (ahol több napi mennyiség is elfér egyszerre) a legnagyobb kiterjedésű elem, mely jól megközelíthető teherautóval, illetve rakodógéppel is. A berakodás után kaparólánccal végzi az anyag továbbítását automatikusan. A nagyméretű tároló végén található kisebb méretű apríték tároló és a hozzá kapcsolódó szárító egység már az az alapanyag gázgenerátorba való előkészítését végzi el, mely során a továbbításra kerülő tüzelőanyag nedvességtartalma a megfelelő technológiai paraméterek biztosításához 20% alatti kell legyen. A tüzelőanyag tároló és szárító feladata tehát a beérkező biomassa tüzelőanyag megfelelő nedvességtartalmának biztosítása, melyhez a gázgenerátor hulladékhője kerül felhasználásra.



48. ábra Gáz előállító rendszer elhelyezkedése az üzemcsarnokban (Forrás: Pyrowatt Kft.)

Az ábra jelei:

1. gázgenerátor
2. termék-gáz elvezetése, gázszűrő
3. csigás felhordó a generátorhoz
4. zsilipes adagoló
5. csigás felhordó az adagolóhoz
6. csigás kihordó, az adagoló felhordóhoz
7. keresztirányú csigás összehordó
8. kalorifer
9. apríték tároló
10. tároló szárító végegysége

11. nagyméretű tároló
12. behajtás a nagyméretű tárolóba
13. a tároló padozata és kaparóláncos behordó szerkezete

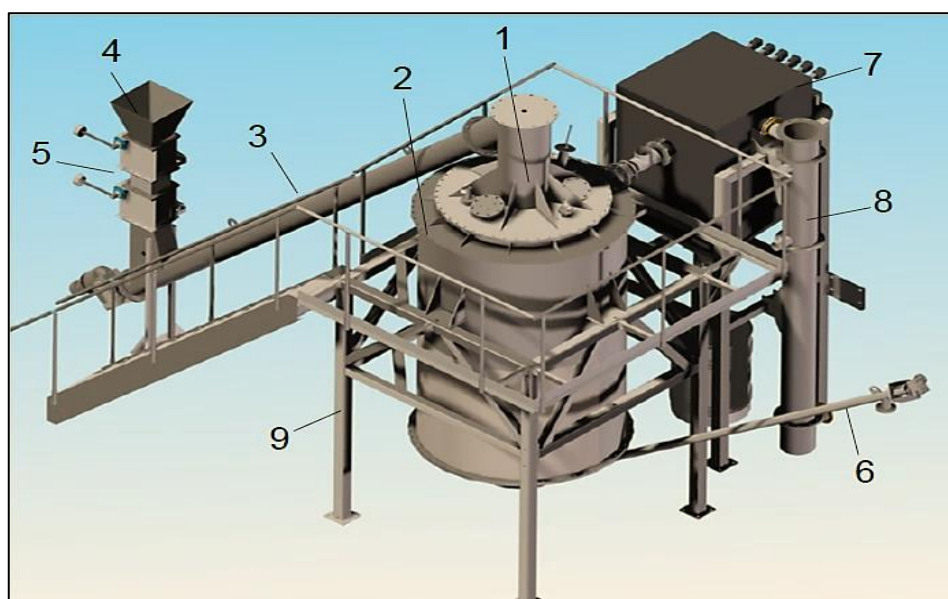
A tüzelőanyag szárítása mozgóágyas technológiával kerül megvalósításra. A szárítás teljesítménye a szárító levegő hőmérsékletével és térfogatáramával szabályozható. A gázgenerátor felé csigás felhordó szerkezet szállítja tovább az alapanyagot.

- | | |
|---|----------|
| – Szárító teljesítmény igénye száraz anyagra vetítve: | 32 kW |
| – Szárítási teljesítmény 40%-ról 10%-ra | 110 kg/h |
| – Szárítási hőmérséklet | 80 °C |
| – Elektromos teljesítményigény: | 1,1 kW |

A párával telített levegő a szárítótérből alacsony sebességgel ($<0,2\text{m/s}$) a szabadba távozik. Az alacsony szárítási sebesség lehetővé teszi, hogy a légáram az aprítékban előforduló por frakciót ne ragadja magával.

A gázgenerátor és a hozzá kapcsolódó főbb elemek

A rendszer legfontosabb része az alábbi 49. ábrán látható generátor test, illetve a hozzá kapcsolódó elemek. A biomassza anyag a csigás adagolón és zsilipeken keresztül érkezik a reaktorba az egység közvetlen közelében elhelyezett előtárolóból.



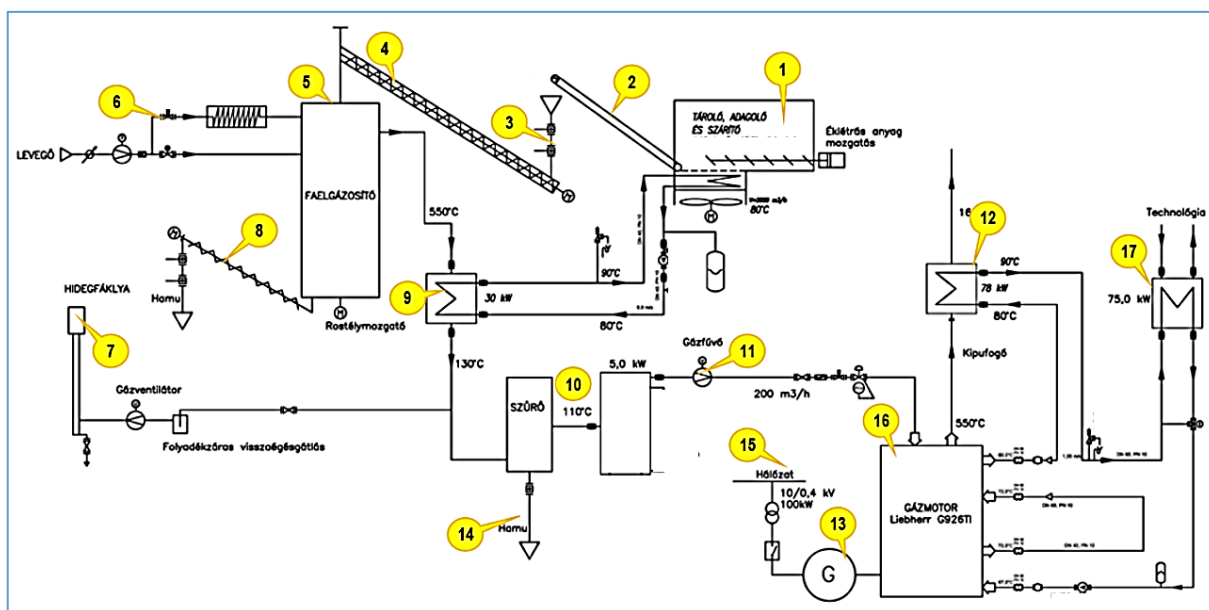
49.ábra Gázgenerátor és kapcsolódó elemei (Forrás: Pyrowatt Kft.)

Az ábra jelölései:

1. generátor test a betápláló nyílással
2. a generátortest és szigetelése
3. tüzelőanyag felhordó cső
4. tüzelőanyag beadagoló nyílás
5. zsiliprendszer
6. hamu kihordó
7. gázszűrő
8. hőcserélő
9. a rendszer vázszerkezete

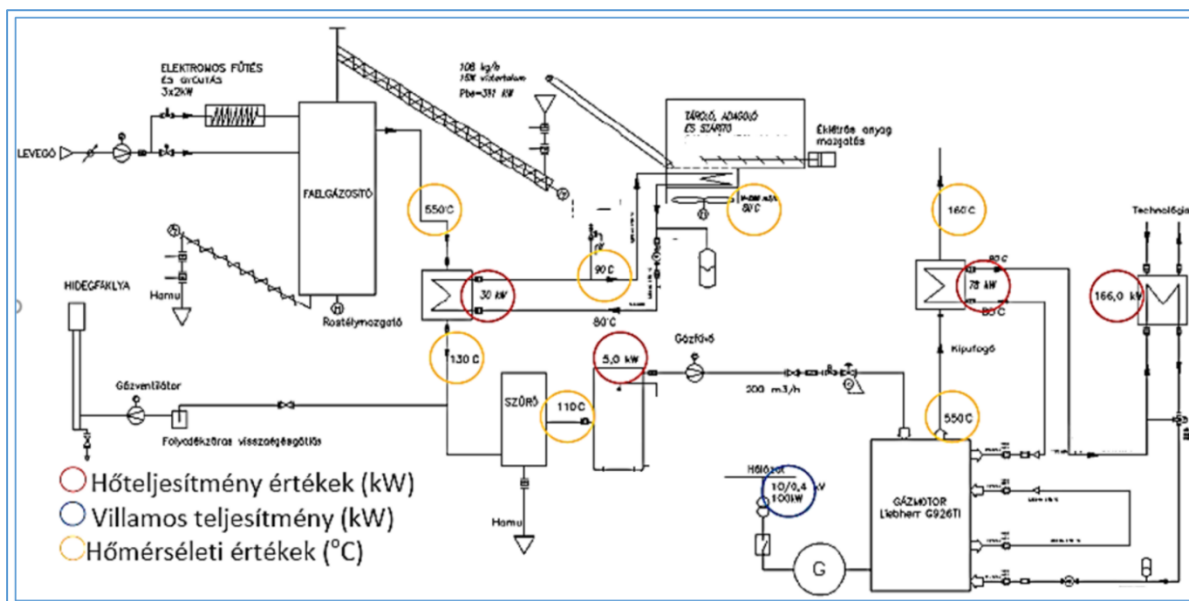
4.2.3. A rendszerre jellemző hőfok és teljesítmény értékek

A rendszer főbb elemei az alábbi 50. ábrán láthatók, a vonatkozó teljesítmény és hőfok értékek pedig az 51. ábrán és a 14. táblázatban kerülnek bemutatásra.



50. ábra A rendszer főbb elemei (saját ábra)

1- tüzelőanyag tároló és szárító berendezés,	9- hőcserélő
2- szállító szalag,	10 - gáztisztító szűrő, gázmosó
3- adagoló (zsilip),	11- nyomásfokozó
4- tüzelőanyag csiga	12- gázmotor kipufogó hőcserélője (gáz/víz)
5- gázgenerátor,	13- villamos generátor
6- levegő adagoló, elektromos gyújtás	14- tisztítóban leválasztott hamu
7- gáz fáklya	15- villamos hálózati csatlakozás
8- hamu leválasztó, a hamu kihordó és - tároló,	16- gázmotor
	17- hőcserélő



51. ábra A teljesítmény és hőmérsékleti értékek a rendszer jellemző pontjain (saját ábra)

14. táblázat Teljesítmény és hőmérséklet értékek

Teljesítmény	[kW]	Hőmérsékleti értékek	[°C]
Tüzelőanyag szárító	30	Gáz a generátor kimenő oldalán	550
Tisztító után	5	A szárító hőcserélője után	130
Használati meleg víz	166	A szárító kalorifer előtt/után	90/80
Villamos	100	A gázszűrő után	110
Összesen	301	Kipufogó füstgáza	550
		A kipufogó hőcserélője után (a szabadba)	160

A pirolízis generátor alkalmazása egy jó hatásfokkal üzemelő CHP hő- és villamosenergiatermelő kiserőműrendszert eredményezett.

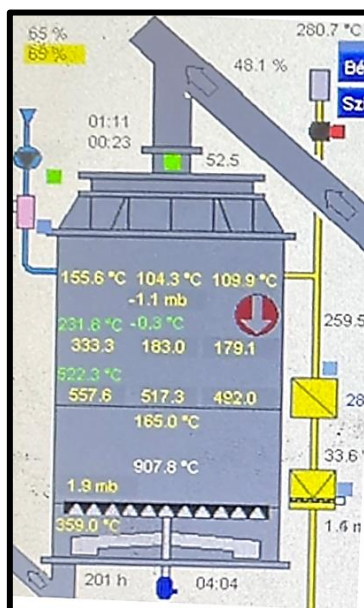
4.2.4. A működés ellenőrzése és a vezérlés

A teljes CHP kiserőmű rendszert egy összetett PLC egység vezérli, melyhez több alfunkció is tartozik.

PLC1 (mester) feladatai:

- a teljes rendszer grafikus megjelenítése
- szabályzás, vezérlés
- gépészeti, valamint villamos védelmek generálása, beavatkozás
- hibák kezelése, naplózási tevékenység
- PLC2 és PLC3 eszközökkel való kommunikáció
- helyi és webes távfelügyelet

A gázmotor folyamatirányítását (PLC2) egy Woodward easYgen típusú CHP vezérlő PLC végzi. Az eszköz bár rendelkezik operátor panellel, de itt csak minimális információ érhető el, melyek elsődlegesen a gázmotor működéséről és üzemállapotairól szolgáltatnak adatokat. RS485 MODBUS kommunikáció biztosít kapcsolatot a mester PLC-hez, ami elsősorban az üzemállapotok és hibák összegyűjtésére szolgál. A vezérlő által felügyelt gázmotor indítása, leállítása és vészleállítása huzalozottan történik a fokozott biztonság érdekében. A gázmotoron számos analóg és digitális érzékelő és távadó található, melyek garantálják rendellenes működés esetén az esetleges beavatkozást, vagy indokolt esetben a leállást. A gázgenerátor képernyő ábrája az 52. ábrán látható.

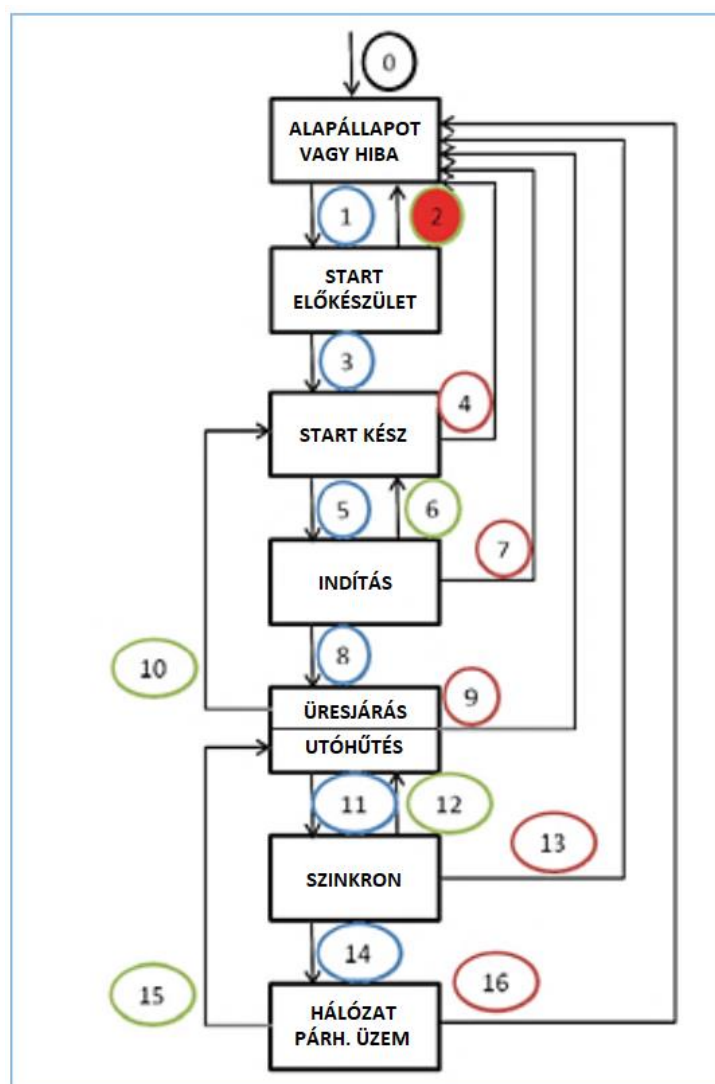


52. ábra A képernyő ábrája a gázgenerátor adataival (saját ábra)

PLC2 feladatai:

- gázmotor üzemszerű indítása és leállítása,
- fordulatszám és teljesítmény szabályzás,
- teljesítmény tényező szabályzás,
- hűtővízkör szabályzás,
- keverékszabályzás,
- gázmotor gépészeti és villamos védelmei,
- üzemanyagrendszer (gáz) vezérlés

A gázmotor üzemállapotainak folyamatábrája az alábbi 53. ábrán látható.



53. ábra A gázmotor üzemállapotának folyamatábrája (saját ábra)

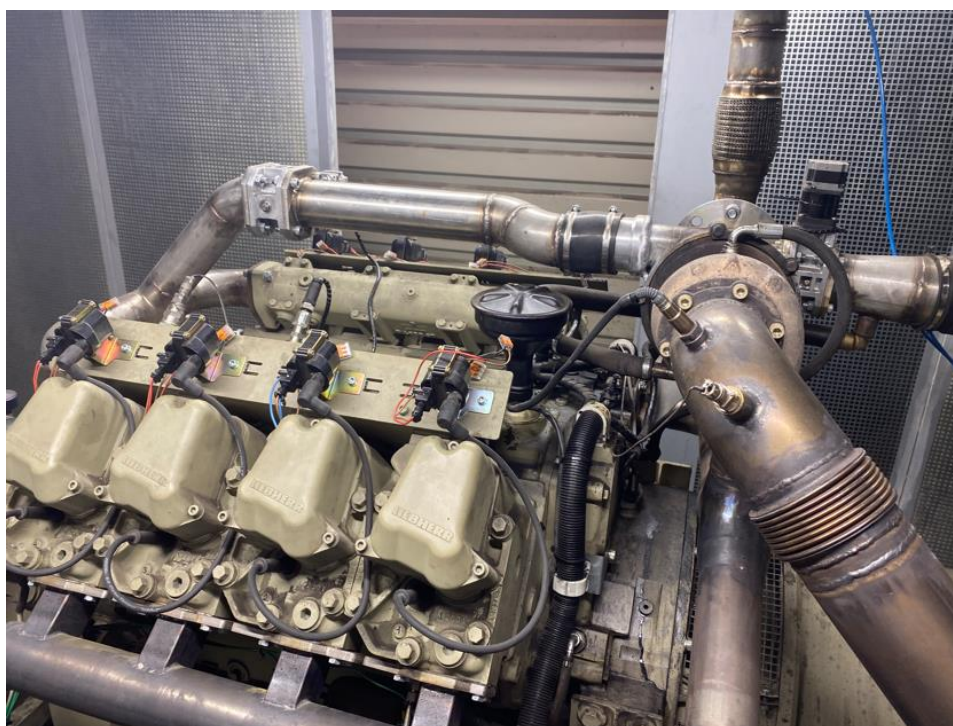
A PLC 3 feladatai pedig az előszárító, üzemanyag-adagoló zsilipek, gázgenerátorban zajló hőmérsékleti folyamatok vezérlése, ellenőrzése, valamint a gázösszetétel, légbevezetés, rostély mozgatás, hamukihordás, szűrőegység tisztítása.

A gázmotor (54. ábra)

15. táblázat Gázmotoroknál megengedett anyagok a gázban

Megnevezés	Dimenzió	Méret
Részecsketartalom	mg/m ³	<50
Részecskeméret	µm	<3
Kátránytartalom	mg/m ³	<100
Alkálik	mg/m ³	<50
NH ₃	mg/m ³	<55
Kén	mg/m ³	<1500
Klór	mg/m ³	<500

A gázgenerátorban előállított termék-gázból a részecskék mechanikai eltávolítása indokolt, amely az üzemi rendszerben speciális kerámiaszűrőkkel valósul meg, biztosítva a hatékony finomszűrést. Az ammónia (NH₃) a magas hőmérsékletű redukciós térben hidrogénné és nitrogénné bomlik, így jelen esetben nincs számottevő hatása. A biomassza-alapanyagok kén- és klórtartalma elhanyagolható, ezek a termék-gázban alig mutathatók ki. Hasonlóképpen, az alkálifémek koncentrációja is a kimutathatósági határ alatt marad, ezért ezek jelenléte sem jelent problémát a rendszer működése szempontjából. A megengedett határértékeket a 15. táblázat foglalja össze.



54. ábra V8-as szikragyújtású Liebherr gázmotor (saját ábra)

A kátrány jelenléte a lehető legkevésbé kívánatos a pirolízis- és elgázosítási folyamatok során, ennek ellenére keletkezése elkerülhetetlen. Fontos célom volt, hogy mennyisége a minimálisra csökkenjen, ezért több sikeres kísérletet végeztem a keletkezés körülményeinek feltárására és csökkentési lehetőségek érdekében.

Részletesen elemeztem azokat a technikai és technológiai tényezőket, amelyek hozzájárulnak a kátrányképződéshez, különös tekintettel a kiindulási anyagok belső összetételére, szerkezeti tulajdonságaira és fizikai megjelenésére. A kátrány eltávolítása és csökkentése alapvető fontosságú, mivel a termékgázban kondenzálódva lerakódhat a motorok szerkezeti elemeire, ahol ráéggve súlyos működési zavarokat okozhat.

Szakirodalmi források (pl. Tóth L., 2012; Madár V. et al., 2014) is megerősítik, hogy a kátrány termikus lebontása megfelelő hőmérsékleten és kontrollált oxigénellátással valósítható meg. Ebből kiindulva az elgázosító közegként a levegő használatát részesítem előnyben, mivel az oxigéntartalom támogatja a kátrányok lebontását. Ugyanakkor ez a választás a reakcióhőmérséklet módosulásához és esetenként a hatékonyság csökkenéséhez is vezethet.

Különösen fontosak azok a paraméterek, amelyek befolyásolják az anyagok konverzióját és a kátrányképződést, például a gázosítás során alkalmazott levegő áramlási intenzitását. Emellett világosan látszik, hogy a reaktorban keletkező CO₂, H₂O és O₂ koncentrációi is jelentősen befolyásolják a reakciók lefolyását és a kátrányképződés mértékét.

A MATE laboratóriumában kifejlesztett, inertgázzal működő és külső elektromos fűtésű reaktorrendszerek megfelelő alapot biztosítottak a vizsgálatokhoz. Ezek lehetővé tették az anyagspecifikus optimális működési paraméterek beállítását, így pontosan értékelhettem a hideggáz energetikai hatékonyságát és a keletkező kátrány mennyiségét is.

Termékgáz szűrése, gázsűrő egység (55. ábra)

Az időegység alatt tisztítandó gáz térfogatának a szűrőközeg felületéhez viszonyított aránya a szűrő felületi terhelése, vagyis a szűrőarány:

$$U_f = \frac{V}{A_{zs f}} \text{ [m}^3\text{/m}^2\text{h]} \quad (16)$$

V – a szűrőbe bevezetésre kerülő gáz térfogatárama (m^3/h)

A_{zsf} – a szűrőanyag összes felülete (m^2)

A megfelelő üzembiztonság érdekében ajánlott a szűrők időszakos tisztítása, mivel a lerakódott szennyeződések csökkenthetik a szűrés hatékonyságát és növelhetik az áramlással szembeni ellenállást. A rendszeres karbantartás nemcsak a szűrő élettartamát hosszabbítja meg, hanem a teljes rendszer hatékony működéséhez is hozzájárul.



55. ábra Gázsűrő egység, háttérben a gázgenerátor (saját ábra)

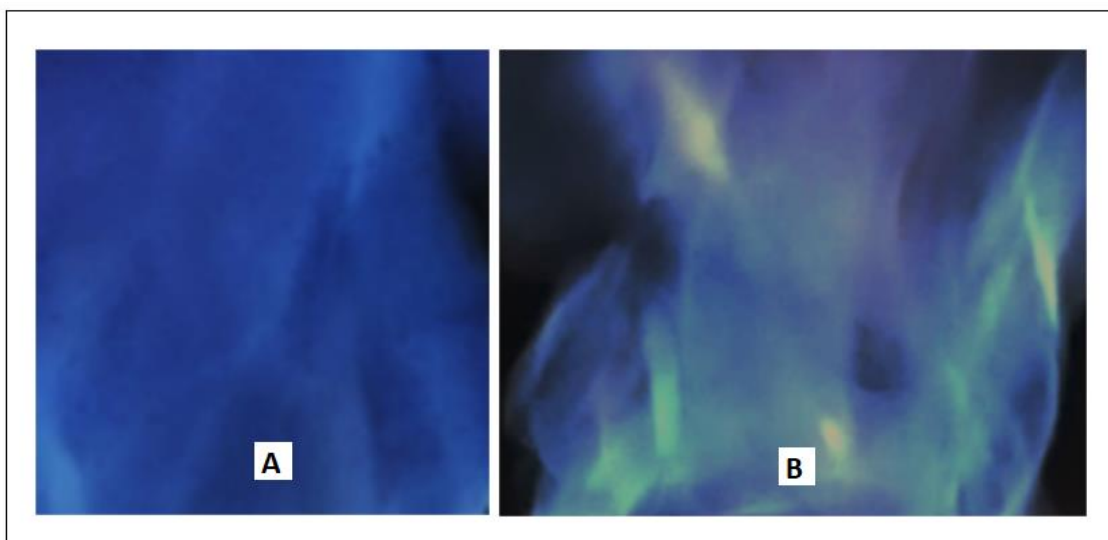
A katalógusból választott és a tervezésnél számított $4,0 \text{ m}^2$ -es felület eléréséhez 18 db szűrőelemre van szükség.

A gáz a generátorból a közvetlenül mellette elhelyezkedő szűrőház szűrő egységeihez jut, mivel a generátorgázt a gázmotorba kerülése előtt szűrni kell $0,3$ mikron finomsággal. A megengedhető maximális portartalom $50 \text{ mg}/\text{Nm}^3$. A gázsűrőben a generátorgáz a hőcserélőből $90\text{-}150^\circ\text{C}$ hőmérsékleten kerül be. A szűrőegységek tisztítása ellenáramú levegő befúvással történik.

A tisztítás beállított időközönként $0,5 \text{ h}$ vagy 2000 Pa -os nyomáscsökkenés esetén történik.

A termék-gáz lángjának (56. ábra) vizsgálata

A gázgenerátorban keletkező gáz szennyezettsége és kátránytartalma nagy mértékben kimutatható a termék-gáz lángjának színével. A tiszta termék-gáz színe kékes színű, viszonylag homogén és egységes kinézetű. Amennyiben a termék-gáz jelentős kormot vagy vizet tartalmaz, lángjának színe enyhén sárgás lesz. Pontos tartalmi összetétel természetesen csak műszeres úton határozható meg, azonban szemrevételezéssel is megállapítható adott esetben az esetleges szennyeződés jelenléte. Ez főként a gázgenerátor indításakor fordul elő, amikor még bemelegítési fázisban van a reaktor. A fejlesztett CHP kiserőmű esetében a gázgenerátor üzemeltetési épületén kívül elhelyezésre került egy ún. fáklya, mellyel a pirolízisgenerátor indításakor vagy leállításakor keletkező nem teljesen tiszta gáz elégethető.



56. ábra A – tiszta termék-gáz lángja (közel egyéges színű), B – szennyezett termék-gáz lángja (különböféle árnyalatok, eltérő színösszetétel a szennyeződések miatt)

4.2.5. A 100 kW rendszer teljesítményének meghatározása

A 100 kW-ra ($120 \text{ kW}_{\text{max}}$) tervezett berendezés teljesítményét a generátor mérésével valósítottam meg. A vizsgálat során a generátort, a lehetőségeknek megfelelően $\sim 100 \text{ kW}$ teljesítményre szabályoztam. Ekkor mértem a hőmérsékleteket a rendszer a különböző pontjain. Ezek alapján meghatároztam a létrejövő teljesítmény veszteségeket a bemenő anyag energia és nedvesség tartalmától, valamint a környezeti hőmérséklettől függően.

A rendszer tüzelőanyag fogyasztása 18,7 MJ/kg fűtőértékű, száraz fából, maximum 2% hamu tartalmú aprítékból óránkénti szükséglet ~125 kg/h. Az energiaátalakítás paramétereit a 16. táblázat tartalmazza.

Energiaátalakítás száraz fára

16. táblázat Energia átalakítás paramétereit

Fa	Felhasználás	Energia	Rendszer	Gázáram*	Gázgenerátor hideg-	Hőteljesít- mény	Villamos teljesítmény
			hatásfok		hatásfok	(~70 %)	(22-23%)
MJ/kg	kg/h	MJ/h	0,79	m ³ /h	~0,8	kW	kW
18,7	125	2337	1847	318	1477	410	103

*Gáz 5,8 MJ/Nm³

A gázgenerátor hideghatásfoka:

$$\eta_{HG} = \frac{H_{agáz} * q_{gáz}}{H_{atü} * q_{tü}} = \frac{5800 * 318}{18700 * 125} = 0,789 (\sim 79\%) \quad (17)$$

Ahol:

- $H_{agáz}$: A generátorgáz fűtőértéke [kJ/Nm³]
- $q_{gáz}$: A generátorgáz térfogatárama [Nm³/h]
- $H_{atü}$: Az átlagosan vett tüzelőanyag fűtőértéke [kJ/kg]
- $q_{tü}$: A tüzelőanyag tömegárama [kg/h]

Kalkulált teljesítmények

100 (120) kW_{max} villamos teljesítményre tervezett berendezés

- 0,0 % nedvességtartalmú vegyes faapríték,
- 17,0-19,0 MJ/kg fűtőérték esetén

A felhasznált anyag- és hőfokjellemzőket, valamint a gáz összetételét, a 17-19. táblázatok tartalmazzák.

A használt anyag

17. táblázat

Tüzelő anyag	Anyagáram kg/h
Száraz fa	125
Nedvesség a levegőből	25
Levegő	240

Gáz összetétele

18. táblázat

Gázösszetétel	Száraz bázison %
CO	17,4
CO ₂	13,5
CH ₄	1,5
H ₂	22,7

Hőfok jellemzők

19. táblázat

A kapcsolatos jellemzők	Vizes bázison
Nedvesség tartalom %	0
Tüzelő anyag hőfoka (°C)	25
Levegő hőfoka (°C)	25
Meleg gáz hőfoka (°C)	600
gázosítási hőfok (°C)	850
A gáz energia tartalma (MJ/Nm ³)	5,8
Hideg gáz hatásfoka (%)	79
Hővesztesség a maradékban (%)	3,8
Hamu (%)	1,8

CHP ból a villamos energia

- $\eta_e = 0,27$ mellett: 110-115 kW
- Hasznosítható hő: 310-330 kW
- 1,0 kWh villamos energia 0,86-0,9 kg fa aprítékból.

100 (120) kW_{max} villamos teljesítményre tervezett berendezés

- 20,0 % nedvességtartalmú vegyes faapríték,
- 13,0 MJ/kg fűtőérték esetén

A felhasznált anyag- és hőfokjellemzőket, a gáz összetételét, valamint az energetikai jellemzőket a 20-23. táblázatok tartalmazzák.

A használt anyag

20. táblázat

Tüzelő anyag	Anyagáram kg/h
Nedves fa	130
Levegő tömegárama	239

Gáz összetétele

21. táblázat

Gázösszetétel	nedves bázison %
CO	14,3
CO ₂	11,6
CH ₄	1,8
H ₂	18,5

Energetikai jellemzők

22. táblázat

Kalkulált jellemzők	Teljesítmény (kW)	Bemenő hőenergia (%)
Hőtelsítmény	477	100
Faszénben maradó	17,8	3,7
Hővesztesség	18	3,8

Hőfok jellemzők

23. táblázat

A kapcsolatos jellemzők	Vizes bázison
Nedvesség tartalom %	20
Tüzelő anyag hőfoka (°C)	25
Levegő hőfoka (°C)	25
Meleg gáz hőfoka (°C)	600
Gázosítási hőfok (°C)	850
A gáz energia tartalma (MJ/Nm ³)	5,1
Hideg gáz hatásfoka (%)	70,1
Hővesztesség (%)	3,9
Hamu (%)	1,9

CHP ból a villamos energia

- $\eta_e = 0,24$ mellett: 104 kW
- Hasznosítható hő: 360-375 kW
- 1,0 kWh villamos energia 1,1- 1,2 kg fa aprítékból.

Összességében: a berendezés hatásfoka kedvező, mind a rendszerre, mind pedig a gázgenerátorra számítva. A CHP berendezés teljesítményértékeit a 24. táblázat tartalmazza.

A CHP berendezés mért teljesítményei

24. táblázat

Teljesítmény	Jele	Arány %
Tüzelőanyag szárító*	Q_{sz}	9-11
Hamuval távozó	Q_m	1,6-2.0
Hőhasznosítás (HMV, fűtés)	Q_{hh}	45-50
Villamos	P_v	23-27
Veszteség**	Q_v	15-19
Összesen	E_{Σ}	~100

Megjegyzés: *számított érték, **Kalkulált érték

- A bemenő levegő hőfoka: 25 °C.
- A faapríték hőfoka 26 °C.
- Hamu ~ 2,0%.

A keletkező gáz összetételét az 25. táblázat foglalja össze.

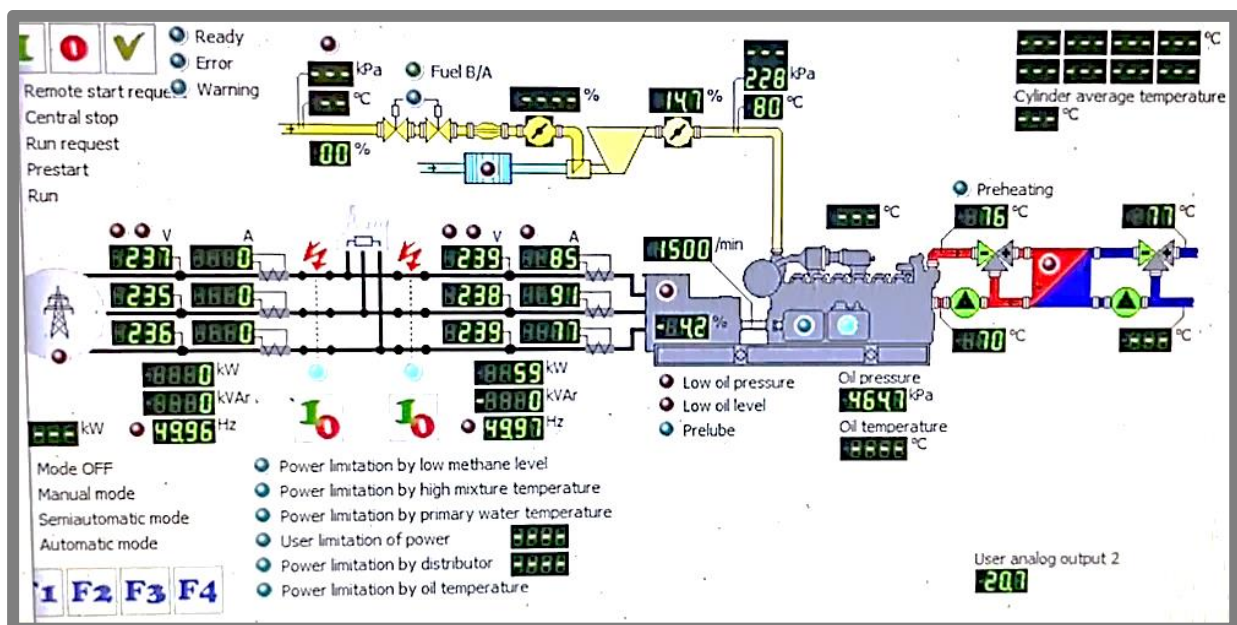
A gáz összetétele az éghető anyagokra

25. táblázat

Megnevezés	Arány (%) (nedvesre)	Arány (%) (szárazra)
CO	16,7	19,6
CO ₂	10,1	11,7
CH ₄	1,8	2,0
H ₂	17,6	20,8

4.2.6. A rendszer csatlakozása a villamos hálózathoz

Az alábbi 57. ábrán bemutatott kijelző (PLC) képernyőképen követhető nyomon a villamos energiatermelés mellett a hőenergia csatlakozása, a beérkező gáz, valamint a turbófeltöltő valós adatainak megjelenítése.



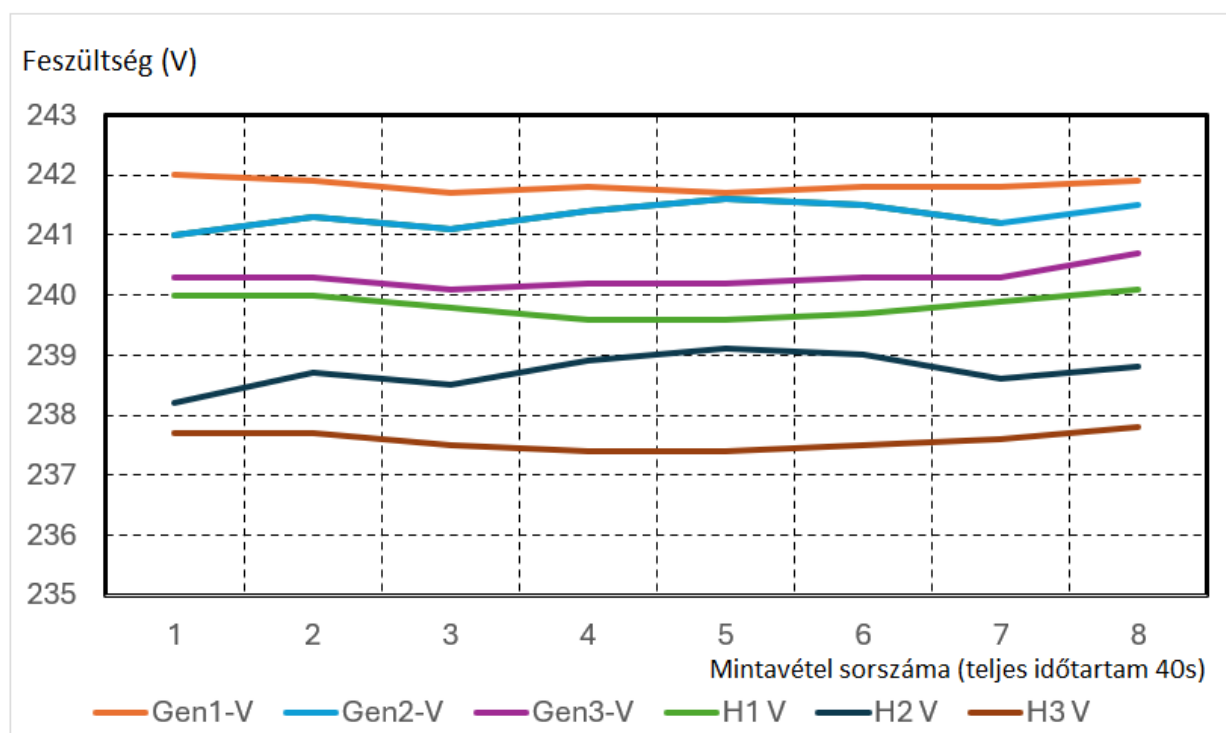
57. ábra A rendszer csatlakozása a villamos hálózathoz, képernyőkép (saját ábra)

26. táblázat Üzemi mérések – a csatlakozás egy szakaszának bemutatása

Üzem	Gen.F [Hz]	Gen1 fesz. (V)	Gen2 fesz.(V)	Gen3 fesz.(V)	Telj (kW)	Hál. F (Hz)	H1 fesz. (V)	H2 fesz. (V)	H3 fesz. (V)	Ford. (min ⁻¹)
1	50,01	242	241	240,3	101,9	50,01	240	238,2	237,7	1501
2	50,01	241,9	241,3	240,3	101,7	50,02	240	238,7	237,7	1502
3	50	241,7	241,1	240,1	100,7	50,01	239,8	238,5	237,5	1501
4	50,02	241,8	241,4	240,2	99,7	50,02	239,6	238,9	237,4	1501
5	50,01	241,7	241,6	240,2	100,6	50,01	239,6	239,1	237,4	1502
6	50,02	241,8	241,5	240,3	101,2	50,03	239,7	239	237,5	1500
7	50,02	241,8	241,2	240,3	100,9	50,03	239,9	238,6	237,6	1502
8	50,01	241,9	241,5	240,7	101,2	50,02	240,1	238,8	237,8	1502

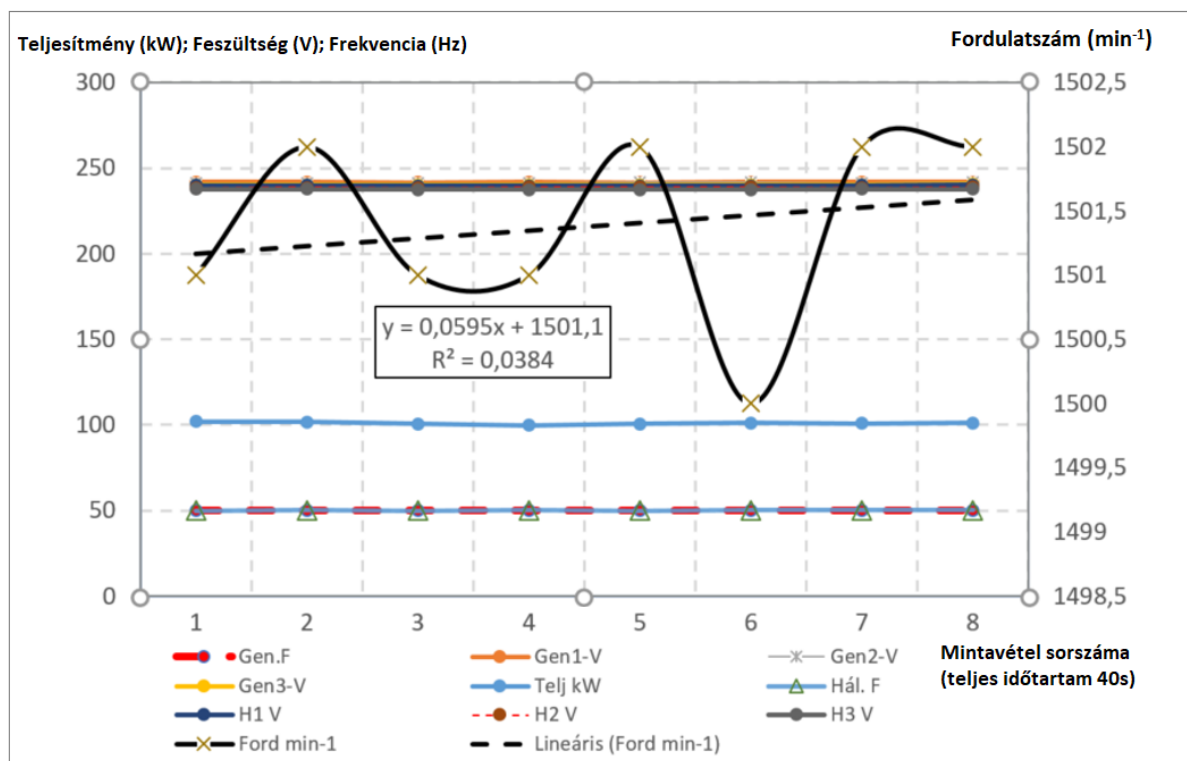
Egy hosszabb üzemi méréssorozat egy szakaszának eredményei láthatók a 26. táblázatban, folyamatos hálózatra csatlakozás mellett, 5 s mintavétel sűrűséggel. Ez a mérés viszonylag jól leírja a rendszer működését, a jellemző üzemi paramétereket, melyek stabilnak mondhatók voltak a teljes üzemeltetés során. Természetesen a felfűtés és az üzemi hőfokok, teljesítmények elérése nem azonnal történik, ez időigényes folyamat, jellemzően 1-3 óra. Mivel a berendezés folyamatos üzemre van tervezve, így a beindítással kapcsolatos procedúra csak ritkán jelentkezik.

Az alábbi 58. ábrán az előbbi 26. táblázat alapján a generátor és a hálózat feszültség értékei láthatók. Megfigyelhető, hogy minimális ingadozás van csak a rendszerben, mind a hálózat mind a generátor részéről, ami alapján a működés zavartalannak mondható.

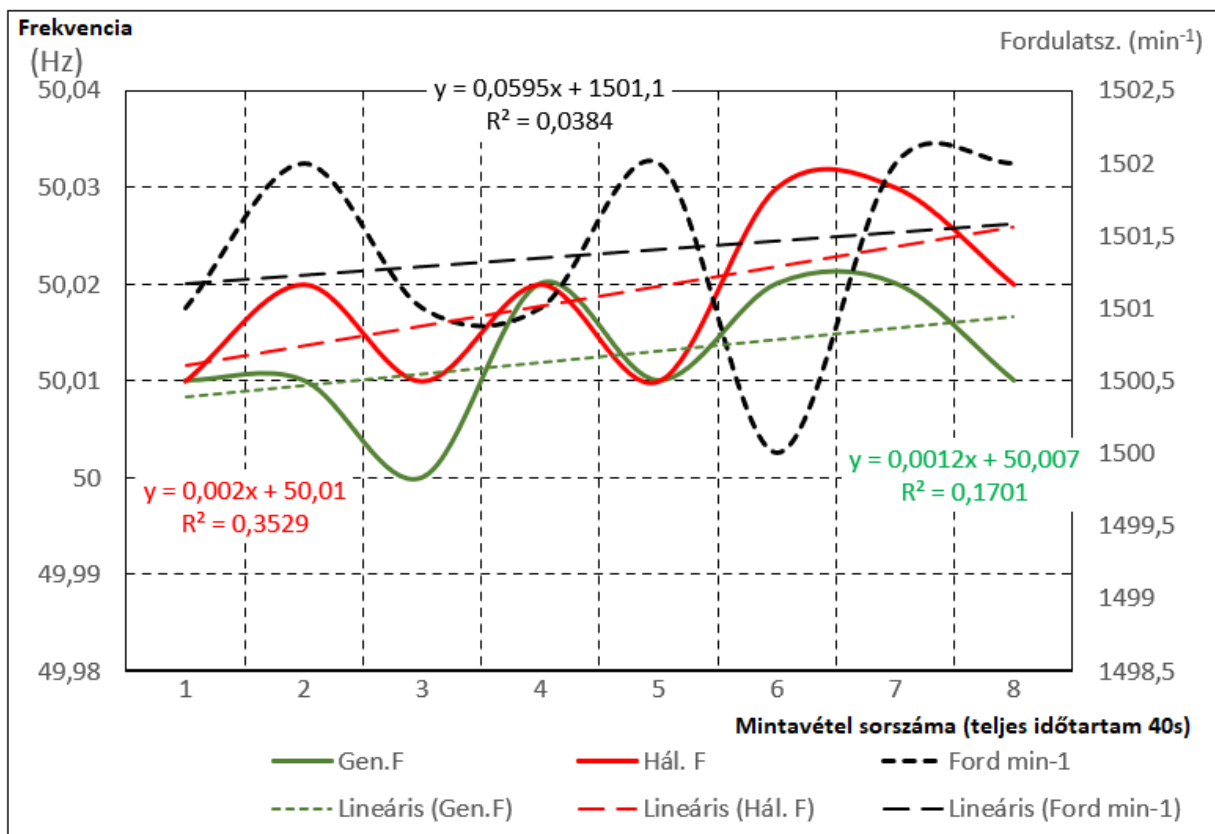


58. ábra Üzemi mérések során a generátor és hálózati feszültségek alakulása - mintavétel 5 s-ként (saját ábra)

Mivel a teljes rendszer automatizált, beavatkozásra ritkán van szükség, az üzemeltetés szakmai felügyelete viszont elengedhetetlen, amit elősegít a PLC vezérlés megjelenítő képernyője és a távelérés funkció. A rendszer együtt futása a hálózattal az 59. ábrán látható.

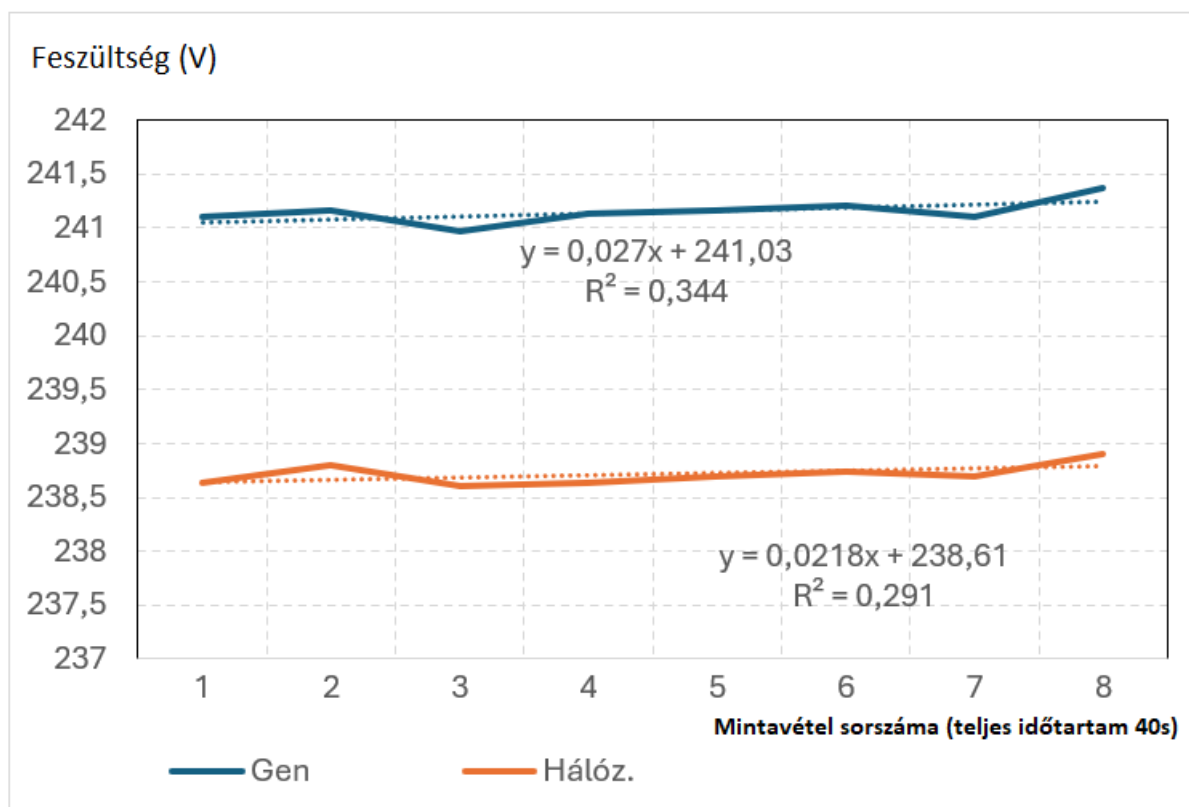


59. ábra Együtt futás a hálózattal - mintavétel 5 s-ként (saját ábra)



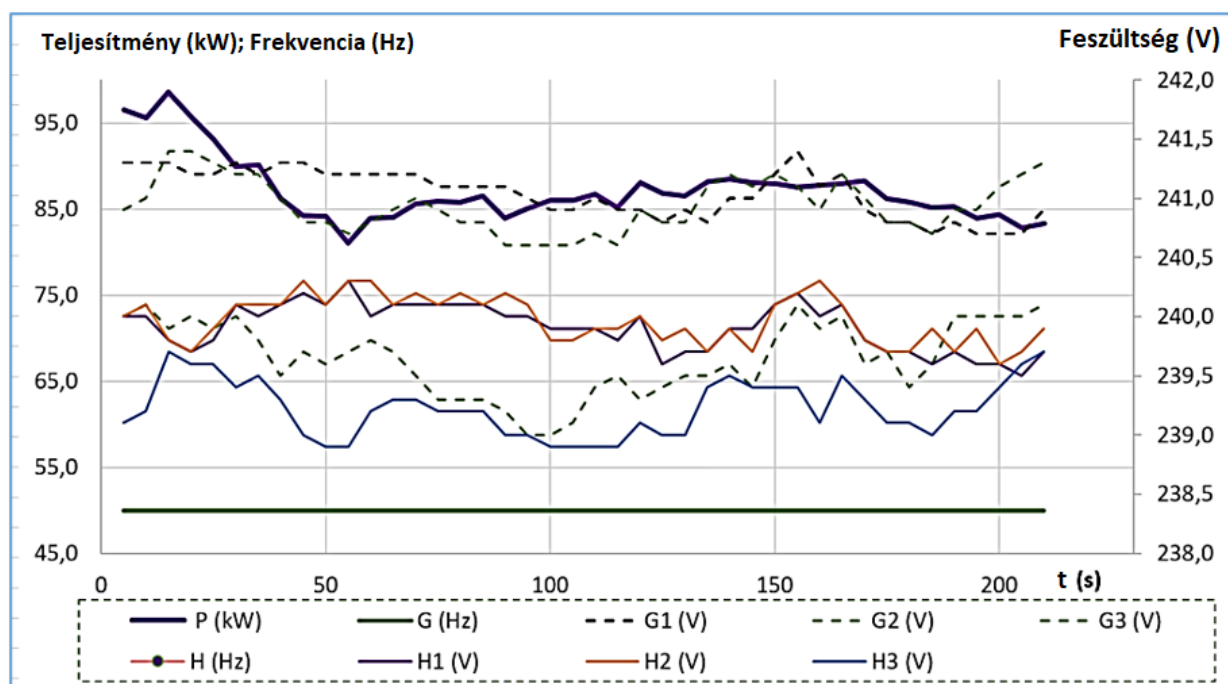
60. ábra Fordulat és frekvencia viszony - mintavétel 5 s-ként (saját ábra)

A fordulatszám és frekvencia értékek a 60., míg a fázisfeszültségek átlagai a 61. ábrán láthatók.



61. ábra Generátor és hálózat fázisfeszültségek átlagolva - mintavétel 5 s-ként (saját ábra)

A hálózat és a generátor együtt futása 200s időtartamban a 62. ábrán látható.

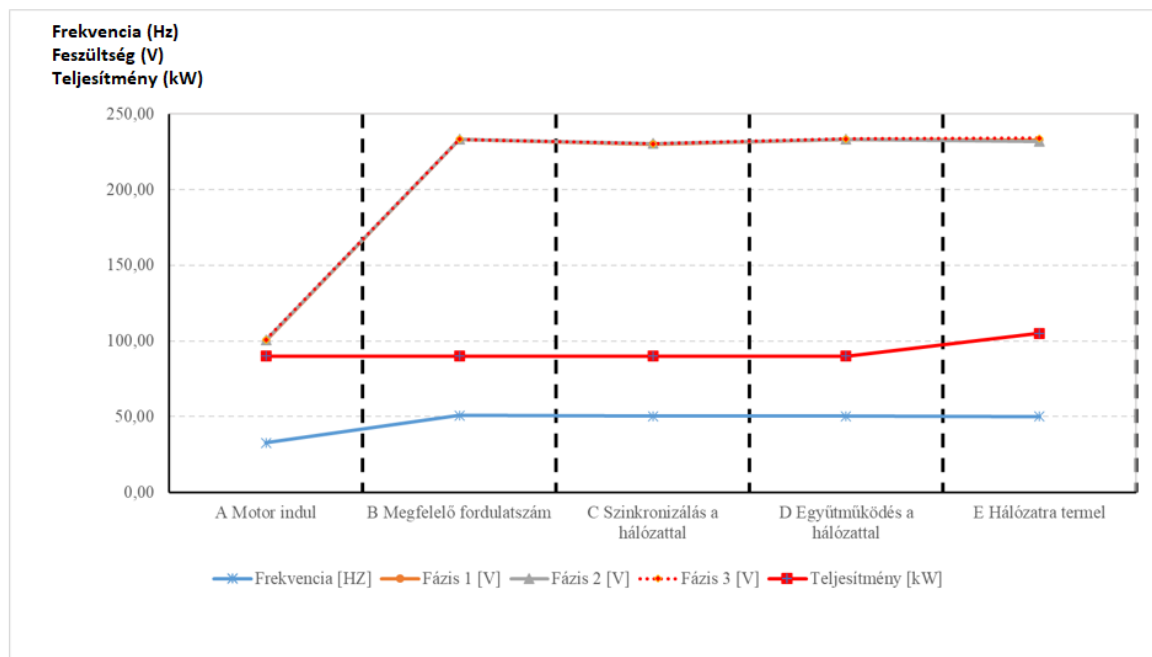


62. ábra A hálózat és a generátor jellemző együtt futása 200 s időtartamban - összekapcsolódás után (saját ábra)

A hálózati, valamint a generátor feszültségei között kismértékű eltérés előfordul (megengedett határértéken belül, MSZ EN 50 160 szabvány szerint), mivel a hálózati feszültség a terheléstől függően folyamatosan változik.

A generátor mind a frekvencia, mind pedig a hálózati feszültségek tartását megfelelően tudja teljesíteni. A mérési adatokból megállapítható, hogy az értékek szórása igen csekély, a gyakorlati működésben elfogadható mértékű, illetve megfelel a vonatkozó előírásoknak.

A hálózati csatlakozás fázisai a 63. ábrán láthatók.



63. ábra A hálózatra csatlakozás szakaszai (saját ábra)

<i>A</i>	<i>Gázmotor indul</i>
<i>B</i>	<i>Megfelelő fordulatszám elérése</i>
<i>C</i>	<i>Szinkronizálása hálózattal</i>
<i>D</i>	<i>Együtműködés a hálózattal</i>
<i>E</i>	<i>Hálózatra termel</i>

4.2.7. A keletkezett hőenergia és a hulladékhő felhasználása

A különféle részegységekben a beépített hőcserélők által biztosított- többek közt gázhűtő, illetve a motor-, és kipufogógáz hűtéséből visszanyert - hőmennyiséget (kb. 300-370 kW) a decentralizált CHP erőmű környezetében igen sokoldalúan fel lehet használni. Fűthetők vele épületek, előállítható melegvíz, terményszárítási célra hasznosítható, valamint a beérkező biomassza

előszárítása megvalósítható. A megvalósult felhasználási lehetőségek a 64. ábrán láthatók, illetve a fűtésrendszerbe szintén betáplálásra kerül a termelt hőenergia.



A

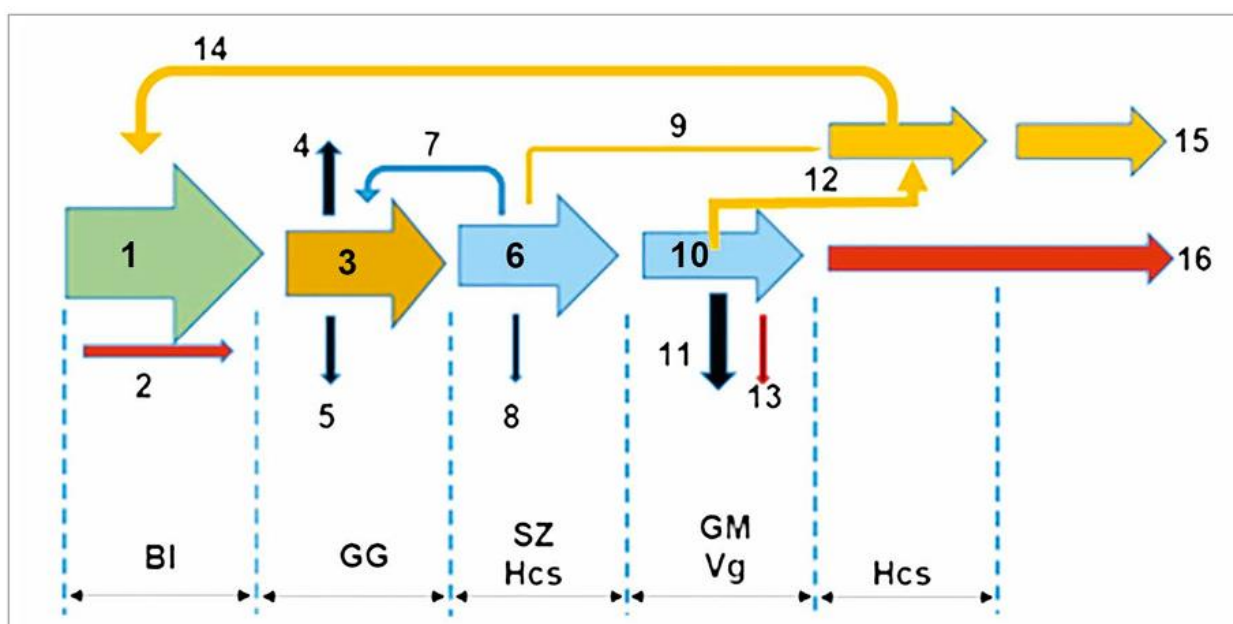


B

64. ábra Terményszárító berendezés fűtő termoventilátora (A), Biomassza előszárítása a pirolízis generátor előtt (B) – (saját ábrák)

4.2.8. A rendszer energetikai folyamatábrája a mérések szerint

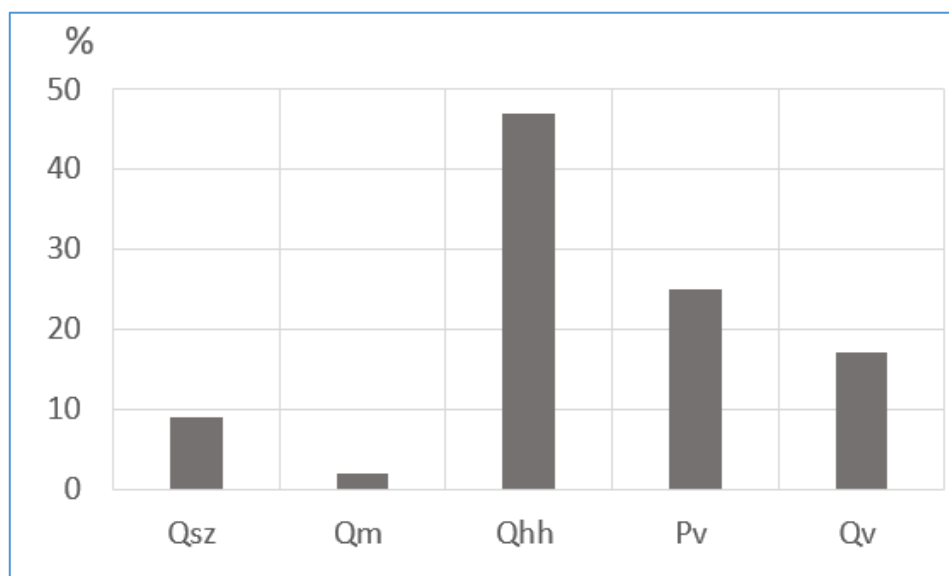
A rendszer energetikai folyamatábrája a 65. ábrán látható.



65. ábra A 100 kW villamos teljesítményű rendszer energetikai folyamatábrája (saját ábra)

BI – biológiai anyag betáplálása, GG – gázgenerátor, SZ és Hcs – porszűrő és hőcserélők, GM és Vg – gázmotor és villamos generátor, Hcs – hőcserélők, 1 – a tározóba bevezetett biomassa, 2 – a nyers biomassa aprításához és szárításához felhasznált villamos energia, 3 – pirolízisgenerátor, 4 – pirolízisgenerátor hővesztesége a környezet irányába, 5 – a generátorból kijövő maradék szén és hamu energiatartalma, 6 – gázsűrítő és a hozzá csatlakozó hőcserélő, 7 – a környezeti levegővel lehűtött gáz energiatartalma, visszavezetve a generátorba, 8 – a szűrőben leválasztott pernye energiatartalma, 9 – a szűrő utáni hőcserélőben (a gázhűtésből) nyert hőenergia hozzávezetése a hőcserélők utáni osztóhoz, 10 – a gázmotorral egybe épített villamos generátor, 11 – gázmotor hővesztesége a környezet irányába, 12 – a motor kipufogógázának hűtéséből nyert hőenergia hőcserélőhöz, 13 – a villamos generátor átalakítási energiavesztesége, 14 – a biomassa szárítására használt hőenergia, 15 – a hasznosítható hőenergia, 16 – csatlakozás a villamos hálózathoz

A biomassa alapú pirolízis CHP kiserőmű energetikai vizsgálata rávilágít arra, hogy a vegyes faaprítékkal működő rendszer – megfelelő műszaki tervezéssel és üzemeltetéssel – hatékonyan képes hő- és villamosenergia-termelésre. A rendszer teljesítményviszonyai az alábbi 66. ábrán láthatók.



66. ábra A CHP berendezés mért teljesítményei (saját ábra)

Jel	Teljesítmény megnevezése
Qsz	Tüzelőanyag szárító*
Qm	Hamuval távozó
Qhh	Hőhasznosítás (Szárítás, HMV, fűtés)
Pv	Villamos
Qv	Összes veszteség**
Eö	Teljesítmény

Megjegyzés: *számított érték, **Kalkulált érték

A decentralizált CHP pirolízis erőműben - a folyamat melléktermékeként - keletkező bioszén további értékes hasznosítási lehetőségeket kínál a mezőgazdaságban és a környezetvédelemben.

5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A laboratóriumi mérésekkel célt volt, a kiválasztott anyagokkal kapcsolatos alapvető viselkedési jellemzők meghatározása.

1. A különféle kezelési hőfokon végzett gázösszetétel méréseknél megállapítottam: magasabb hőmérsékleten növekszik gáz hidrogén tartalma, ami viszont csökkenti a szénmonoxidot és a metán tartalmat. A szén-dioxid tartalom ugyancsak csökkent. A fixágyas generátort prezentáló minta berendezésben a hőforráshoz közelebb álló (alsó) részekben nagyobb fűtési sebesség alakult ki, míg a távolabbi anyagrészekben mérsékeltebb volt. Az anyag lebomlása jól követte a (feltételezett elméleti) TGA jellegzetes lefutását, a középső intenzív szakaszt az alábbi lineáris függvény jellemzi.

Kisebb intenzitású lebontásnál, 400°C esetén: $y = -0,9x + 810,9$
 $R^2 \approx 0,9$

Nagyobb intenzitású lebontásnál, 600°C esetén: $y = -0,2466x + 696,16$
 $R^2 \approx 0,9$

Ahol (mindkét esetben): x – időtartam (s)
 y – a reaktortérben lévő anyag tömege (g)

2. A vizsgálatok rámutattak arra is, hogy a lebomlás következtében a kipárolgó anyag miatt a halmaz légáteresztő képessége csökken, amit az üzemi célra készített reaktornál figyelembe kell venni az oxigén beviteléhez szükséges szivattyú megválasztásánál.

A 600°C-os lebontásnál az anyag gyorsabban kipárolg, miközben intenzíven nő az átvezetéshez szükséges nyomás (növekszik az áramlási ellenállás), de az átalakulás megszűnése után a szemcsék közötti tér szabaddá válik és kisebb lesz a halmaz ellenállása. A lassabb lebontásnál (400 °C) a kipárolgás szinte a teljes folyamatban egyenletesen zajlik, és az ellenállás közel lineárisan növekszik.

A nyomás változása a lebontási intenzitás függvényében

600°C-on ellenállási csúcspont alakul ki, ahol az anyag összeroskad:

$$y = -1E-06x^2 + 0,0015x + 0,307$$
$$R^2 = 0,9061$$

400°C-on a kisebb intenzitású lebontásnál az ellenállás növekedése közel a folyamat végéig tart:

$$y = 0,0002x + 0,0075$$
$$R^2 = 0,9883$$

Ahol (mindkét esetben): x – lebontási idő (s)
 y – a nyomás változása (mbar)

A maradékanyag mennyisége (hamu és szén) a magasabb hőfokon végzett lebontásnál kevesebb, ami ugyancsak az anyag nagyobb mérvű gázzá alakulását jelenti.

3. Az inert gázos modell reaktor közép síkjában megvizsgáltam a bevezetett faapríték lebontásának terjedését, mely során megállapítottam, hogy a kirajzolódó geometriai kép kúp formájú, melynek kialakulását a magas hőmérsékletű acél fal is elősegíti. A keresztmetszeti kontúrját modellezve másodfokú függvényt kaptam, melynek lefutása nagymértékben függ a reaktor átmérő és a magasság viszonyától. A keresztmetszet kontúrára kapott függvény:

$$y = 2,7017x^2 - 28,614x + 83,227$$

$$R^2=0,9819$$

Ahol: x – a reaktor átmérője (mm)
 y – a reaktor magassága (mm)

4. A gázgenerátor hideg hatásfokát alapvetően a bevitt tüzelőanyag fűtőértéke, valamint a kapott generátorgáz fűtőértéke határozza meg. Ezen értékek viszont függenek a tüzelőanyag nedvesség tartalmától és a kapott gáz éghető anyagának összetételétől. A pirolízis folyamat szempontjából előnyösnek mondható, ha a tüzelőanyag nedvességtartalma alacsony (<25%), a gázosítás hőfoka magas (>850°C).

A gázgenerátor hideghatásfoka:

$$\eta_{HG} = \frac{H_{agáz} * q_{gáz}}{H_{atü} * q_{tü}} = \frac{5800 * 318}{18700 * 125} = 0,789 (\sim 79\%)$$

Ahol:

$H_{agáz}$: A generátorgáz fűtőértéke [kJ/Nm³]

$q_{gáz}$: A generátorgáz térfogatárama [Nm³/h]

$H_{atü}$: Az átlagosan vett tüzelőanyag fűtőértéke [kJ/kg]

$q_{tü}$: A tüzelőanyag tömegárama [kg/h]

5. A pirolízis generátorral épített CHP rendszer minőségét a hálózatra csatlakoztatás jósága határozza meg. Ahhoz, hogy a rendszerrel előállított villamos energia közvetlen a villamos hálózatra csatlakoztatható legyen, meg kell feleljen a hálózat alapvető paramétereinek, illetve a vonatkozó MSZ EN 50160 szabvány előírásainak. A rendszer vezérlő egységének a villamos hálózatot figyelnie kell és a csatlakozást csak akkor lehet létrehozni, amennyiben teljes paraméter egyezőség van. A folyamatos üzemhez szükséges a szikragyújtású motor és villamos generátor együttműködésén túl a gázgenerátor okszerű szabályozása is. A legalapvetőbb mutató, a motor fordulatszáma meghatározza a közvetlen csatlakozó villamos generátor fordulatszámát, s ezáltal a villamos energia frekvenciáját. Az első és legfontosabb lépés a hálózat megfelelő értékeinek elérése (beállítása) és a csatlakozás elvégzése. Ezt követően már a hálózat folyamatos figyelésével a generátort a hálózati értékekhez kell szabályozni. Mivel a rendszer lokálisan telepített transzformátor állomásra működik, a paraméterei jelentős mértékben függenek az adott pillanatokban a hálózat terhelésétől, valamint a terhelés jellegétől (változhat az egyes fázisok feszültsége és a teljes rendszer terhelés függő frekvenciája is). Tehát a csatlakozási rendszernek hálózat követőnek kell lenni, ellenkező esetben a csatlakozás és a folyamatos energiaátvitel megghiúsulhat. A CHP kiserőmű validációja során annak megfelelő működését az alábbi összefüggésekkel igazolom.

Hálózati frekvencia (Hz)

$$y = 0,002x + 50,01$$

$$R^2 = 0,3529$$

Generátor frekvencia (Hz)

$$y = 0,0012x + 50,007$$

$$R^2 = 0,1701$$

Ahol (mindkét esetben):

y – a frekvencia (Hz)

x – a mérési időtartam (s), 0-40 tartományban

A hálózat fázisfeszültségei átlagolva (V)

$$y = 0,0218x + 238,61$$

$$R^2 = 0,291$$

A generátor fázisfeszültségei átlagolva (V)

$$y = 0,027x + 241,03$$

$$R^2 = 0,344$$

Ahol (mindkét esetben):

y – a feszültség (V)

x – a mérési időtartam (s), 0-40 tartományban

E 40 s-os mérés szakaszában a generátor fordulatszám $1500\text{-}1502 \text{ min}^{-1}$ tartományban váltakozott, mely megfelelőnek tekinthető.

6. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A laboratóriumi mérések alapján és a nemzetközi irodalom dokumentumai szerint szinte az összes biomassza anyag alkalmas pirolízis technika alkalmazásával energia előállítása, illetve bioszén termelésre. Alapvető kritérium, hogy az anyagok nedvesség tartalma legfeljebb 25%-os legyen. A laboratóriumi vizsgálatoknál alkalmazott gravitációs rendszerű modell berendezéseknél is alapvető követelménynek bizonyultak az anyagok jellemzői, pl. a szemcsék mérete, nedvességtartalom. Az aprózottság jelentőségét a félüzemi kísérleti berendezés is igazolta, ha az anyag nem felelt meg az ÖNORM szabványnak, akkor zavarmentesen a berendezés nem volt képes működni. Az anyagok közvetlen felhasználásra még megfelelő nedvesség tartalom esetén sem alkalmasak, ha az aprítás jellegéből fakadóan hosszú származványok akadályozzák az egyenletes áramlást a reaktortérben.

Energetikai célú pirolízist magas véghőmérsékleten ($>850^{\circ}\text{C}$) célszerű végezni, amelynek hatására a gáz energiatartalma növekszik, valamint a koromtartalom csökken. Az ilyen, függőleges elrendezésű gravitációval működő reaktoroknál a lebontási zónákat (átmeneteket nem számítva) ismerni kell, mivel ezek alapján határozható meg a reakcióhoz szükséges oxigén bevitel és a pirolizálendő anyag megfelelő tömegárama. Ezen tényezők határozzák meg leginkább a keletkező gáz energiatartalmát, de a bevitt energiatartalomra vonatkozó végső hatásfokot is.

Ahhoz, hogy az előállított gázzal szikragyújtású belsőégésű motor üzemelhessen, s annak fordulatszámát állandóra lehessen beállítani, nagy tisztaságú, kormot és egyéb szilárd részecskéket minimálisan tartalmazó generátorgáz előállításra van szükség, hogy a közvetlen hajtású generátor állandóan a megfelelő szinkron fordulaton tudjon működni. A gázmotor vezérlőegységétől illetve a turbófeltöltőtől kapott visszajelzés szolgáltatja a szükséges paraméter módosításokat a gázgenerátornál, az oxigén bevitelt és a pirolizálendő anyagáramot is. A keletkező gáz számottevő mennyiségben tartalmaz szilárd szennyeződések (porszerű anyagokat), ezért a gázmotorba történő bevitel előtt feltétlen szűrni kell (porleválasztó alkalmazásával). A kísérleteknél kipróbált megoldások közül leginkább megfelelőnek a kerámiaszűrő bizonyult, amelynél (üzem közben is) időszakos tisztítást lehet végezni ellenirányú áramoltatással.

Mindezek figyelembevételével elérhető a megfelelő szinkron fordulatszám és a rendszer a közüzemi villamos hálózathoz csatlakoztatható. Az automatikus biztonság eléréséhez három szabályozási zóna került kialakításra:

- a gázgenerátor hatékony működéséhez,
- a szikragyújtású motor megfelelő fordulatszámának biztosításához, és
- a generátor által termelt villamos energia illesztéséhez a közüzemi hálózathoz.

A kutatócsoportunk által fejlesztett és az általam validált üzemi méretű rendszerben a három szabályozási zóna lehetővé tette a biztonságos hálózati csatlakozást. Ezzel a rendszer alapvetően

teljesítette a kitűzött célokat, így a CHP rendszer képes önálló működésre, megfelelő anyagellátás esetén közvetlen felügyeletet sem igényel.

A rendszerrel elérhető energetikai hatások villamos energia tekintetében ~27%, Ha a hőenergia felhasználása is megtörténik, összességében 68-77% érhető el. A keletkező hőenergia felhasználásánál prioritást élvez a betáplálendő biomassza nedvességtartalmának megfelelő szinten tartása. Ezért szükséges, hogy az előtároló rendszerek termoventilátorokkal legyenek ellátva. Amennyiben szárításra nincs szükség, a hőenergia felhasználható egyéb termények szárítására, illetve téli időszakban kommunális célokra. A pirolízis maradéka (3-4%) főként hamut és bioszenet tartalmaz. Amennyiben a bemenő anyag nehézfémeket nem tartalmaz, e maradék mezőgazdasági célokra felhasználható. A benne lévő bioszén az úgynevezett „kemény bioszenet” képvisel, amelynek nagy a belső felülete és ezáltal az adszorpciós képessége, s a talajban évtizedekig nem bomlik le.

A hagyományos kazánégetéses, gőzturbinás CHP rendszerekhez viszonyítva a megvalósított 100 kWe rendszernek kedvezőbb a hatásfoka és kisebb a környezetre gyakorolt negatív hatása.

A laboratóriumi méréseim és az üzemszerűen működő berendezés validációjának eredményei bizonyították, hogy hulladék biomasszából, így pl. vegyes faaprékból magas hatásfokkal villamos- és hőenergia állítható elő.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásom fő célja a decentralizált környezetben bőségesen rendelkezésre álló biomasszák energetikai hasznosítása, valamint 100 kW ($120\text{kW}_{\text{max}}$) villamos teljesítményű CHP (kombinált hő -és villamosenergia) pirolízis erőmű megvalósításában való részvétel, valamint annak üzemi validációja volt.

Munkám során leginkább a puha- és keményfa aprítékok mellett a vágástéri nyesedék energetikai célú felhasználhatóságával foglalkoztam, és célom volt, hogy minél magasabb hatásfok legyen elérhető mind a termokonverziós folyamatban, mind pedig a villamosenergia előállításnál.

A vonatkozó hazai és nemzetközi szakirodalmi források alapján megállapítást nyert az a tény, hogy a biomassza pirolízis egy nagyon összetett folyamat, melynek tervezéshez kiemelkedően fontos a részfolyamatokra kiterjedő szabályozhatóság.

Jelentősen befolyásolja a pirolízis reakciót az anyagok beltartalmi összetétele, energiatartalma, nedvességtartalma, valamint az aprózottság mértéke. Lényeges tényezők még a reaktor típus és kezelési hőmérséklet, melyek függvényében specifikusan valamilyen végterméket kapunk. (pl. bioolaj, szintézisgáz vagy bioszén, illetve ezek kombinációja).

Laboratóriumi vizsgálatokat végeztem különféle biomassza anyagok esetén, ahol meghatároztam azok energiatartalmát és beltartalmi jellemzőit.

A nemzetközi gyakorlatban megismert eljárások közül decentralizált kisüzemi berendezésnek leginkább a nyugvóágyas (fix-ágyas) gravitációs rendszerű ún. függőleges lefelé áramoltatású eljárást találtam megfelelőnek. A labor kísérletek azt mutatták, hogy a magasabb hőmérsékleten végzett lebontás előnyösebb, amelynél a termékágnak nagyobb az energiatartalma és kedvezőbb a lebontás mértéke.

Megvizsgáltam a lebontásra jellemző paramétereket különféle hőmérsékleti tartományokban és megállapítottam, hogy a legalább 850 °C-ot elérő rendszer adhat megfelelő eredményeket.

Kutatócsoport tagjaként K+F projekt keretében létrehozott 100 kW villamos teljesítményre tervezett rendszer beüzemelése során validáltam a laboratóriumi méréseim során kimutatott eredményeket.

A berendezés elsősorban hulladékként keletkező vegyes faaprítékra és a vágástéren keletkező nyesedékanyagokra lett tervezve. Az első kísérletek bizonyították, hogy a mulcsolt fahulladékok a méret szóródás alapján nem felelnek meg, csak akkor alkalmazhatók, ha további utóaprítás történik. Előszárítás megvalósítása a lebontás hatékonysága miatt szükséges, melyhez a rendszer keletkezett hulladékhőjéből visszanyert energiája kiválóan felhasználható.

A teljes CHP rendszer vezérlése és felügyelete PLC egységek által valósul meg. A függőleges elrendezésű gázgenerátorba az anyag betáplálása zsilipeken keresztül történik, és ugyancsak zsilipeléssel távozik a maradékanyag (szén- és hamu). A reaktorban keletkező termékgáz szűrés és hűtés után kerül a gázmotorba, amivel a direkt módon összekapcsolt villamos generátor közvetlenül csatlakoztatható a közüzemi hálózathoz.

A laboratóriumi és az üzemi mérések alapján meghatároztam a rendszer energetikai jellemzőit. Megállapítás nyert továbbá, hogy az égetéses biomassa CHP rendszerekhez viszonyítva a pirolízis eljárással gazdaságosabb és hatékonyabb decentralizált rendszer valósítható meg, mely a körforgásos gazdasági modellbe illeszthető.

A berendezés jelenleg is üzemszerűen működik, tehát a kitűzött cél megvalósult.

8. SUMMARY

The main goal of my research was the energetic utilization of abundant biomasses available in decentralized environments, and participation in the implementation of a CHP (combined heat and power) pyrolysis power plant with an electrical output of 100 kW (120kW_{max}).

In the course of my work, in addition to softwood and hardwood chips, I mostly dealt with the use of cuttings for energetic purposes, and my goal was to achieve the highest possible efficiency both in the thermoconversion process and in the generation of electricity.

Based on the relevant domestic and international literature sources, it has been established that biomass pyrolysis is a very complex process, for the design of which controllability covering sub-processes is of paramount importance.

The pyrolysis reaction is also significantly influenced by the composition, energy content, moisture content and degree of comminution of the materials. The reactor type and treatment temperature are also important factors, depending on which specific end products are obtained (e.g. bio-oil, synthesis gas or biochar, or a combination of these). I carried out laboratory tests on various biomass materials, where I determined their energy content and internal characteristics.

Among the processes known in international practice, I found the so-called vertical downflow process with a fixed-bed gravity system to be the most suitable for decentralized small-scale equipment. Laboratory experiments showed that decomposition at higher temperatures is more advantageous, at which the product gas has a higher energy content and a more favorable degree of decomposition.

I examined the parameters characteristic of the decomposition in various temperature ranges and found that a system reaching at least 850 °C can provide adequate results.

As a member of a research group, I validated the results of laboratory measurements during the commissioning of a system designed for 100 kW electrical power created within the framework of an R&D project.

The equipment was intended to primarily utilize shredded wood waste. Initial experiments proved that mulched wood waste is not suitable due to its size distribution and can only be used if further shredding is performed. Pre-drying is necessary for the efficiency of the decomposition, for which the energy recovered from the waste heat generated by the system can be used in an excellent way.

The entire CHP system is controlled and monitored by PLC units. The material is fed into the vertical gas generator through sluices, and the residual material (coal and ash) is also discharged through sluices. The product gas generated in the reactor is filtered and cooled before being fed into the gas engine, which allows the directly coupled electric generator to be directly connected to the utility grid.

Based on my laboratory and operational measurements, the energetic characteristics of the system were determined. It was also found that compared to combustion biomass CHP systems, the pyrolysis process can be used to implement a more economical and efficient decentralized system.

The equipment is currently operating successfully, so the set goal has been achieved.

9. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

- [X1] Aboelela, D.; Saleh, H.; Attia, A.M.; Elhenawy, Y.; Majozi, T.; Bassyouni, M. (2023) Recent advances in biomass pyrolysis processes for bioenergy production: Optimization of operating conditions. *Sustainability* 2023, 15, 1238.
- [X2] Babinszki, B.; Sebestyén, Z.; Jakab, E.; Köhalmi, L.; Bozi, J.; Várhegyi, G.; Wang, L.; Skreiberg, Ø.; Czégény, Z. (2021) Effect of slow pyrolysis conditions on biocarbon yield and properties: Characterization of the volatiles. *Bioresour. Technol.* 2021, 338, 125567.
- [X3] Beke J. (2000): Műszaki hőtan mérnököknek, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, pp 452-280.
- [X4] Boer, F.D.; Pignolet, L.; Valette, J.; Candelier, K.; Commandré, J.M.; Fournier, M.; Thévenon, M.F. (2024) Efficacy of slow pyrolysis liquid from sugarcane bagasse for wood protection and its leaching properties. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 2024, 82, 1665–1683.
- [X5] Bosmans A, Wasan S, Helsen L. (2013) Waste-to-clean syngas: avoiding tar problems. 2nd International Enhanced Landfill Mining Symposium. 2013:181-201.
- [X6] Brahma, S.; Nath, B.; Basumatary, B.; Das, B.; Saikia, P.; Patir, K.; Basumatar, S. (2022) Biodiesel production from mixed oils: A sustainable approach towards industrial biofuel production. *Chem. Eng. J. Adv.* 2022, 10, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100284>
- [X7] Bridgwater AV. (2009) Biomass pyrolysis. In: Thermal Biomass Conversion. Bridgwater AV, Hofbauer H, van Loo S (Eds). CPL Press, Berkshire, UK 37–78, 423–429
- [X8] Chen W-H, Lin B-J, Huang M-Y. (2015) Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: a review. *Bioresour Technol* 2015,184 27-314. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.11.050>.
- [X9] Cheng Y, Thow Z., Chi-Hwa Wang, (2016) Biomass gasification with CO₂ in a fluidized bed; Powder Technology, Volume 296, pp 87-101, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.12.041>.
- [X10] Conesa, J.; Marcilla, A.; Moral, R.; Moreno-Caselles, J.; Perez-Espinosa, A (1998). Evolution of gases in the primary pyrolysis of different sewage sludges. *Thermochim. Acta* 1998, 313, 63–73.
- [X11] Di Blasi, C. (1993) Modeling and Simulation of Combustion Processes of Charring and Non-Charring Solid Fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 19, 71-104. [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90022-7)
- [X12] Gøbel B, Henriksen U, Ahrenfeldt J, Jensen T, Hindsgaul C, Bentzen J, Sørensen L (2004): Status - 2000 Hours of Operation with the Viking Gasifier, 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Rom.
- [X13] Henriksen U (2001) : Development of a two-stage gasifier at DTU- Gasification with low tarcontent.
- [X14] Henriksen U, Ahrenfeldt J, Kvist Jensen T, Gøbel B, Bentzen JD, Hindsgaul C, Sørensen LH (2003) : The Design, Construction and Operation of a 75 kW TwoStage Gasifier.

- [X15] Joseph S., P. Taylor, A. Cowie (2017): Basic principles and practice of biochar production and kiln design., <https://biochar.international/guides/basic-principles-of-biochar%20production/> letöltve: 2025. 03. 10.
- [X16] Koido, K., & Iwasaki, T. (2018). Biomass Gasification: A Review of Its Technology, Gas Cleaning Applications, and Total System Life Cycle Analysis. InTech. doi: 10.5772/intechopen.70727
- [X17] Lehmann, J., Joseph, S.. (2009). Biochar for environmental management: An introduction. Biochar for environmental management. Science and technology. Earthscan Publishers Ltd. DOI: 10.4324/9781003297673-1
- [X18] Lettner F., Timmerer H., Haselbacher P. (2007): Guideline for safe and eco-friendly biomass gasification; Graz University of Technology - Institute of Thermal Engineering Inffeldgasse 25B, 8010 Graz Austria
- [X19] Luis G.G. Pereira, Hero J. Heeres, Sirlene B. Lima, Carlos A.M. Pires, (2022) Development of process-product relations for the pyrolysis of sisal residue, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2022, 165, 105583, <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105583>.
- [X20] Madár V., Schrempf N. Betovics A., Tóth L. (2023): Biomassza hőbontása, bioszén jelentősége, Mezőgazdasági Technika, 2023, Április, pp 12-15
- [X21] Madár V., Tóth L., Madár Gy., Schrempf N.: (2014), Kísérleti fagázgenerátor Mezőgazdasági Technika, ISSN 0026 1890. 55. évf. Nr.4. pp. 2-5
- [X22] Malav LC, Yadav KK, Gupta N, Kumar S, Sharma GK, KrishnanS, (2020).A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities. J Clean Prod. 2020;277:123227. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123227
- [X23] Mensah, P., & Yankson, E. (2025). Biomass energy as a catalyst for achieving global sustainability goals: technological advancements and policy implications. Academia Green Energy, 2(1). <https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7556>
- [X24] Mishra, R.K.; Mohanty, K. (2023) A review of the next-generation biochar production from waste biomass for material applications. *Sci. Total Environ.* 2023, 904., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167171>
- [X25] Molino A., Iovanea P., Donatellia A., Braccioa G., Chianeseb S., Musmarra D. (2013) Steam Gasification of Refuse-Derived Fuel in a Rotary Kiln Pilot Plant: Experimental Tests, Chemical Engineering Transactions 32. 337-342. DOI: 10.3303/CET2332057
- [X26] Mong, G.R.; Chong, C.T.; Chong, W.W.; Ng, J.H.; Ong, H.C.; Ashokkumar, V.; Tran, M.V.; Karmakar, S.; Goh, B.H.; Yasin, M.F. (2022) Progress and challenges in sustainable pyrolysis technology: Reactors, feedstocks and products. *Fuel* 2022, 324, 124777.
- [X27] Mubarak, N.; Kundu, A.; Sahu, J.; Abdullah, E.; Jayakumar, N. (2014) Synthesis of palm oil empty fruit bunch magnetic pyrolytic char impregnating with FeCl₃ by microwave heating technique. *Biomass Bioenergy* 2014, 61, 265–275.

- [X28] Nanda, S.; Dalai, A.K.; Berruti, F.; Kozinski, J.A. (2016) Biochar as an exceptional bioresource for energy, agronomy, carbon sequestration, activated carbon and specialty materials. *Waste Biomass Valorization* 2016, 7, 201–235.
- [X29] Nguyen, V. N., Nayak, S. K., Le, H. S., Kowalski, J., Deepanraj, B., Duong, X. Q., Truong, T. H., Tran, V. D., Cao, D. N., Nguyen, P. Q. P. (2024). Performance and emission characteristics of diesel engines running on gaseous fuels in dual-fuel mode. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49, 868–909. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.130>
- [X30] Patwardhan, P.R.; Dalluge, D.L.; Shanks, B.H.; Brown, R.C. (2011), Distinguishing primary and secondary reactions of cellulose pyrolysis. *Bioresour. Technol.* 2011, 102, 5265–5269.
- [X31] Prabir Basu (2018): Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Third Edition); Academic Press, pp 49-91, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00003-0>.
- [X32] Prins MJ, Ptasiński KJ, Janssen FJJG. (2006) More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy* 31, 3458–3470.
- [X33] Rangel, M. d. C., Mayer, F. M., Carvalho, M. d. S., Saboia, G., & de Andrade, A. M. (2023). Selecting Catalysts for Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Biomass*, 3(1), 31-63. <https://doi.org/10.3390/biomass3010003>
- [X34] Ranzi E., Debiagi P. E. A., Frassoldati A. (2017) Mathematical Modeling of Fast Biomass Pyrolysis and Bio-Oil Formation. Note I: Kinetic Mechanism of Biomass Pyrolysis. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2017, 5, 2867–2881. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b03096>
- [X35] Rapagna S. et al. (2000) Steam-gasification of biomass in a fluidised-bed of olivine particles, *Biomass and Bioenergy* 19. pp. 187–197.
- [X36] Raza, M., Inayat, A., Ahmed, A., Jamil, F., Ghenai, C., Naqvi, S. R., Shanableh, A., Ayoub, M., Waris, A., & Park, Y.-K. (2021). Progress of the Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies for Biomass Pyrolysis Processing. *Sustainability*, 13(19), 11061. <https://doi.org/10.3390/su131911061>
- [X37] Ruiz, J.A.; Juárez, M.C.; Morales, M.P.; Muñoz, P.; Mendiivil, M.A. (2013) Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 18, 174–183.
- [X38] Sansaniwal, S.K.; Rosen, M.A.; Tyagi, S.K. (2017) Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 80, 23–43.
- [X39] Sebestyén Z. (2014): Biomassza anyagok jellemzése termikus analízis és analitikai pirolízis alkalmazásával – Doktori dolgozat (BME)
- [X40] Sharma, Abhishek, Pareek, Vishnu, Zhang, Dongke. (2015). Biomass Pyrolysis- A Review of Modelling, Process Parameters and Catalytic Studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 50. 1081-1096. [10.1016/j.rser.2015.04.193](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.193).
- [X41] Shi, H., Si, W., & Li, X. (2016). The Concept, Design and Performance of a Novel Rotary Kiln Type Air-Staged Biomass Gasifier. *Energies*, 9(2), 67. <https://doi.org/10.3390/en9020067>
- [X42] Talwar, P., Agudelo, M. A., & Nanda, S. (2025). Pyrolysis Process, Reactors, Products, and Applications: A Review. *Energies*, 18(11), 2979. <https://doi.org/10.3390/en18112979>

- [X43] Tóth L. (2012): Alternatív energiaellátási rendszerek az agrárgazdaságban, Szaktudás Kiadó, Budapest, ISBN 978-615-5224-22-5. 320 p.
- [X44] Tóth L.; Madár V.; Bácskai I. (2019) Pirolízis berendezés fejlesztését megelőző vizsgálatok ENERGIAGAZDÁLKODÁS 60 : 1-2 pp. 27-33., 7 p.
- [X45] 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
- [X46] Tóvári P. et al. : (2013) Biomassza tüzelőanyagok termokémiai kezelésének laboratóriumi és félüzemi vizsgálata Mezőgazdasági Technika, 2013. február 2-5 pp.
- [X47] Tripathi, M.; Sahu, J.N.; Ganesan, P. (2016) Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 55, 467–481.
- [X48] Wang, J.; Ku, X.; Lin, J.; Yang, S. (2021) Impact of the reactor structure on biomass pyrolysis in fluidized-bed reactors: A course-grained CFD–DEM study. *Energy Fuels* 2021, 35, 10035–10050.
- [X49] Wild P. de, Reith H., Heeres E. (2011): Biomass pyrolysis for chemicals; *Biofuels* 2011 2(2), 185–208
- [X50] Weldekidan, H.; Strezov, V.; He, J.; Kumar, R.; Asumadu-Sarkodie, S.; Doyi, I.N.; Jahan, S.; Kan, T.; Town, G. (2019) Energy conversion efficiency of pyrolysis of chicken litter and rice husk biomass. *Energy Fuels* 2019, 33, 6509–6514.
- [X51] Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. and Zheng, C. (2007) Characteristics of Hemicellulose, Cellulose and Lignin Pyrolysis. *Fuel*, 86, 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- [X52] Yung Gao. et al. Two-Stage Dry Reforming Process for Biomass Gasification (2023): Product Characteristics and Energy Analysis *ENERGIES* MDPI, Basel, 2023, 16, 4783. <https://doi.org/10.3390/en16124783>
- [X53] Zapater, D.; Kulkarni, S.R.; Wery, F.; Cui, M.; Herguido, J.; Menendez, M.; Heynderickx, G.J.; Van Geem, K.M.; Gascon, J.; Castano, P. (2024) Multifunctional fluidized bed reactors for process intensification. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2024, 105, 101176. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101176>
- [X54] (<https://saf.org.ua/en/news/1825/>) - Bioenergy in 2023: Global Statistics report of the World Bioenergy Association (WBA) letöltve: 2025.03.16.

M2 : Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk

Dhaundiyal, A., **Betovics, A. M.**, Toth, L. (2025). Estimating a Non-Linear Economic Model for a Small-Scale Pyrolysis Unit. ENERGIES, 18(2),445. <http://doi.org/10.3390/en18020445> (Scopus: Q1, IF: 3,2)

Betovics, A., Madár, V., Tóth, L. (2024). Az éghajlatváltozás hatásainak mérséklése a mezőgazdaságban. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 65(6), 2–6.

Betovics, A., Madár, V., Schrempf, N., Tóth, L. (2024). Hő- és villamos energia előállítása biomasszából decentralizáltan pirolízis-technikával. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 65(3), 26–31.

Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2024). Bioszén-előállítás mezőgazdasági használati jelentősége. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 65(10), 2–7.

Madár, V., Schrempf, N., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). Biomassza hőbontása, bioszén jelentősége. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(4), 12–15.

Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). PRODUCTION AND PRODUCTION-INCREASING FACTORS OF BIOCHAR. HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING, (42), 14–25. <http://doi.org/10.17676/HAE.2023.42.14>

Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). A bioszén felhasználása, a használat előnyei. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(11), 34–37.

Tóth, L., **Betovics, A.**, Schrempf, N. (2023). A mezőgazdaság részesedése a hazai energiarendszerben (Energiamegtakarítási lehetőségek). MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(1), 18–20.

Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). A bioszén gyártása és terméshozam növelő tényezői. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(8), 2–7.

Tóth, L., **Betovics, A.** (2023). A közeli jövő meghatározó energiaforrásai és a villamos hálózatra gyakorolt hatás mérséklése: Szél- és napenergia-termelés előnyei és problémái. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(2), 16–20.

Tóth, L., **Betovics, A.** (2023). Szél- és napenergia, mint alapvető megújuló energiaforrások. ENERGIAGAZDÁLKODÁS, 64(1–2), 45–50.

Viktor, M., **András, B.**, Norbert, S., László, T. (2023). Thermal decomposition of biomass, significance of biochar. MACHINES TECHNOLOGIES MATERIALS, 17(7), 267–269.

Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). Bioszén és terméshozam növelő tényezői. AGRÁRIUM, 33(9–10), 14–17.

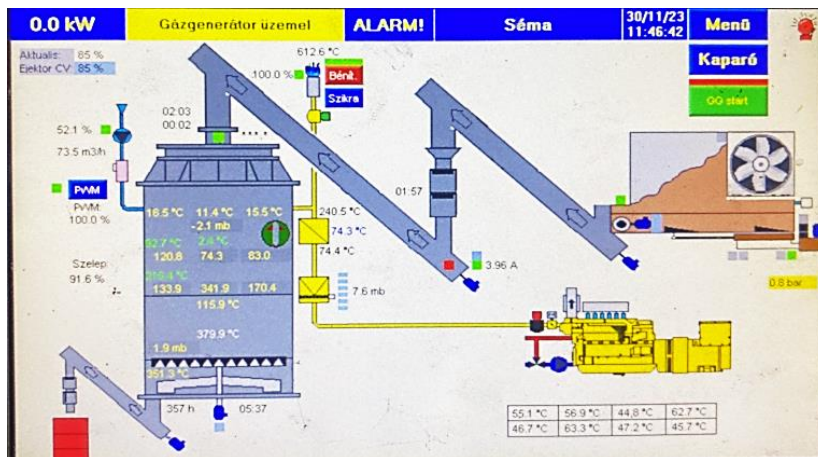
Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). A bioszén felhasználás, a használat előnyei. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 2023(11), 3–7.

Madar, V., Schrempf, N., **Betovics, A.**, Toth, L. (2022). Hidegenergia előállítása pirolízis generátor (CHP) hulladékhőjével. ENERGIAGAZDÁLKODÁS, 63(3), 2–8.

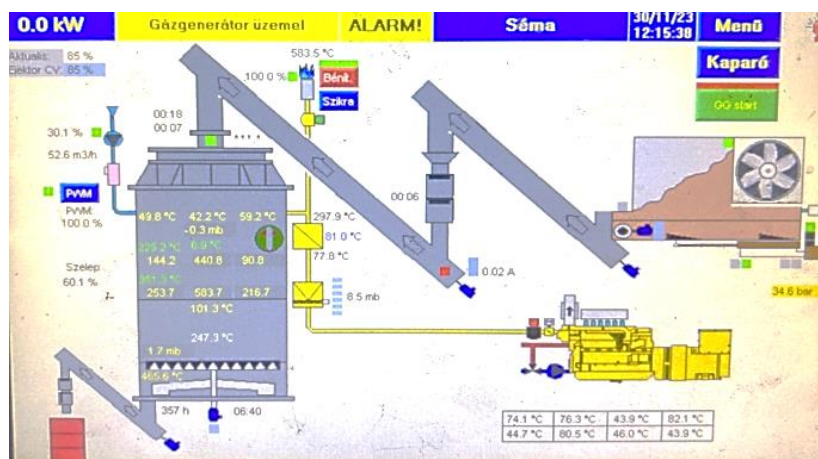
V., Madar, Schrempf N., **Betovics A.**, Toth L. (2021). GENERATING COLD ENERGY USING WASTE HEAT FROM A PYROLYSIS GENERATOR (CHP). HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING, (40), 78–90. <http://doi.org/10.17676/HAE.2021.40.78>

M3 : Üzemi berendezéshez kapcsolódó ábrák

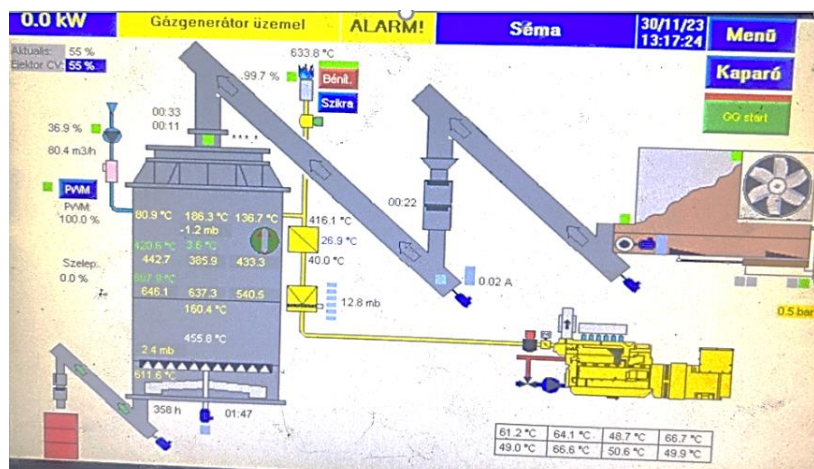
Gázgenerátor felfűtési ábrák (1-4. ábra)



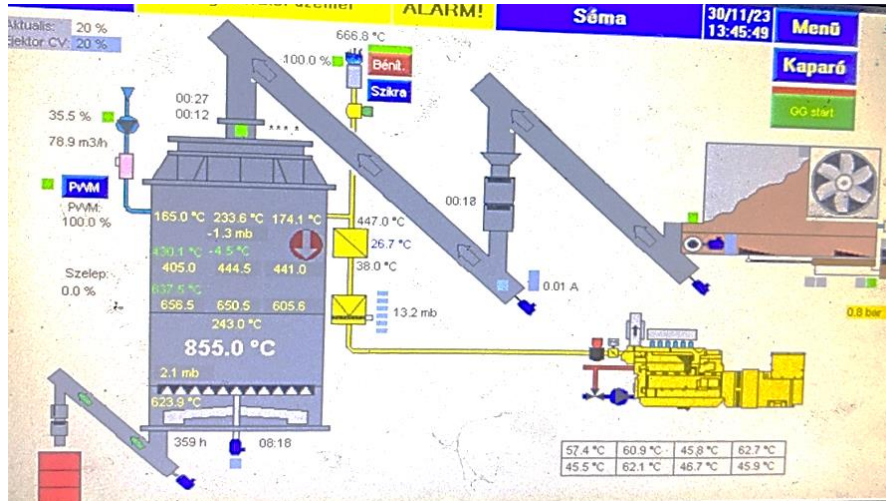
1. ábra: Gázgenerátor felfűtése – A (saját ábra)



2. ábra: Gázgenerátor felfűtése – B (saját ábra)



3. ábra: Gázgenerátor felfűtése – C (saját ábra)



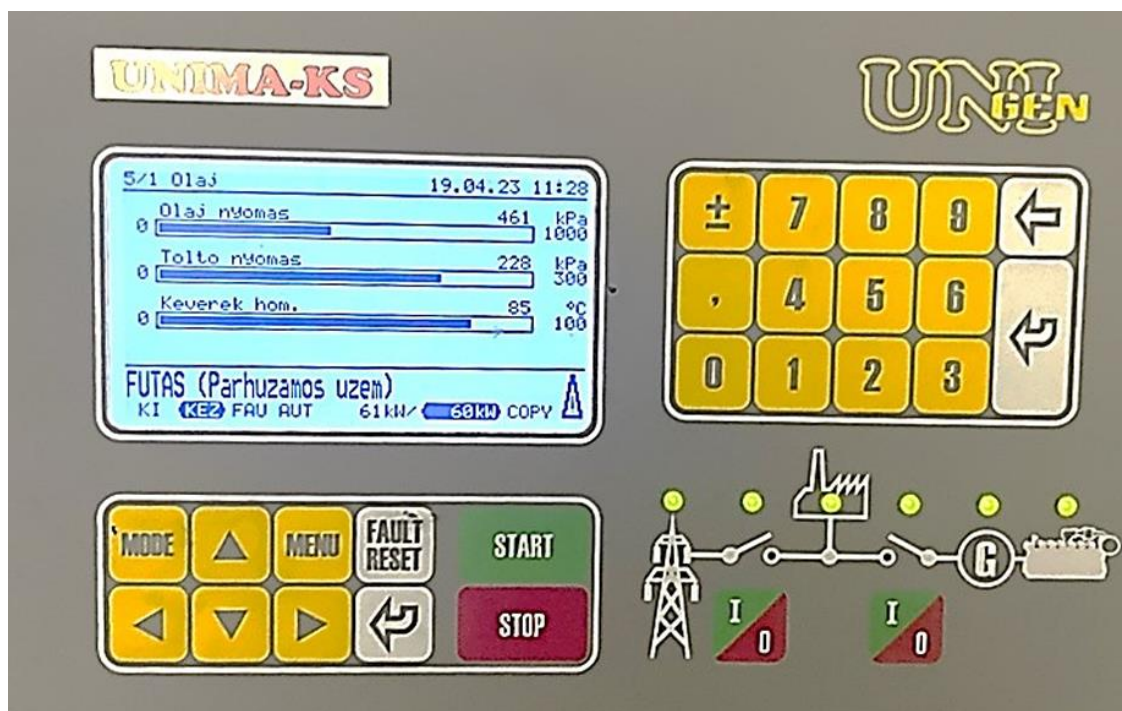
4. ábra: Gázgenerátor felfűtése – D (saját ábra)

Alapanyag az előtárolóban (5.ábra):



5. ábra Alapanyag az előtárolóban – vegyes faapríték (saját ábra)

Gázmotor-generátor vezérlő PLC képernyőképe (6.ábra):



6.ábra: Gázmotor-generátor vezérlő PLC kijelzője (saját ábra)

Tüzelőanyag beadagolást végző zsilipek (7.ábra):



7. ábra: Tüzelőanyag betöltő zsilipek (saját ábra)

Melléktermék kihordó csiga és tároló egység (8.ábra):



8.ábra: Melléktermék kihordó csiga és a tároló egység (saját ábra)