



DECENTRALIZÁLT CHP PIROLÍZIS ERŐMŰ ENERGETIKAI VISZONYAI

Doktori (PhD) értekezés tézisei

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

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK	4
1.1 A munka előzményei	4
1.2 Célkitűzések	5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	6
2.1. A mérések során felhasznált eszközök, berendezések	6
2.2. Mintaüzemi kísérleti berendezés	7
3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE	9
3.1. Szemcseméret hatása a tömegcsökkenésre, gázösszetétel változás	9
3.2. A TG görbék alakulása és nyomásváltozás a reaktorban	10
3.3. A hőmérséklet terjedésének geometriai alakulása és a kettősfalú rendszer	11
3.4. A rendszer csatlakozása a villamos hálózathoz	12
4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK	15
5. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	17
6. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI	19

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

1.1. A munka előzményei

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. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. A mérések során felhasznált eszközök, berendezések

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

Nedvességtartalom mérés

Égéshő meghatározása



1. ábra METTLER TOLEDO nedvességmérő, tömörítőprés, IKA-WERKE C2000 kaloriméter (MGI labor)

Elemi összetétel vizsgálat

Hamutartalom, hamuolvadáspont vizsgálat



2. ábra ELEMENTAR VARIO X elemi összetétel vizsgáló készülék, Nabertherm égetőkamra, HESSE 154 hevítőmikroszkóp (MGI labor)

Gázösszetétel vizsgálata



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

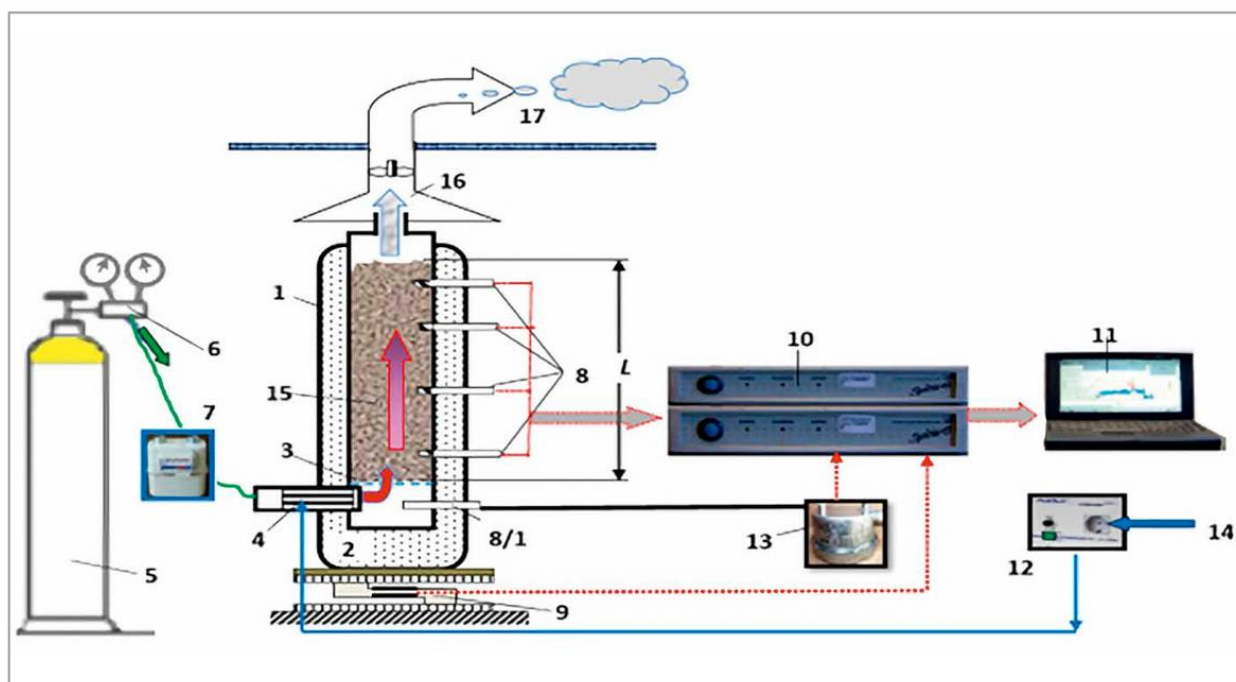
2.2. Mintaüzemi kísérleti berendezés

A kitűzött célok megvalósítása érdekében több különféle kísérletet végeztem laboratóriumi mintaegységeken. 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 (4. ábra) egységgel az égés előrehaladását, terjedési sebességét és a TGA analízis egyes szakaszait lehet elemezni.

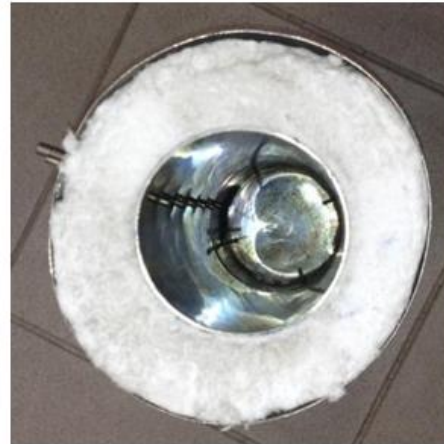
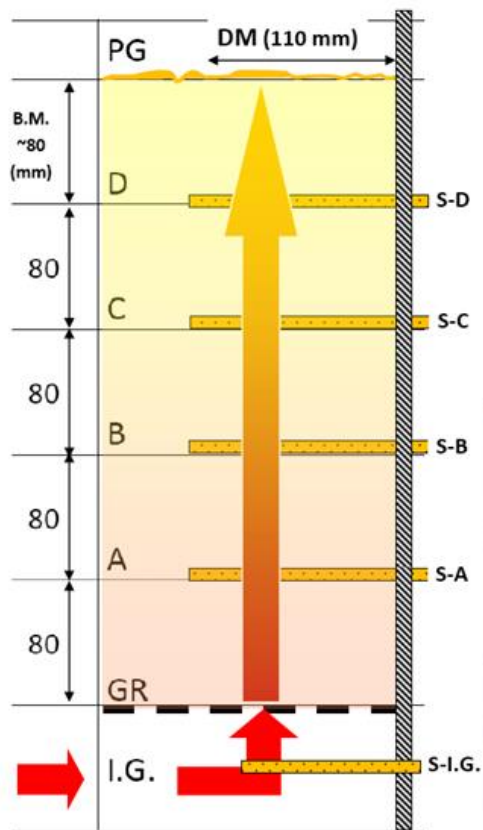
A villamos fűtésű (6. ábra) és teljesen zárt rendszernél a TGA mellett a fűtött levegő bevezetésének hatásait lehet elemezni. A levegő hatását a véggáz összetételére, a kátrány típusú vegyületek csökkenésére.

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 az 5. ábra szemlélteti.

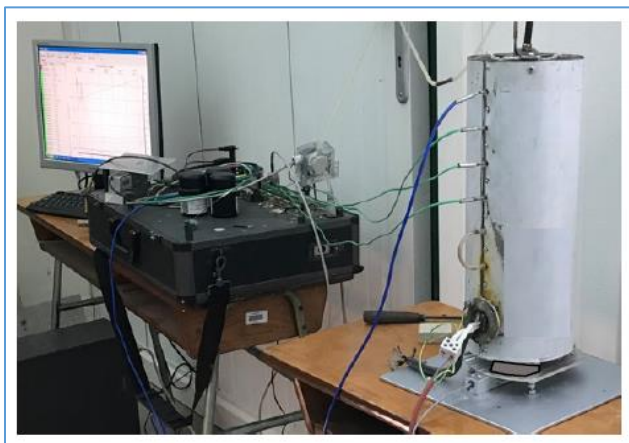


4. ábra Nitrogén gázfűtésű laborreaktor mérőkör (MATE labor)

1 – generátortest, 2 – szigetelés, 3 – anyag rács, 4 – fűtőtest, 5 – N gázpalack, 6 – gázszabályozó, 7 – gázmérő, 8 – hőmérséklet-érzékelők, 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



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



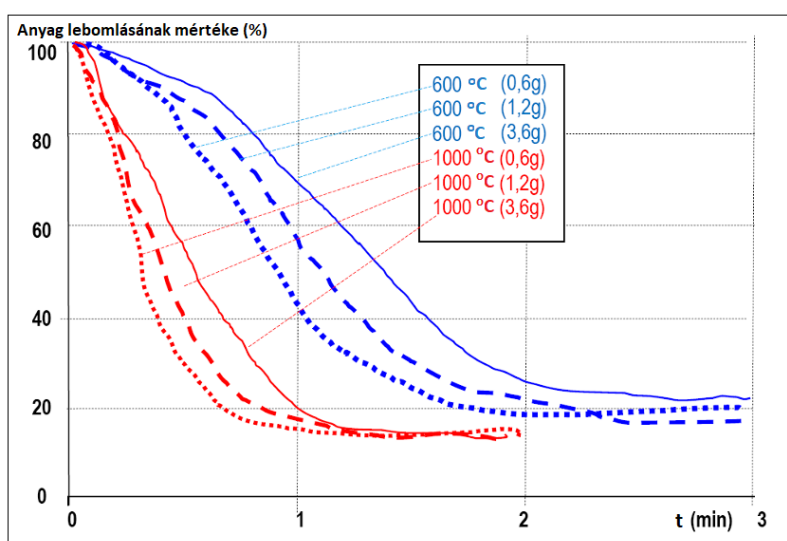
6. ábra Direkt módon elektromos fűtésű, légbevezetésre alkalmas laborreaktor, maximális működési hőmérséklet: 1300 °C (MATE labor)

3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

3.1. Szemcseméret hatása a tömegcsökkenésre, gázösszetétel változás

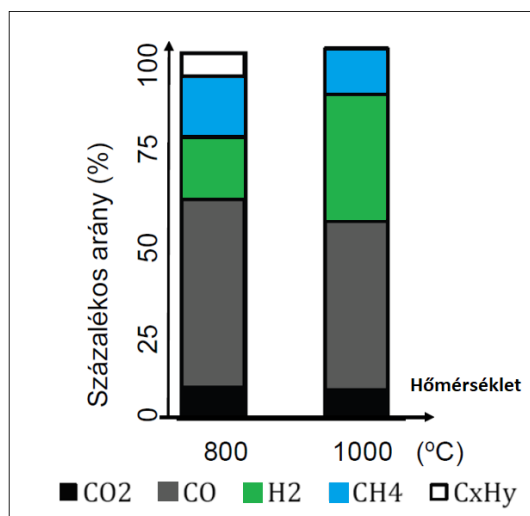
A pirolízis során a kiindulási anyag szemcsemérete jelentős hatással van a tömegcsökkenés ütemére és mértékére. Kisebb szemcseméret esetén nagyobb a fajlagos felület, ami gyorsabb hőátadást és egyenletesebb bomlást eredményez, így a termokonverziós folyamat gyorsabban és hatékonyabban megy végbe. Ezzel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

A 7. 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.



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

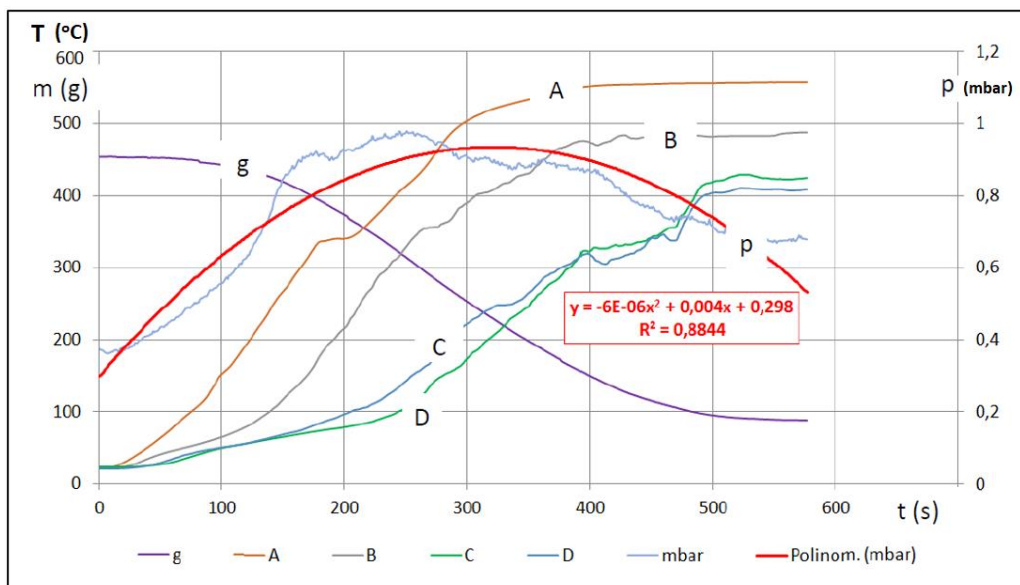
A 8. ábrán 800/1000 °C kezelési hőmérsékleten láthatók a kapott termék gáz összetevői.



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

3.2. A TG görbék alakulása és nyomásváltozás a reaktorban

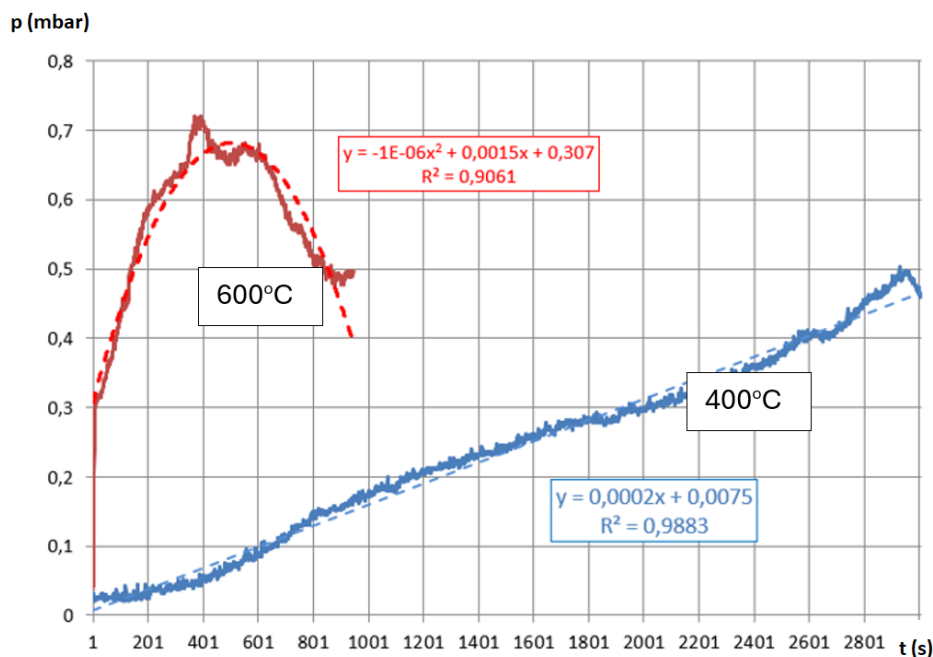
A 9. ábra a laboratóriumi modellreaktoron végzett vizsgálat eredményeit szemlélteti.



9. 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 10. 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.

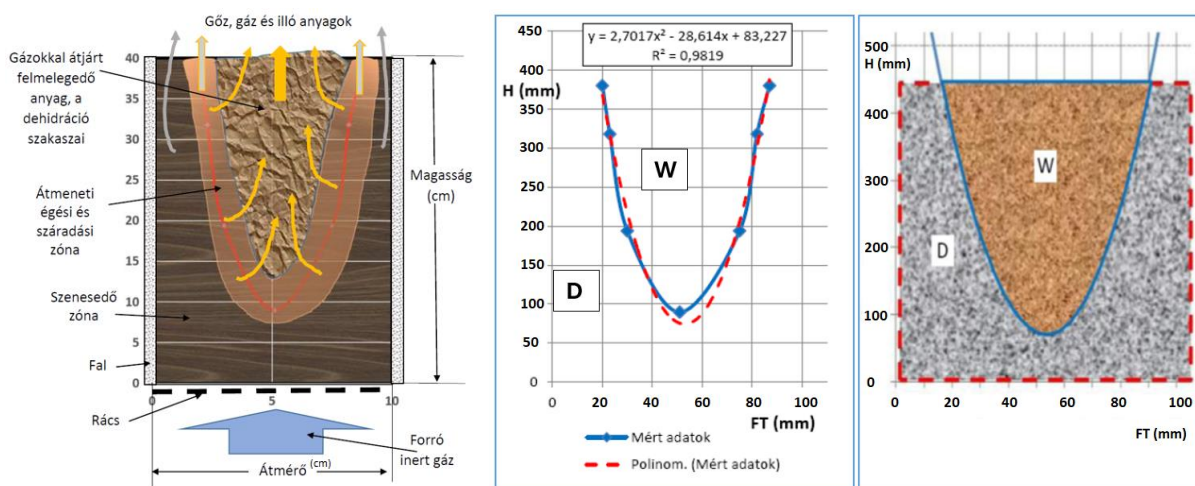


10. ábra A nyomás változása a lebontási intenzitás függvényében - G30 vegyes faapríték (MATE labor)

3.3. A hőmérséklet terjedésének geometriai alakulása és a kettősfalú rendszer

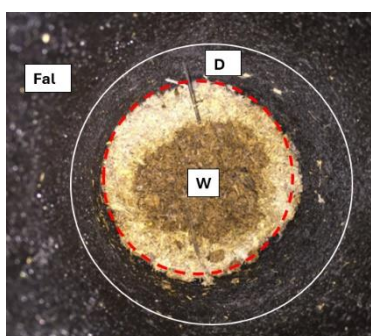
Az inert gázos laboratóriumi modell reaktor közép síkjában vizsgáltam a lebomlás alakulását (11. ábra). A mérést akkor végeztem, amikor az anyagoszlop második érzékelőjénél is meghaladta a hőmérséklet a 350°C-os értéket, tehát a pirolizáció megkezdődött, vagy már végbement. Ezt követően megmértem, hogy H magasságban az anyag a faltól mérve milyen távolságban kezdte meg az átalakulást.

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



11. ábra Hőmérséklet terjedésének geometriai alakulása (saját ábra)

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 (11. ábra) lefelé mutató parabolikus kúp-szerűen megy végbe. Felülnézeti kép a 12. ábrán látható. A laboratóriumi egységre a határoló felület keresztmetszeti kontúrja az alábbi függvény szerint alakult.



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

$$R^2 = 0,9819$$

Ahol: x – a reaktor átmérő (mm);

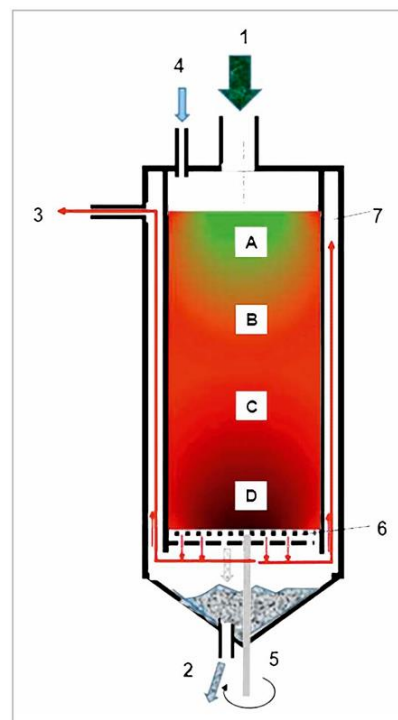
y – a reaktor magasság (mm)

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 – falközötti tér, A – száradás, B – pirolízis, C – égés, D – krakkolás, hűlés

12. ábra Felülnézeti kép

(saját ábra)

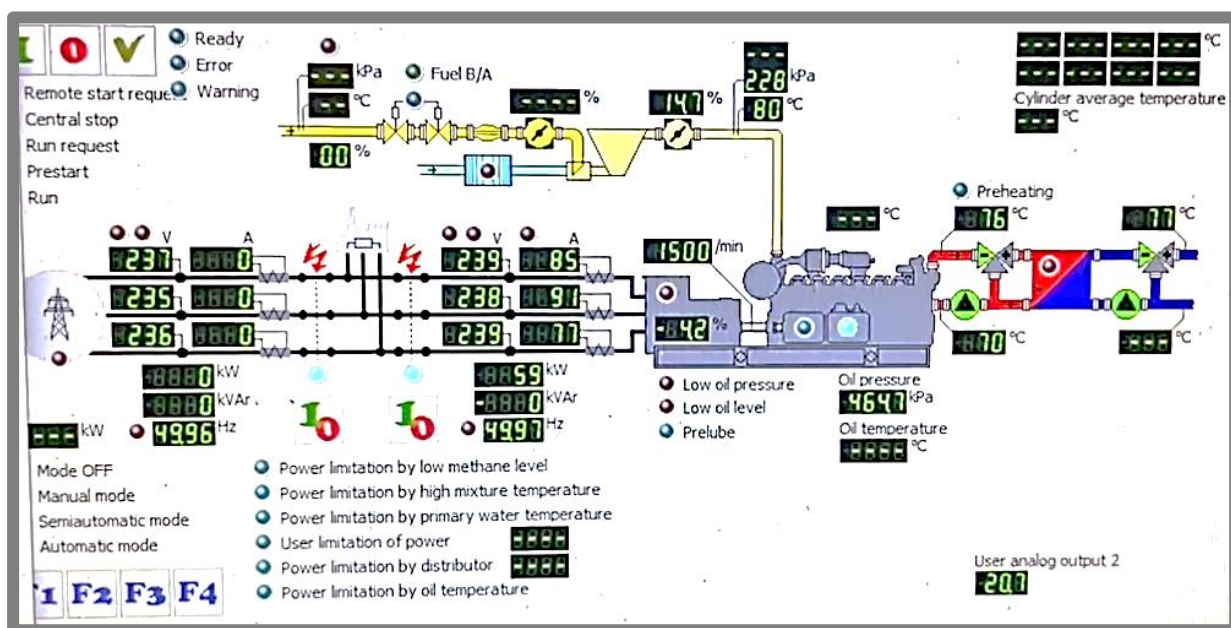
A 13. ábrán látható a reaktor végső kialakítását eredményező üzemi megoldás, ahol a reaktorból kiáramló gáz a kettős köpenynek köszönhetően fűti a reaktor falát.



13. ábra A kettősfalú rendszer

3.4. A rendszer csatlakozása a villamos hálózathoz

Az alábbi 14. ábrán bemutatott kijelző (PLC) képernyőképen követhető nyomon a villamos energiatermelés mellett a hőenergia csatlakozása, a beérkező gáz, valamint a turbófeltöltő valós adatainak megjelenítése.



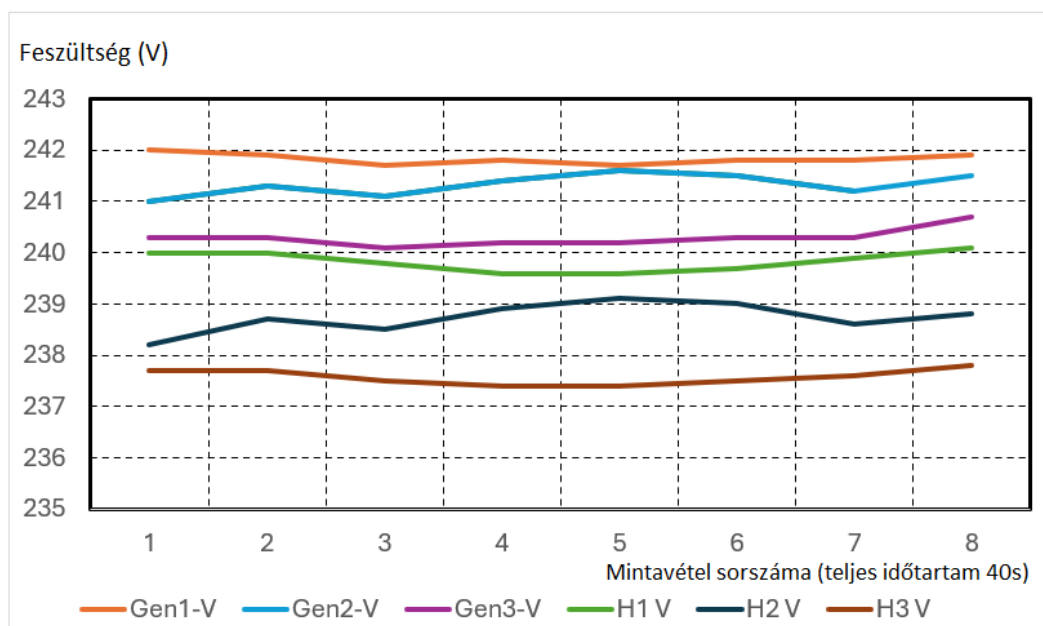
14. ábra A rendszer csatlakozása a villamos hálózathoz, képernyőkép (saját ábra)

1. 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

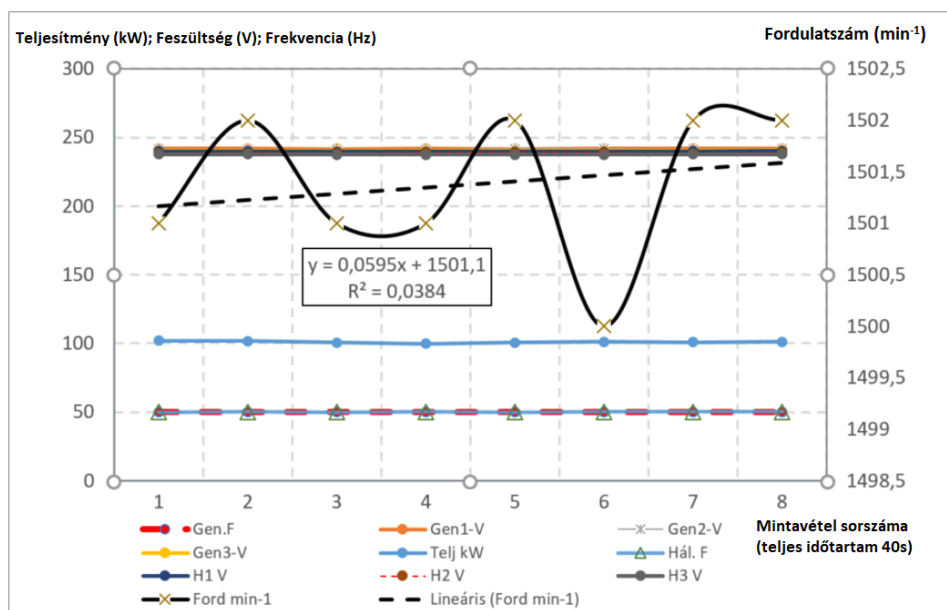
Egy hosszabb üzemi mérésorozat egy szakaszának eredményei láthatók az 1. táblázatban, folyamatos hálózatra csatlakozás mellett, 5 s mintavétel sűrűséggel. Ez a mérés viszonylag jól leírja a rendszer működését, a jellemző üzemi paramétereket, melyek stabilnak mondhatók voltak a teljes üzemeltetés során. 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 15. ábrán az előbbi 1. 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.

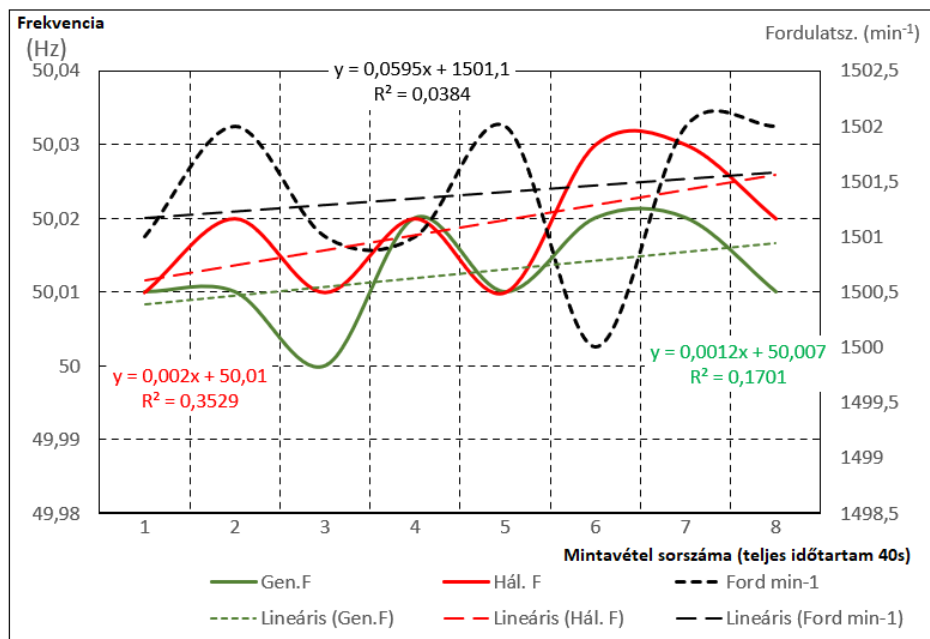


15. ábra Üzemi mérések során a generátor és hálózati feszültségek alakulása - mintavétel 5 s-ként (saját ábra)

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 16. ábrán látható.

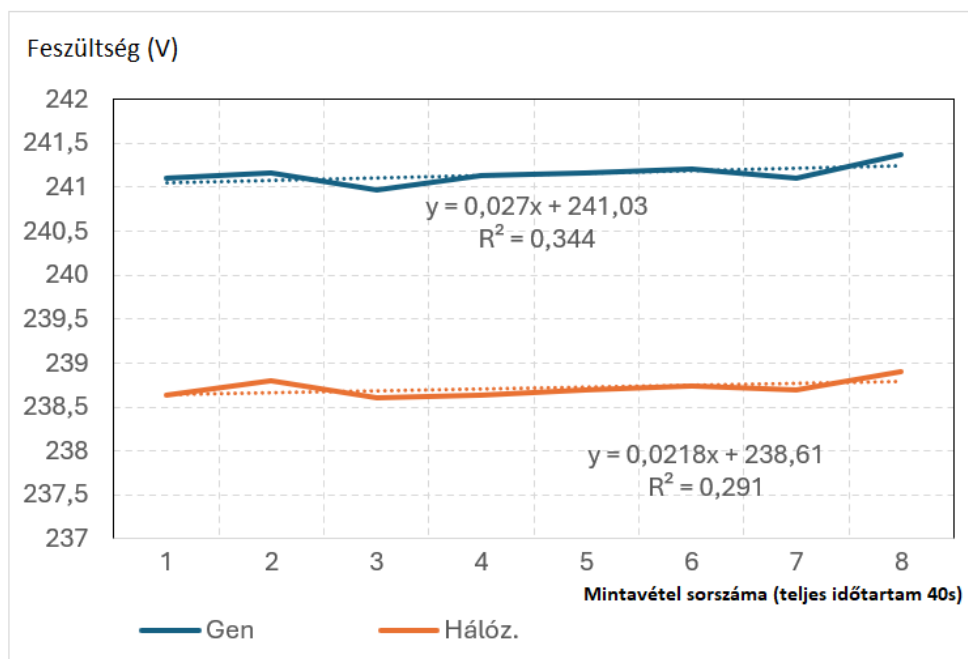


16. ábra Együtt futás a hálózattal - mintavétel 5 s-ként (saját ábra)



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

A fordulatszám és frekvencia értékek a 17., míg a fázisfeszültségek átlagai a 18. ábrán láthatók.



18. ábra Generátor és hálózat fázisfeszültségek átlagolva - mintavétel 5 s-ként (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.

4. 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, a 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.

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 kipárolog, 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]

$H_{atü}$: A 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 1500-1502 min⁻¹ tartományban váltakozott, mely megfelelőnek tekinthető.

6. A SZERZŐNEK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓI

Lektorált cikk világnyelven

1. 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)
2. 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>
3. Madár V., **Betovics A.**, Schrempf, N., Tóth, L. (2023). Thermal decomposition of biomass, significance of biochar. MACHINES TECHNOLOGIES MATERIALS, 17(7), 267–269.
4. Madár V., Schrempf N., **Betovics A.**, Tóth 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>

Lektorált cikk magyar nyelven

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

7. Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2024). Bioszén-előállítás mezőgazdasági használati jelentősége. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 65(10), 2–7.
8. Madár, V., Schrempf, N., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). Biomassza hőbontása, bioszén jelentősége. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(4), 12–15.
9. Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). A bioszén felhasználása, a használat előnyei. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(11), 34–37.
10. Tóth, L., **Betovics, A.**, Schrempf, N. (2023). A mezőgazdaság részesedése a hazai energiarendszerben (Energiamegtakarítási lehetőségek). MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(1), 18–20.
11. Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). A bioszén gyártása és terméshozzájáruló tényezői. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 64(8), 2–7.
12. 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.
13. Tóth, L., **Betovics, A.** (2023). Szél- és napenergia, mint alapvető megújuló energiaforrások. ENERGIAGAZDÁLKODÁS, 64(1–2), 45–50.
14. Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). Bioszén és terméshozzájáruló tényezői. AGRÁRIUM, 33(9–10), 14–17.
15. Madár, V., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2023). A bioszén felhasználás, a használat előnyei. MEZŐGAZDASÁGI TECHNIKA, 2023(11), 3–7.
16. Madár, V., Schrempf, N., **Betovics, A.**, Tóth, L. (2022). Hidegenergia előállítása pirolízis generátor (CHP) hulladékhőjével. ENERGIAGAZDÁLKODÁS, 63(3), 2–8.

Nemzetközi konferencia kiadvány

17. **Betovics A.**, Madár V., Schrempf N., Tóth L. (2024): Production of high-quality gas by pyrolysis - International Conference on Science (ICOSTEE2024), Technology, Engineering, and Economy - Mechanical Engineering, Materials Science and Energetics section – Poster presentation. 31st May 2024. ISBN: 978-963-306-986-8
18. **Betovics A.**, Madár V., Schrempf N., Tóth L. (2023): Environmentally friendly production of electricity, heat and cold energy with a chp pyrolysis small power plant – Poster presentation; 3rd JTACC and 9th V4 Thermoanalytical Conference, 20–23 June 2023. ISBN 978-963-454-915-4