SZENT ISTVÁN EGYETEM

Pirolízisgenerátor hatékonyságának növelése

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Bácskai István Tamás

Gödöllő
2020

A doktori iskola megnevezése:	Műszaki Tudományi Doktori Iskola
tudományága:	Agrárműszaki tudományok
vezetője:	Prof. Dr. Farkas István egyetemi tanár, DSc SZIE, Gépészmérnöki Kar
Témavezető:	Prof. Dr. Tóth László professzor emeritusz, DSc SZIE, Gépészmérnöki Kar
Társ-témavezető:	Dr. Schrempf Norbert egyetemi docens SZIE, Gépészmérnöki Kar

....

a témavezető jóváhagyása az iskolavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK 4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK 5
1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége 5
1.2. Célkitűzések 5
2. ANYAG ÉS MÓDSZER 7
2.1. Vizsgált anyagok 7
2.2. A vizsgálatokhoz használt műszerek, eszközök 7
2.3. Laboratóriumi nagymintás pirolízisreaktor 7
3. EREDMÉNYEK 10
3.1. Tömegváltozás intenzitása az idő függvényében 10
3.2. Az anyaghalmaz közegellenállásának hatása a reakciós folyamatra 13
3.3. Eredmények felhasználása a félüzemi rendszerben 14
3.4. Víz és levegő adagolásának hatása a pirolízis-folyamatra 15
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK 19
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK 22
6. ÖSSZEFOGLALÁS 23
7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK 24

JELÖLÉSJEGYZÉK

C	szén	[-]
CH_4	metán	[-]
CO_2	szén-dioxid	[-]
CO	szén-monoxid	[-]
FG	füstgáz	[-]
G	gáz	[-]
HCS	hőcserélő	[-]
HMV	használati melegvíz	[-]
H_2	hidrogén	[-]
H_2O	víz	[-]
L	levegő	[-]
m	tömeg	[kg]
O_2	oxigén	[-]
P	teljesítmény	[kW]
p	nyomás	[Pa]
Q	térfogatáram	[m^3/h]
t	idő	[s]
T	hőmérséklet	[°C]
V	víz	[-]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Az értekezésem első fejezetében a téma jelentőségét fogalmazom meg, illetve a munkám célkitűzéseit mutatom be.

1.1. A választott téma időszerűsége, jelentősége

Az elmúlt évtizedekben egyre világosabban körvonalazódott, hogy az emberiség környezetszennyező és energia-pazarló életvitele hosszú távon a természeti erőforrások kimerüléséhez, ökológiai katasztrófához vezethet. Napjainkban a technológia ugrásszerű fejlődése mellett nemcsak a nagyobb volumenű megújuló energiaforrások alkalmazását kell szem előtt tartani (napenergia, szélenergia, vízenergia, geotermikus energia) hanem a különböző ipari folyamatokból, a mezőgazdaságból, az élelmiszeriparból, vagy éppen az emberiség létfenntartásából származó hulladékok és melléktermékek energetikai alkalmazását. Az említett anyagok termikus felhasznosítására számos technológiát fejlesztettek már ki. Ezeket folyamatosan fejleszteni és adaptálni kell a mindenkori alkalmazási területekhez és a rendelkezésre álló alapanyag fizikai/kémiai tulajdonságaihoz. Az elgázosítási eljárások az égetés és a hőbontás előnyeit kombinálják, a másodlagos környezetszennyező hatásokat pedig minimalizálják. A jövő alternatív eljárásainak tekinthetők a szilárd hulladékok termikus kezelésében az égetéses technológiával szemben.

1.2. Célkitűzések

Munkám célja, hogy az adott téma szempontjából elmélyedjek a rendelkezésre álló szakirodalomban és annak kutatása segítségével betekintést nyerhetek a tématerület és kidolgozottsági fokába. A szerzett tapasztalatokat követően, az esetlegesen nem kellő mélységben kidolgozott, vagy hiányzó részek további kidolgozására és betöltésére hipotéziseket állítsak és azokat megerősítsem, vagy megcáfoljam a gyakorlati kutatásaim során. Pirolizálási folyamatnak alávethető alapanyagok vizsgálatával és a folyamat lefutásával kapcsolatos kutatási célok:
A szakirodalom áttekintését követően célom volt meghatározni, hogy egy megvalósítani kívánt CHP erőmű milyen technológiai kialakítást igényel. Ennek érdekében a megvalósítás előtt laboratóriumi méretű kísérleti reaktort kell készíteni és azzal előzetes folyamat-kísérleteket lehet elvégezni. A reaktortérben lájátszódó folyamatokra várhatóan nagy befolyással bírnak a töltet fizikai kémiai jellemzői, valamint a fűtés intenzitása. A lejátszódó hőbomlási szakaszokat laboratóriumi rendszerben kívánom mérni, rögzíteni és elemezni. Kutatási célom:

- Laboratóriumi nagymintás (500 – 1000 gramm) kísérleti technológia megvalósítása olyan módon, hogy a benne lefutó folyamatok átültethetők legyenek a félüzemi szintű megoldás kialakításhoz.
- Különböző halmazsűrűségű és tömörségű, főként fás szárú biomassza minták pirolízisfolyamatainak vizsgálata és adatinak rögzítése az idő függvényében, inert gázfűtéssel, különböző kezelési hőmérséklet mellett.

A kezelési hőmérséklet növelésével, várhatóan növekszik a hőbontási folyamat sebessége, ami az intenzívebb kigázosodáshoz vezet. A célom:

- Két eltérő kezelési hőmérsékleten – 400 °C, 600 °C – vizsgált a pirolízis folyamatok paramétereinek rögzítése és elemzése.
- Reakciózóna időtartamfüggő karakterisztikájának felvétele a tölteten belül is.
- Különböző halmazsűrűségű (porozitású) töltetek reakció-intenzitásának vizsgálata.
- Az *alapvető cél* az alapanyagok eltérő fizikai, kémiai és geometriai tulajdonságai mellett (térfogat sűrűség, halmazsűrűség, porozitás, energia tartalom stb.) *a fixágyas rendszer végső hatékonyságának javítása, a nyert „energia/alapanyag-tömeg" (J/kg) viszonyában.*

A szakirodalmi és a laboratóriumi kutatást követően tudok arra következtetni, hogy milyen típusú technológiai megoldáshoz szükséges fordulni, az ismerteket tovább fejleszteni, hogy az a lehető legalacsonyabb kátránytartalmú gázt nyerhessünk, ami a CHP kiserőmű hosszabb futásidejét biztosítja.
A laboratóriumi vizsgálatok tapasztalatainak megfelelően üzemi léptékű berendezés létesítése és ezzel validációs vizsgálatok elvégzése.

- A magas hőmérsékletű (600 °C – 800 °C) folyamat, valamint a töltetben a kátrány krakkolása biztosíthatja a magas tisztaságú termékgázt.

Valójában a hatékonyság ellenőrzése a félüzemi kísérleti reaktorral végezhető, amelynek egyedi geometriai méretei (oxidációs/redukciós kúp jellemzői) ugyancsak hozzájárulnak a magas tisztaságú, hatékonyabb gáz termeléséhez, amit tovább fokozhat a kombinált gázút biztosítása és várhatóan a több ponton adagolt táplevegő is

.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az értekezésem e fejezetében bemutatom a kutatási céljaim megvalósításához használt kísérleti módszereket, a használt eszközöket és felhasznált mintákat.

2.1. Vizsgált anyagok

Ahhoz, hogy hatékony pirolizáló (hőbontó) berendezés célszerűen tervezhető és legyártható, majd használható legyen meg kell ismerni a rendelkezésre álló anyagokat. A tervezés egy adott helyen specifikus is lehet, ha az adott területen nagy mennyiségben és folyamatosan rendelkezésre álló anyagok vannak. A technológia szempontjából releváns anyagok, amiket vizsgálni fogok a következők:

- akácfa apríték,
- nyárfa apríték,
- mezőgazdasági melléktermékek.

2.2. A vizsgálatokhoz használt műszerek, eszközök

A vizsgálni kívánt paramétereket rendkívül fontos tudni nemcsak a laboratóriumi kísérletek elvégzése tükrében, hanem a félüzemi léptékű (5 kWe) technológia tervezésében és üzemviteli paramétereinek beállításában is nagy szerepet játszanak.

A jelenleg vizsgált jellemzők és a használt műszerei:

- nedvességtartalom (termo-gravimetrikus mérleg),
- égéshő, fűtőérték (adiabatikus bomba kaloriméter),
- hamutartalom (hamvasztókemence, laboratóriumi mérleg),
- elemi összetétel (elemi összetétel analizátor),
- hamu olvadáspont (hamuolvadáspont-mérő mikroszkóp)
- gázösszetétel (gázanalizátor).

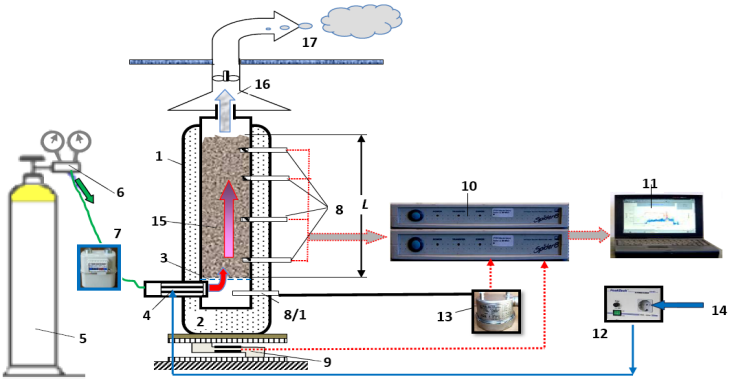
A paraméterek vizsgálati módszerei hazai és nemzetközi szabványokban vannak rögzítve, amiket a Laboratórium alkalmazási területek listája foglal magában az ISO/IEC 17225:2018 jelzetű szabványnak megfelelően.

2.3. Laboratóriumi nagymintás pirolízisreaktor

Az alapanyag vizsgálatokat követően az Intézetem laboratóriumában gázosítási vizsgálatokat végeztem, kezdeményezésemre egy ipari partnerrel közösen tervezett és kivitelezett laboratóriumi nagymintás pirolízis reaktorral (1. és 2. ábrák).

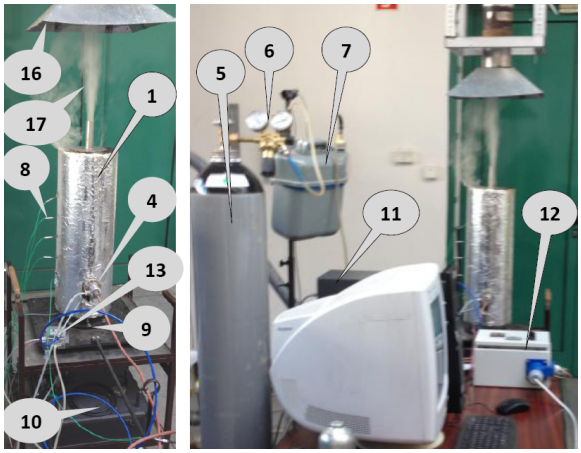
A reaktor falát egy 110 milliméteres átmérőjű edzett acélcső (1) alkotja, mely gondosan körbe van szigetelve kőzetgyapottal és egy precíziós torziós mérlegcellán nyugszik (9). A reaktorcsőbe helyezhető töltet (15). tömege 400-

1500 gramm között változik az alapanyag tömegsűrűségétől függően. A gázosításhoz szükséges hőenergiát a 2000 W teljesítményű fűtőpatron (4) szolgáltatja, melynek vezérlését különálló, saját fejlesztésű egység szolgálja (12). A reaktor hosszmetszeti tengelyén 5 db K-típusú hőlemet helyeztünk el (8). A legalsó közvetlen a fűtőpatron előtt van (8), ami a visszacsatolást biztosítja a vezérlőnek, hogy a fűtés a program szerinti legyen.



1. ábra Pirolízis reaktor és mérőrendszerének sematikus ábrája

Függőlegesen fölfelé haladva még négy hőelem lett elhelyezve egyenlő távolságokra (80 mm), melyekkel a kigázosodási hőmérsékleteket vizsgáljuk az idő és a tömegcsökkenés függvényében. A fűtőpatronon keresztül, nyomásszabályzó segítségével nitrogén (4.5 tisztaságú) gázt eresztünk (5. 6. és 7.) a reaktortérbe, ami az inert atmoszférát biztosítja a nem kívánt oxidáció elkerülése végett. Az átáramló nagy mennyiségű gáznak és a nagy tömegű töltetnek erős hűtő hatása van a rendszerre. Ezért az elméletileg szükségesnél nagyobb teljesítményű fűtőpatront választottunk és a teljesítmény többlettel a kívánt értékre kompenzálni lehet a folyamat jellemzőit (hőváltozás sebességét, a kívánt hőfokot). A teljes lebomláshoz szükséges 600 °C -ot és a vele azonos gázhőmérsékletet is elértünk. A keletkező termékgázt a mérés, majd a fáklyázást követően elvezettük (16. és 17.).



2. ábra Pirolízis reaktor és mérőrendszere

Ábrák jelei:

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

3. EREDMÉNYEK

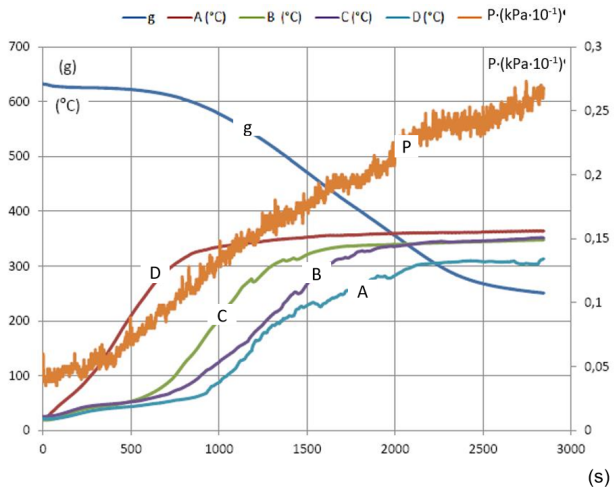
Értekezésem e fejezetében bemutatom a kutatómunkám során elért új tudományos eredményeket, amik a szilárd biomassza üzemű, elgázosító reaktorok hatékonyságának növelésére, valamint a technológia optimális működtetéséhez járulnak hozzá.

3.1. Tömegváltozás intenzitása az idő függvényében

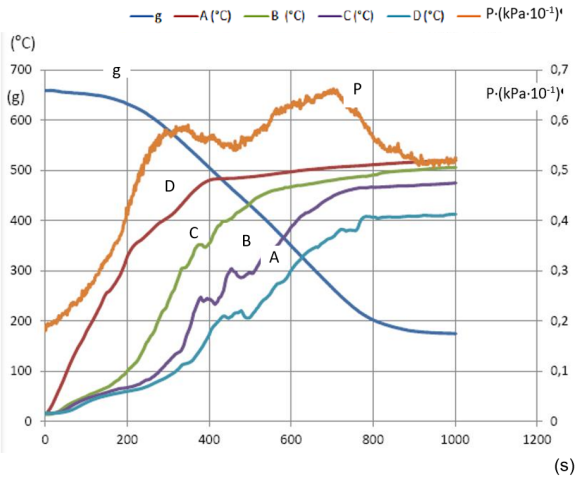
A kiválasztott alapanyagot (keményfa apríték) először 400, majd 600 °C-os hőmérsékleten kezeltem inert gáz (4.5 nitrogén) környezetben az oxidáció elkerülése érdekében. A kísérleteket tömegállandóság beállásáig végeztem. A rögzített paraméterek az idő függvényében a következők voltak:

- hőmérséklet az anyaghalmazban négy különböző magasságban, az 1. ábra szerint, alulról felfelé: A, B, C és D (Lásd: 3. és 4. ábra jeleit).
- tömegcsökkenés (g),
- nyomásváltozás a töltet alján (p).

A vizsgálatokat 7 féle anyagnál végeztem el, amikből *példaként* a keményfa aprítékot mutatom be. Ennek adatsorából készült diagramokat a 3-as és a 4-es ábra szemlélteti.



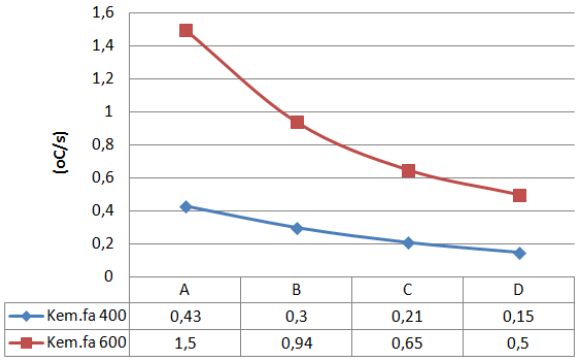
3. ábra Keményfa apríték pirolizálása 400 °C-os kezelési hőmérsékleten



4. ábra Keményfa apríték pirolizálása 600 °C-os kezelési hőmérsékleten

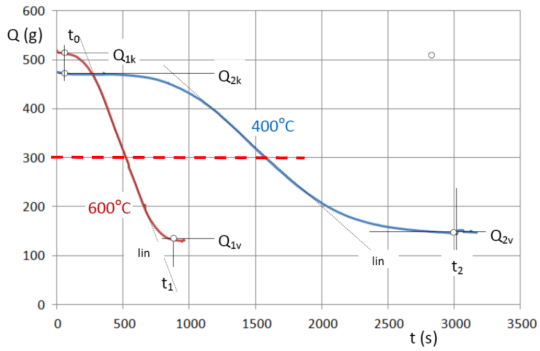
Az anyaghalmazban a hőmérsékleteket terjedését mértem az idő függvényében (A. B. C és D görbék). A fűtőpatronon keresztül, nyomásszabályzó segítségével nitrogén gáz jut a reaktortérbe, ami az inert atmoszférát biztosítja. A keletkező termékgázt összetétel analizálóhoz, majd a fáklyázóhoz vezettem. Az anyag idősoros tömegváltozását a gázosító készülék alá beépített precíziós mérleggel regisztráltam. A látszólagosan oxigén mentes környezet ellenére a szén az elemi méréseknél kapott tömeg értékekhez viszonyítva ~1/3-ad részt csökkent.

A magasabb hőfokon a szén lebomlását anyagban lévő víz disszociációja közben keletkező oxigén segítette. A hőmérsékletváltozás a magasabb hőfokon igen gyors, 600 °C-on a felső hőfok változása mutat közel azonos tendenciát, mint 400 °C-nál a legalsó pont, ahol a fűtött inert gáz bevezetése történt (5. ábra).



5. ábra Ugyanazon fa aprítéknál a hőmérséklet változásának intenzitása (°C/s)

Ugyanezen mérésnél a bemért anyagok tömegváltozásait az idő függvényében a 6. ábra szemlélteti.



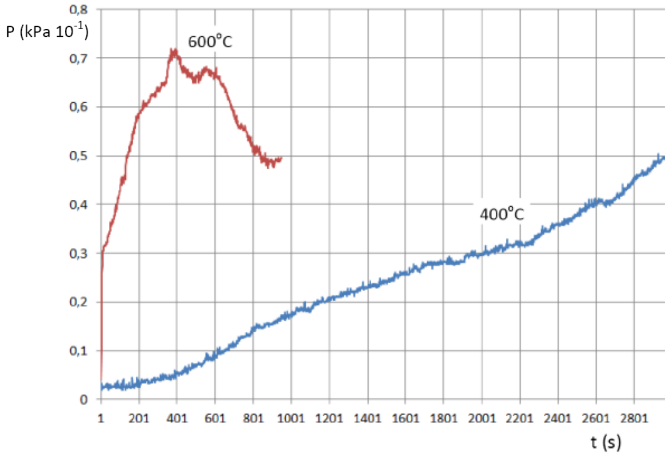
6. ábra Szenesítés inert gázban 400 és 600 °C-on, a tömeg változása (lebomlása) az idő függvényében

A cél a hőfoktól függően is kettős lehet: bioszén (>400 °C), vagy hajtógáz (<600 °C) előállítása. Általában a két hőfokon a lineáris szakaszokat egymáshoz viszonyítva, a tömegcsökkenés kétszer nagyobb intenzitású.

A magasabb hőfokon a maradvány (C-D) ~10%-kal kevesebb. A teljes lebontási folyamatokban a szén további bomlása már az oxidációnak és a redukciónak tudható be.

A kísérletek során megállapítottam, hogy a töltet tömegcsökkenés-tulajdonságainak karekterisztikája igen nagy hasonlóságot mutatnak mindkét kezelési hőmérsékletnél. Az anyagoszlopban különböző magasságokban elhelyezett hőmérséklet érzékelők által gyűjtött adatokból szerkesztett diagramok karakterisztikája is igen hasonlók mindkét kezelési hőmérsékletnél. A 400 és 600 °C-os kezelés között szignifikáns különbséget a nyomásviszony-változás mutatott.

Ez annak köszönhető, hogy a magasabb kezelési hőmérséklet gyorsabb kigázosodást okoz, ami kihat az anyaghalmaz „összeomlására”, valamint a részecskék klaszterképződésére. Ennek köszönhető az átáramló gáz nyomásértékei közötti markáns különbség 400 és 600 °C-os kezelési hőmérsékletnél (7. ábra).



7. ábra A gázáteráramláshoz szükséges nyomás a szenesítés során

3.2. Az anyaghalmaz közegellenállásának hatása a reakciós folyamatra

A laboratóriumi kísérletek megtervezésekor figyelembe kellett venni a rendelkezésre álló alapanyagok frakcióméretét, az egyes szemcsék sűrűségét, valamint a teljes töltet (mint egység) tömegsűrűségét. A töltet gázáteresztő képessége, porozitása kihat a teljes pirolízis-folyamatra, valamint a kinyerhető termékgáz és bioszén mennyiségére és minőségére egyaránt. A mérések során a porozitás és a töltet gázáteresztő képességét a reaktor aljába elhelyezett nyomásmérő szenzorral tudtam nyomonkövetni.

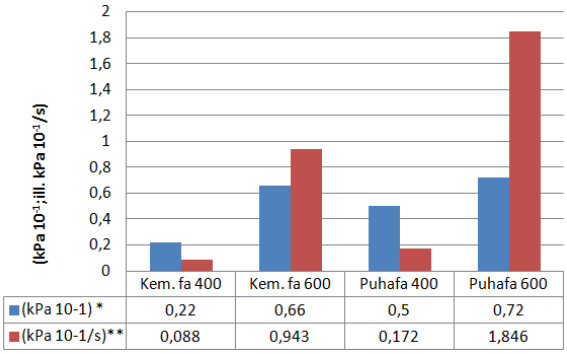
A 3-as és 4-es ábrák a keményfa apríték szenesítéséből származó adatok alapján készültek. A 7. ábra az inert gáz nyomásértékeit szemlélteti az idő függvényében.

A nagy nyomású nitrogén palackból a gázt állandó nyomáson és tömegárammal jut a fűtőegység utáni térbe. Az ott lévő szenzor méri a megváltozott értékeit a teljes szenesítési ciklus alatt az idő függvényében.

A különféle anyagoknál a kezdeti állapotban néhány század kPa (0,03-0,05) volt az eltérés. A magasabb hőfokú fűtés esetén néhány s-alatt a nyomás 0,03 kPa értékre nőtt és folyamatosan változott 0,07 kPa értékig, amely időtartama ~400 s. Ekkorra a teljes anyagtérfogat hőmérséklete nagyobb lett 100 °C-nál, tehát minden rétegben gőz és gázképződés megkezdődött (aktív pirolízis).

Az A és B rétegek intenzíven szenesedtek és az anyagból az apróbb szemcsék tovább zsugorodtak, a rétegvastagság csökkent és ezzel a belső áramlási ellenállás is kisebb lett. Ez a nyomás csökkenését eredményezte, ami végül 0,05 kPa-on megállt. Ekkorra a teljes tömeg szenesedett és „összezuhant”, ami kisebb nyomásnövekedést idézett elő. A trendek a kemény és a puha fánál is

azonosak voltak, de a mértékük a puhafánál a lazább szerkezet miatt nagyobb volt (8. ábra).



8. ábra A gázátáramláshoz szükséges nyomás* és a nyomásváltozás intenzitás** a szenesítés során

A 400 °C-on egyenletes nyomásnövekedés volt egészen a teljes szenesedésig, a növekedés ekkor is az előzőhöz hasonlóan 0,05 kPa-on állt meg (ezen eljárás lehet jellemző a szén előállítására). E jelenségek igen lényegesek a fixágyas, függőleges, felülről táplált és alsó légbevezetésű generátoroknál, különösen, ha nem szén, hanem hő és villamos energia előállítása a cél. Alul történik a primer levegő bevezetése, annak mennyisége az égési hőfok fenntartása és a keletkező kátrány redukálása miatt is igen lényeges.

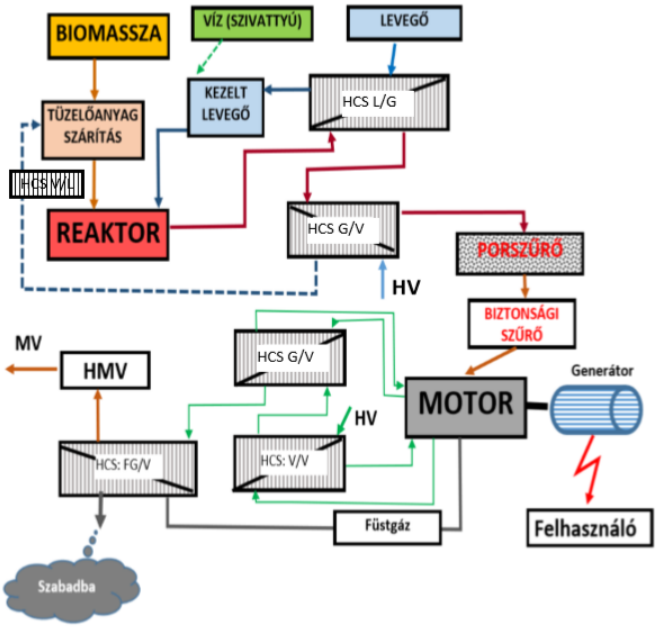
3.3. Eredmények felhasználása a félüzemi rendszerben

A rendszer tervezésénél felhasználtuk a fellelhető forrásmunkák eredményeit, a szerzők által szerzett tapasztalatokat, javaslatokat, valamint a laboratóriumban elvégzett kutatások eredményeit. Ennek ellenére néhány alkalommal a kivitelnél és méréseknél is hivatkozom a korábbi eredményekre, azért, hogy rávilágítsak az adott megoldás konkrét okaira. Végül is a tervezett rendszer sok részletében, főként az egyszerűsítések miatt eltér a szakirodalmi forrásokból ismert, ún. felső betáplálású és alsó gáz-elvezetésű megoldásoktól.

A rendszer leírása:

A beérkező biomassza a telepi (udvari) tároló térről a berendezés előtti előtárolóba kerül, ahol szükség szerint megtörténik a szárítása a kívánt nedvességtartalomra. Az ehhez szükséges hőt a forró gázból nyert energia szolgáltatja a gáz-levegő hőcserélő közbeiktatásával (9. ábrán a folyamatok irányát a nyilak jelzik). Az oxidációs térbe kerülő levegő előmelegítése ugyancsak - az említett - hőcserélőn keresztül átáramló levegővel történik. Tehát e hőcserélő másik oldalán megtörténik a levegő előmelegítése, majd ebbe a légáramba végezzük a vízbefecskendezést is. Ez már a reaktorban

valósul meg. A reaktor teljes tere (a gázelvezetés oldaláról) a légkörinél kisebb nyomás alatt van (kapcsolódó vákuumszivattyú segítségével), ez egyértelművé teszi a gáz áramlási irányát is. A generátor alsó részéről elvezetett gáz a hőcserélés révén lehűlik és a már hidegebb gáz kerül a porszűrőbe, ahol megtörténik a por durva leválasztása, de innen még egy biztonsági szűrőbe kerül, hogy a kapcsolt rendszerbe teljesen kátrány mentes gáz kerüljön. Ezzel a motor égéstere megvédhető a lerakodások kialakulásától. A motorban keletkező hulladékhő-hasznosítás a két víz/víz hőcserélőn keresztül történik. A hőcserélők szolgálnak a használati melegvíz előmelegítésére. A használati melegvíz végső hőfokát gyakorlatilag a motorból kiáramló magas hőfokú füstgáz végzi. Ennek következtében tiszta és alacsony hőmérsékletű füstgáz kerül a környezetbe. Ezzel a komplex rendszer legjobb hatásfokát érjük el. A rendszer további funkcionális elemeinek részletes leírását a későbbiekben mutatom be.



9. ábra A rendszer funkcionális ábrája (HCS – hőcserélő, L – levegő, V - víz, G - gáz, FG - füstgáz, HMV - használati melegvíz)

3.4. Víz és levegő adagolásának hatása a pirolízis-folyamatra

A szakirodalom szerint a hőmérséklet tartása mellett a víz és levegő bevezetése az oxidációs, illetve redukciós térben megváltoztatja a gáz összetételét és *csökken a kátránytartalom*. A víz befecskendezésének hatására a szénszemcsék nyitott pórusaiba beáramló víz (vízgőz) disszociál hidrogénné

és szénmonoxiddá. Ezzel megváltozik a gáz összetétele, éghetősége és energiatartalma is.

Ennek ellenőrzése céljából a rendszerbe különböző mennyiségű vizet fecskendeztünk be injektorokon át az említett rezgőszelepek állíthatósága révén. A vizet az egyes méréseknél a beáramló, pirolízist tápláló levegőhöz adagoltuk. A víz, illetve vízgőz/levegő víz keveréke jelentős részen közvetlen az oxidációs és redukciós térbe jutott. A rendszer hőmérsékletére gyakorolt hatása alapvető, hiszen a víz és levegő (metán oxigén, vagy CO_2) bevezetésekor is a redukciós tér hőmérsékletét megfelelő szinten kell tartani. Ehhez szükséges az oxidációs tér alatti redukciós tölcsér átmenetének, torkolatának helyes megválasztása, hogy a megfelelő mennyiségű anyag áramoljon át. Tehát a beadagoláshoz illeszthető legyen az átáramlás tömegárama.

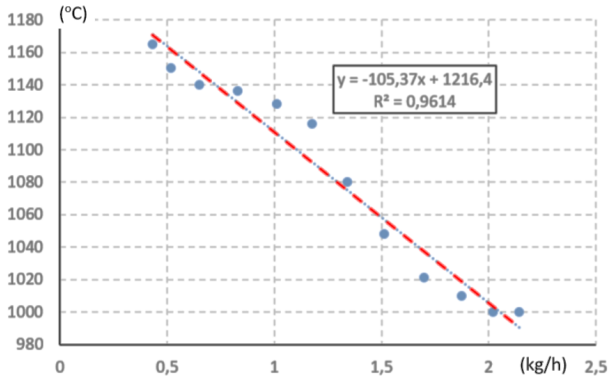
A kísérleteket a leadott teljesítmény állandó értéke mellet végeztük. A bevezetett víz mennyiségének hatására a redukciós tér hőmérséklete csökkent (1. táblázat, 10.–13. ábra).

1. táblázat Kondenzvíz befecskendezés hatására mért adatok

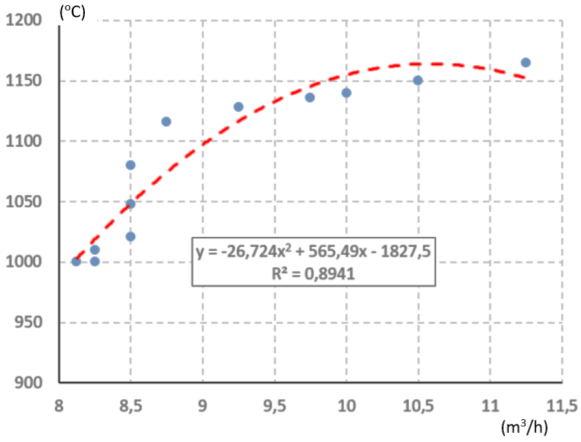
Teljesítmény (kW)	Beadagolt levegő (m^3/h)	Idő (sec)	Oxidációs hőm. (°C)	Kondenzvíz tömegárama (kg/h)
5	11,25	83,2	1165	0,43
5	10,5	69,2	1150	0,52
5	10	55,4	1140	0,65
5	9,75	43,4	1136	0,83
5	9,25	35,6	1128	1,01
5	8,75	30,6	1116	1,18
5	8,5	26,8	1080	1,34
5	8,5	23,8	1048	1,51
5	8,5	21,2	1021	1,70
5	8,25	19,2	1010	1,88
5	8,125	17,8	1000	2,02
5	8,25	16,8	1000	2,14

Az eredményekből az látható, hogy jelen berendezés esetén 1,5 kg/óra vízmennyiségnél többet nem célszerű beadagolni, hogy a redukciós tér

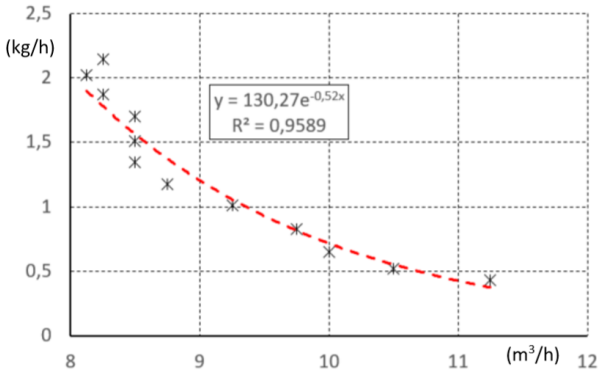
hőmérséklete 950-1000 °C alá ne csökkenjen. A levegő bevezetése ugyancsak hatással bír a redukciós tér hőmérsékletére. Tekintve, hogy a levegővel nagyobb mennyiségű oxigén bevezetésére is sor kerül, ezáltal az égés javul, tehát a hőmérsékletre növelő hatása van. A jelen berendezésnél 9,0- 9,5 m^3/h légmennyiségnél több bevezetése nem indokolt, mivel az már csökkentené a redukciós tér hőmérsékletét. A két összefüggésből adódik, hogy a víz és levegőadagolás közötti összefüggés exponenciálisan csökkenő (közel lineáris). Ebből következik, hogy a levegő növelésekor a víz mennyiség csökkentése indokolt.



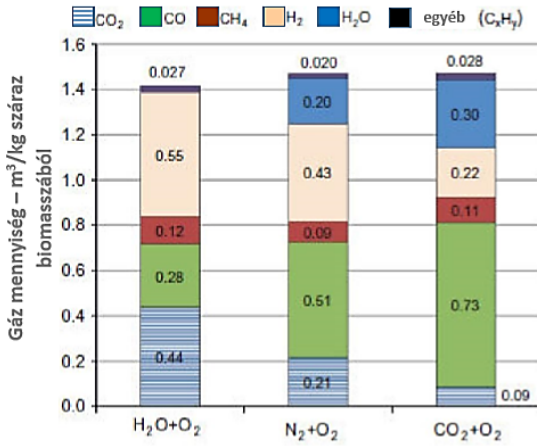
10. ábra A vízbevitel hatása a redukciós tér hőmérsékletére



11. ábra A levegőbevitel hatása a redukciós tér hőmérsékletére



12. ábra A levegő és vízbevitel összefüggése



13. ábra A H_2O, O_2 és CO_2 anyagok bevitele az oxidációs-redukciós zónába, hatásuk a gáz összetételre

Végül is, a H_2O, O_2 (CO_2) anyagoknak, a biomassza pirolízis folyamatában, a katalitikus gázosításban jelentősen előnyös hatása van. Az adagolásuk révén a gázhalmazállapotú vegyületekké történő átalakítása során a kátrányos vegyületek aránya csökken. A 850-900 °C fölött végzett gázosítási reakciókban mindegyik hatás érvényesül. Szakirodalmi források szerint a legmagasabb hideggáz hatásfok a szén-dioxid-tartalmú légkörrel érhető el. Bármelyik adagolásának hatása a kátrány tartalmat a motorokhoz szükséges határérték alá csökkenti. Szakirodalmi források arra is felhívják a figyelmet, hogy a vízbevitel hatására a lebontás sebessége növelhető. Laboratóriumban végzett kísérleteim azt mutatták, hogy ez közepes méretű keményfa biomassza aprítéknál igaz.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Laboratóriumi mérőegység és vizsgálati elv kidolgozása

Pirolízisgenerátor hatékonyságának növelése érdekénben egy laboratóriumi mérőegységet és annak mérési elvét dolgoztam ki, amit meg is építettem. Azzal különféle struktúrájú és energiatartalmú biomassza anyagok tömegváltozás (gázképződés) mértékét, az időegység alatti változások intenzitását, az átáramló gáz nyomásigényét, az anyagon belül a hőmérséklet-eloszlást és az anyagjellemzők hatását is meg lehetett állapítani. A vertikális hőfokeltérések alapján jól követhető a reakciós zónák változása az idő függvényében.

A berendezésben a jó hővezetésű falak mentén és az anyagban is intenzívebb a hőterjedés, ami hat az anyag lebomlási folyamataira. Ezt a jelenséget a konstrukcióknál figyelembe kell venni (ellenirányú hőelvonással kiegyenlíteni, az ebből nyert energia az anyagok szárításához felhasználható). Ilyen modell-mérőegység a szakirodalomban nem volt ismeretes.

2. Pirolízis hőfokának a reakció sebességére és a termékgázra gyakorolt hatása

Az általam tervezett kísérleti modell-berendezés segítségével az anyag idősoros tömegváltozását a gázosító készülék alá épített precíziós mérleggel regisztráltam. A nagyobb intenzitású hőközlés hatására a lebomlási folyamat, a gázképződés gyorsabb, volumenében több, de a visszamaradó szilárd anyag (szén és hamu) mennyisége kevesebb. A magasabb kezelési hőfokon az anyag lebomlását a benne lévő víz disszociációja közben keletkező oxigén segíti. Azonos anyagoknál a tömegváltozás (a gázképződés) intenzív szakaszán (t_{lin}) a magasabb hőfokon (600 °C, ~0,9 g/s, amíg 400 °C-on ~0,3 g/s, közel háromszor) gyorsabb.

3. A töltet fizikai tulajdonságainak hatása a kigázosodási reakcióra

Bebizonyítottam, hogy a pirolizálandó biomassza anyagok sűrűsége és a belőlük összeálló anyaghalmaz térfogatsűrűsége jelentősen befolyásolják a pirolízis-folyamatát. *A teljes töltetet vizsgáltam, mint egységet*. A sűrűség és ezzel a porozitás változik a lebomlás során, ami változtatja a gáznyerés intenzitását. 15% indulási nedvesség és azonos aprítékjellemzők mellett a sűrűségváltozás az alábbi volt:

- keményfa aprítéknál 31,4%,
- fenyőfa aprítéknál 61,4%,
- keményfa pelletnél 58,4% és a
- fenyő gyaluforgácsnál 64,1%,

A gáznyerés intenzitása legkisebb mértékben a lebomlás során, a struktúráját jobban megtartó keményfa aprítéknál változik. A pelletált anyagoknál hasonló tapasztalható.

4. Vízgőz és levegő hatása a hőmérsékletre és a lebomlási sebességre

A félüzemi kísérleti egység működtetésével, használatával bebizonyítottam, hogy az oxidációs térbe beáramoltatott levegővel bevitt víz mennyiségének hatására a kátránytartalom mérsékléséhez szükséges redukciós tér hőmérséklete csökkent (a láng színének változása igazolta). Bebizonyítható, hogy a határesetet a redukciós tér hőmérséklete határozza meg, amelynek a hőfoka 950-1000 °C alá nem csökkenhet. A félüzemi tesztméréseim által igazoltam, hogy (adott körülmények között) a levegő 1,4-1,8 m^3/kWhe fajlagos értéke felett csökken a redukciós tér hőmérséklete.

$$y = 105{,}37x + 1216{,}4,$$

(ahol y = °C; x = kg/h levegő; $R^2 = 0{,}9614$*)*

A légbevitel növelése a vízbeviteli igényt mérsékeli. A kapott összefüggés:

$$y = 130{,}27\, e^{0{,}57x}.$$

($R^2 = 0{,}9589$*; az y és x értékek a fentebbinek megfelelők)*

Igazoltam, hogy a CHP (5,0 kW) rendszerre tervezett fixágyas, félüzemű, kísérleti berendezésnél az alacsony nedvesség tartalmú és ezáltal fajlagosan nagyobb fűtőértékű faforgácsnál a villamos energiává (kWhe/kg anyag) konvertálás hatékonysága a nedvesebb anyagokhoz viszonyítva (a víz elpárologtatásának a jelentős energia igénye miatt), a kedvezőbb értékeknél is (~ 12-16%-kal) nagyobb.

5. A töltet porozitása és a szemcsék elmozdulásának összefüggése

Konkrét berendezések tervezésénél ismerni kell, hogy a légbevezetés okoz–e szemcseelmozdulást. Külön, erre a célra készített laboratóriumi egységben vizsgáltam az oxidációs és redukciós zónákban lévő szemcsés szén (pellet és apríték után visszamaradó) légáteresztő képességét 25 és 50 cm-es anyagvastagság mellett (~220 kg/m^3 sűrűség esetén). Meghatároztam, hogy mekkora hajtóerő (N) mellett jön létre a szemcsék elmozduláshoz szükséges légáram.

25 cm szénréteg esetén:

$$P_{gv} = 5.66\, Q_s$$

(a határérték $P_{gv} = 96{,}1$ *N; a* $Q_s = 17{,}4\ m^3/h$*)*

50 cm szénréteg esetén:

$$P_{gv} = 7{,}94\ Q_s$$

(a határérték $P_{gv} = 135{,}98$ *N; a* $Q_s = 16{,}36\ m^3/h$*)*

$$(R^2 = 0{,}8941)$$

E mérések a szemcsék elmozdulásáig folytak. A méréseimmel igazoltam, hogy a légbevezetéssel anyagmozgás létrehozható, de annak határesete, amikor a tömegáram az oxidációs és redukciós terekben az átalakulásokra (lebontásokra) már kedvezőtlen. Ekkor a mechanikus mozgatás válik szükségessé. A mozgatási igényt az oxidációs kúp szögének mérete is befolyásolja. A mozgás irányába (lefelé) tartó erőnek nagyobbnak kell lenni, mint a kúposságból adódó súrlódási erőnek és ekkor az anyag boltozódása is mérsékeltebb.

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutató munkám során különböző eredetű, szilárd biomassza melléktermékek pirolizálásával foglalkoztam laboratóriumi és félüzemi körülmények között. A laboratóriumi vizsgálatokra támaszkodva lett megvalósítva egy innovatív 5 kWe teljesítményű hő- és villamosenergiát (CHP) elállítani tudó kiserőmű, ami jobb hatásfokkal és jobb minőségű termékgázt képes előállítani, mint az azt megelőző technológiai kialakításúak.

Kutatásom egyik célja az volt, hogy az általam, kollégáim és Partnereim által fejlesztett termokémiai berendezés olyan melléktermékekkel legyen képes hatékonyan működni, amiknek minőségi paraméterei nem felelnek meg a klasszikus biomassza termikus hasznosítására létrehozott berendezések üzemeltetéséhez.

Partnereimmel és szakmai vezetőimmel megterveztünk és kiviteleztünk egy olyan egyedi, nagymintás laboratóriumi berendezést és mérőrendszert, ami képes kezelni 500–1500 grammnyi vizsgálati töltetet, valamint rögzíteni képes a folyamat közben a hőmérséklet-, nyomás- és tömegváltozás adatokat az idő függvényében.

A vizsgálatok során kiderült, hogy a pirolízisfolyamatot nagyban befolyásolja a töltetet alkotó szemcsék méretei, valamint az egyes szemcsék sűrűsége, ugyanis az egész és a rész anyag porozitása szoros kapcsolatban áll a folyamatban részt vevő aktív felülettel. A kigázosodási folyamat a hőmérséklet növelésével szintén emelkedett, ami várt eredménynek mondható, de különböző eredetű és porozitású anyagoknál a töltet alján detektált nyomásváltozásból számos következtetést tudtunk levonni.

A laboratóriumi vizsgálatok során kapott eredmények alkalmasak lakossági, félüzemi, üzemi méretű technológiai fejlesztésre, ugyanis a kísérleti anyaghalmaz nagysága (500–1500 gramm) extrapolálható nagyobb léptékre, mivel a halmaz viselkedési formája nagyon hasonló az említett, nagyobb léptékű berendezésekbe táplált töltetéhez.

A megvalósított 5 kWe teljesítményű berendezés segítségével bizonyítottam, hogy az általunk kigondolt technológiai kivitelezés képes fogadni a laboratóriumi vizsgálatok során vizsgált, kedvezőtlen energetikai paraméterekkel rendelkező anyagokat. Emellett bebizonyosodott az is az üzemi mérések során, hogy a pirolízis és redukciós zónába táplált megfelelő mennyiségű levegő, vízpermet kedvező hatással van a reaktorban lezajlódó folyamatokra, valamint a termékgáz minőségére, különös tekintettel a gáz kátránytartalmára.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatómunkám célja az volt, hogy hazánkban és Európában nagy mennyiségben termelődő, máshol nem, vagy csak nehezen felhasználható alapanyagokat – rossz minőségű puhafa és keményfa apríték, kukoricaszár, biogáz stabiliszap, szeparált trágya – laboratóriumi vizsgálatok során meghatározzam azok energetikai paramétereit.

Az analitikai vizsgálatok befejeztével a fejlesztendő félüzemi technológia modell-berendezésének segítségével végeztem vizsgálatokat. Ehhez azonban meg kellett tervezni magát a laboratóriumi reaktort is és annak mérőrendszerét egyaránt. A berendezés laboratóriumi méretekhez képes nagy tömegű (500–1500 gramm) minták befogadására lett alkalmas, mely tömeg a betöltött minta szemcseméretétől és azok sűrűségétől függ. A kísérleti berendezésbe beszerelt érzékelők (K-típusú hőelemek, nyomásmérő, mérlegcella, gázmérő) hazai és nemzetközi mérési etalonokra való visszavezethetőségét biztosítottuk akkreditált kalibráló laboratórium bevonásával. Így a mérések során rögzített adatok a valóságnak megfelelnek. Fontosnak tartom megjegyezni, hogy ilyen típusú, laboratóriumi nagymintás vizsgálatokról szóló publikációt sem a hazai, sem a nemzetközi szakirodalomban nem találtam.

Következő lépésben a kísérleti mérések adataiból származó tapasztalatokra támaszkodva meg lehetett kezdeni a megvalósítani kívánt 5 kWe teljesítményű kiserőmű tervezését. A laboratóriumi kísérletezések azért voltak elengedhetetlenek, mivel már az említett kb. 1-1,5 kg-mos töltet viselkedése kiterjeszthető jóval nagyobb méretre is, így optimalizálni lehetett a méretezést és a költségeket is egyaránt. A félüzemi berendezés tervezésekor cél volt a minél nagyobb hatásfok elérése, valamint a lehető legmagasabb energiatartalmú, de ugyanakkor a lehető legalacsonyabb kátránytartalmú termékgáz előállítása. Ezen eredmények elérésében a reaktorzóna egyedi kialakításának, a termékgáz elvezetési módjának, a rendszerbe a megfelelő helyen és mennyiségben betáplált levegőnek és víznek volt köszönhető. A hagyományos pirolízis által előállított termékgázhoz képest a magasabb fűtőértéket a beinjektált vízből felszabaduló hidrogén adta, az alacsonyabb kátránytartalmat pedig a redukciós zónán keresztüli elszívás biztosítja, hiszen a gázban lévő hosszú szénláncú vegyületek feldarabolódnak és megkötődnek a kialakult nagy porozitású és hőmérsékletű aktív szénrétegnek köszönhetően.

A munkám során megfogalmazott új tudományos eredmények segítséget nyújthatnak gyakorló mérnököknek az ilyen és ehhez hasonló, szilárd biomasszát pirolizálni képes berendezések optimális tervezésében, kivitelezésében. Emellett hozzájárul a környezettudatos, karbonsemleges hő- és villamosenergia termeléshez.

7. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ KIEMELT PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

1. Madár, V., **Bácskai, I**., Dhaundiyal, A., Tóth, L. (2018): Development of biomass based pyrolisis CHP, Hungarian Agricultural Engineering, No 33/2018, pp. 17-23., HU ISSN 0868-7410
2. **Bácskai, I.**, Madár, V., Fogarassy, Cs., Tóth, L. (2019): Modelling of some operating parameters required for the development of fixed bed small scale pyrolysis plant, Journal of MDPI Resources Volume 8, Issue 2, 8020079, ISSN: 2624-8115
3. Dhaundiyal, A., **Bácskai I.**, Tóth, L., Atsu, D. (2019): Analysis of pyrolysis reactor for hardwood (Acacia) chips, Renewable Energy, Vol. 147. pp. 1979-1989, ISSN: 0960-1481 (IF: 5,439)
4. Dhaundiyal, A.; Singh, S.; **Bácskai, I.** (2020): Mathematical Modelling of Pyrolysis of Hardwood (Acacia). Preprints 2020020094 (doi: 0.20944/preprints202002.0094.v1). Preprints c/o MDPI St. Alban-Anlage 66 4052 Basel Postfach, CH-4020 Basel http://www.preprints.org/imprint

Lektorált cikk magyar nyelven

1. Tóth L., Madár V., **Bácskai I.**, Schrempf N. (2017): Biomassza-pirolízis alapú kiserőmű fejlesztése, Magyar energetika, 24. évf. 3. szám 18-23. o. ISSN 1216-8599
2. Madár V., **Bácskai I.**, A. Dhaundiyal, Schrempf N., Tóth L. (2018): Hő-, villamos energia és szén előállítása pirolizálással, Mezőgazdasági Technika 59. évf. III. sz. 2-12. o, ISSN 0026 1890
3. **Bácskai I.**, Madár V., A. Dhaundiyal, Schrempf N., Tóth L. (2018) Biomassza-hulladékok hőbontásának méréstechnikája, Mezőgazdasági Technika, 59. évf. 5. szám 2-12. o. ISSN 0026 1890
4. **Bácskai I.**, Madár V., Tóth L. (2019): Pirolízis berendezés fejlesztését megelőző vizsgálatok, Energiagazdálkodás, 60. évf. 1-2 szám 2-8. o. ISSN 0021-0757