SZENT ISTVÁN EGYETEM

Pirolízisgenerátor hatékonyságának növelése

Doktori (PhD) értekezés

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:	Dr. Tóth László professzor emeritusz, DSc SZIE, Gépészmérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet
Társ-témavezető:	Dr. Schrempf Norbert egyetemi docens, PhD SZIE, Gépészmérnöki Kar, Folyamatmérnöki Intézet

.....	.....
az iskolavezető jóváhagyása	a témavezető jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK 5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK 7
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége 7
1.2. Célkitűzések 7
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS 9
2.1. Biomassza, mint energiahordozó 9
2.1.1. Termokonverzió 9
2.1.2. A pirolízis 9
2.1.3. A gázosítás kinetikája 11
2.1.4. A konverzió folyamatának laboratóriumi modellezése 15
2.1.5. Inert atmoszféra 16
2.1.6. Faszén jellemzői 18
2.1.7. Az alkalmazott eljárások 20
2.2. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése 23
3. ANYAG ÉS MÓDSZER 25
3.1. Vizsgált anyagok 25
3.2. A vizsgálathoz használt műszerek, eszközök 26
3.2.1. Nedvességtartalom mérési módszere 26
3.2.2. Égéshő meghatározásának módszere 27
3.2.3. Elemi összetétel vizsgálati módszere 28
3.2.4. Hamutartalom meghatározás módszere 29
3.2.5. Hamuolvadáspont meghatározás módszere 29
3.2.6. A termékgáz vizsgálatának módszere 30
3.2.7. Az anyaghalmazok hőtechnikai elemeinek mérése 31
4. EREDMÉNYEK 35
4.1. Tömegváltozás intenzitása az idő és a hőmérséklet függvényében 35
4.2. Az anyaghalmaz közegellenállsának hatása a reakciós folyamatra 38
4.2.1. A szemcsés szén gázáteresztő képességének megállapítása 42
4.2.2. Áramlási intenzitás és vonal menti sebesség 44
4.2.3. Alapanyag sűrűségéből származó eredmények 45
4.3. Az új laboratóriumi eredmények felhasználása a félüzemi rendszerben 49
4.3.1. A pirolízisgenerátor kialakításának jellemzése 50
4.3.2. A rendszer leírása 51
4.3.3. Gázszűrő 56

4.3.4. A rendszer hőtechnikai jellemzése (A félüzemű kísérleti berendezéssel végzett vizsgálatok) ... 56
4.3.5. Bemenő anyagok nedvességtartalma ... 61
4.3.6. Porleválasztás a termékgázból ... 62
4.3.7. Gázszűrő kiválasztása ... 62
4.3.8. A szűrő felületének meghatározása ... 63
4.3.9. A nyomásveszteség meghatározása ... 63
4.3.10. Teljesítmény meghatározása ... 63
4.3.11. Mérési eredményekből származtatott teljesítmény értékek ... 65
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK ... 70
6. ÖSSZEFOGLALÁS ... 71
7. SUMMARY ... 72
8. MELLÉKLETEK ... 73
M1: Irodalomjegyzék ... 73
M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk ... 76
M3: Az 5 kWe teljesítményű félüzemi kisérleti berendezés nézeti és metszeti ábrái ... 78
M4: Zsákszűrő tisztítási folyamata ... 83
9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS ... 85

JELÖLÉSJEGYZÉK

Jelölések:

C	szén	$[-]$
CH_4	metán	$[-]$
CO	szén-monoxid	$[-]$
CO_2	szén-dioxid	$[-]$
H	hidrogén	$[-]$
$H_{agáz}$	generátorgáz fűtőértéke	$[J/m^3]$
$H_{atü}$	tüzelőanyag fűtőértéke	$[J/kg]$
H_2O	víz	$[-]$
M	nedvességtartalom	$[\%]$
N	nitrogén	$[-]$
NO_x	nitrogén-oxidok	$[-]$
O_2	oxigén	$[-]$
$q_{gáz}$	generátorgáz térfogatárama	$[m^3/s]$
$q_{tü}$	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	$[m^3/kg]$
A_{szf}	szűrőfelület	$[m^2]$
ΔP_{sz}	szűrő nyomásvesztesége	$[Pa]$
K_c	szűrőszövet állandó	$[1/m]$
η_g	fagáz viszkozitás	$[Ns/m^2]$
$H_{agáz}$	generátorgáz fűtőértéke	$[kJ/m^3]$

$q_{gáz}$	generátorgáz térfogatárama	$[m^3/h]$
$H_{atü}$	átlagos tüzelőanyag fűtőérték	$[kJ/kg]$
$q_{tü}$	tüzelőanyag tömegárama	$[kg/h]$

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

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

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Az elmúlt évtizedekben egyre világosabban körvonalazódott, hogy az emberiség környezetszennyező és energia-pazarló életvitele hosszú távon a természeti erőforrások kimerüléséhez, ökológiai katasztrófához vezethet.

A fenyegető globális problémák- a túlnépesedés, a légköri szén-dioxid szint növekedése, az ózonréteg vékonyodása – kezelésre várnak, amelyet csak nemzetközi összefogással lehet megoldani. Több nemzetközi megállapodás nyomán, mint például a Rio De Janeiro-i egyezmény, ahol általános elveket fogalmaztak meg az erőforrások hasznosításáról, a környezet védelméről, a fenntartható fejlődésről és az egyes országok együttműködésének alapelveiről (Antal, Morten, 1998).

Napjainkban a technológia ugrásszerű fejlődése mellett nemcsak a „hétköznapi" megújuló energiaforrások alkalmazását kell szem előtt tartani (szélenergia, vízenergia, geotermikus energia, napenergia stb.) hanem a különböző ipari folyamatokból származó, mezőgazdaságból, élelmiszeriparból, vagy éppen az emberiség létfenntartásából származó hulladékok, melléktermékek energetikai alkalmazását. Ezen említett anyagok termikus felhasználásra számos technológiát fejlesztettek már ki, melyeket folyamatosan fejleszteni szükséges, mivel adaptálni kell a mindenkori alkalmazási területhez és a rendelkezésre álló alapanyag fizikai/kémiai tulajdonságaihoz (Lettner, et al., 2007).

Legújabb elgázosítási eljárások az égetés és a hőbontás előnyeit kombinálva, a másodlagos környezetszennyező hatásokat minimalizálva, a korszerű hulladékégetőkhöz hasonló beruházási és üzemeltetési költségekkel a jövő alternatív eljárásainak tekinthetők a szilárd hulladékok termikus kezelésében a már kiforrott égetéses technológiával szemben (Hammerer, 2000).

A nagy mennyiségben rendelkezésre álló, erősen vegyes összetételű, többnyire szilárd fázisú melléktermékekből termokémiai konverzió közben éghető gázok szabadulnak fel, melyet felhasználva kogenerációs erőművekben hő-, és villamosenergiát tudunk termelni fenntartható módon.

1.2. Célkitűzések

Munkám célja, hogy az adott téma szempontjából elmélyedjek a rendelkezésre álló szakirodalomban, publikációkban. A széleskörű szakirodalmi kutatás segítségével betekintést nyerhetek a témába 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 meghatározni, hogy egy megvalósítani kívánt CHP erőmű milyen technológiai kialakítást igényel, valamint a megvalósítás előtt egy laboratóriumi méretű kísérleti reaktort megépíteni, aminek segítségével előzetes folyamat-

kísérleteket lehet elvégezni. A reaktortérben lájátszódó folyamatokra vélhetően nagy befolyással bírnak a töltet fizikai kémiai jellemzői, valamint maga a reaktortér kialakítása. A lejátszódó hőbomlási szakaszokat laboratóriumi rendszerben kívánom rögzíteni. Kutatási célom:

- Laboratóriumi nagymintás (500 – 1000 gramm) kísérleti technológia megvalósítása olyan módon, hogy a benne lefutó folyamatok átültethetők legyenek félüzemi szintű kialakításhoz.
- Különböző halmazsűrűségű és tömörségű, főként fás szárú biomassza minták pirolízisfolyamatainak vizsgálata és adatinak rögzítése az idő függvényében, inert gázfűtéssel, különböző kezelési hőmérséklet mellett. Tehát az alapanyagok eltérő fizikai, kémiai és geometriai tulajdonságai miatt (térfogat sűrűség, halmazsűrűség, porozitás stb.) *a rendszerek hatékonyságának javítása, a nyert „energia/alapanyag-tömeg" (J/kg) viszonyában.*

A kezelési hőmérséklet növelésével várhatóan növekszik a hőbontási folyamat sebessége, ami az intezívebb kigázosodásra vezethető vissza. A célom:

- Két eltérő kezelési hőmérsékleten – 400 °C, 600 °C – vizsgált a pirolízis folyamatok rögzítése és elemzése.
- Reakciózóna karakterisztikájának felvétele a tölteten belül.
- Különböző halmazsűrűségű (porozitású) töltetek reakció-intenzitásának vizsgálata

A szakirodalmi és a laboratóriumi kutatást követően tudok arra következtetni, hogy milyen típusú technológiai megoldáshoz szükséges fordulni, azt esetlegesen továbbfejleszteni, hogy az a lehető legalacsonyabb kátránytartalmú gázt legyen képes előállítani, ami a CHP kiserőmű minél hosszabb futásidejét biztosítaná.

A laboratóriumi vizsgálatok tapasztaltainak megfelelően üzemi léptékű berndezés létesítése, validációs vizsgálatok elvégzése.

- A magas hőmérsékletű (600 °C – 800 °C) kezelési folyamat, valamint a töltetben való kátrány lekrakkolása biztosítaná a magas tisztaságú termékgázt.
- *A hatékonyság ellenőrzése a félüzemi kísérleti reaktorban*, amelynek egyedi geomatriai méretei (oxidációs/redukciós kúp jellemzői) szintén hozzájárulnak a magas tisztaságú, hatékonyabb gáz termeléséhez, amit tovább fokozhat a kombinált gázút biztosítása és várhatóan a több ponton adagolt táplevegő is.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Értekezésem második fejezetében a hazai és nemzetközi szakirodalom segítségével bemutatom a közleményekben megjelent laboratóriumi, kísérleti folyamatokat és hivatkozom azokra, amelyekre támaszkodva megvalósíthattam egy új, egyedi mérési technikát és módszert, amit eddig sem hazai sem nemzetközi szakirodalom nem közölt.

2.1. Biomassza, mint energiahordozó

A biomassza az egyetlen olyan energiaforrás a földön, amely a növekedése során kémiai kötésben tárolni képes a napenergiát. E tárolt energia a biomassza termokémiai átalakításával felhasználható.

A hatékony energetikai felhasználásához megfelelő technológiai megoldások szükségesek, úgy, mint a pirolízis, gázosítás, plazmatechnológia, vagy ezek kombinációja.

A gázosítás az egyik ígéretes termokémiai átalakítási technológia, amely a biomasszát éghető gázokká alakítja, amelyet termékgáznak neveznek. A gáz fő alkotóelemei a hidrogén, szén-monoxid és metán. A tisztaságtól függően ez a gáz felhasználható a hőtermeléshez, a belső égésű motorban és az üzemanyagcellában az áramtermeléshez, vagy átalakítható folyékony szénhidrogén-üzemanyaggá (Asadullah, 2014).

Az energetikai célú hasznosításon szűkebb értelemben a villamos- és a hőenergiatermelést értjük; mindemellett a mechanikai energia előállítása, mint munkavégzésre fogható energiatípust is célszerű idesorolni, mert egyre inkább előtérbe kerülnek az erőmű-energetikai hasznosítás mellett a bio-üzemanyagok.

A pirolízis, a gázosítás és ezek kombinációi lehetőséget adnak arra, hogy a szilárd biomasszából gáz halmazállapotú energiahordozót (fagázt) állítsunk elő. Gázosításnál a szilárd végtermék a salak és a hamu (Szuhi, 2009, és 2013).

2.1.1. Termokonverzió

Termokonverziós technológiáknak (termokémiai lebontás) nevezzük mindazokat a termikus kezelési eljárásokat, amelyek során a biomassza olyan kémiai változásokon megy át, aminek következtében az egyes alkotóelemei felbomlanak, majd ezek az illékony vegyületek kilépnek az anyagból.

2.1.2. A pirolízis

A pirolízis, olyan termokémiai lebontási folyamat, mely során organikus anyagokat magas hőmérsékleten, oxigénhiányos környezetben kezeljük. A pirolízisfolyamatban rendszerint magas nyomást és magas hőmérsékletet alkalmazunk. A pirolízis a görög pyr 'tűz' és ysis „elkülönít” szavakból ered. A szerves anyagok termokémiai bontása endoterm folyamat. Pirolízissel mindenféle szerves anyagot fel lehet dolgozni: növényi eredetű hulladékot, például lágyszárú és fás növényi részeket, fűrészport, fahulladékot, maghéjat, szalmát, korpát, energiafüvet és állati eredetű hulladékokat, úgymint csontlisztet és húsliszetet. A termék a pirolízisgáz és a széntartalmú melléktermék, a bioszén.

A hőbontás során a szerves hulladékból, pirolízisgáz, folyékony termék (olaj, kátrány, szerves savakat tartalmazó bomlási víz) és szilárd végtermék (piroliziskoksz) keletkeznek. Ezek összetétele, aránya és mennyisége a kezelt hulladék összetételétől, a reaktor üzemi viszonyaitól és szerkezeti megoldásától függ.

A pirolízálást a gáz a sokféle alkalmazása ellenére számos technológiai problémája miatt még fejleszteni szükséges. A folyamat során kátrány, por részecskék és mérgező gázok (ammónia, a kéngázok stb.) elkerülhetetlenül keletkeznek, amelyek súlyos problémákat okoznak a későbbi alkalmazásokban. Ezért a termékgázgáz tisztítása elengedhetetlen a további felhasználás előtt.

A hőbontás során döntőek a kémiai átalakulás és a reakció-feltételei. Ide tartoznak elsősorban a hőmérséklet, a felfűtési idő és a reakcióidő, továbbá a szemcse-, ill. frakcióméret, valamint az átkeveredés mértéke, hatékonysága. A végtermék összetételének és részarányának alapvető meghatározója a hőmérséklet. A hőátadástól függ a felfűtési sebesség, amely szintén hat a termékek összetételére, amit a 2.1 számú táblázat mutat be (Barótfi, 2000a).

2.1. táblázat Technológiai paraméterek (Valyon, 2010)

		Olaj	Szén	Gáz
Gyors pirolízis	Közepes hőmérsékelt (400-500 °C) rövid tartózkodási idő, (< 2 s) gyors hőmérséklet emelés(1000-10000°C/s)	75	12	13
Szenesítés	Alacsony hőmérséklet (300-500 °C) hosszú tartózkodási idő (több óra, nap)	30	35	35
Gázosítás	Magas hőmérséklet (> 700 °C) változó, de jellemzően hosszú tartózkodási idő	5	10	85

A végtermék elsősorban energiahordozóként (fűtőgáz, tüzelőolaj, koksz), ritkábban vegyipari másodnyersanyagként (pl. a gázterméket szintézisgázzá konvertálva metanol előállításához) és esetenként egyéb célokra (talajjavítás szilárd, szénben dús maradékkal; fakonzerválás vizes maradékkal; granulált salakolvadék építőipari adalékanyagként stb.) hasznosíthatók. A reaktorok a fűtési mód szerint lehetnek: közvetett (reaktorfalon keresztül, ill. cirkulációs közeg segítségével) és közvetlen fűtési megoldásúak. A közvetlen fűtésű reaktorokban a pirolízis és a hőenergiát szolgáltató parciális égés közös térben megy végbe. A reaktorfalon keresztüli hőközlés egyrészt rossz hatásfokú, másrészt az ilyen reaktorok érzékenyek a tűzálló falazat minőségére, viszont egyszerű üzemeltetésűek és jól szabályozhatók. A cirkulációs közegű hőátadás jó hatásfokú, ellenben bonyolultabb az üzemeltetése. A legjobb hőátadási viszonyok a közvetlen fűtési módszerrel érhetők el, viszont ilyenkor megnő a gáztermékek szén-dioxid-, víz-és nitrogén-oxid-tartalma és körülményesebb a folyamatszabályozás is.

A reaktorban feldolgozott anyag és a pirolízisgázok egymáshoz viszonyított áramlási iránya szerint megkülönböztetünk egyen-, ellen-és keresztáramú eljárásokat. A hőbontás legnagyobb előnye az, hogy termékei értékesíthető alifás és aromás szénhidrogének, továbbá légszennyező hatása jelentősen kisebb, mint a hulladékégetésé (Barótfi, 2000b).

Példa arra, hogy a pirolízis technológiája kevésbé légszennyező:

1 tonna fa ($C_6H_{12}O_6$) elégetésekor keletkező CO_2 (tonna).

- Reakcióegyenlet→ $C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O$.
- 1 mol $C_6H_{12}O_6$ az 180 g, tehát 1 tonna az 5555, 5556 mol.
- Mivel 1 mol $C_6H_{12}O_6$-ból keletkezik 6 mol CO_2 ezért → 5555,5556*6= 33333,333 mol, ami (3333,333 mol * 44 g/mol) *1, 46 t CO_2 keletkezésének felel meg.*

1 tonna fa pirolizálásakor keletkező CO_2 (tonna)

- Mivel oxigénszegény a környezetben a reakcióegyenlet:
- $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3\ CO_2 + 3\ CH_4$,
- Az eredmény ekkor: csupán *0,73 t CO_2 keletkezik.*

Természetesen ez csak akkor lehet igaz, ha a gázból a káros összetevőket kiszűrjük.

2.1.3. A gázosítás kinetikája

Az eljárás legfőbb célja a hulladék ártalmatlanítása mellett a legnagyobb gázkihozatal, amihez az optimális energetikai hatásfok elérése társul. A gázosítás során előállított szintézisgáz hidrogénben és szén-monoxidban gazdag gázelegy, ami a gázosító közegtől függően más, energetikailag inert összetevőket is tartalmazhat. A leggyakrabban előforduló éghetetlen komponens a szén-dioxid és a vízgőz, amik a reaktortérben részt vesznek a kedvező reakciók lejátszódásában, de a reaktort elhagyva ballasztként viselkednek. A gázosító közeg jelentősen befolyásolja a keletkező szintézisgáz kémiai összetételét és energiatartalmát, valamint az átalakítás hatékonyságát. A gázosító közeg segít lebontani a szilárd karbont és a nagyobb molekulatömegű szén-hidrogéneket, ami eredményeként hidrogén és szén-monoxid szabadul fel (Young, 2010). Leggyakrabban levegőt, vízgőzt, vagy tiszta oxigént alkalmazunk, de szén-dioxid és oxigén megfelelő arányú keveréke is kedvező eredményt hozhat (Basu, 2013).

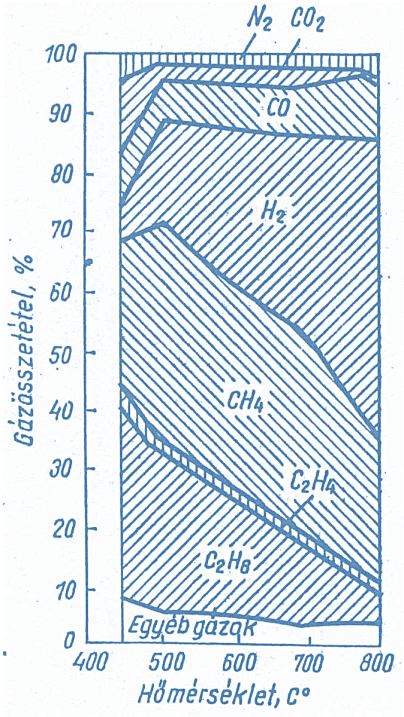
A gázosítás önállóan nem létező technológia, mert az erre a célra kialakított reaktorban pirolízis és égetési zóna egyaránt kialakul. A megnevezés mégis helytálló, mert a lejátszódó reakciók termodinamikai egyensúly esetén, a sugárzási veszteségeket leszámítva, önfenntartó folyamatot eredményeznek (Reed, Das, 1988).

Termodinamikai egyensúlyi állapotban a rendszer nem hűl és nem melegszik, tehát nem igényel hőbetáplálást (pirolízis), vagy hőelvonást (égetés), valamint éghető szintézisgázt állít elő. A gázosítás négy lépcsőben valósul meg, ami a reaktorban eltérő hőmérsékletű és sztöchiometriai arányú zónákat eredményez. A zónák egymáshoz való viszonyát a reaktor típusa határozza meg (Young, 2010). Anyagáramlási megközelítésben megkülönböztetünk alsó- és felső kiáramlású reaktorokat, ami a hulladék és a szintézisgáz egymáshoz viszonyított áramlási iránya alapján egyen- és ellenáramú lehet. A zónák relatív elhelyezkedése és az áramlási irány befolyásolja a keletkező szintézisgáz kémiai összetételét, valamint hőmérsékletét (Basu, 2013).

A tüzelőanyagok pirogén bomlása bonyolult fizikai – kémiai folyamat, amely párhuzamos és egymást követő reakciókból és fizikai folyamatokból tevődik össze (Lavrov, 1965). A szilárd tüzelőanyagok pirogén bomlása három (különböző természetű) folyamatból áll. A gyakorlatban ezek a folyamatok egymásra épülve, szoros összefüggésben állnak egymással, ezért rendkívül nehéz elválasztani és külön-külön vizsgálni az egyes részfolyamatokat, azok hatását a gázosításra, illetve gázosíthatóságra. Az első fázisban a tüzelőanyag felmelegítése, azaz a hőközlés időszükséglete fékezi a termikus bomlást, befolyásolva annak eredő sebességét. A kísérletek azt mutatták, (Lavrov, 1965) hogy a termikus bomlás a tüzelőanyag-fajtától függően 100 - 400 °C között kezdődik és 1100 - 1200 °C között fejeződik be.

A tüzelőanyag 100 - 110 °C hőmérsékletig csak szárad, a 100…250 °C hőmérséklet-intervallumban kezdődik a legfiatalabb tüzelőanyagok (lignit, fa, barnaszén) bomlása. E termékek elsősorban széndioxidot és szénmonoxidot tartalmaznak. Ezt követően 250 - 270 C° fölé hevítve, az illókban szénhidrogének, kátránytermékek, különböző oxigéntartalmú vegyületek, köztük ecetsav és metilalkohol (lignit és fa bomlásánál) jelennek meg (Németh, 1998). Az illótartalom nagy része a fiatal tüzelőanyagokból 270 - 450 °C között, míg a régebbi eredetű tüzelőanyagokból 350 - 500 °C körül válik ki. 500 - 580 °C-on a kátránykiválás megszűnik. A tüzelőanyag további hevítésekor a bomlás csak gázkiválással jár együtt.

A tüzelőanyag felmelegítési hőmérséklete nem csak a felszabaduló illóanyag mennyiségére, de összetételére is hatással van. Az 2.1 ábra mutatja, hogy hogyan változik a gáz összetétele a pirolízis folyamatában a hevítési hőmérséklet függvényében.



2.1. ábra A gázösszetétel változása a hőmérséklet függvényében (Lavrov, 1965)

Ha a tüzelőanyag-részecskék felhevítési sebessége megfelelően szabályozott, és a keletkezett gőz – gáz termékek a reakció zónából elvezetésre kerülnek, akkor a bomlási folyamat úgy irányítható, hogy egy előre meghatározott összetételű gáz keletkezzen. Aljtsuler és munkatársai (Lavrov, 1965) kísérletileg kimutatták, hogy a szilárd tüzelőanyag szerves részének termikus bomlása – inert gázközegben – nem függ a nyomástól és azt elsősorban a hőmérsékleti feltételek határozzák meg.

Ezen megállapítás alapján kísérleteink során a kiválasztott tüzelőanyagokat részletesen vizsgáljuk.

A tüzelőanyag pirogén bomlását a sztöchiometrikus egyenlethez hasonló anyagmérleg-egyenlet jellemzi (Lavrov, 1965):

Tüzelőanyag = szilárd maradék + kátrány + víz + gáz + Q,

ahol: Q a tüzelőanyag bomlási hője.

A tüzelőanyag bomlási hője lehet pozitív is és negatív is. A nagy oxigéntartalmú tüzelőanyagok ilyen exotermikus hatása igen jelentős, a fa bomlásakor pl. (180 °C-on) mintegy 280 kcal/kg. 15%-nál kisebb oxigéntartalom mellett a bomlás hőeffektusa igen kicsi.

A termékgáz minőségének, illetve a reakciós folyamatok intenzitásának növelésére az alábbi lehetőségek kínálkoznak: (Bridgwater, 1999; Parikh, 1988; Reed, 1998; Venselaar, 1983; FAO, 1986)

- a reakciós zónák hőmérsékletének emelése,
- a befúvási sebesség növelése,
- a tüzelőanyag reakciós felületének növelése aprítással,
- reaktortér nyomásának növelése,

- a reagáló gáz koncentrációjának növelése
- a reagáló gáz és a tüzelőanyag intenzív keveredésének biztosítása.

Ezekből következik, hogy a hagyományos fizikai szűrés technikailag és környezetvédelmi szempontból nem életképes eljárás a gáz tisztításához.

A reakciós zónák hőmérséklete:

A hőmérséklet emelésével gyorsan nő a kémiai reakciósebesség, melynek következtében, ha a folyamat kinetikus, vagy köztes tartományban folyik, akkor lehetséges a folyamat intenzitásának növelése.

A hőmérséklet többféle módon emelhető:
- a levegő előmelegítésével
- a befúvott levegő oxigénnel történő dúsításával,
- a reaktortér hőveszteségének csökkentésével.

A reakció sebességének változtatása, növelése

Az egyik legkedvezőbb megoldás a folyamatok felgyorsítására. A befúvási sebesség jelentős mértékben növeli a gázosítás intenzitását anélkül, hogy a gáz minősége és a gázosítás hatásfoka romlana. A sebesség növelésével a tartózkodási idő csökken, a gáz minősége mégis változatlan marad. Ennek oka, hogy a zónahőmérsékletek emelkednek, s emiatt a redukció feltételei kedvezőbbek, ugyanakkor meggyorsul a primer szén-monoxid kihordás az oxidációs zónából.

Az anyagok felülete

A szemcseméretek csökkentésével nő az adott anyagtömeg felülete és ezzel az égés és a gázosítás intenzitása is. Oka, hogy az egységnyi térfogatra számított reakciófelület nagyobb.

Az anyagok sűrítését, préselését (pellettálását) elsősorban a tárolási és szállítási célokat szolgál, de a pirolízis folyamat kinetikájára is jelentős hatással van. Kezdetben kisebb a a fajlagos felület, de koverzió során a szemcsék szétesnek és megnő az aktív felület (Tóth és tsai., 2019).

Nyomás a reatortérbez

A konverzió kezdeti szakaszán a nagyobb lebomlási arány miatt, mivel még az anyag porozitása jelentősen nem változott, nő a nyomás és ezzel a gáz sűrűsége is. Ez kisebb áramlási sebességet jelent, tehát nő a tartózkodási idő, ami rövidebb reakciózónákat eredményez. Ez kihatással van a berendezések méreteire. Várhatóan a gáz fűtőértéke nagyobb lesz, viszont - az oxigén kompresszió szükségessége miatt - magasabb beruházási költség jelentkezik (Dhaudiyal et al., 2020).

A konverzió befolyásolása

Az égés és gázosítás folyamataiban a legfőbb befolyásoló anyagok az oxigén és a vízgőz. A levegőbefúvás, vagyis a reakcióhoz szükséges oxigéndúsítás hatására növekszik a reakció sebesség és hőmérsékletemelkedés is bekövetkezik (de Wild, 2011).

Az anyagok nagyobb pórustérfogatának hatására változik a keletkező gáz összetétele, amelyet befolyásol reaktorok kialakítása, illetve azok rendszere. A keletkezett gázösszetételt a 2.2 táblázat adatai szemléltetik (Németh, 1998).

Jelentős eltérés a kátrány tartalomban mutatkozik, amely befolyásolja a gáz felhasználhatóságát, valamint tisztításának technológiai igényét, ezáltal a beruházási költségeket is. A keletkezett gázok fűtőértékei kis százalékban térnek el egymástól, azaz a termékgáz ez irányú minőségét a tüzelőanyagok fajtája és a technológiák számottevően nem

befolyásolják. Viszont a tüzelőanyag energitartalma, a fizikai jellemzői jelentős hatással vannak van a termékgáz minőségére (Németh, 1998, de Wild, 2011).

A gáz minősége és összetétele

A reaktorból kiáramló gáz minősége a számos alkalmazása ellenére fontos technológiai kihívások miatt még mindig fejlesztés alatt áll. Az olyan szennyeződések, mint a kátrány, a salak részecskék és a mérgező gázok, beleértve az ammóniát, a sósavat és a kéngázokat, amelyek elkerülhetetlenül keletkeznek, problémákat okoznak a későbbi alkalmazásokban. Ezért a termelőgáz tisztítása elengedhetetlen a felhasználás előtt. Önmagában a hagyományos szűrés nem megfelelő eljárás a gáz fizikai tisztításában (Dhaundiyal et al,. 2019, 2020).

A katalizálás felhasználható a forró gáz tisztításához, ez az egyik legnépszerűbb technológia megoldás. A katalizátorágy a kátránymolekulákat gázzá reformálhatja, a mérgező gázokat és por részecskéket lebontja vagy adszorbeálja. A hagyományos katalizátoroknak számos kritériumot teljesíteni kell.

(Asadullah, 2014) a különféle gáztisztítási módszerek előnyeit és hátrányait kritikusan elemezte, és arra a következtetésre jutott, hogy a reakcióágyon végzett forró gáz katalitikus tisztítása a legéletképesebb lehetőség a tiszta termelőgáz üzemi előállítására

2.2. táblázat Gázosító rendszereknél az átlagos gázösszetétele eltérő tüzelőanyagok esetén

	Gázosító berendezés típusa		
	Felső elszívású	Alsó elszívású	Átáramlásos, vagy keresztül szívó
Alkalmazott tüzelőanyag (10-20% nedvességtartalom)	fenyő faapríték	kemény faapríték	faszén
Gázösszetétel (% nedves bázis)			
hidrogén	8-14	12-20	5-10
szén-monoxid	20-30	15-22	20-30
metán	2-3	1-3	0,5-2
szén-dioxid	5-10	8-15	2-8
nitrogén	45-50	45-55	55-60
oxigén	1-3	1-3	1-3
kátrány (g/m^3)	2-10	0,1 – 3	≤0,3
fűtőérték (MJ/m^3)	5,3 - 6	4,5 – 5,5	4 – 5,2

A redukciós zóna (katalizátorágy) egyrészt a kátránymolekulákat gázzá reformálhatja, másrészt mérgező gázokat és részecskéket lebontja, vagy adszorbeálja és ezzel tiszta gáz keletkezik. Kereskedelmben kapható katalizátorokkal történő lebontás vizsgálatánál arra akövetkeztetésre jutottak, hogy a forró gáz katalitikus tisztításához a legéletképesebb lehetőség a tiszta termelőgáz reaktoron belüli tisztítása, a káros összetevők lebontása (de Wild P., 2011).

2.1.4. A konverzió folyamatának laboratóriumi modellezése

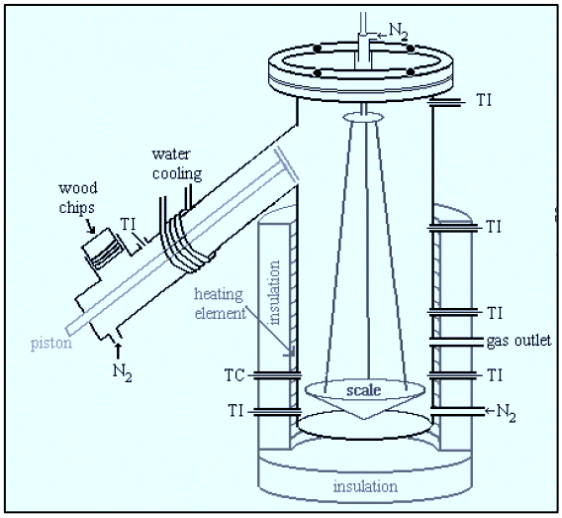
A szakirodalomban számos kísérleti eszközt ismertté tettek, melyekkel a pirolízis vizsgálatokat félüzemi, vagy üzemi szinten elvégezték. A beszámolókban a meglehetősen költséges berendezések legtöbbjénél a fa és lágyszárú tüzelőanyagok alkalmazására nem tértek ki (Pokol, 1998; Henriksena, 2006). Nem lett ismeretes a hamuolvadási hőmérséklet miatt bekövetkező salakosodás nagyfokú kockázatot jelent a berendezés élettartamára (Gronli, 2002), kísérleti modellrendszer építése szükséges.

A faaprítékok pirolízis idejét két különböző módszerrel és mérőberendezéssel vizsgálták. Az egyik megoldás egy 100 kW-os kísérleti berendezésben végzett méréssorozat, melyben száraz és nedves faaprítékot juttattak be különböző hőmérsékletű faszén ágyra. A mérés során a pirolízis időt a bejuttatás idejétől mérték a teljes elszíneződésig. A méréssorozat jellegénél fogva számos nehézséget vetett fel, ilyenek:

- a tűzágy hőmérsékletének és egyenletes eloszlásának bizonytalansága,
- a bejuttatott tüzelőanyag egyenletes eloszlatása a tűzágyon,
- a vizsgálati minta összekeveredése a faszén ágyban.

A felsorolt méréstechnikai hibák miatt a mérési eredmények nagyfokú szórást mutattak, ezért a *vizsgálati módszer adaptálását nem tartottam megfelelőnek.*

A vizsgálatok elvégzésére kidolgozott másik megoldás egy Macro TGA elnevezésű, speciális kialakítású termikus mérleg, melyben pontosabb vizsgálatokat lehetett elvégezni, de a megvalósítása költséges. (2.2 ábra)



2.2. ábra Kísérleti makro termikus mérleg (Gronli, 2002)

A kísérleti generátort úgy alakították ki, hogy a reaktorteret egy külső, fűthető köpennyel vették körbe, melynek fűtése szabályozható. A reaktortér alsó részében egy függesztett mérleget helyeztek el a tömegcsökkenés mérése céljából. A tüzelőanyag bejuttatását egy, a felső részen kialakított dugattyúval oldották meg. A méréshez biztosítani kellett az oxigén mentes környezetet, ezért a reaktor különböző pontjain nitrogén bevezetésére alkalmas furatokat alakítottak ki.

A mérőrendszer jellemzői:

- csak kismintás (1 gramm) vizsgálatokra alkalmas, a struktúrák hatása nem mérhető,
- jól szabályozható hőmérséklet tartományok,
- a mérleg (függesztett) mérési hibája az anyag beejtése és a nitrogén befúvás következtében nagy,
- a mérőkészülék kialakítása rendkívül költséges.

A rendelkezésre álló szakirodalom gazdag a pirolizáló/gázosító laboratóriumi mérésekben. Ezek a vizsgálati módszerek kimutatják, hogy különböző hőfoklépcsőkön milyen fokú kigázosodás, illtve exoterm, vagy endoterm folyamat megy szimultán végbe.

Ennek elemzése során fogalmazódott meg az az ötlet, hogy szükséges lenne egy olyan termogravimetrián alapuló berendezést és hozzá tartozó mérési módszert megalkotni, ami az adott halmazszerű minta strukturális állapotának változását képes rögzíteni. E rendszer megalkotása és az általa mért adatokból származó eredmények tudományos eredményeim szerves részét képezik.

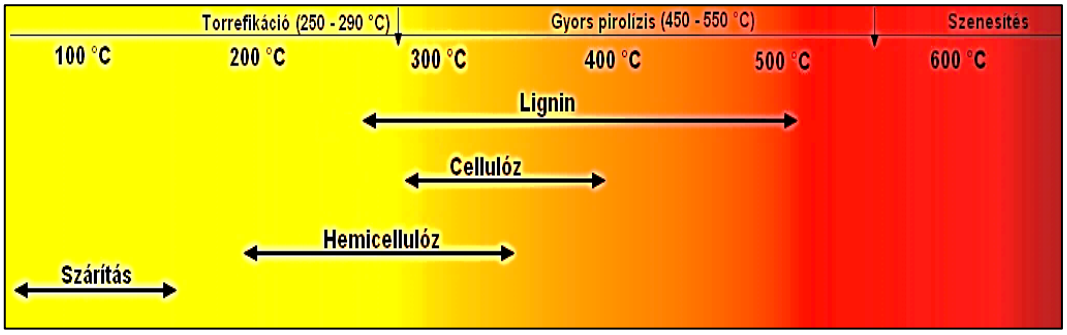
2.1.5. Inert atmoszféra

A bimasszák konverziójához meg kell ismerni az oxigénmentes környezetben végbemenő karbon reakciókat, valamint a keletkezett gáz- és szilárd részek fő- és melléktermékeit.

A szilárd biomasszák gázosítása során a döntő folyamat a karbon reakciója, hiszen:

- e tüzelőanyagok elemi összetételének legnagyobb részét a karbon adja,
- a karbon termokémiai reakciója a nagy hőfelszabadulással járó és hosszú folyamat. A folyamatot, a teljes reakció lefolyását (pl. intenzitását) ez a szakasz határozza meg (Lavrov, 1965).

A fa összetett makromolekulás rendszer, amely hő hatására rendkívül bonyolult kémiai és fizikai változásokon megy keresztül (de Wild, 2011). (Lásd 2.3 ábra)



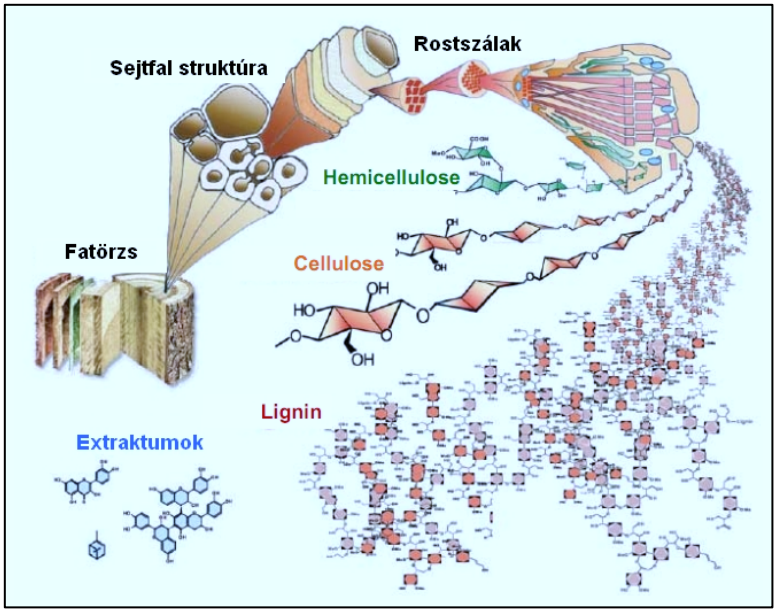
2.3. ábra Lignocellulózok bomlási hőmérséklet tartományai (de Wild, 2011)

Az oxigén mentes, ill. szegény atmoszférában lejátszódó hőbomlás a pirolízis. A fa komponensei közül először a hemicellulóz, azután a cellulóz és végül a lignin bomlik le (Kovács, 1975).

A reakciók belső- és külső tényezőktől függenek (Németh, 1998):

- belső tényezőnek tekintjük az anyag kémiai és fizikai „felépítését”, azaz a belső jellemzőit,
- a külső tényezőket a technológiai jelenti (a hőmérséklet, a nyomás, a rendszert körülvevő atmoszféra stb.).

A fa szerkezeti és kémiai felépítését a 2.4 ábra szemlélteti.



2.4. ábra A fa szerkezeti és kémiai felépítése (de Wild, 2011)

A komplex rendszer bomlását a legjobban az anyag tömegcsökkenésének mérésével, valamint a lejátszódó folyamatok hőeffektusának meghatározásával lehet értékelni (Blasi, 2000; Lavrov, 1965).

A folyamat ~400 – 500 °C-on intenzív, miközben a fából gáznemű termékek, elsősorban CO_2, CO, H_2, CH_4 és egyéb szénhidrogének, valamint elszenesedett maradékok keletkeznek (Németh, 1998).

A termékek súlyaránya (Lugosy, 1976) szerint függ a faanyag összetételétől, az alkalmazott technológiától, valamint a hőmérséklettől.

Bükkfa pirolízisénél az átlagos gázösszetétel (Sjöström, 1981):

- 21% fagáz,
- 35% faecet,
- 9% kátrány,
- 35% faszén.

A lepárlás során a gáz átlagos összetétele:

- 52% szén-dioxid,
- 34% szén-monoxid,
- 10% metán,
- 2% etén,
- 2% hidrogén.

A legtöbb szakirodalmi forrás szerint a fa, faszénné alakulásának egyszerűsített reakcióegyenlete (Lavrov, 1965; Antal, 1998; Kroll, 1943; Milligran, 1994; Shafizadeh, 1985 stb.):

$C_{21}H_{32}O_{14}$	----->	C_7H_4O	+	9 CO	+	5 CH_4	+	4H_2O
'fa'		faszén		szén-monoxid		metán		víz

Az inert (oxigén szegény, ill. oxigén mentes) atmoszférában végbemenő termikus bomlások reakcióegyenleteit főként közelítéssel és eltérő egyenletekben publikálták.

McKendry (2002) szerint ekkor a gázosítás technológia alap összefüggései:

$C + ½ O_2 \leftrightarrow CO$ - parciális oxidáció,

$O + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$,

$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$.

Az egyenletekből látszik, hogy a reakciósor az inert atmoszférában az alapanyagban található oxigén tartalom felhasználásával kezdődik, majd ezt követően a hőmérséklet függvényében a tüzelőanyag nedvességtartalma lép reakcióba a keletkezett szén-monoxiddal, melynek eredménye képen hidrogéngáz és metán keletkezik.

2.1.6. Faszén jellemzői

Mivel a munkám során kapott bioszén mintákat nem főtermékként, csupán köztes-, vagy melléktermékként kezeltem, ezért a méret szerinti csoportosítástól eltekintek.

Hiller (1988) szerint az átlagos minőségű faszén összetétele az alábbi:

- nedvességtartalom: 2-4%,
- illóanyag tartalom: 18-23%,
- széntartalom: 74-81%.

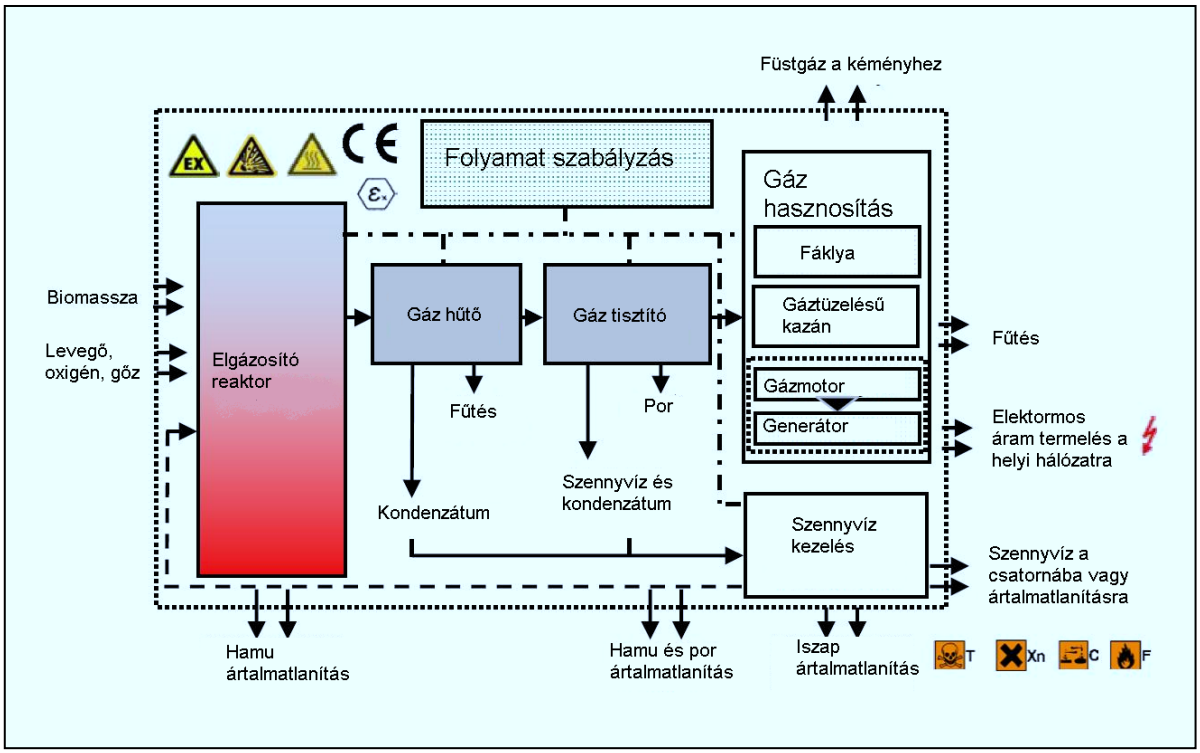
A biomasszák pirolízálásának lehetősége a kapcsolt hő- és energiatermelésben

A kis és közepes teljesítményű kapcsolt hő- és energiatermelő *rendszereknek (CHP) kedvező* **a** *villamos hatásfoka, ezért* a biomassza gázosítási eljárások igen ígéretes technológiáknak számítanak a *decentralizált energiatermelésnél* (Demirbas, 2004; Parikh, 1988; Rajvanshi, 1986).

A 2.5 ábra egy átlagos elgázosító üzem elrendezését láthatjuk az alrendszerek feltüntetésével. Az ábra segítségével áttekinthetők az erőműben zajló folyamatok (Demirbas, 2004).

A tüzelőanyagot általában egy légzsilipen keresztül juttatják a gázgenerátorba (ez alól csak a nyitott rendszerű elgázosító a kivétel). A tüzelőanyag a gázgenerátorban alakul generátorgázzá.

A szárítás, a pirolízis, az oxidáció és a redukció folyamatai a gázgenerátorban vagy ennek kiegészítő egységeiben zajlanak.



2.5. ábra Egy biomassza üzemű kapcsolt energiatermelő egység sematikus ábrája (https://www.holz-kraft.com/)

A generátorgáz az elgázosítót nem kivánatos anyagtartalommal és hőtartalommal hagyja el. A generátorgáz érzékelhető hője adja a folyamat fenntartásához szükséges belső hőmennyiséget, a további hőmennyiség elvonható. Végül a gáz egy száraz (meleg) és/vagy nedves tisztító- és/vagy hűtőberendezésen halad keresztül, hogy kielégítse a gázhasznosító egységek (gázmotor, gázturbina, mikro-gázturbina, vagy akár üzemanyagcella) által támasztott tisztasági követelményeket.

Gázosítás folyamata (FAO, 1986):

- gázosító berendezés,
  - szárítási zóna,
  - pirolízis zóna,
  - égési zóna,
  - redukciós zóna,
  - hamu zóna,
- gáztisztítás (por és kátránymentesítés),
- gázhűtés,
- végfelhasználás.

A komplex pirolízis rendszerben a lebomlását a legjobban az anyag tömegcsökkenésének mérésével, valamint a lejátszódó folyamatok hőeffektusának meghatározásával lehet értékelni. Ezeknek rendkívül kiterjedt elméleti és műszerfejlesztési célú kutatási programjai vannak, de a termokémia tudományterülete még számos megoldatlan feladatot előtt áll.

A gázosító berendezésben lezajló reakciók első fázisa a száradás, amely a 100-150 °C-os hőmérsékleti zónában történik. Ez a gázosító berendezés tüzelőanyag tartályának alsó részén helyezkedik el.

Ezt követi a pirolízis zóna, amely a reaktor felső egyharmadában található és amelyben a tüzelőanyag felmelegedése és az illótartalom elsőlépcsős kigázosodása történik. Ezen zóna hőmérséklete optimális esetben 150-600 °C-os, azonban a tüzelőanyag nem megfelelő bolygatása esetén az égési zóna „feléghet" akár ide is, amely ekkor elérheti a 700-900 °C-t is. Az anyagok jellemzői alapvetően meghatározzák a pirolízis berendezés kivitelét és működési módját. Ilyenek a szemcsézettség mértéke, a belső összetétel, a sűrűség (de Wild, 2011).

A reaktor alsó harmadában a redukciós- és hamu zóna helyezkedik el, melynek mozgatásáról folyamatosan kell gondoskodni. A felületen keletkező hamut el kell távolítani és meg kell akadályozni a salak összeállását.

A légbevezetés hatására a pirolizálás utolsó részében fontos reakciók zajlanak a gáz minősége szempontjából. Itt fontos az arányok betartása: az oxidációs és a redukciós tér hőmérséklete, a kedvező értékek fenntartása. A rendszerek szabályozása ezek függvényében jól befolyásolható.

A gáztisztítás egy igen összetett és bonyolult kémiai- és mechanikai eljárás, amelyben elsősorban kátrány-mentesítik a termékgázt.

Ezt követi a hűtés, amely során a 300-400 °C-os termékgázt általában hidegvizes mosón engedik keresztül és választják le belőle, az esetlegesen még benne lévő szilárd szennyeződéseket is.

A rendszerhasználat igen jelentős eleme a hatékonyság, ami arra ad választ, hogy egységnyi mennyiségű alapanyag mekkora energiatermelést tesz lehetővé (Di Blasi, 2001; Kaupp, 1984; McKendry, 2002; Parikh, 1988).

2.1.7. Az alkalmazott eljárások

A gázosítás legfőbb alaptípusai Szuhi (2009) és Young (2010) szerint:

A Schwel-Brenn (Siemens)-, a Lurgi-, a Noell- és a Babcock eljárások.

A gázosítás előnyeit is megfogalmazták:

- a nagymolekulájú szénhidrogének, főként az ártalmas klórtartalmú vegyületek nagyhőmérsékletű lebontása, a dioxinok és furánok redukáló atmoszférával gátolt képződésével,
- salakolvasztásos eljárásnál az üvegszerű salak-granulátum előállításával (nehézfémek megkötésével) a szilárd maradékok másodlagos környezet- szennyező hatásai minimalizálhatók, egyúttal könnyebben hasznosítható végtermék nyerhető ki (hasonlóan a salak-olvasztásos égetéshez),
- olyan tiszta gáztermék állítható elő, amely sokoldalúan hasznosítható.

A gázosítás hátrányai a jellemzésük szerint:

- a gázosítás során keletkező salakmaradék hasonló összetételű a hagyományos égetőkéhez,
- az üzem olyan hulladékokat igényel a hatékony működéshez (papír, fa, műanyag, ételmaradékok), amelyek éppen az anyagában történő hasznosítás, valamint a fermentálás legjobb alapanyagai, előfordulhat, hogy a hulladékok újrahasznosításával több energiát takarítunk meg, mint amennyit a gázosítást (pirolízist is beleértve) követő szintézisgáz hasznosítása során nyerünk.

Egyéb speciális jellemzők:

- CO_2 helyett elsősorban CO képződik, ami gázmotorban, vagy turbinában hasznosítható,
- szilárd maradványok felhalmozódása jobban tárolható salak formájában,
- kevesebb a szennyvíz a szintézisgáz tisztításából.

A technológiák áttanulmányozása, jó alapot jelentett a később bemutatásra kerülő kisérleti mintareaktor tervezésénél.

A fixágyas rendszerek

A fejlesztésnél a végső cél kisüzemi (0,05-0,3 MW) decentralizált CHP rendszer létrehozása, ezért főként a fixágyas gázgenerátorokkal kapcsolatos elméleti alapok vizsgálatával foglalkozom.

A termokémiai folyamatok kedvező alakulásához megfelelő szilárd biomassza és hatékony gázgenerátor kialakítása szükséges. Fontos jellemzője bármely tüzelőanyagos alapelven működő elgázosítási folyamatnak a hideg gáz hatásfoka. Ezt az együttható Hammerer (2000) szerint:

$$\eta_{HG} = \frac{H_{agáz} * q_{gáz}}{H_{a\ tü} * q_{tü}},$$

ahol:

$H_{agáz}$ a generátorgáz fűtőértéke,

$q_{gáz}$ a generátorgáz térfogatárama,

$H_{atü}$ a tüzelőanyag fűtőértéke,

$q_{tü}$ a tüzelőanyag tömegárama.

Fixágyas gázgenerátorok

A fix ágyas gázgenerátoroknál a tüzelőanyag megtölti a reakcióteret. A friss tüzelőanyagot a generátor tetején töltik be egy nyíláson, vagy zsilipen keresztül, majd gravitációs elven süllyed a generátor alsó része felé, miközben végbemegy az elgázosodás.

A fixágyas, felfelé áramoltató gázgenerátor

A felfelé áramoltató gázgenerátorban (2.6 ábra) a generátorgáz és az elgázosító segédanyag a tüzelőanyaggal szemben áramlik keresztül a generátoron. Tehát ha a friss tüzelőanyagot a reaktor felső részén juttatják a rendszerbe, akkor az elgázosító segédanyag (levegő, oxigén, vagy gőz) a tüzelőanyag oszlopot tartó rostély felől érkezik a reakciótérbe. Ez esetben könnyen elkülöníthető helyeken zajlanak le az elgázosítás folyamatai (Reed, 1988).

A pirolízis zónában keletkezett bomlástermék és a frissen betáplált tüzelőanyag száradásakor keletkezett gőz, a keletkezett generátorgázzal együtt hagyja el a gázgenerátort (Fercher, et al., 1998). A számos problémát okozó pirolízisgáz egyetlen magas hőmérsékletű zónán sem halad keresztül, ezért nem oxidálódik vagy bomlik el megfelelően. Így a generátort elhagyó nyers generátorgáz akár 100 g/m^3- nyi vagy akár magasabb kátránytartalommal is rendelkezhet (Venselaar, 1982).

A felfelé áramoltató gázgenerátorok érzékenyek a tüzelőanyag víztartalmára, mivel az oxidációs zónában tartózkodó izzó faszén és gőz reakciójának (endoterm víz-gáz reakció) köszönhetően a tüzelőanyag hőmérsékletét csökkenti. Végül is (egyszerűsítve) mennyiségi szempontból a pirolízis a fizikai és kémiai folyamatok közötti kölcsönhatás. A hőenergia, főleg a hővezetés révén a részecskékbe áramlik. A szilárd anyag által felvett, majd keletkező hő és hőáramlás révén az exotermikus másodlagos reakciók befolyásolhatják a bomlást. De az illékony anyagok kiáramlásából származó konvekciós hő gátolja a befelé irányuló hőáramlás.

Az illékony anyagok egy részét is vissza lehet kényszeríteni a pirolízis térbe (a létrehozott vákuummal), ami újabb kémiai reakciókat vált ki. Mindezeket az anyagszemcsék mérete

jelentősen meghatározza. Az egészen kicsi anyag részecskékben a hő és a tömegátvitel nehezen különíthető el. Nagyon nagy részecskéknél a pirolízis csak egy vékony reakcióba lépő rétegben fordulhat elő, amely az anyag belseje felé mozog, és ezzel egy zsugorodó magmodell írható le. Az eltérő sűrűségtől és az adott pont hőmérsékletről függ, hogy valójában a pirolízis hogyan megy, vagy nem megy végbe. Az utóbbit közbenső termékek jellemzik, és eltérő viselkedés Az aprított biomasszáknál ezért is van előírás az aprózottság mértékére (akár égetésről, akár pirolízisről van szó). Ilyen pl. az ÖNORM M7133 szabvány. Vizsgálatainkat ennek elfogadása alapján végeztük (Tóth et al., 2018).

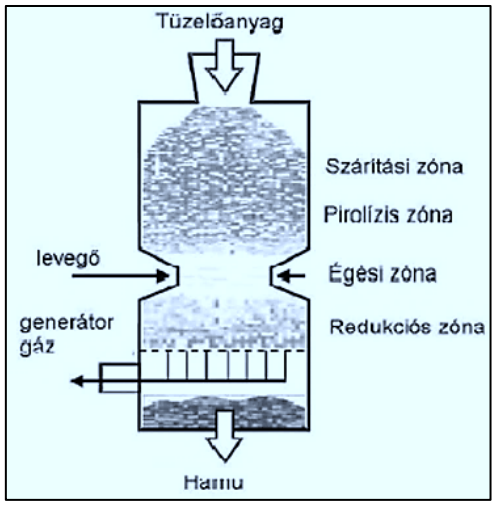
A fixágyas, lefelé áramoltató gázgenerátor

A lefelé áramoltató gázgenerátor esetében az elgázosító segédanyag egy irányba áramlik a gravitáció törvényeinek engedelmeskedő tüzelőanyaggal, tehát felülről lefelé. A száradási és pirolízis zónák közvetlenül az oxidációs zóna fölött helyezkednek el, tehát hőszállítás útján megkapják a lejátszódó folyamatokhoz szükséges hőmennyiséget. Az oxidációs zónában pedig a főleg gáz halmazállapotú pirolízis termékek reakcióba lépnek a beérkező elgázosítási segédanyaggal. Az oxidációs zónából szivárgó gázokat (CO_2 és H_2O) a redukciós zónában található izzó faszén CO-dá és H_2-né redukálja. Tehát az endotermikus Boudouard és víz-gáz reakciók után a füstgáz az érzékelhető hőjének egy részét átadja a gázgenerátornak, növelve annak kémiai energiáját. Itt a hőmérséklet olyannyira lecsökken, hogy a faszén és a generátorgáz között már nem jön létre reakció. Következésképpen a lefelé áramoltató gázgenerátor esetében a tüzelőanyag oszlopot tartó rostély fölött mindig marad egy réteg faszén, amit a hamuval együtt el kell távolítanunk (Venselaar, 1982).

Ennek folytán a lefelé áramoltató gázgenerátorból kikerülő hamu mindig fog faszenet tartalmazni. Optimális üzemi körülmények között viszont a tüzelőanyag száraz tömegének akár 95%-át is átalakíthatjuk.

A generátorgáz a rostély közelében távozik a reakciótérből. A generátorgáz áramlási irányának köszönhetően a pirolízis zónából származó reakciótermékeknek át kell haladniuk az oxidációs zónán, amelyet gyakran a „kátránytermékek forró kezelőzónájának” neveznek, ahol stabil gázokká válnak a pirolízis-gázok (Hammerer, 2000).

Tehát a lefelé áramoltató gázgenerátorokhoz képest ilyen elven működők termékgázai *számottevően alacsonyabb kátránytartalommal hagyja el az elgázosítót.* A becsült kátránytartalom körül-belül 1g/m^3. A generátorgáz szervesanyag-tartalmát, ami a pirolízis termékek igen nagy hőmérsékletű (1000-1200°C) oxidációs zónán való áthaladása után marad a generátor termékében, harmadlagos kátrányoknak nevezik. Ezen folyamatokat 60-80%-os hideggáz hatásfokon üzemeltethető.



2.6. ábra Lefelé áramoltató gázgenerátor (Fercher, et al., 1998)

Amikor az elgázosodási segédanyag beáramlik igen fontos, hogy sugárirányban elrendezett fúvókák úgy legyenek kialakítva, hogy a tüzelőanyag oszlopba a lehető legmélyebben be tudjon hatolni. Abban az esetben, ha az oxidációs zóna eloszlása nem egységes a teljes keresztmetszetben, akkor fennáll annak a veszélye, hogy a pirolízis gázok és a generátorgáz semlegesednek. Segédanyagok bejuttatása a központi csöveken keresztül elősegítheti a gázgenerátor keresztmetszeti hőmérsékletmezejének homogenitását (Reed, 1988).

A szakirodalomban további speciális megoldások is találhatók (Venselaar, 1982, Hammerer, 2000):

- kettős tüzelésű elgázosítók,
- több fázisú fixágyas rendszerek.

2.2. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

Munkám folyamán a szóba jöhető többféle alapanyag belső összetételét is megvizsgáltam. Megállapítottam, hogy hazánkban számos olyan biomassza van, amelyek energiatartalmuknál, térfogatsűrűségüknél fogva alkalmasak lehetnek a jóminőségű pirolízisgáz előállításához. A hazai és nemzetközi szakirodalom a hőbontásra számos különféle technológiát és azok elméleti, gyakorlati kialakítását ismerteti.

Ezek áttekintése alapján megállapíthatom, hogy

1. A komplex pirolízis rendszerben *a lebomlását a legjobban az anyag tömegcsökkenésének mérésével, valamint a lejátszódó folyamatok hőeffektusának meghatározásával lehet értékelni.* Ezeknek rendkívül kiterjedt elméleti és műszerfejlesztési célú kutatási programjai vannak, de a termokémia tudományterülete még számos megoldatlan feladatot rejt.

A gravimetrikus eljárások az egész folyamatot nem képesek értékelni, csupán egyes részletekre mutatnak rá.

A célkitűzésekben megfogalmazottak és a szakirodalmi kutatás alapján megállapítom, hogy a kísérleteimet egy olyan saját fejlesztésű laboratóriumi nagymintás (500 -1000 g) reaktoron szükséges végeznem, amelynek révén az elvégzett vizsgálatok eredményét extrapolálni lehet félüzemi méretű technológiára. Tehát az alapanyagok eltérő fizikai, kémiai és geometriai tulajdonságai mellet (térfogat sűrűség, halmazsűrűség, porozitás stb) a rendszerek hatékonyságának javítása (a nyert energia/alapanyag tömege -J/kg).

2. A konverziós vizsgálatokat a kiválasztott alapanyagokkal a *400 és 600 °C-os hőmérsékleten fogom elvégezni*, a szakirodalmi ajánlások szerint, ahol várhatóan az anyagok teljes átalakulása végbemegy. A lebontásnál meghatározom:
   - a kiindulási anyagok belső jellemzőit (kémiai és energetikai),
   - a gázképződés dinamikáját (a reaktor geometriája miatt),
   - a halmozok jellemzőit (anyag és halmazsűrűségrt, majd a kialakuló belső nyomás változását).
3. *A komplex rendszereben a lebomlást* az anyag *tömegcsökkenésének* mérése mellet az anyagoszlop különböző szintjein a hőmérséklet alakulásával, a hőmérséklet változásával meghatározásával lehet értékelni. A gázosító berendezésben a hővándorlást (a terjedés sebességét), és ezzel a *lezajló reakciókat az alapanyag halmaztulajdonságai módosítják.* A vertikális hőfokeltérések alapján jól követhető az anyagtulajdonságok (nedvesség, belső elemi összetétel, a belső energiatartalom) hatása a reakciós zónákra) a közölt külső energia függvényében. Ebből következik, hogy az adott anyagok esetén milyen technológiai, valamint gépi megoldás szükségeltetik a kellő hatékonyság eléréshez. Ez az általánosan, a lebomlásra használt gravimetrikus modellekkel nem valósítható meg.
4. A szakirodalmi források arra irányították a figyelmemet, hogy a több fázisú, fixágyas technológiai kialakítását kutassam. Ezért inert gáz fűtéssel a fixágynál jelentkező paraméterek mérésére, a fellelhető tendenciák meghatározására koncentráltam. Pl.: A teljes lebomlás időtartama, az állandósult szakaszokon lebontás intenzitása (g/min), és ezek hatása hatása a maradék anyagok mennyiségére, arányaikra (szén, hamu). A maradék anyagok sűrűségének a rétegvastagság függvényében a gáz átáramlásánál jelentkező hatásokra. A cél tehát a szemcsék elmozduláshoz szükséges nyomás és légsebesség megismerésére, vagyis a fixágy mozgatásának szükségességére a felületre rakódó hamu eltávolítása érdekében.
5. A vonatkozó szakirodalm tanulmányozását követően szükségesnek láttam, hogy a laboratóriumi kísérletek eredményének figyelembevételével egy olyan félüzemi (5,0 kWe) CHP rendszer létrehozását, amelyen az eredmények validálhatók (külső vállalkozóval). Így a hatékonyságra (kWhe/kg fa), a hideg gázra, a kiindulási anyagok eltérő nedvesség és energiatartalmának hatásaira is konkrétabb válasz kaphatunk.

   A gyártó vállakozóval nem csak a tervezésnél működöm majd közre, hanem a kísérleti egység méréseinek meghatározó részeit is magam fogom végezni, mivel az Intézetemnél (NAIK MGI) ezek a műszerek kalibrált formában rendelkezésemre állnak.

   Feltételeztem, hogy e rendszerrel a légbevezetés és nedvességtartalom hatását is mérni tudom, a pirolízálás folyamat változása, a gáz összetételére és minőségére tekintettel. Megbizhatóbb válasz kapok a gáz generátorhoz kapcsolt gázmotoros villamos generátor teljesítményére, a rendszer hatékonyságára. Lényeges az oxidációs és redukciós térben megfelelő hőmérséklet elérése, fenntartása (tervezésnél a konstrukciók szempontjából alapvetően). Végül is a rendszer szabályozása csak ezek függvényében végezhető.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az értekezésem e fejezetében bemutatom a kutatási céljaim megvalósításához használt kísérleti módszereket, a használt eszközöket és felhasznált mintákat. Első lépésben a kiválasztott mintákat laboratóriumi vizsgálatnak vetettem alá, amik segítségével meghatároztam a legfontosabb energetikai jellemzőiket, úgy, mint elemi összetétel (CHNSO), égéshő, nedvességtartalom, hamutartalom. A laboratóriumi vizsgálatokat a Nemzeti Agrárkutatási és Innovációs Központ Mezőgazdasági Gépesítési Intézet NAH-1-1840/2018 nyilvántartási számú akkreditált Energetikai Vizsgálólaboratóriumában készültek. A vizsgálatokban a Laboratórium munkatársai a segítségémere voltak, ennek okán a laboratóriumi folyamatokból származó eredmények csapatmunka következménye. Az analitikai vizsgálatokat követően egy egyedileg tervezett és legyártott pirolizáló berendezés segítségével kezeltem a kiválasztott anyagokat különböző kezelési hőmérsékleten. Ehhez kísérleti módszert dolgoztam ki, ami meghatározta a kezelési hőmérséklethez szükséges inert gáz betáplálási mértékét, a kezelési időt, a rendszer lehűtésének módját.

3.1. Vizsgált anyagok

Ahhoz, hogy hatékony pirolizáló (hőbontó) berendezés célszerűen tervezhető és legyártható, majd használható legyen meg kell ismerni a rendelkezésre álló anyagokat. (3.1 táblázat) De a tervezés egy adott helyen specifikus is lehet, ha az adott területen nagy mennyiségben és folyamatosan rendelkezésre álló anyagok vannak.

3.1. táblázat Jellemző magyarországi anyagszortiment

Alapanyag (apríték)	Fűtőérték (MJ/kg)
Akácfa	18,2
Nyárfa	18,8
Gabona szalma	16,7
Repce szalma	17,9
Kukoricaszár	17,1

A táblázat szerinti felsorolást még lehetne folytatni, amelyeket ugyancsak megvizsgáltam, pl.: faüzemi hulladékokat, gabona- és élelmiszer feldolgozás-, szennyvízkezelés-, biogáz előállítás maradékait stb. A vizsgált anyagok frakcióméreteit a 3.1 ábra szemlélteti.

3.1. ábra Az alkalmazott anyagokra jellemző frakcióméret

Aprítás után az anyagok energiatakarékosabban száríthatók. A tömörítés, préselés révén csökken a helyigény és nő az anyagok energiasűrűsége.

A tüzelőanyagok szenesítési zónában való tartózkodását az elszenesedési képesség határozza meg. Ha ez túl hosszú romlik a gáz minősége, illetve csökken a kiáramló gáz nyomása. A biomassza szemcsék mérete nagymértékben befolyásolja a szenesítési időt és a reakcióképességet (a felület méretéből adódik). A szemcseméretnek jelentősége van a tárolók alakjának, a behordók rendszerének, a reaktorok beömlőnyílásainak és a rostélyok kialakításban. A szemcsék méretét és halmazsűrűségét a 3.2 táblázat mutatja be.

3.2. táblázat Jellemző magyarországi anyagszortiment

Típus	Méret (mm)	Nedvesség (%)	Halmazsűrűség (kg/m^3)
Apríték	3-100	20	545
Pellet ϕ	6,25	6,9	1170

A különféle biomasszák lignin, hemicellulóz és cellulóz tartalma lényeges a lebontás szempontjából.

Így pl. 250-300°C-ig:

- a lignin mennyisége keményfaféléknél számottevően nem csökken (a maradékban a %-os aránya növekszik),
- a hemicellulóz (a kezdeti ~15%-ról) szinte teljesen lebomlik,
- a cellulóz (a kezdeti ~30-35%-ról) ~10%-a nem,
- az egyéb anyagok (a kezdeti ~25%-ról) szinte teljesen lebomlanak (gázzá, vagy kondenzált olajjá).

3.2. A vizsgálathoz használt műszerek, eszközök

Vizsgált anyagi jellemzők

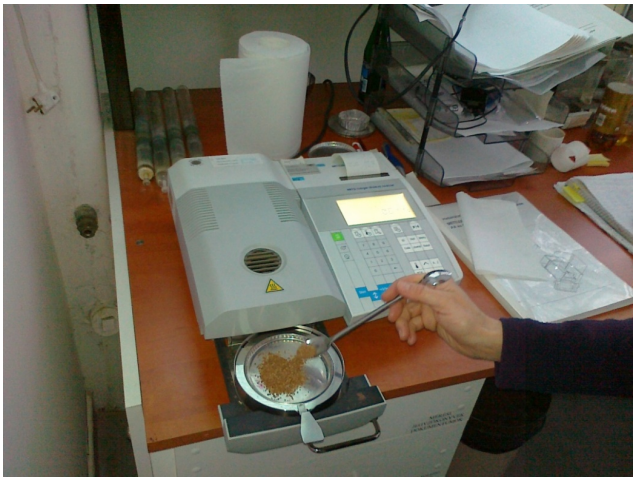
A vizsgálni kívánt paramétereket rendkívül fontos tudni nemcsak a laboratóriumi kísérletek elvégzése tükrében, hanem a félüzemi léptékű (5 kWe) technológia tervezésében és üzemviteli paramétereinek beállításában is nagy szerepet játszanak.

A jelenleg vizsgálni kívánt jellemzők:

- nedvességtartalom,
- égéshő, fűtőérték,
- hamutartalom,
- elemi összetétel,
- hamu olvadáspont.

3.2.1. Nedvességtartalom mérési módszere

A vizsgálatokat kalibrált METTLER TOLEDO termo-gravimetrikus mérleggel végeztem. (3.2 ábra) A mérés kezdetekor ellenőriztem a műszer vízszintezését, a szabvány szerint a 105 °C beállítását. További teendőket anyagtulajdonság alapján a kezelési útmutató részletesen meghatározza. A műszer által nyomtatott mérési jegyzőkönyv a tételesen nyilvántartott vizsgálati dossziéban kerül tárolásra. A teljes mérési protokollt az MS EN ISO 18134-1:2016 és MSZ EN ISO 18134-3:2016 jelzetű szabványok írják le.



3.2. ábra METTLER TOLEDO nedvességmérő

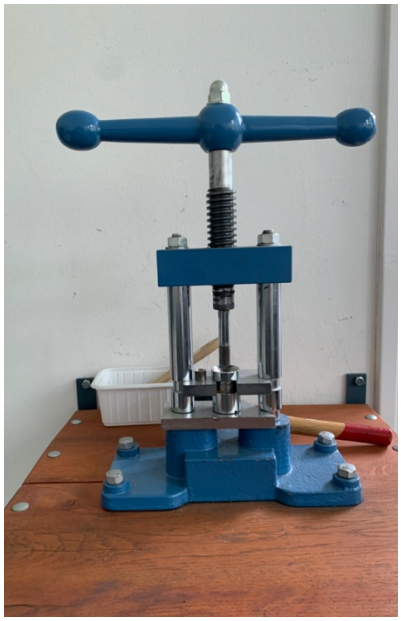
Mérőeszközök, mérési pontosság

METTLER TOLEDO termo-gravimetrikus mérleg:

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

3.2.2. Égéshő meghatározásának módszere

A mintának szánt anyagból egy gramm körüli adagokat kimértem. Ezeket egy kalibrált Mettler Toledo MX-5 típusú precíziós mérleg segítségével. Az adagokat egy tömörítő berendezésbe (3.3. ábra) helyeztem, hogy egy pellethez hasonló mintát képezzek. A szerkezet felépítése egyszerű. Egy asztalhoz rögzített vezetőoszlopos prés, aminek préselő erejét magam fejtettem ki egy hajtókaron és egy menetes száron keresztül.



3.3. ábra Pelletprés

Az így keletkezett pellet-szerű mintát vizsgáltam tovább a hatályos szabvány szerint. Az IKA-WERKE C2000 (3.4. ábra) égéshőt mérő műszernek úgynevezett mérőbombájának mintatartójába helyeztem a mintát úgy, hogy egy vékony fonal körbeérje, ami az égést vitte át

a mintára a gyújtóelektródáról. A mérőbomba egy vastag falú menetes tetejű nyomástartó edény, tetején szeleppel. Ezt be kell pattintani a helyére, ami által feltölthetővé válik a mérőbomba oxigénnel. A gép automatikusan csukódik be, majd a mérőbomba köré hűtővizet szivattyúz. A hűtés zárt rendszerű, a felmelegedett hűtővizet saját hőcserélővel hűti vissza. A mérőműszerhez csatlakozik egy oxigénpalack is. A lehető legjobb fokú égés elősegítéséhez járul hozzá a tiszta oxigén. Feltöltés és hőmérséklet stabilizálása után a program megkezdi a minta elégetését, majd meghatározza az égéshőt. A mérés megfelelőssége igazolt,

ha:

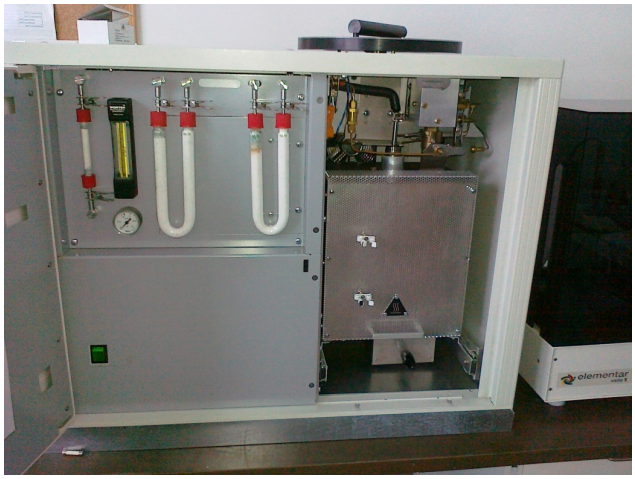
- a közepes, relatív hiba < 0,2 % (MRF %),
- a százalékos szórás < 0,45 (Diff %).

A teljes vizsgálati protokollt az MSZ EN ISO 18125:2017 jelzetű szabvány foglalja magába.

3.4. ábra IKA-WERKE C2000 kaloriméter

3.2.3. Elemi összetétel vizsgálati módszere

Ez a vizsgálat azt a célt szolgálja, hogy meghatározzam a minta fontosabb kémiai összetevőit, mint például: C-szén, H-hidrogén, N-nitrogén, S-kén, O-oxigén és Cl-klór. Ezek mind befolyásolják az égést, a pirolízis-folyamatot és az emissziót. Az elemi összetételmérés az MSZ EN ISO 16948:2015 – Szilárd bio-tüzelőanyagok. Az összes szén-, hidrogén- és nitrogéntartalom meghatározása. Műszeres módszer. című és az MSZ EN ISO 16994:2015 – Szilárd bio-tüzelőanyagok. Az összes kén- és klórtartalom meghatározása című szabvány iránymutatásával, valamint a mérőműszer gyártója által előírt munkautasítás alapján végeztem el. Az elemi összetétel vizsgálatokat ELEMENTAR VARIO MACRO analitikai műszerrel végeztem. A műszer a 3.5 ábrán látható.



3.5. ábra ELEMENTAR VARIO X elemi összetétel vizsgáló

3.2.4. Hamutartalom meghatározás módszere

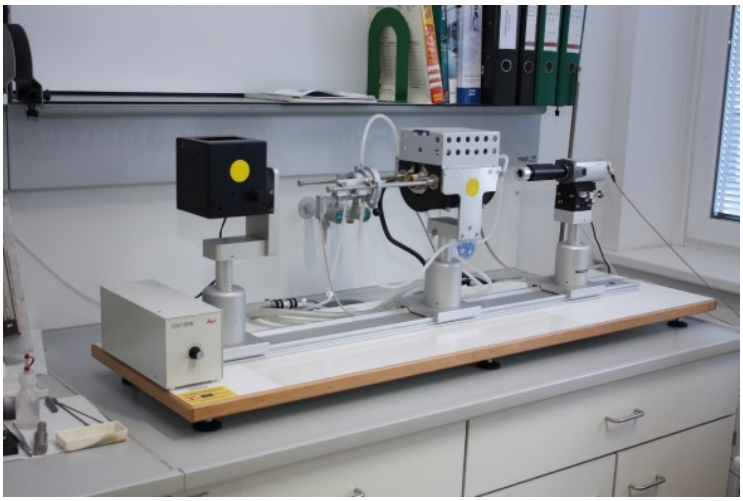
A hamutartalom mérést az MSZ EN ISO 18122:2016 – Szilárd bio-tüzelőanyagok. A hamutartalom meghatározása című nemzetközi szabvány iránymutatásai alapján végeztem el. A vizsgálat lényege, hogy meghatározzuk az adott tüzelőanyag hamutartalmát égetőkemence segítségével. A vizsgálni kívánt alapanyagot tömegmérésnek vetettem alá, melyhez egy 200 g méréshatárú 0,01 mg pontosságú analitikai labormérleget használtam. A szabvány szerint előírt mintamennyiséget az előkészített és lemért mintaedénybe bemértem, melynek tömegét jegyzőkönyvben rögzítettem, majd behelyeztem az égetőkemencébe. (3.6 ábra) Ezt követően a kemencét 250 °C- ra fűtöttem. A mintát a hőmérséklet elérésétől számított 60 percig szárítottam, ezután 550 °C-ra emeltem a kemence hőmérsékletét. Ezt elérve 120 percig égettem a mintát. Kivétel után desszikátorba helyzetem a mintákat és hagytam szobahőmérsékletűre hűlni, majd labormérlegen visszamértem a tömegét. Az eredményt a kivett nettó tömeg és a bemért nettó tömeg hányadosának 100-zal szorzott értéke adja.

3.6. ábra Nabertherm égetőkemence

3.2.5. Hamuolvadáspont meghatározás módszere

Ezt a vizsgálatot egy HESSE Instruments 154 típusú hevítő mikroszkóp (3.7 ábra) segítségével mértem. A műszer a vizsgált tüzelőanyag minta hamujának olvadási fázisállapotait elemzi optikai módszerrel. Az említett hamumintákból gyártói utasítások alapján próbatestet

készítettem, amihez segítséget a gyártó által rendelkezésre bocsátott eszközök szolgáltattak. A préselt próbatestet a tárgylapra helyeztem, majd a szoftver és az optika segítségével pozícionáltam. A mérés automata rendszerű, adatrögzítése folyamatos és számítógépre történik. A mérés kiértékelését a számítógép folyamatosan és automatikusan végzi. Külön papír alapú mérési feljegyzés szükségtelen. A folyamat lefutása végén a mérést végző algoritmus meghatároza a próbatest lágyülási hőmérsékletét.



3.7. ábra HESSE hevítő mikroszkóp

A teljes vizsgálati eljárást az CEN/TS 15370-1:2006 jelzetű technológiai specifikáció írja le.

3.2.6. A termékgáz vizsgálatának módszere

A kísérleti berendezés működési elvénél fogva alacsony kátránytartalmú termékgáz előállítására alkalmas, ezért a kátránytartalom mérése nem indokolt. A keletkező termékgáz összetételét is vizsgálni fogom a továbbiakban egy VISIT 03H típusú gázanalizátor (3.8 ábra) segítségével, mely műszer kifejezetten fagáz minták vizsgálatára lett kifejlesztve.

3.8. ábra VISIT 03H típusú gázanalizátor

Az alapkészülék tartozékai:

- szenzorok (CO, H_2, CH_4, CO_2 és O_2 érzékelő),
- az abszolút nyomás érzékelője,
- nyomáskülönbség érzékelő,
- adattároló,
- mátrixnyomtató,
- filtrol mosóflaska,
- vizes mosóflaska,
- szűrő / abszorber,
- gázhűtő / kondenzátum-szeparátor,
- léghőmérséklet érzékelő.

A gázanalizátor mérési tartományát a 3.3 táblázat mutatja be részletesen.

3.3. táblázat VISIT 03H típusú gázanalizátor

Megnevezés	Tartomány	Mértékegység
CO	0-60	V/V %
H_2	0-50	
CH_4	0-25	
CO_2	0-100	
O_2	0-25	
Léghőmérséklet	-30 – +300	°C
Gázhőmérséklet	-30 – +1200	
Nyomás különbség	-100 – +100	hPa

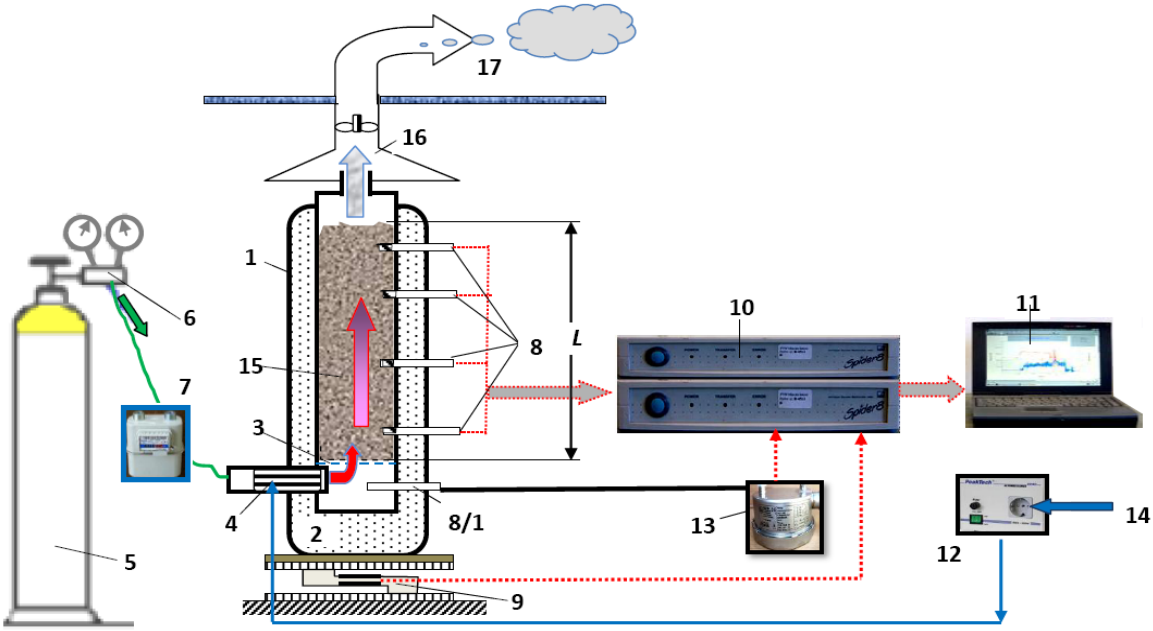
A műszerben található érzékelők az alábbi leírsnak felelnek meg:

A CO, CH_4, CO_2 koncentrációjának mérése infravörös érzékelőkkel történik. Ezek az érzékelők hőmérsékletet, nyomást és egy úgy nevezett alapvonal csúszást kiegyenlítő kompenzátort tartalmaznak. A hőmérséklet és a nyomás kiegyenlítését a mérés során a rendszer folyamatosan aktualizálja. A H_2 koncentrációjának mérése hővezetőképesség-érzékelő segítségével történik. A hidrogénszenzor a hőmérséklet, az alapvonal csúszás és a metánra vonatkoztatott keresztérzékenység kompenzálásával van kialakítva, vagyis ezek a hatások a mérés során kompenzálásra kerülnek. Az O_2 koncentrációjának mérése elektrokémiai érzékelővel történik.

3.2.7. Az anyaghalmazok hőtechnikai elemeinek mérése

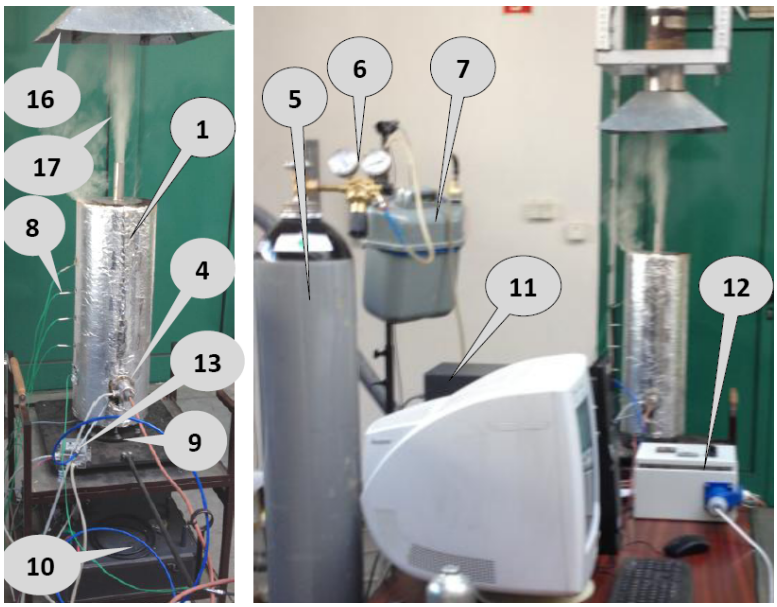
Az alapanyag vizsgálatokat követően az Intézetem laboratóriumában gázosítási vizsgálatokat végeztem, kezdeményezésemre egy ipari partnerrel közösen tervezett és kivitelezett laboratóriumi nagymintás pirolízis reaktor (3.9–3.10. ábrák) segítségével.

A reaktor falát egy 110 milliméteres átmérőjű edzett acélcső alkotja, mely gondosan körbe van szigetelve kőzetgyapottal és egy precíziós torziós mérlegcellán nyugszik. A reaktorcsőbe helyezhető töltet tömege 400-1500 gramm között változik az alapanyag tömegsűrűségétől függően. A gázosításhoz szükséges hőenergiát egy 2000 W teljesítményű fűtőpatron biztosítja, melynek vezérlését is szintén egyedileg alakítottuk ki. A reaktor hosszmetszeti tengelyén több (5 db) K-típusú hőlemet helyeztünk el. A legalsó közvetlen a fűtőpatron előtt lett elhelyezve, ami a visszacsatolást biztosítja a vezérlőnek, nehogy túlfűtés esete álljon fel.



3.9. ábra Pirolízis reaktor 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 a reaktortérbe, ami az inert atmoszférát biztosítja az oxidáció elkerülése végett. Az átáramló nagy mennyiségű gáznak és a nagy tömegű töltetnek erős hűtő hatása van a rendszerre. Ezért esett a választás egy 2 kW-os fűtőpatronra, melynek teljesítményével ezt a hatást kompenzálni lehet amellett, hogy akár 600 °C gázhőmérsékletet is elérjünk. A keletkező termékgázt fáklyázást követően elvezetjük.



3.10. ábra Pirolízis reaktor

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.

Kísérlet előtt meghatároztuk az anyagok energetikai jellemzőit, mégpedig:

- sűrűsége,
- nedvesség tartalma,
- összetevői (kevert biomasszák esetén),
- belső tartalom,
- C, H, O, N, S,
- nedvesség tartalom,
- hamu tartalom,
- energia tartalom.

Minden mérést az idő függvényében végeztem, melynek folyamata és feltételei alább olvashatók:

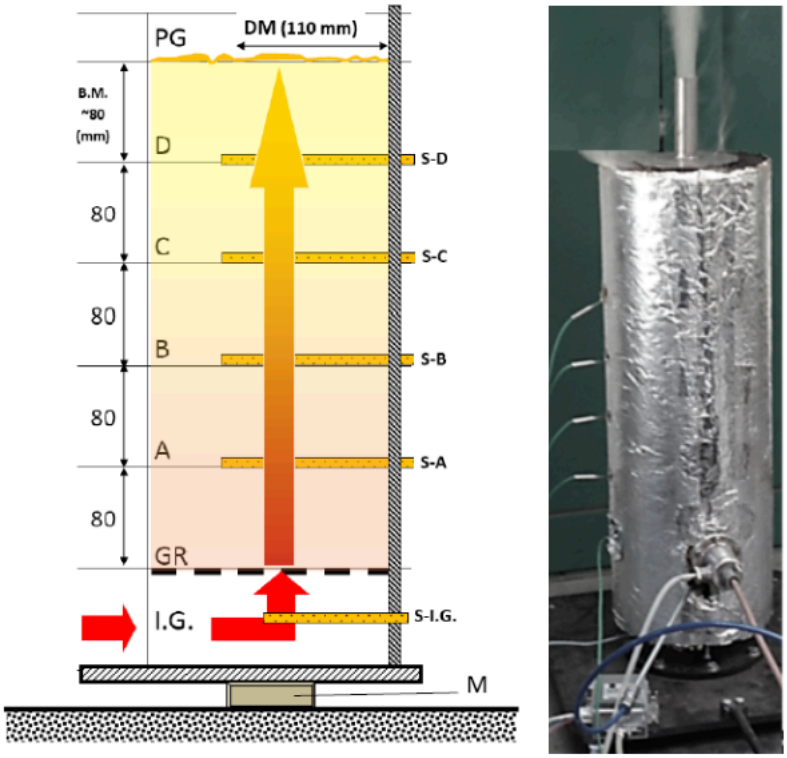
1) mérési mintavédelmi periódus: 1,0 s,
2) a mérés indítása,
3) mérleg tárázása,
4) az anyag betöltése,
5) anyag tömeg megállapítása,
6) mérés hőfoka 400/600 ^{o}C,
7) gázszelep kinyitása,
8) a nyomás beállítása,
9) nitrogén áramlás ~ 130-170 liter/min,
10) a fűtés megkezdése,
11) a gáz szeleppel és villamos vezérléssel,
12) mérés a tömegállandóságig folyik,
13) fütés lekapcsolása, gázáram csökkentése, majd megszűntetése.

Mérési diagramok az alábbiak szerint készültek.

1. Idő - tömegváltozás
2. Idő - hőmérséklet változás a mérési pontokon
3. Idő - nyomásváltozás a biomassza alatt (rács)
4. Idő - gázáram

A létrehozandó konstrukció (pirolízis generátor) szempontjából fontos az anyaghalmazoknál lejátszódó folyamatok megismerése. A fixágyas reaktornál a kiszáradási, hőmérséklet-vándorlási és gáz-áthaladási jellemzők a konstrukció és a hatékonyság fontos és meghatározó tényezők. A konstrukciók szempontjából lényegesebbek, mint a gravimetriával kapott adatok.

A halmazokból fakadó reaktorjellemzők modellezéséhez, méréséhez ún. laboratóriumi nagymintás gázosító készüléket fejlesztettünk (3.11. ábra).



3.11. ábra A fejlesztett mérőegység fő méretei és az érzékelők elhelyezkedései

Az ábra szerinti főbb jellemzők:

- S - I.G - hőérzékelő is elhelyezést nyert,
- az A, B, C és D magasságokban vannak a (S - A) – (S - D) hőérzékelők,
- az S - D érzékelő fölött még 80 mm anyagmagasság található, és ezt követi a PG gáz kivezető nyílása (mintavételhez és a fáklyázóhoz),
- M – precíziós mérleg,
- I.G – fűtött inert gáz bevezetése,
- GR – tartórács.

A reaktor falát 110 milliméteres átmérőjű jól szigetelt acélcső alkotja, mely precíziós, torziós mérlegcellán nyugszik. A reaktorcsőbe helyezhető töltet tömege 400-1500 g között változott, az alapanyag tömegsűrűségétől függően. A gázosításhoz szükséges hőenergiát 2000 W teljesítményű villamos fűtőpatron biztosítja, melynek vezérlését az általunk kialakított rendszer végezte. A reaktor hosszanti tengelyére merőlegesen az oldalfalon át benyúló, K-típusú hőelemek vannak elhelyezve. A legalsó közvetlen a fűtőpatron mögötti térben van, ami a visszacsatolást biztosítja a vezérlőnek, hogy folyamatosan a beállított fűtés jöjjön létre. Fölfelé haladva még négy hő-elem van, egymástól egyenlő távolságra elhelyezve.

4. 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.

4.1. Tömegváltozás intenzitása az idő és a hőmérséklet függvényében

Az analitikai mérések során kapott eredmények megközelítőleg a szakirodalmi értékeket reprezentálják mind elemi összetételt, mind hamuolvadási értékeket tekintve. Az eltérések annak köszönhetők, hogy alapanyagként szándékosan nem a rendelkezésre álló legjobb minőségűek lettek kiválasztva, hiszen a piacon nehezen lelhetők fel kitűnő minőségű termékek, így téve gyakorlat-orientálttá a kísérleteket. Az analitikai mérések eredményeit az alábbi 4.1-es számú táblázat tartalmazza.

4.1. táblázat A vizsgált alapanyagok analitikai eredményei

	Elemi összetétel					Nedvességtartalom (%)					Hamuolvadási hőmérséklet (°C)		
	N(%)	**C(%)**	**S(%)**	**H(%)**	**A(%)**	**érkezés-kori**	**égéshő**	**CHNS**	**hamutar-talom (%)**	**égéshő (MJ/kg)**	**Deformá-ciós pont**	**Félgömb hőmér-séklet**	**Folyási hőmér-séklet**
Vágástéri nyesedék	0,4193	34,6718	0,0887	7,0408	0,0129	23,94	28,78	30,06	2,65	13,774	n.d.	n.d.	
	0,4233	34,9023	0,0809	7,1159	0,0114								
	0,4253	34,9664	0,0879	7,0382									
puhafa	0,0393	40,2828	0,0656	6,6302	0,0002	18,58	19,42	18,08	1,43	15,736	1364	n.d.	n.d.
	0,0692	40,3150	0,0701	6,6206	0,0003								
	0,0356	40,2733	0,0717	6,5796									
keményfa	0,1080	42,8588	0,0697	6,2919	0,0003	12,73	11,52	12,73	1,75	16,857	1427	n.d.	
	0,0862	42,8543	0,0654	6,2844	0,0002								
	0,0917	42,7908	0,0600	6,2958									
faapríték1	0,1168	43,6601	0,0708	6,0694	0,0014	10,98	10,14	10,14	3,39	17.271	1248	1323	1363
	0,1183	43,8792	0,0681	6,1608	0,0019								
	0,1149	43,7710	0,0672	6,1485									
faapríték2 (rossz minőségű)*	0,2339	30,1744	0,0785	4,1031	0,0059	11,31	9,55	9,55	36,61	11,65	1181	1373	1493
	0,2004	30,2590	0,0761	4,0236	0,0090								
	0,2004	29,0243	0,0746	3,8073	0,0076								

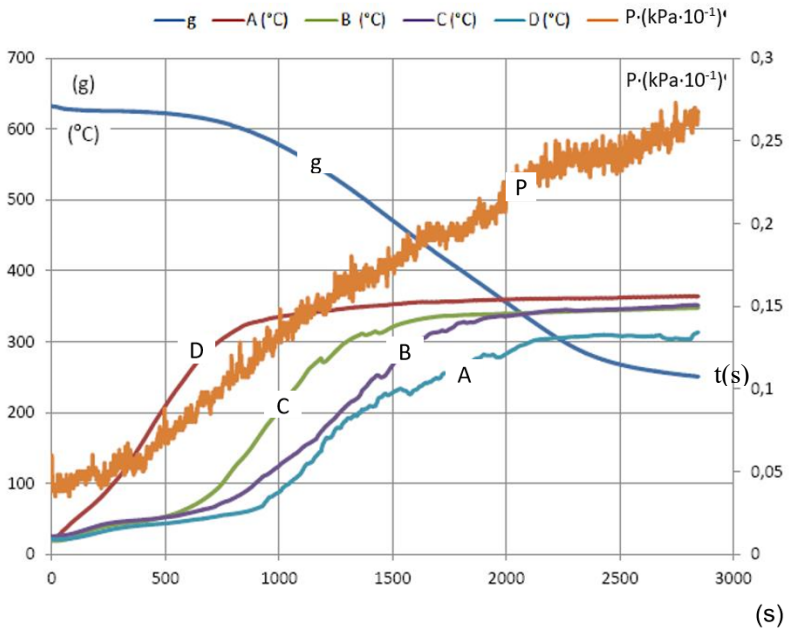
Megjegyzés: * A kiinduló anyag jelentős mennyiségben tartalmazott talajmaradványokat és kérget.

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:

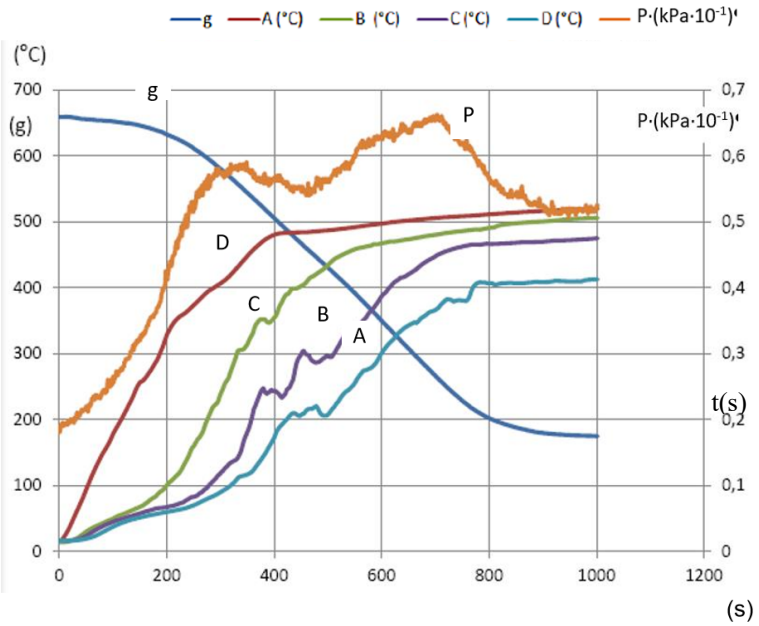
- hőmérséklet az anyaghalmazban négy különböző magasságban t (s),
- tömegcsökkenés,
- nyomásváltozás a töltet alján.

A vizsgálatokat 7 féle anyagnál végezterm el, amikből *példaként* a keményfa aprítékot mutatom be.

Ennek adatsorából készült diagramokat a 4.1-es és a 4.2-es ábra szemlélteti.



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

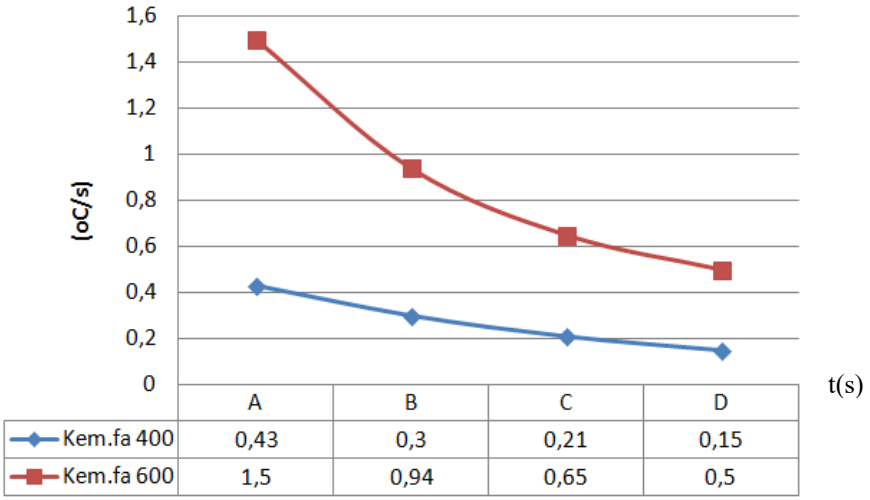


4.2. ábra Keményfa apríték pirolizálása 600 °C-os kezelési hőmérsékleten

Az anyaghalmazban a hőmérsékleteket terjedését mértem az idő függvényében. 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.

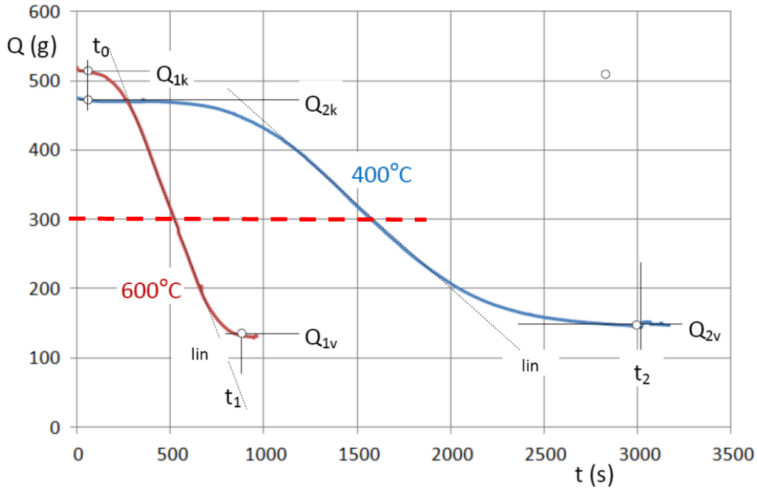
A magasabb hőfokon a szén lebomlását anyagban lévő víz disszociációja közben keletkező oxigén segítette. A hőmérsékletváltozás a magasabb hőfokon igen gyors, 600 ºC-on a felső

hőfok változása mutat közel azonos tendenciát, mint 400 °C-nál a legalsó pont, ahol a fűtött inert gáz bevezetése történt (4.3 ábra).



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

Ugyanezen mérésnél a bemért anyagok tömegváltozásait az idő függvényében a 4.4 ábra szemlélteti.



4.4. 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. A 4.4 ábra jelei a következő 4.2 táblázatban olvashatóak.

Általában mindkét hőfokon a lineáris szakaszokat az egész folyamathoz viszonyítva, a tömegcsökkenés kétszer nagyobb intenzitású.

A magasabb hőfokon a maradvány (zömmel a C) ~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 ºC-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 ºC-os kezelési hőmérsékletnél.

4.2. táblázat Fa apríték szenesítése inert gázban, a tömeg változása az idő függvényében

	Jel	Idő (s)	Tömeg (g)	Idő (s)	Tömeg Q_k-Q_v (g)	Intenz. (g/s)	Marad. C (%)	Lin. marad. C (%)
400 ºC								
Kezd.	t_o	101	Q_{2k} 470		325	0,112	30,85	
Vég	t_1	3001	Q_{2v} 145	2900				
Lin. Kezd.*	t_{k1}	1120	406		166	0,227		59,11
Lin. Vég.*	t_{v1}	1850	240	730				
600 ºC								
Kezd.	t_o	20	Q_{1k} 515		375	0,425	27,18	
Vég	t_2	901	Q_{1k} 140	881				
Lin. Kezd.*	t_{k2}	401	450		270	0,9		40
Lin. Vég.*	t_{v2}	701	180	300				

**Megjegyzés: A – Lin. – a lineárisnak tekinthető szakaszok kezdete és vége (egyenletes tömegváltozás időtartama)*

4.2. Az anyaghalmaz közegellenállsának hatása a reakciós folyamatra

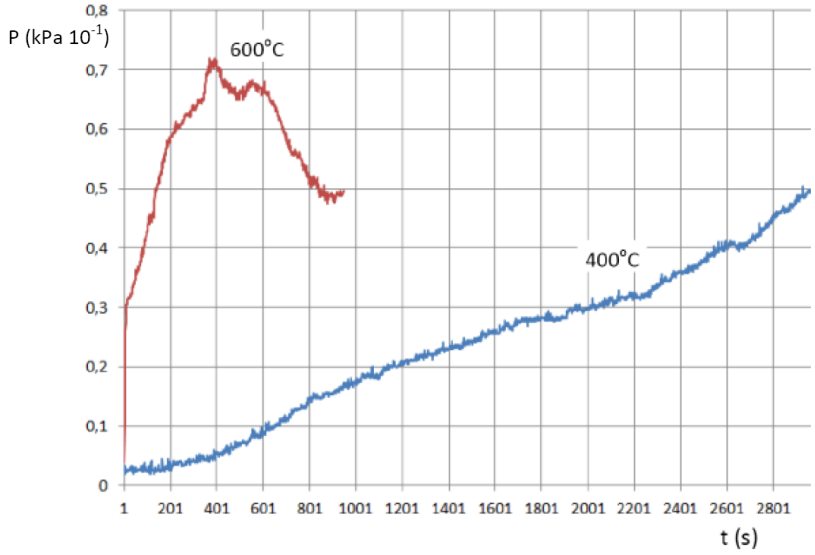
A viszgálatok szempontjából az anyagok belső tulajdonságai:

- nedvességtartalom,
- alkotó elemek aránya,
- energiatartalom,
- sűrűség,
- hamu,
- szenesedési tulajdonság,
- reakcióképesség,
- illóanyag tartalom.

A laboratóriumi kísérletek megtervezésekor viszont 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 4.5-ös és 4.6-os ábrák a keményfa apríték szenesítéséből származó adatok alapján készültek. Az inert gáz nyomásértékeit szemlélteti az idő függvényében.

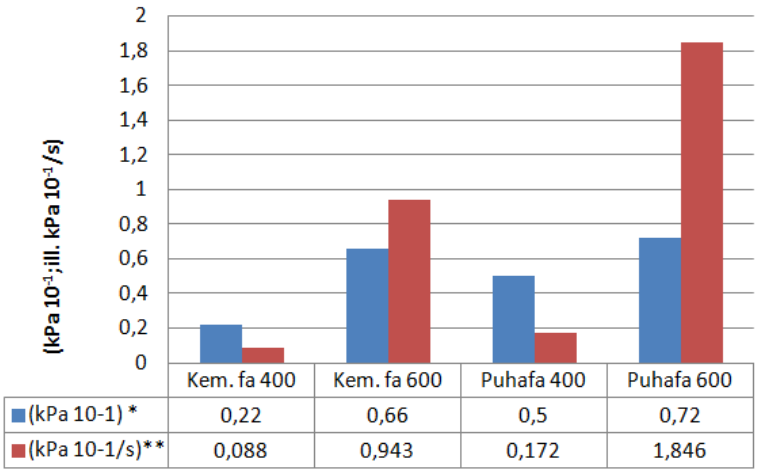
A nagy nyomású nitrogén palackból a gázt állandó nyomáson és tömegárammal jut a fűtőegység utáni térbe. Az ott lévő szenzor méri a megváltozott értékeit a teljes szenesítési ciklus alatt az idő függvényében.



4.5. ábra A gázátáramláshoz szükséges nyomás a szenesítés során

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.



4.6. 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 csak szén, hanem hő és villamos energia előállítása is cél. Alul történik a primer levegő bevezetése, annak mennyisége az égési hőfok fenntartása és a keletkező kátrány redukálása miatt is igen lényeges.

Nedvesség- és energiatartalom

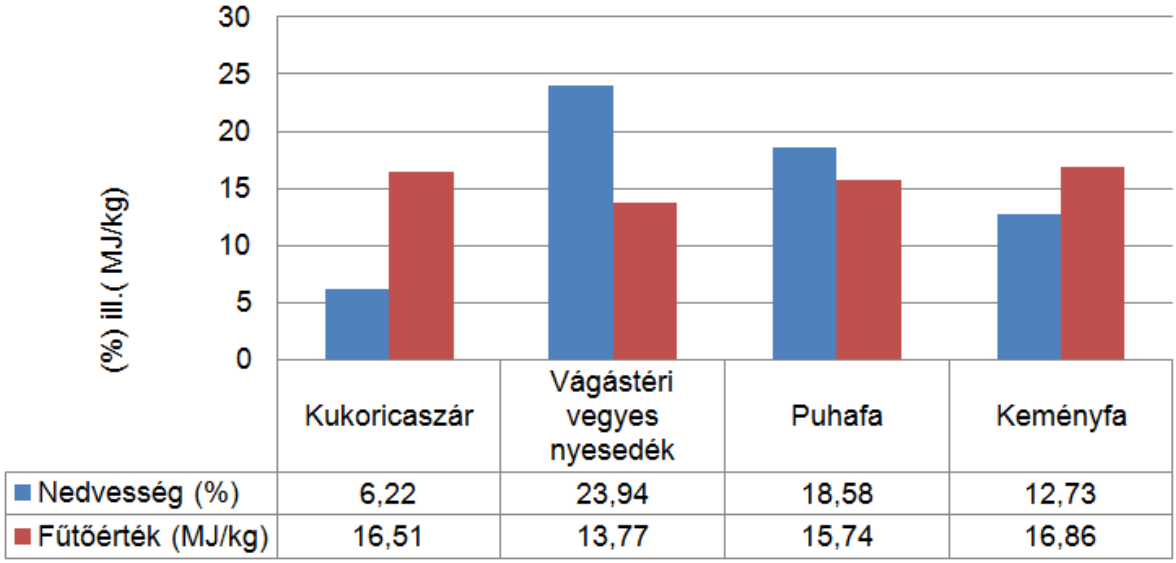
A nedvességtartalom a gázosításnál fontos szerepet játszik, hiszen abból éghető gázok keletkeznek, viszont egy határon túl rontja a gázgenerátor hatásfokát. Ez abból adódik, hogy megkötött állapotban van benne a víz és ezt csak szárítással, vagy kigőzöléssel távolítható el, ami energiát von el a folyamatból.

A rendszerbe bevitt anyagnál a nedvességtartalom növekedésének hatására a keletkező gáz energiatartalma csökken. A működő egységnél pl. 15%-os 25%-os fa használatakor a gáz energiatartalma 75,1%-ról 70,8%-ra csökkent.

Az illóanyagoknak kipárolgása alacsony hőmérsékleten kezdődik el és a rendszerben jól hasznosulnak. A vizsgált anyagoknálnál a kiindulási nedvességtartalomra és a fűtőértékre vonatkozó adatok a 4.3 táblázatban találhatók, az arányokat a 4.7-es ábra szemlélteti.

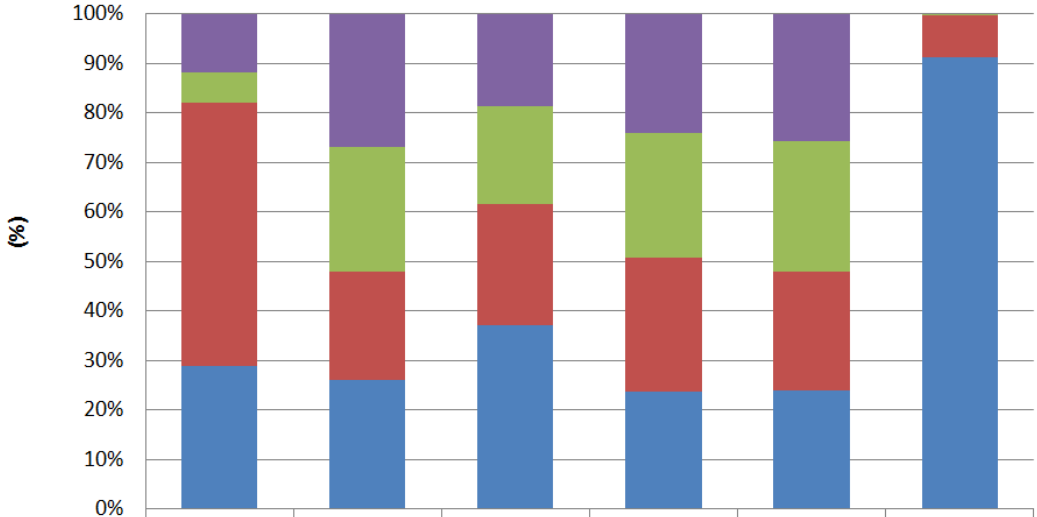
4.3. táblázat Alapanyag paraméterek

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



4.7. ábra Apríték vizsgálata nedvességtartalomra és a fűtőértékre

A belső összetétel %-os arányai a tömör anyagra vonatkoztatva. (4.8 ábra)



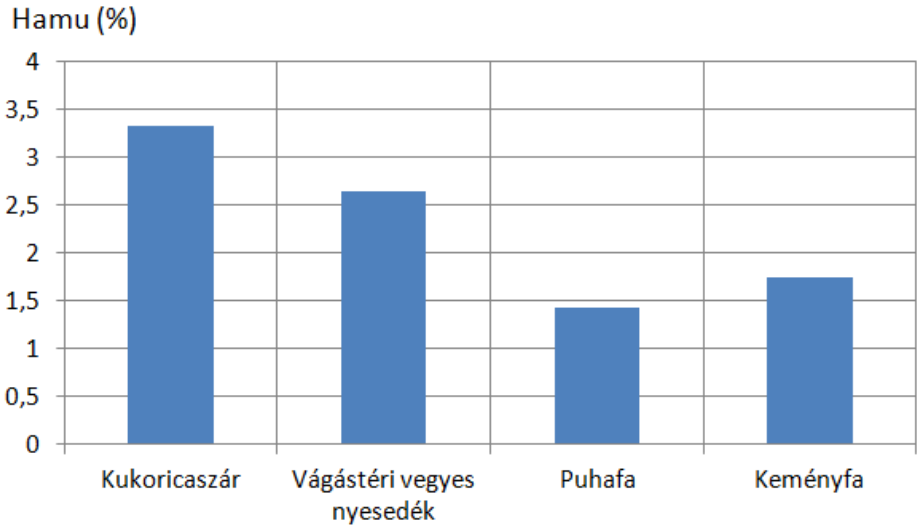
	N (%)	C (%)	S (%)	H (%)	O %	Cl (%)
Keményfa	0,10	42,83	0,07	6,29	39,91	0,00025
Puhafa	0,05	40,29	0,07	6,61	41,19	0,00025
Vágástéri nyesedék	0,42	34,85	0,09	7,06	37,10	0,01215
Kukoricaszár	0,23	41,47	0,13	6,21	37,20	0,1295

4.8. ábra A belső összetétel %-os arányai (víz, hamu nélkül)

Ezen anyagokban a számottevő eltérés csupán a N és a Cl arányában van. A szén és a hidrogén arányai közel azonosak. A vágástéri nyesedék alacsonyabb széntartalmát feltehetően a nem szétválasztható szennyeződés (leginkább föld) okozta.

Hamutartalom (4.9 ábra)

A termokémiai folyamat során lebontott tüzelőanyag maradványa a hamu, mely különböző ásványi anyagok oxidációjából képződik. Gázgenerátoroknál fontos figyelembe venni a különböző biomasszák hamusodási képességét és hőfokait, mert ez befolyásolja a technológiai kialakítást, a hamu eltávolítás lehetőségét. Ha egy adott biomassza alapanyagnál a hamu olvadáspontja alacsony, salakká éghet össze, ami dugulást okoz. A hamu a redukciós felületeken réteget alkot, ami csökkenti széndioxid szénmonoxiddá való redukálását. A feleületeket a folyamatok befejezését követően szemrevételezéssel elleöríztem, majd meghatároztam a %-os arányokat.

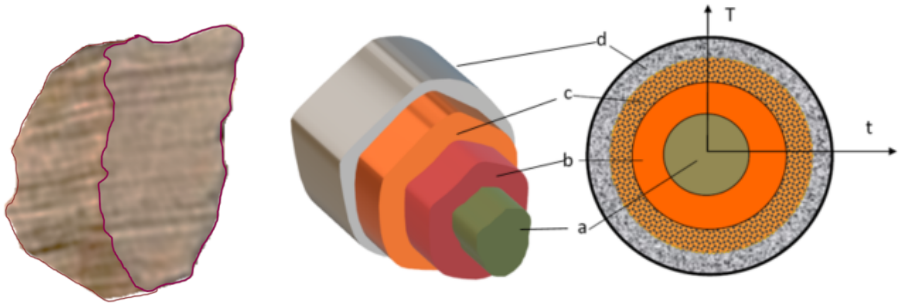


4.9. ábra A hamu mennyisége néhány jellemző anyagnál

A rostélyokra való feltapadás és a salakosodás elkerülése miatt igen lényeges, hogy az adott anyag milyen tulajdonságú hamumaradékkal rendelkezik. Erre jellemző az ún, deformációs pont meghatározása. Mivel a bioanyagok pirolízisénél 1000 ºC-nál magasabb hőfokot nem alkalmazunk, a vizsgált anyagoknál a hamu deformációja 1000 ºC fölött következik be.

4.2.1. A szemcsés szén gázáteresztő képességének megállapítása

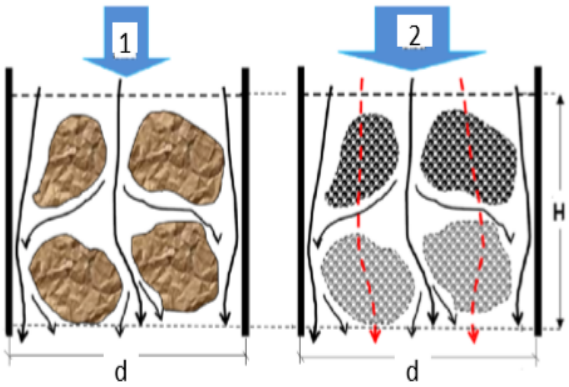
A pirolízis mechanizmusa nagyon összetett, de a folyamata az anyagrészecskék méretétől és a fűtési sebességtől alapvetően függ. Egy szemcsét vizsgálva a geometriai (gömb, henger, szabálytalan téglatest stb.) rétegeiben hasonló folyamatok vannak, mint a pirolízis reaktorban lévő anyag teljes tömegében (4.10 ábra).



4.10. ábra A részecskében elkülöníthető négy réteg (t=idő, T = ºK)

a) alapanyag, b) pirolízis, c) illó anyagok kiválása, d) szén rétegek (benne gázok, illó anyagok)

A különféle anyagszemcsék egymásmelletti elhelyezkedése (porozitása), a hézagok mérete, az anyag „tömörsége” határozza meg a halmaz gázáteresztő képességét és ezzel a reakciók sebességére is hatással van. (4.11. ábra). Ez különösen fontos az oxidációs és redukciós zónákban, ahol a gáz minősége kialakul.



4.11. ábra A rendszer jellemző ábrái (fa szemcséknél, 2 – szén szemcséknél)

A porozitás meghatározásához térfogatokat, és/vagy sűrűségeket kell mérni. A relatív hézagtérfogat a szemcsék közötti hézagtérfogatnak az összes térfogathoz viszonyított értéke:

$$\varepsilon = \frac{V_h}{V + V_h}, \tag{4.1}$$

ahol:
- V = az anyagtérfogat,
- V_h = az ún. hézagtérfogat.

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

$$\rho_t = \frac{m}{V + V_h}, \tag{4.2}$$

ahol:
- m = az anyag tömege.

Ezzel a porozitás:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_t}{\rho}, \tag{4.3}$$

ahol:
- ρ = az eredeti anyag sűrűsége.

Pirolízálás során a szemcsék között levegő, illetve termékgáz áramlik át.
A szemcsézett közegen át a gáz átáramlásának intenzitása, a rendszer nyomás-gradiensével arányos (Darcy- törvénye).

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

$$q_h = \frac{\Delta p}{h}, \tag{4.4}$$

ahol:
- $\Delta p = (p_k - p_o)$ = gáz nyomásának különbsége
- h = mérési pontok távolsága.

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

$$\kappa = \frac{\varepsilon \rho g}{\mu}, \tag{4.5}$$

ahol:

- ε = a szemcsés halmaz porozitása,
- ρ = a gáz sűrűsége [kg/m^3],
- μ = a gáz dinamikai viszkozitása [Pa s],
- g = a gravitációs állandó [m/s^2].

A κ nevezhető a halmaz gázvezető képességének is.

Végül is a vezetőképesség a különféle anyagoknál az aprózottság mértékétől, az anyagok szilárdságától, a szemcsék alakjától (pl. pellet, gyaluforgács, darált puha, vagy keményfa, szálas apríték stb.) függ.

Ezek alapján a halmaz lehet durván-, vagy finoman szemcsézett, vagyis nagy- és kisméretű szemcséket egyaránt tartalmazó, továbbá kemény és puha szemcsékből álló stb. Pirolízálódás során az erősen inhomogén anyagoknál az alsó és felső rétegek ellenállása eltérő. Erős

hamuképződéssel a vezetőképesség romlik. A sok homokot, port tartalmazó anyagok is hasonló jellemzőket adnak.

4.2.2. Áramlási intenzitás és vonal menti sebesség

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

$$q_i = -\kappa \frac{\Delta p}{h}. \tag{4.6}$$

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

A rétegvastagság és a gázelvezetés teljes felületi mérete (a kettő viszonya) a teljes tömegáramot meghatározza (Q):

$$Q = -\kappa A \frac{\Delta p}{h}. \tag{4.7}$$

Például a kísérleti modell felső végén kiáramló gázhozam Q nagysága [m^3/s, ill. kg/s] függ a bent lévő anyag vezetőképességétől, az áramlási keresztmetszettől és a nyomási gradienstől.

Az egységnyi keresztmetszeten átáramló hozam (inhomogén gradiens):

$$q_i = \frac{Q}{A}. \tag{4.8}$$

Vagyis, q az áramlási intenzitás (m/s) sebesség dimenziójú. Makroszkópikusan szemlélve átlagos gázsebesség értékét (felületi átlagértéket ad).

Az anyaghalmaz belsejében az áramlásokat végül is a porozitása (ε) határozza meg.

$$v = \frac{q_i}{\varepsilon}. \tag{4.9}$$

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

Meg kell különböztetni az átáramlott mennyiséghez (hozam, Q) kapcsolódó áramlási intenzitást (fluxus, q) és az anyagban áramló gáz sebességét (v).

A rendszer jellemzői kalkulálhatók, de ehhez kísérleti alapon több tényezőt előre meg kell határozni.

A halmazon átáramló gáz nyomásváltozása a légsebesség változásának függvénye, amely mérésekkel meghatározható.

$$\Delta p = f(v_f). \tag{4.9}$$

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

Általánosan elfogadott, hogy ezek:

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

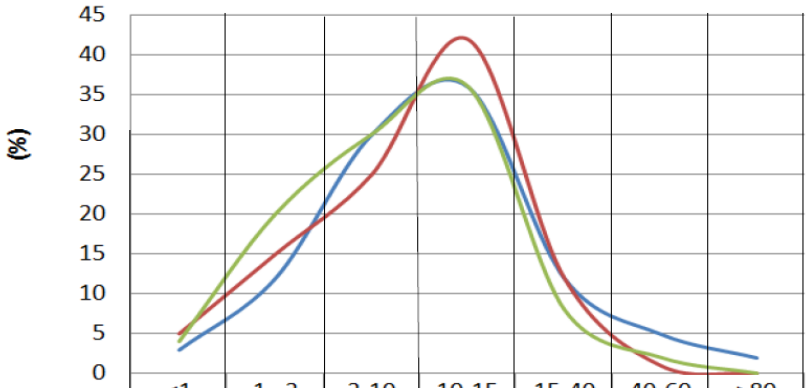
Aprítás jellemzői:

a biomassza anyag aprítása révén csökken az egyes darabok mérete (x_n), de növekszik az apríték darabok összes felülete (F_n), amely a pirolízis szempontjából meghatározó, a már említett és még több tényezőre is:

$$F_n = F_0 \frac{x_0}{x_n}. \tag{4.10}$$

Az apríték darabok aprítás előtt (x_o) és -utáni méretarányai változóak. Ha az apríték darabok méretéből méretosztályokat képezünk, akkor eloszlásfüggvényt rajzolhatunk fel. Ezek momentumai az x_0 és az x_n méretek. E méretek kerülnek a képletbe behelyettesítésre. (egyeztethetők a darabolt anyagok méretszabványában megadott értékekkel is).

Három gyakori és a vizsgált anyag aprítás utáni rostavizsgálatát szemlélteti a 4.12. ábra.



	<1	1 - 3	3-10	10-15	15-40	40-60	>80
Keményfa	3	12	30	36	12	5	2
Kukoricaszár	5	15	25	42	12	1	0
Puhafa	4	20	30	36	8	2	0

A (mm^2)

4.12. ábra Az aprítékok szemcseeloszlásának gyakorisági görbéi

A biomasszák aprítása jelentős energiaigénnyel jár. Kick (1955) szerint az energia igény az aprítás előtti (x_0) és az aprítás utáni (x_n) apríték darabok méretarányának logaritmusától és az anyag k_a tényezőjétől függ (ennek értékét az anyagok szilárdsági értékei adják).

Tehát:

$$W = k_a ln \frac{x_0}{x_n}. \tag{4.11}$$

Ha légszáraz anyagnál darabolás során megmérjük a felhasznált energiát, kiszámíthatjuk az adott anyagra vonatkozó k_a értéket.

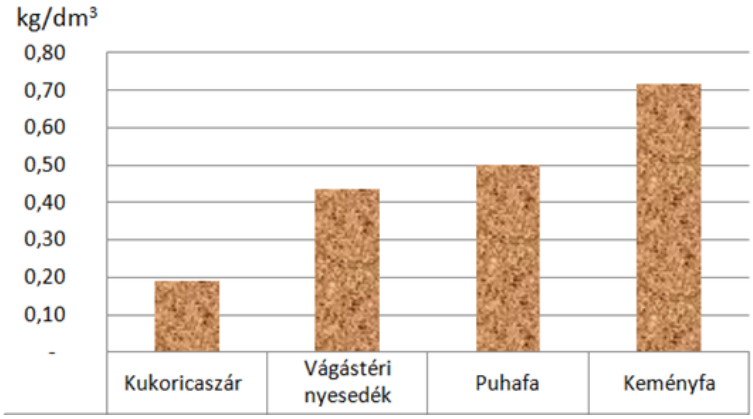
Az aprítás energiaszükséglete arányosan nő a szemcsék számának növekedésével és ebből fakadóan a felületnövekedéssel.

4.2.3. Alapanyag sűrűségéből származó eredmények

Az anyagok sűrűségében igen jelentős eltérések vannak, amik függnek az alapanyag biológiai jellemzőitől, a nedvességtartalmától és az aprítottság és a tömörítettség fokától. Például, a fa esetében meglehet különböztetni a törzs, a kéreg és a tuskó sűrűségét eredeti állapotában is. Ennek megfelelően számottevő eltérések vannak a cellulóz, a hemicellulóz és a lignin tartalomban is. Ezek kihatása jelentős az energiatartalomra és a hamu mennyiségére is. Ezt igazolja a K és Si és Mg tartalomban jelentkező eltérés. Amig a fa belsőben és a tuskóban közel

azonosak az arányok a fa kéreg ezeket az anyagokat 4-10 szeres mennyiségben is tartalmazhatja. Ezeket a részeket tisztán lebontva a hamu mennyisége 200%-kal is nagyobb lehet. A tüzelőanyag tömegsűrűsége általában arányos a tüzelőanyag energiasűrűségével. Ezért is a kis halmazsűrűségű anyagokat préseléssel tömörítik, így nagyobb „anyagsűrűséget" érnek el. Meghatároztam, hogy mekkora változások következnek be, különféle anyagoknál a préselés hatására.

Préselés nélkül a különféle aprított anyagok sűrűségei jelentősen eltérők (4.13. ábra)

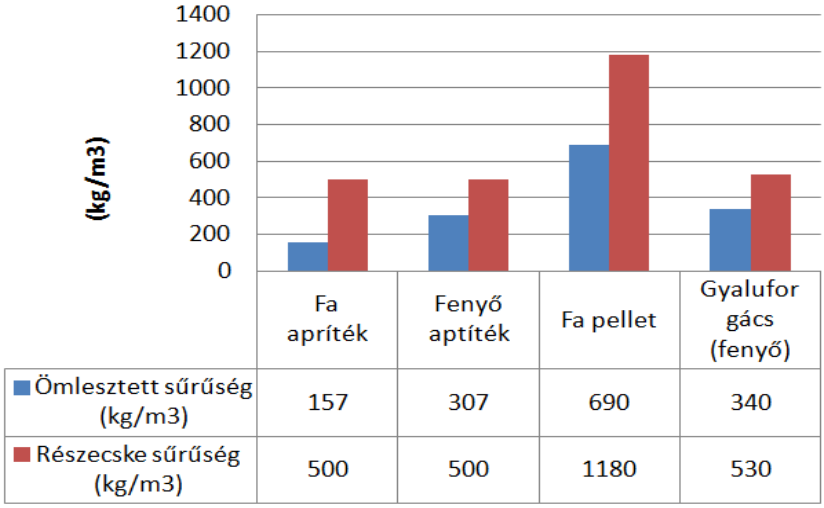


4.13. ábra Néhány vizsgált apríték sűrűsége (~ 15% nedvességtartalomnál)

A méréseim során azt tapasztaltam, hogy a nagyobb sűrűségű eltérés ellenére a fajlagos energiatartalomban már kisebb arányú eltérések tapasztalhatók.

Pelletek jellemzői:

A pelletek halmaz sűrűsége a nedvességtartalom és az átmérő függvényében is változik. Sok törmeléket, szétesett pellet darabokat tartalmazó anyag halmazsűrűsége csökken, de ez igaz az így létrejövő frakciók méretére is. A sok apró frakciót tartalmazó anyag a nedvességtartalom hatására kisebb térfogattömeggel rendelkezik. Mindezek igazak a kisebb és nagyobb átmérőre készített pelletekre is. A 4.14. ábra néhány vizsgált anyagnál az ömlesztett és a préselt sűrűséget mutatja be.



4.14. ábra Fa aprítékból készült pelletek jellemzői (fa apríték - teljes növényre, fenyő - csak asztalosipari maradékokra)

A pellettálás hatására nő a fajlagos energiatartalom, de ismerni kell, hogy a sűrűség (arányosan az energiatartalommal) növelésével az energiaráfordítás is nagyobb. A szén és hidrogén, valamint az oxigén mennyiségének aránya befolyásolja a nyerhető gáz energiatartalmát. Például a működő egységünknél a 15% nedvességtartalmú faapríték használatakor, ha az O/(C+H) arány csökkent 0,803-ról 0,69-re, a gáz energiatartalma 77,9%-ról 78,7%-ra növekedett. Hasonló a helyzet a kisebb belső energia tartalmú anyagoknál is. A pirolízálásnál nyert hideg gázra vonatkoztatott energiatartalom csökkenés, 12-15%-os fűtőérték csökkenés esetén csupán 1,0-1,4%-os hideggáz energia csökkenést jelentett.

A fentiekből következik, hogy a felület-, tehát az aprítás mértékének növelése a pirolízis szempontjából – hőtechnikai szempontból - meghatározott arányig előnyös, de energia igénye nagy és ezért az optimumra kell törekedni. A túlzottan aprított anyag a gázáramlási ellenállását is növeli, erre a jelenségre későbbiekben térek ki részletesen. A biomasszából nyert szén erősen porózus anyag. A belső részének porozitása általában nem egyenletes, jellemzően apró anizotrop szerkezetű, a külső részeken keletkező pórusok kiszélesednek. A pórusok lehetnek:

- nyitott,
- zárt, vagy,
- összekapcsolt formák.

A kutatások szerint a magasabb hőmérséklet hatására jelentős változásokon mennek át (Santiago, 2011).

A rétegvastagság hatása

Külön, erre a célra készített laboratóriumi egységben vizsgáltam a pirolízis és redukkciós zónában keletkezett nagy mennyiségben lévő szemcsés szén légáteresztő képességét, ill. azt, hogy mekkora nyomás mellett jön létre az anyagi részecskék elmozduláshoz szükséges légáram. A modell jellemzőit a 4.4–4.6 táblázatok, valamint a 4.15–4.18 ábrák tartalmazzák.

4.4. táblázat Rétegvastagság és sűrűség

A réteg vastagsága	Sűrűség
m	kg/m^3
0,25	220
0,50	220

E jelenségek igen lényegesek a fixágyas, függőleges generátoroknál, különösen, ha nem csak szén, hanem hő és villamos energia előállítása is a cél. A primer levegő bevezetése, annak mennyisége az égési hőfok fenntartása és a keletkező kátrány redukálása miatt is igen lényeges.

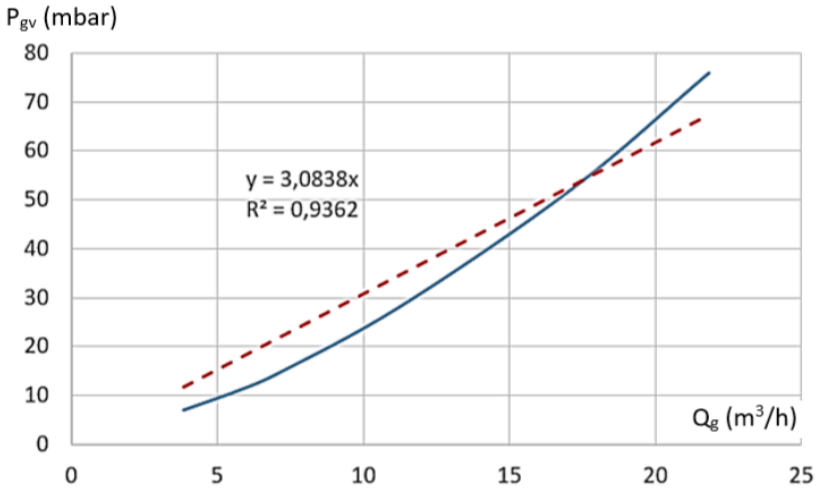
4.5. táblázat Az oxidációs tér és a redukciós tér közötti áramlási jellemzők (0,25 m szénréteg)

Merés sz.	Időtartam s	Térfogatáram m^3/h	sebesség m/s	Nyomás különbség mbar	Hajtóerő N	Az anyag tömege (kg)
1	94	3,83	0,06	7	12,86	9,91
2	63	5,71	0,09	11	20,21	9,91
3	51	7,06	0,11	14,5	26,65	9,91
4	32	11,25	0,17	28,2	51,82	9,91

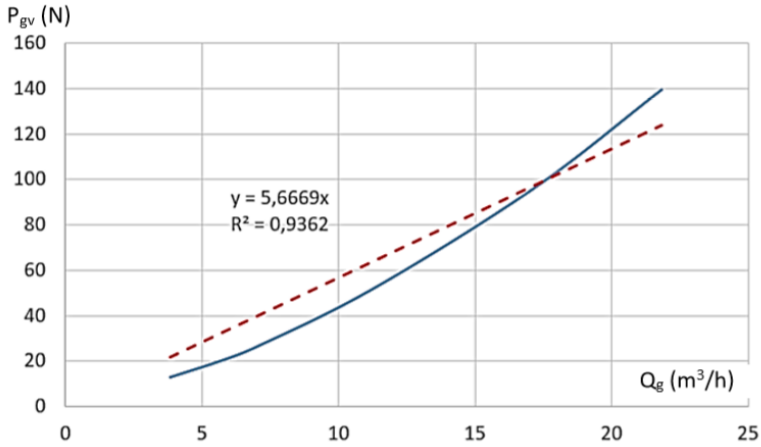
5	42	17,14	0,26	52,3	96,11	9,91
6	33	21,82	0,33	76	139,66	9,91

4.6. táblázat Az oxidációs tér és a gáztér közötti áramlási jellemzők (0,50 m szénréteg)

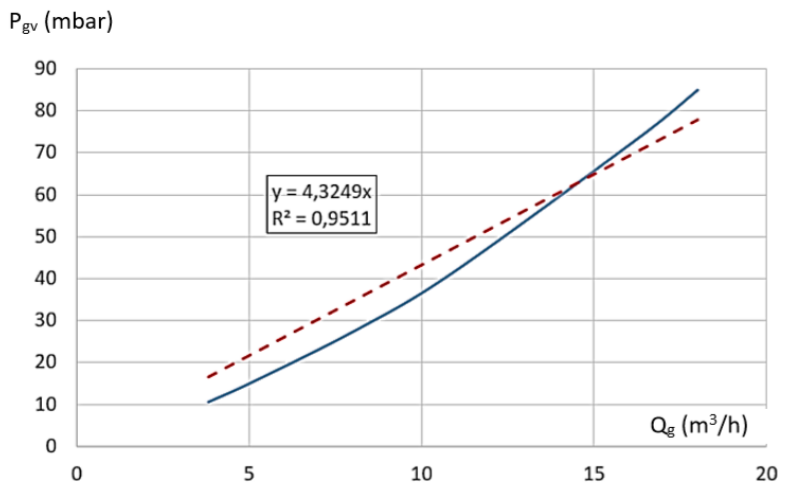
Merés sz.	Időtartam s	térfogatáram m^3/h	sebesség m/s	Nyomás különbség mbar	Hajtó erő (N)	Az anyag tömege (kg)
1	94	3,83	0,06	10,5	19,29	19,83
2	70	5,14	0,08	15,4	28,30	19,83
3	44	8,18	0,12	28	51,45	19,83
4	33	10,91	0,16	41,4	76,08	19,83
5	44	16,36	0,25	74	135,98	19,83
6	40	18,00	0,27	85	156,20	19,83



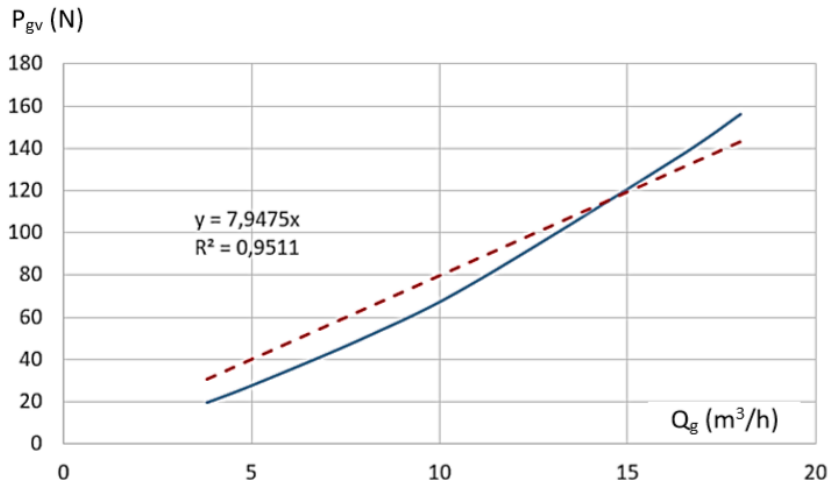
4.15. ábra Nyomáskülönbség a tömegáram függvényében (0,25 m szénréteg)



4.16. ábra Hajtóerő a tömegáram függvényében (0,25 m szénréteg)



4.17. ábra Nyomáskülönbség a tömegáram függvényében (0,5 m szénréteg)



4.18. ábra A szükséges nyomáskülönbség a tömegáram függvényében (0,5 m szénréteg)

A mérések során szerzett tapasztalatokra támaszkodva megállapítottam, hogy két kezelési hőméréklet, a szemcseméret és a teljes töltet tömegsűrűsége feltétlen kihat a pirolízis-folyamatra. Az eljárás során nem csak a teljes töltet gázáteresztőképessége változik meg az anyagi összeomlásokból fakadóan, hanem az egyes szemcsék porozitása is, így a gáz nem csak a reaktor fala mellett és a szemcsék között áramlik, hanem a szemcséken keresztül is. Ezáltal nagyobb felületen játszódik le a pirolízis reakció, emellett a termékgáz kátránytartalmának jelentős része lerakódik. Ennek az ismeretnek a birtokában a félüzemi egység nagy tisztaságú (<50 mg/m^3 kátránytartalom) termékgázt képes előállítani, ami biztosítja a kapcsolt gázmotor 7000 óra/év futásteljesítményét.

4.3. Az új laboratóriumi 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.

4.3.1. A pirolízisgenerátor kialakításának jellemzése

A rendszer legfontosabb eleme a generátortest és a lebontási folyamatban résztvevő elemek funkcionális rendszere (4.19 ábra).

A tervezett rendszerünkben a felső részén lévő idomcső oldalsó ágán át érkezik az előtárolóból a biomassza a csigás adagolón át (1).

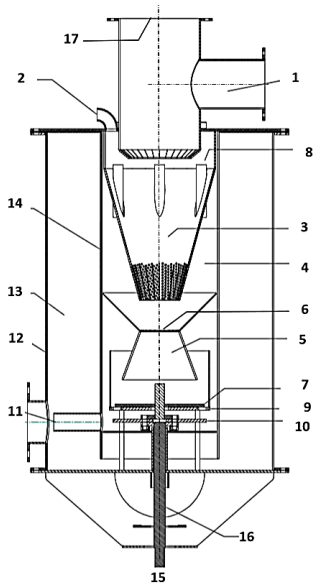
A beejtő cső alsó része kúpos kialakítású azért, hogy az anyag irányítottan pirolízis kúp középső szakaszára hulljon be.

A pirolízis kúp (3) alsó része perforált kialakítású és a teljes felületét a magas hőmérséklete oxidációs tér (4) veszi körül.

Az anyag innét a kettős kúpos (5) kialakítású redukciós zónában kerül. A kettős kúp középső részénél lévő szűkítés – torok - (6) igen lényeges a rendszer működése szempontjából. A különféle anyagoknak eltérő a belső- és a falon kialakuló súrlódási tényezője van. A súrlódás függ az anyagok szemcseméretétől és szemcsék belső szilárdságától.

A felső kúpból áramló, „áthulló” anyag az alatta lévő redukciós tartályba kerül. Innét a gáz oldalirányba és felfelé is képes áramlani, s az így létrejövő nyomásesés okozta nyomáskülönbséget, ami segíti az anyag átáramlását.

E tartály az alsó részén lévő forgó kaparókés (7) a darabos anyagokat, az esetleg összeálló szénrészeket (salak) feldarabolja és így a már kisebb részecskék képesek áthullani az alatta lévő rácson (9). A rács alatt ugyancsak a forgókotró (10) helyezkedik el, amelynek az a feladata, hogy a lehullott kisebb szemcsés és porszerű hamut, valamint kisebb szénrészecskéket a gáz kivezető nyílás (11) irányába terelje. A gáz, a kivezető nyíláson át a gázszűrőhöz jut, ahol a szilárd részek leválasztása megtörténik (lásd. 8.7 ábrát a mellékletben) és csak tiszta gáz áramolhat tovább a motor irányába. A pirolízishez szükséges előmelegített levegő bevezetése a pirolízis tartály felső részén (2) történik, hogy a pirolízis folyamata intenzívebb, az oxidációs részben a bontás hatékonyabb legyen. A kúpos tartály az oldalsó részén pirolízis gázt elszívó csövekben gáz sugárszivattyú nyílások (8) vannak. A generátor külső, vastagrétegű szigetelése (13) megakadályozza a hőelvezetést és ezzel is javul a rendszer hatásfoka. Az általunk javasolt rendszernél a beépített injektoron át a rezgő-szelep segítségével adalékoljuk vizet a tápláló levegőhöz és e keverék jut a rendszer oxidációs és redukciós tereibe. Ezzel az a cél, hogy javuljon a gáz fűtőértéke, energiatartalma és kátránymentes gázt kapjunk.



4.19. ábra A pirolízisgenerátor vázlata

A 4.19 ábra jeleit a 4.7 számú táblázat sorolj fel.

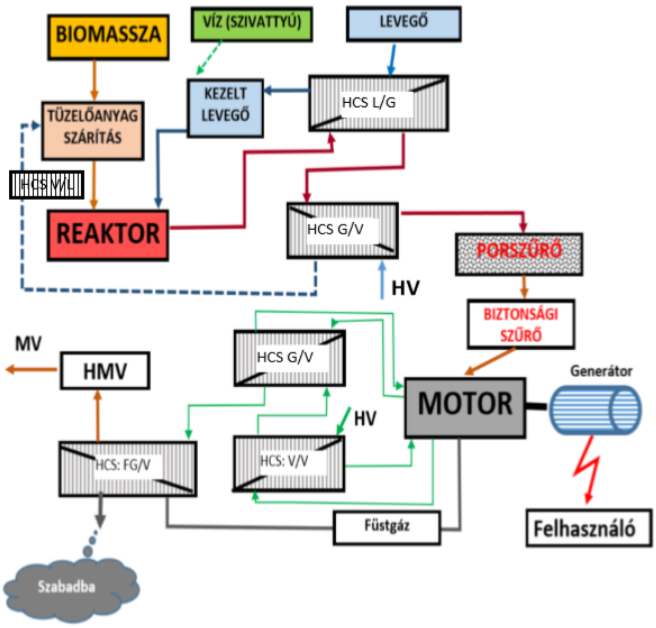
4.7. táblázat A reaktortest részei

Szám	Megnevezés
1	Tüzelőanyag adagoló (csigás)
2	Előmelegített levegő, gázosítási segédanyag
3	Szenesítési zóna (pirolízis kúp)
4	Oxidációs kamra
5	Redukciós zóna (redukciós kúp)
6	Átömlő keresztmetszet
7	Forgó penge (kaparó kés)
8	A pirolízis gázt elszívó gáz sugárszivattyú
9	Rostély
10	Forgókotró
11	A gáz elvezetése
12	Gáz záró külső köpeny
13	Hőszigetelés
14	Gáz és szilárd anyagterelő belső hőálló köpeny
15	Hajtómotor
16	Hajtótengely
17	Zárófedél javításnál szerelésnél

4.3.2. 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

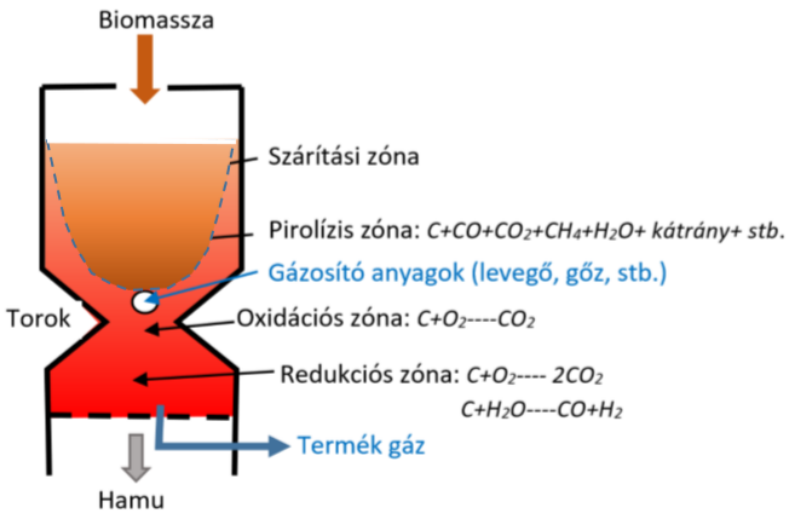
a forró gázból nyert energia szolgáltatja a gáz-levegő hőcserélő közbeiktatásával (4.20 ábra, a folyamatok irányát a nyilak jelzik). Az oxidációs térbe kerülő levegő előmelegítése ugyancsak - az említett - hőcserélőn keresztül átáramló levegővel történik. Tehát e hőcserélő másik oldalán megtörténik a 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 megvédhető az égéstérben 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 funkcionális felépítését a 4.20 ábra mutatja be. A rendszer további funkcionális elemeinek részletes leírását a későbbiekben mutatom be.



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

A gyakorlati megvalósítás során összeépült reaktor rendszerelemeit lásd a mellékletben.

A berendezés azon részén, ahol a levegőt bevezetjük, megy végbe a pirolízis termékek meghatározó részének oxidálása. E levegő a későbbi, az endotermális folyamatokban a hőbontási hőszükségletet fedezi. Ezen és ez alatti zónának további fontos jellemzője a pirolízis zónában létrejövő kátrány lebontása, kisebb molekulákká alakítása. A kátrány nem léphet túl az oxidációs zónán. Ezért itt nem alakulhat ki alacsonyabb hőfokú terület. A fix-ágyas (zónás) reaktor modellben a pörkölődési előrehaladás, lefelé mutató parabolikus kúp formában megy végbe. Ezért is lényeges a magasság/átmérő viszonyának megfelelő meghatározása. Ehhez az előkísérletek adtak jó alapadagokat (a jelen megoldást ~2,0 - re választottuk).



4.21. ábra Az alsó-elvezetésű fixágyas rendszer elvi működése

Tehát az oxidációs zóna geometriája alapvető és kritikus tervezési tényező. A torokban sűrűsödő anyag segíti a hő koncentrálását, tehát a légáramnak olyannak kell lenni, hogy a teljes keresztmetszetben azonosan magas hőmérsékleti zóna alakuljon ki (4.21 ábra). A lényeg az, hogy a beérkező levegő (levegő - gőz keveréknek) a falig tartó teljes keresztmetszetet ki kell tölteni. E szilárd ágyban lévő levegő áramlása nagymértékben függ a szemcseméretől, valamint a bevezető nyílás (száradási tér felső nyílás) felületének és az átömlő nyílás felületi arány az 5-10 értéken lehet előnyös. A szűkítési zónában figyelni kell a geometriai kialakításra. A szénnek és a gázoknak a tartózkodási ideje megfelelő hosszú legyen ahhoz, hogy a konverziót maximális szintet érjen el. Az átmeneti kettős kúpban általában a 3/2-es szűkítés a megfelelő, de a tényleges méretek a szemcsézettségtől, a szemcsék méretétől függ, mivel a részecskék közötti súrlódási (morzsolódási) folyamatok fontos szerepet játszanak a redukcióban. A gázosító anyag bevezetésénél a nyílás és a fal között (D) előnyös, ha legalább 10 nagyrészecske méretnek megfelelő hely van (pl. G30 anyagnál 300 -500 mm). A garat fölött lévő anyag mennyiségével nő a felület és a szemcsék között kölcsönhatás, vagyis nő az oldalfalon és a szemcsék közt fellépő súrlódás is. Ha egy Δh vastagságú szemcserétegre a fal nagyobb súrlódási erőt fejt ki, mint a réteg súlya, akkor a nyomás nem növekszik tovább. A maximális nyomás (p_{max}) és a tartály aljára ható maximális erő:

$$p_{max} = \frac{r\rho g}{2\mu^*} \quad \text{és} \quad F_{max} = p_{max} r^2 \pi = \frac{r^3 \pi \rho g}{2\mu^*}, \tag{4.16}$$

ahol:

- r=nyílás átmérője,
- F_{max}=a nyílás keresztmetszete
- ρ=az anyag sűrűsége
- μ*=a szemcsék közötti súrlódási tényező (a szemcseméretől függően változik).

A redukciós kúp nyílása és szöge

Gyakorlati kérdés, hogy a tároló tartályokból az anyag gravitációsan kifolyik-e, vagy vibráció szükséges. Példaképp egy r sugarú, h magasságú hengeres tartályt, ahol $h \gg r$. Ha a tartályba szemcsés anyagot töltünk, a tartály aljára ható nyomás kezdetben a folyadékok hidrosztatikai nyomásához hasonlóan növekszik. A beöntött anyag mennyiségével azonban nő az oldalfalra és a szemcsék közötti kölcsönhatás, és ezzel együtt nő az oldalfalon és a szemcsék közt fellépő

súrlódás is. Ha egy Δh vastagságú szemcserétegre a fal nagyobb súrlódási erőt fejt ki, mint a réteg súlya, akkor a nyomás nem növekszik tovább. A maximális nyomás (p_{max}) és a tartály aljára ható maximális erő:

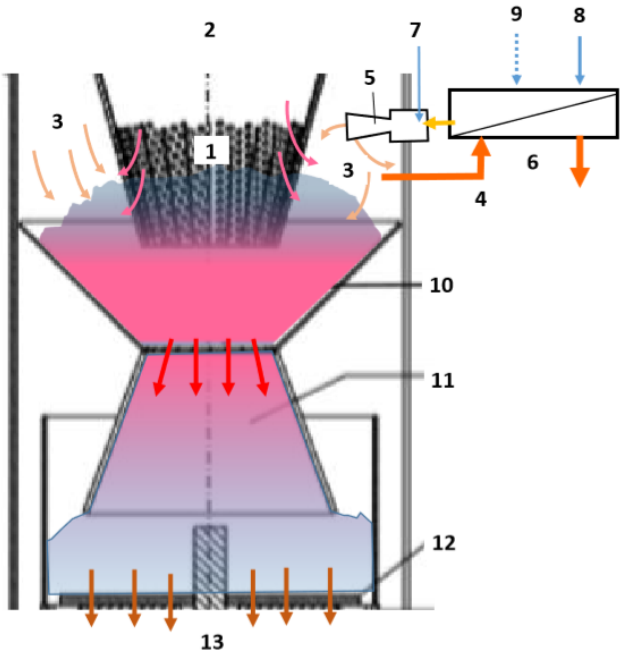
$$p_{max} = \frac{r\rho g}{2\mu^*} \quad \text{és} \quad F_{max} = p_{max} r^2 \pi = \frac{r^3 \pi \rho g}{2\mu^*}, \tag{4.17}$$

ahol:

- r=nyílás átmérője,
- F_{max}=a nyílás keresztmetszete,
- ρ=az anyag sűrűsége,
- μ*=a szemcsék közötti súrlódási tényező.

A beöntött anyag súlyának egy részét az oldalfal tartja, amire függőleges eredő erők is hatnak. Az anyagban jelentkező befeszülések, a kifolyást akadályozó boltozódások jelentkeznek. Ennek mértéke az aprítás minőségével számottevően összefügg, pl. a hosszabb szálmaradványok a primer kiváltó okok is lehetnek. Az anyagoszlop magasságából fakadó gravitáción túl a halmaz egyensúlyát a szemcsék közti nyomó és súrlódási erők határozzák meg. A szabálytalan alak miatt a befeszülések, beékelődések is keletkezhetnek. E szempontból a statikájuk legegyszerűbb kísérleti vizsgálata a rézsűszög mérése.

A 4.22 ábra a prolízisgenerátor funkcionális felépítését mutatja be.



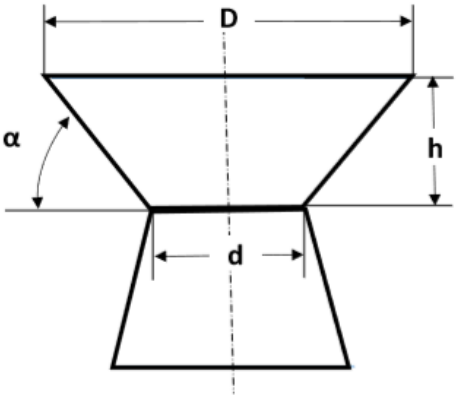
4.22. ábra A generátor funkcionális jellemzése,

1- Szenesítés, pirolízis tér, 2- Szárítási zóna, 3- Oxidációs kamra, 4- Elsődleges gáz, 5- Injektor, 6- Hőcserélő, 7- Biomasszával érkező levegő (külső nyomással), 8- Fűtött levegő, 9- Vízbefecskendezés (rezgő szivattyútól), 10- Kettős kúp (redukciós átfolyó), 11- Redukciós zóna, 12- Forgó penge és rács, 13- Forró gáz, hamu, korom, szénrészecskék

A betöltött anyagok nem folynak szét, hanem egy többé-kevésbé szabályos kúpot alkotnak. A kúp alkotójának vízszintessel bezárt α szöge a rézsűszög. A szemcsék méretétől, alakjától, anyagi minőségétől függő rézsűszög mértékét a konstrukción túl egyéb működtető erők is

befolyásolják. Jelen esetben a szemcsék között áramló gáz, amely elmozdulásukat eredményezi, de szerepet játszik a redukciós kosár alsó részén lévő aprító kés is, amelynek vertikális irányú erő kihatása is van.

Az oxidációs és redukciós zóna közötti átmenet kialakítása. (4.23. ábra)



4.23. ábra A kettős kúp az oxidációs és redukciós zóna között

A felső kúp szöge:

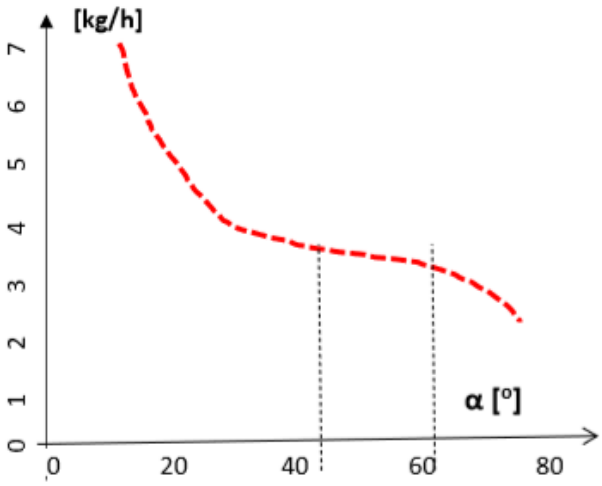
$$tg\alpha = \frac{D - d}{2\,h}, \tag{4.18}$$

ahol:

- D= az oxidációs zóna átmérője (300 mm),
- d= átmenet (szűkület) átmérője (100 mm),
- h= a redukciós zóna felső kúpjának magassága (170 mm).

(A részletesebb elemzést a melléklet tartalmazza).

Síklapon szénszemcsékkel (~1,0-8,0 mm) végzett modellmérések szerint a lefolyási intenzitása a ~40-60°-os tartományban stabil, ami a rendszer egyenletes működése szempontjából előnyös (4.24. ábra).



4.24. ábra Az α alakulásának függvényében a tömegáram

A súrlódási félkúpszög (tgρ) a 60°-os dőlésszögű „tölcsér” esetén az átfolyás lehetősége a szabadkifolyási értékre csökken. α = 60° fölött az acél és szén esetén a ρ már kisebb 8°-9°-nál, a mi a belső súrlódási értéknél kisebb, ezáltal a boltozódási hajlam mérsékelt (elhanyagolható). Gyakorlatilag az ebből adódó reakció erőt a nyomáskülönbség hatása leküzdi. Az átfolyás a számított és mért átfolyási tömegáramnál (sebességnél) biztonságos.
Ezért a kúpszöget 60°-ra választottuk.

Vízbevezetés

A Mono mágnesszelep szivattyú, amely a folyadékok viszonylag nagy nyomáson történő pumpálására lett tervezve, elektromágneses visszacsapó szelepekkel és rozsdamentes acél dugattyúval.

Az adagolási frekvenciával tettük változtathatóvá, s ezzel a kívánt értékűre állítottuk a vízáramot.

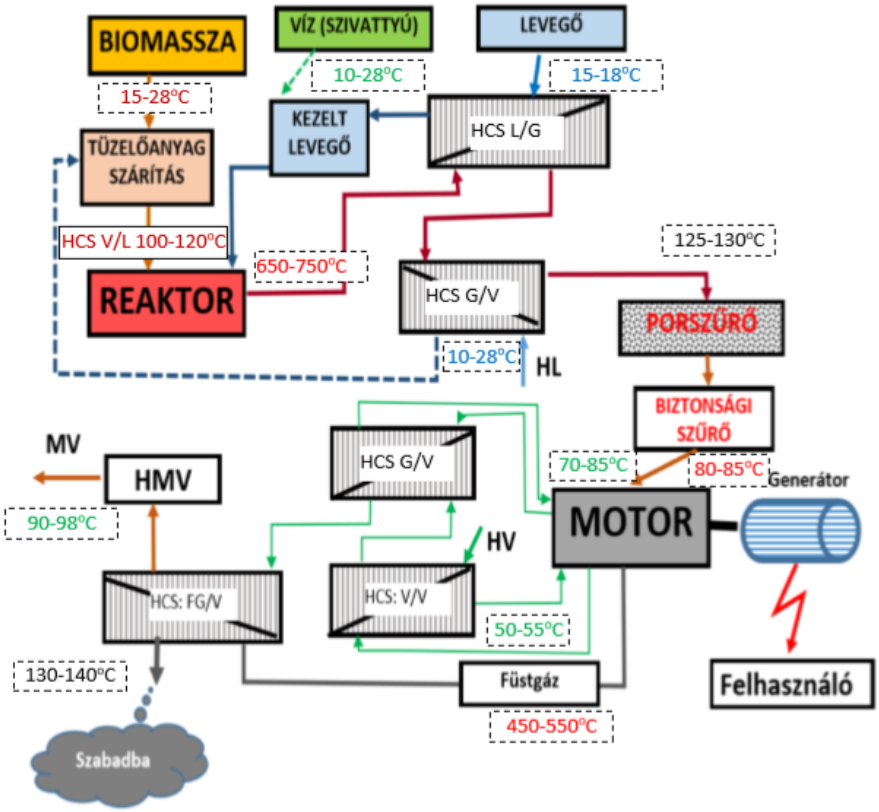
4.3.3. Gázszűrő

A kiválasztott technológiánál a porszűrőn átvezethető gáz maximális hőmérséklete a 130 °C-nál nem magasabb. A gázszűrőről készült ábrákat a melléklet tartalmazza.

4.3.4. A rendszer hőtechnikai jellemzése (A félüzemű kísérleti berendezéssel végzett vizsgálatok)

Alapvető cél volt, hogy a reaktorban beérkező biomassza állandó hőmérsékletű és nedvesség tartalmú legyen. Ez csak azzal érhető el, hogy még a reaktor előtt úgynevezett előszárítást végzünk. Ehhez a reaktorban keletkező hőt használjuk. Mégpedig úgy, hogy a reaktorbol kikerülő magas hőmérsékletű gázt (650-700 oC) hőcserélőkbe vezetjük. A második helyen lévő hőcserélőből 100-120 oC-ra. Ezáltal a beérkező tüzelőanyag hőmérséklete megközelítőleg 100 °C.
A reaktorból kikerülő gáz hőmérséklete 650-750 °C. Tekintve, hogy az ellenoldali hőmérséklet alacsony, a gáz jelentős hőfok veszteséggel jut a második hőcserélőre, amelynek ellen oldalán a reaktorba bemenő levegő előmelegítése történik. E hőcserélőből a gáz már 125 °C-on jut a porszűrőbe. A porszűrőben a környezetnek ad le energiát, csökken a hőmérséklete, tehát még alacsonyabb hőmérsékleten kerül a biztonsági szűrőbe. Ebben a legkisebb szemcsés anyagok is kiszűrésre kerülnek és a gáz 80-85 °C-ra hűlve kerül a motor szívóterébe. A motor hűtési hője is hasznosításra kerül. A gázmotorok általában a bevitt energiának 30-35%-át képesek hasznosítani, a többi energia hő formájában távozik a rendszerből. A hő visszanyerésére két lehetőség van, az egyik a hűtővízből, a másik az olajhűtésből (4.25 ábra).

A harmadik rész a füstgázzal távozik. A motor hűtésére két hőcserélőt alkalmazunk. Az egyik hőcserélővel történik a motor vizének lehűtése, a másikkal pedig a kenéshez használt olaj hűtése. Itt kerül bevezetésre a hőcserélő másik oldalán a használati melegvízhez beadagolt 14-18 °C-os víz. A másik hőcserélőben ez a víz már 50-55 °C-ra melegszik és így jut tovább a használati melegvíz hőcserélőbe, melynek meleg oldalán található a füstgáz átvezetés. Ide a füstgáz 5-600 °C-osan érkezik és 130 - 140 °C-osan hagyja el a hőcserélőt. A víz oldalon a használati melegvíz 85 - 100 °C-on távozik a rendszerhez csatlakozó tárolóba vagy közvetlen felhasználási területhez.



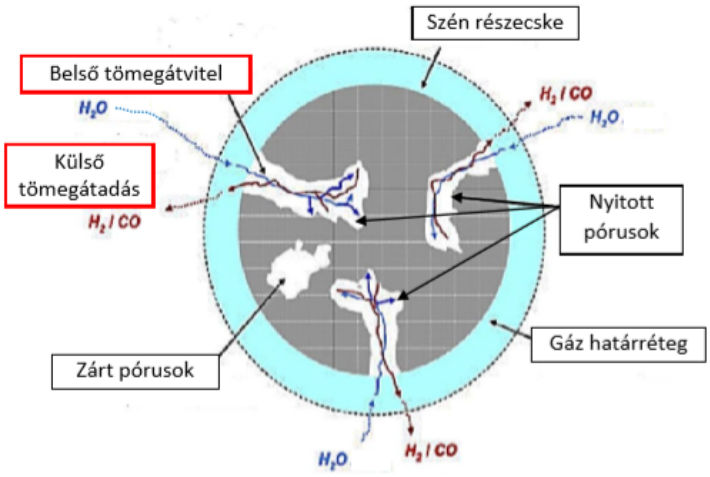
4.25. ábra A hőmérsékletek alakulása a rendszer különböző pontjain

A laboratóriumi mérésekre támaszkodva lett megtervezve és legyártva a 4.4 pontban bemutatott pirolízisfolyamaton alapuló kogenerációs CHP erőmű.

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 (Wild P. 2011). Ezzel megváltozik a gáz összetétele, éghetősége és energiatartalma is (4.26 ábra).

Ennek ellenőrzése céljából a rendszerbe különböző mennyiségű vizet fecskendeztünk be injektorokon át az említett rezgőszelepek állíthatósága révén. A vizet gyakorlatilag 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.



4.26. ábra A magas hőfokú szénszemcse pórusaiba bejutó víz konverziója (Henriksena U, et al., 2006)

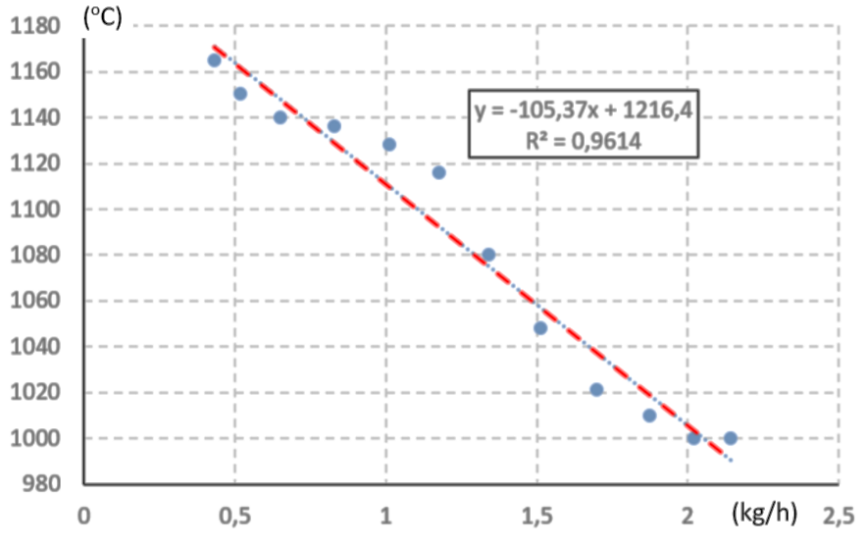
A kísérleteket a leadott teljesítmény állandó értéke mellet végeztük. A bevezetett víz mennyiségének hatására a redukciós tér hőmérséklete csökkent (4.8. táblázat, 4.27–4.30. ábra).

4.8. táblázat Kondenzvíz befecskendezés hatására mért adatok

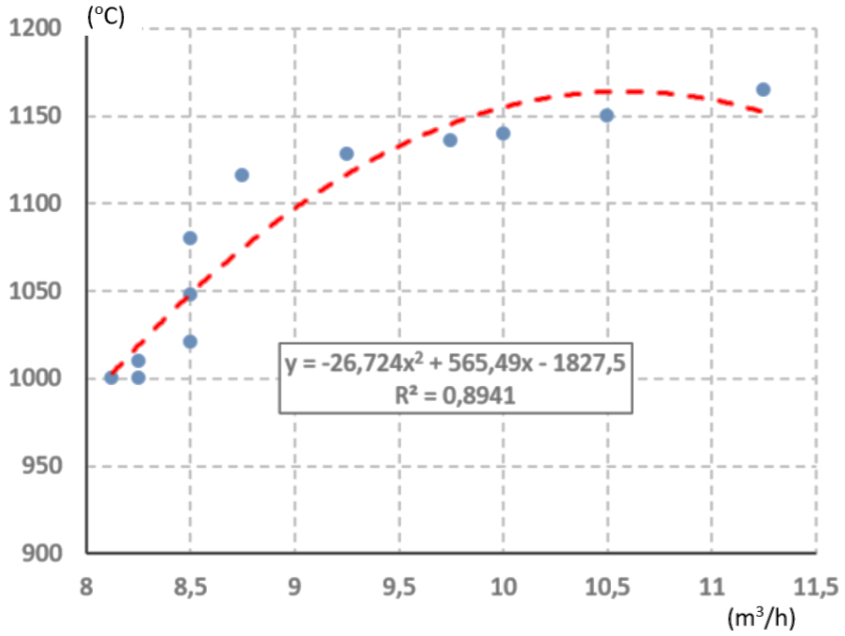
Teljesítmény P [kW]	Beadagolt levegő [m³/h]	Idő [sec]	Oxidációs hőm. [°C]	Kondenzvíz tömegárama [kg/h]
5	11,25	83,2	1165	0,43
5	10,5	69,2	1150	0,52
5	10	55,4	1140	0,65
5	9,75	43,4	1136	0,83
5	9,25	35,6	1128	1,01
5	8,75	30,6	1116	1,18
5	8,5	26,8	1080	1,34
5	8,5	23,8	1048	1,51
5	8,5	21,2	1021	1,70
5	8,25	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 m³/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

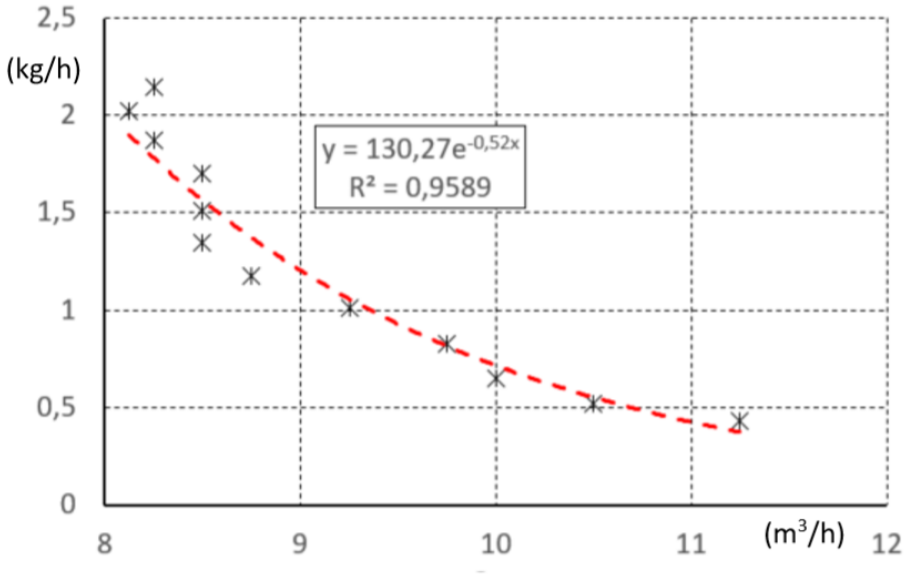
csökkenő (közel lineáris). Ebből következik, hogy a levegő növelésekor a víz mennyiség csökkentése indokolt.



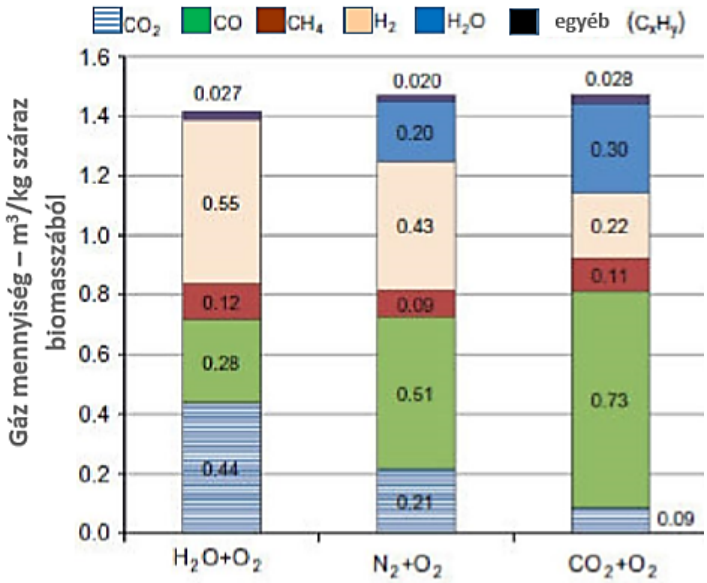
4.27. ábra A vízbevitel hatása a redukciós tér hőmérsékletére



4.28. ábra A levegőbevitel hatása a redukciós tér hőmérsékletére

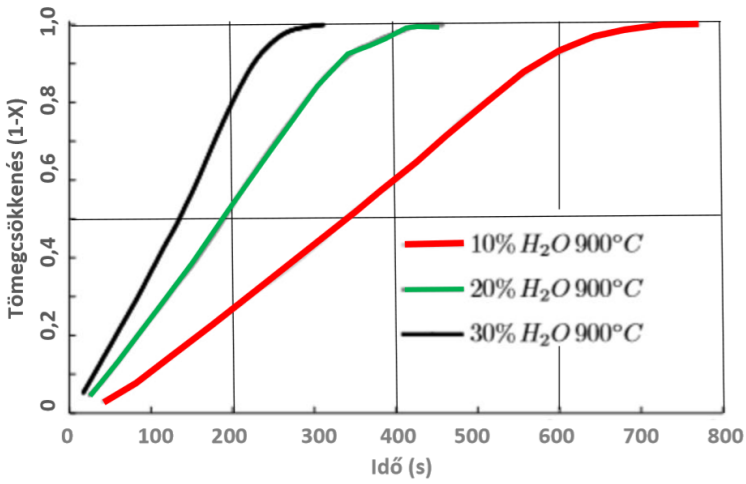


4.29. ábra A levegő és vízbevitel összefüggése



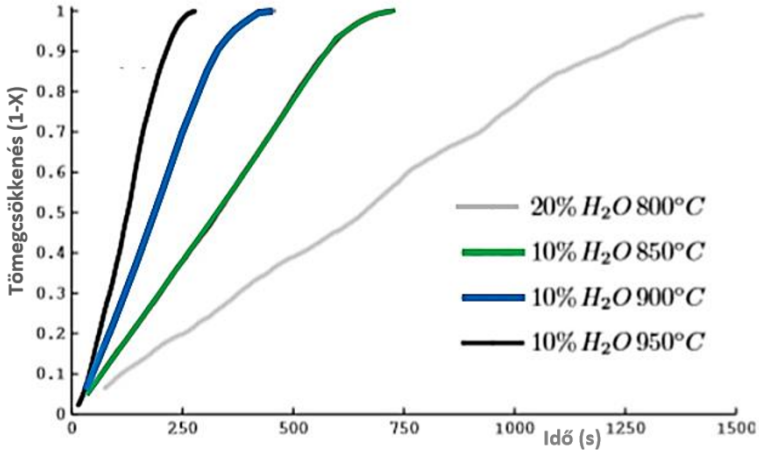
4.30. ábra A H_2O, O_2 és CO_2 anyagok bevitele az oxidációs-redukciós zónába, hatásuk a gáz összetételre

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 vizbevitel hatására a lebontás sebessége növelhető. Laboratóriunban végzett kísérleteim azt mutatták, hogy ez közepes méretű keményfa biomassza aprítéknál igaz. Gyakorlatilag nehezen megvalósítható, mivel a redukciós kúp torokátmérője határozza meg az átvihető anyag tömegáramát. (4.31 ábra)



4.31. ábra Azonos, de magas hőmérsékleten a növekvő vízbevezetés hatására a konverzió gyorsul

Eltérő hőmérsékleteken az azonos mennyiségben bevezetett víz megváltoztatja a lebontás sebességét. Magasabb hőmérsékleten az azonos mennyiségű víz az anyag lebontását gyorsítja. De a kátrány lebontásánál alacsonyabb hőmérséklet esetén, a nagyobb vízmennyiség már aránytalanul megnöveli a lebontás időtartamát, tehát ennek alkalmazását mindenféleképpen kerülni kell. (4.32 ábra)



4.32. ábra A hőmérséklet növelésének hatására, azonos bevezetett víz esetén a konverzió lassul, de nagyobb mennyiség hatására már aránytalanul nagyobb

4.3.5. Bemenő anyagok nedvességtartalma

Vizsgáltam különböző nedvességtartalmú anyagok hatását a berendezésben lezajló reakciókra. A méréseket 900 ºC redukciós hőmérsékleten végeztem. Az eredmények azt mutatták, hogy a nagyobb víztartalmú anyagoknál százalékosan több a hidrogén mennyisége, viszont kisebb a szén-monoxid aránya. A gáz energiatartalma a magasabb nedvességtartalmú anyag esetén alacsonyabb, de ugyanez jellemző a konverziós hatásokra is, ami mintegy 4% -kal kisebb értékre adódott. Ezért javaslom lehetőség szerint 15-18%-os nedvességtartalmú anyagok alkalmazását. Ennél nagyobb nedvességtartalom esetén célszerű az anyagot szárítani, amelyre a rendszerben keletkező hulladékhő a helyszínen rendelkezésre áll. (4.9 táblázat)

4.9. táblázat Alapanyag nedvességtartalmának befolyása (keményfa, G30)

Megnevezés	Mértékegység	Érték	Érték
Nedvesség tartalom	w_w %	**15**	**25**
Redukció hőfok	°C	900	900
Környezeti hőfok (levegő)	°C	25	25
CO	%	13,9	10,5
CO_2	%	11,7	12,4
CH_4	%	1,6	1,5
H_2	%	21,8	15,6
H_2O (nedves gáz)	%	19,7	24,7
Gáz energia tartalma	kJ/Nm^3	*5245*	*4715*
Konverziós hatásfok (gáz és hő)	%	74	70,1

4.3.6. Porleválasztás a termékgázból

A pirolízis ágyon átáramló gáz levegő keverék porszemcséket ragad magával. A por leválasztása két fokozatban történik:

- ciklon és
- szűrő.

A porszemcsék a ciklonban ívelt pályát írnak le és többször körbefutnak a leválasztó térben. A ciklontestbe érintőlegesen bevezetett gázáram hatására jön létre a körmozgás. A leválasztó tér felülete, azaz a ciklon fala felé haladnak a porszemcsék a centrifugális erő következtében, ott pedig a falnak ütközve lelassulnak és kiválnak az áramlásból. Ez a por a nehézségi erőnek köszönhetően a ciklon aljára, majd a portartályba kerül. A gáz, a tengely-szimmetrikusan beépített merülő csövön halad felfelé és így hagyja el a készüléket.

A ciklonban leválasztható legkisebb méretű részecskét határszemcsének is nevezik. Az ezekre ható radiális irányú sebesség összetevőknek egyensúlyban kell lenni az elvezető cső átmérőjével és a ciklon hengerfelületével. Kisebb ciklon átmérők esetén a leválasztható porszemcse mérete kisebb, de ilyenkor célszerű több ciklont sorba kötni.

4.3.7. Gázszűrő kiválasztása

A faelgázosító berendezéseknél a porszűrési technológiáknak négy főbb csoportja terjedt el, ezek a centrifugális erőteret kihasználó szűrők, szálhalmazokkal készült rétegszűrők, elektrosztatikus porleválasztók és nedves porleválasztók. Azonban figyelembe kell venni a rendszernél a robbanásveszélyt, mert éghető gázokat tartalmaz a szűrendő gáz és a benne lévő szennyező anyagok ütközések révén statikus feltöltődésre hajlamosak és begyújthatják a gázt. Az összetevők közül figyelembe kell venni a legalacsonyabb begyulladási hőmérsékletet, ami jelen esetben a faszénnek van, viszonylag alacsony 280 °C-os gyulladási ponttal. A kiválasztott technológián átvezethető maximális hőmérséklet az 100 °C, amiből adódik, hogy a hőcserélő után és a vizes mosó előtt kell, hogy elhelyezkedjen a technológia sorban.

4.3.8. A szűrő felületének meghatározása

A szűrő felületi terhelése az időegység alatt tisztítandó gáz térfogatának a szűrőközeg felületéhez viszonyított aránya, ezért szűrőaránynak is nevezik:

$$U_f = \frac{V}{A_{zsf}}, \tag{4.20}$$

ahol:

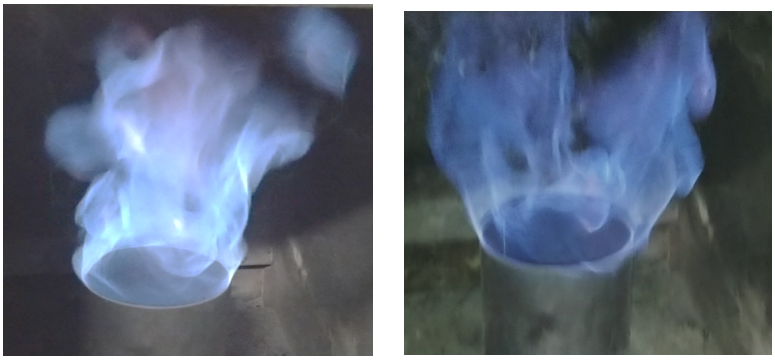
- V – a szűrőbe bevezetett gáz térfogatáram,
- A_{szf} – a szűrőanyag összes felülete.

4.3.9. A nyomásveszteség meghatározása

A szűrő nyomásvesztesége két főbb meghatározó összetevőből áll: a szűrőréteg szövetszerkezet, amely függ a kialakított szűrő anyag fajtájától és a szűrőre rárakódott por vastagságtól, az utóbbi nagyobb mértékben befolyásolja a nyomásveszteséget. A berendezésnél alkalmazott szűrő felépítését lásd a mellékletben.

A láng vizsgálata

A berendezésben keletkező gáz kátránytartalma jelentős mértékben kimutatható a gázláng színével. A sok kormot tartalmazó gázláng színe enyhén sárgás, de hasonló, ha nagyobb mennyiségben tartalmaz vizet. A tervezett egység gáza jelentős mértékben nem tartalmazhat vizet, mivel a magas hőmérsékletű a redukciós térben az összes víz elpárolgott ill. részt vesz a redukcióban. Később a rendszerben már nem tud vizet felvenni, hiszen mindegyik hőcserélő teljesen zárt. Ennek révén a láng szemrevételezés is informatív, hogy a gáz tartalmaz-e kátrányt. Nyilván a pontos tartalma csak műszeresen határozható meg. A lentebbi ábrákon látható, hogy indulásnál a gázláng színe enyhén sárgás, mivel indulásnál még a rendszerben kondenzálódott vízmaradványok vannak. A működő (üzemmeleg) berendezés fáklyájánál megfigyelt láng színe már teljesen áttetsző, illetve kék színű (nincs kátrány). (4.33. ábra)

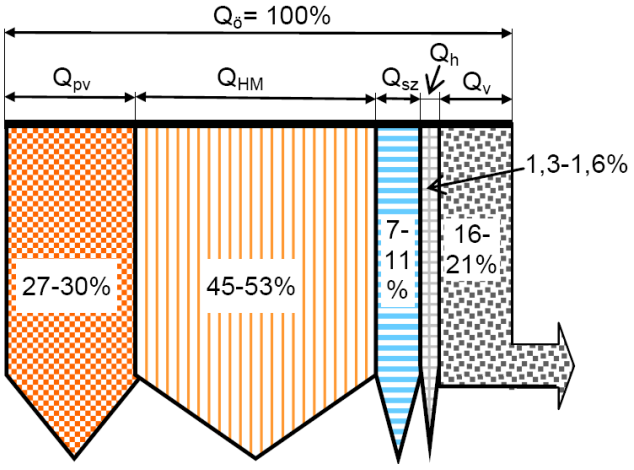


4.33. ábra Láng képe közvetlen az üzemi hőmérséklet elérése után és a láng képe az üzemi hőmérsékleten

4.3.10. Teljesítmény meghatározása

A kísérleti berendezés teljesítményét gyakorlatilag a generátor mérésével végeztem el. A méréseknél a generátort, a lehetőségeknek megfelelően 5,0 kW teljesítményre szabályoztam. Ekkor mértem a hőmérsékleteket a rendszer a különböző helyein. Ezekből határoztam meg a létrejövő teljesítmény-veszteségeket (4.34. ábra) a bemenő anyag energia- és nedvességtartalmától, valamint a környezet hőmérsékletétől függően. Regisztráltam az adott időszakban a bevezetett víz mennyiségét és a kapott értékeket táblázatba foglaltam. (4.10

táblázat). Megállapítható, hogy 21% nedvességtartalom még nem jelent számottevő teljesítményváltozást. Összességében a berendezés hatásfoka kedvező, mind a rendszerre, mind pedig a gázgenerátorra számítva is.



4.34. ábra A kísérleti berendezésnél mért teljesítmények %-os megoszlása

A bemenő levegő hőfoka: 25 °C.

A fa apríték nedvességtartalma: 26%.

Hamu ~ 1,6%.

4.10. táblázat A kísérleti berendezésnél mért teljesítmény arányok

Teljesítmény	Jele	Arány %
Tüzelőanyag szárító	Q_{sz}	8-10
Hamuval távozó	Q_m	1,3-1,6
Hőhasznosítás (HMV, fűtés)	Q_{hh}	45-50
Villamos	P_v	27-29
Veszteség*	Q_v	16-19
Összesen	$E_ö$	100

A gáz összetételét a 4.11 táblázatba foglaltam össze.

4.11. táblázat Gázösszetétel

Megnevezés	Arány (%)
CO	14,3
CO_2	12,2
CH_4	1,8
H_2	19,9
H_2O	16,6

A rendszer tüzelőanyag fogyasztása 13-15 MJ/kg fűtőértékű 19,7%-os nedvességtartalmú maximum 1,6% hamutartalmú biomassza apríték. Óránkénti tüzelőanyag szükséglet (száraz anyagra vetített) ~40 kg/h.

Energia átalakítás mérésének összefoglalása a 4.12 táblázatban van feltüntetve.

4.12. táblázat Energiaátalakítás

Fa	Felhasz-nál	Energia	Rend-szer	Gázáram*	Gázmo-tor	Hőteljesít-mény	Villamos teljrsítmény
			hatásfok		hatásfok	(~70 %)	(24-25%)
MJ/kg	kg/h	MJ/h		m^3/h	~0,75	kW	
14,0	40,0	560,0	0,75	79,2	59,4	16,5	5,0

*Gáz 5,3 MJ/m^3

A gázgenerátor hideghatásfoka:

$$\eta_{HG} = \frac{H_{agáz}\, q_{gáz}}{H_{a\ tü}\, q_{tü}} = 0{,}75 - 0{,}78\ \ (\ 75 - 76\%), \qquad (4.24)$$

ahol:

- $H_{agáz}$: A generátorgáz fűtőértéke,
- $q_{gáz}$: A generátorgáz térfogatárama,
- $H_{atü}$: A átlagosan vett tüzelőanyag fűtőértéke,
- $q_{tü}$: A tüzelőanyag tömegárama.

Végül is a pirolízis generátor alkalmazása révén egy jó hatásfokú CHP kiserőmű rendszert kapunk, ahol 19-20% nedvességtartalmú keményfa (13 MJ/kg) apríték (10-30 cm) esetén:

- CHP hatásfok: ~70-73%.

4.3.11. Mérési eredményekből származtatott teljesítmény értékek

Az elméleti paraméterek a 4.13 táblázatklaszterban vannak feltüntetve

5,0 kW villamos teljesítményre tervezett berendezés

- 0,0% nedvességtartalmú keményfa apríték
- 17,0 MJ/kg fűtőérték.

4.13. táblázat Elméleti, kiindulási paraméterek

Tüzelő anyag	Anyagáram (kg/h)
Száraz fa	4,9
Nedvesség a levegőből	2,2
Levegő	7,5

Gázösszetétel	Száraz bázison (%)
CO	11,4

CO_2	19,5
CH_4	0,5
H_2	30,7

Kalkulált jellemzők	Energia (kW)	Bemenő hőenergia (%)
Hőenergia	18,1	100
Energia a faszénben	0,6	2,6
Hőveszteség	0,6	3,0

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)	600
A gáz energia tartalma (MJ/Nm^3)	4,88
Hideg gáz hatásfoka (%)	75,6
Hőveszteség (%)	3,5
Hamu (%)	1,5

CHP -ból a villamos energia:

- η_e = 0,25 mellett: 4,76-5,05 kW,
- Hasznosítható hő: 6,5-7,0 kW,
- 1,0 kWh villamos energia 0, 92- 0,95 kg fa aprítékból.

A gyakorlati paraméterek a 4.14 táblázatklaszterbanban vannak feltüntetve.

5,0 kW villamos teljesítményre tervezett berendezés

- 20,0% nedvességtartalmú keményfa apríték,
- 13,0 MJ/kg fűtőérték.

4.14. táblázat Gyakorlati kiindulási paraméterek

Tüzelő anyag	Anyagáram (kg/h)
Nedves fa	5,2
Nedvesség a levegőből	2
Levegő tömegárama	8,3

Gázösszetétel	Száraz bázison (%)
CO	7,6
CO_2	21,6
CH_4	0,45
H_2	28,7

Kalkulált jellemzők	Energia (kW)	Bemenő hőenergia (%)
Hőenergia	16,9	100
Energia a faszénben	0,6	2,6
Hőveszteség	0,6	3,0

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)	600
A gáz energia tartalma (MJ/Nm^3)	4,31
Hideg gáz hatásfoka (%)	70,1
Hőveszteség (%)	3,5
Hamu (%)	1,5

CHP ból a villamos energia:

- η_e = 0-24-0,25 mellett: 4,5-4,8 kW,
- Hasznosítható hő: 5,5-6,0 kW.

1,0 kWh villamos energia 0,95- 1,1 kg fa aprítékból.

Megállapítottam a pilot reaktoron végzett mérések segítségével, hogy a rendszerbe bevezetett vízpermet kihat a termékgáz összetételére, a reaktortér hőmérsékletére, ezáltal a teljes rendszer által leadni képes hő- és villamos teljesítményre.

Új tudományos eredmények

Ebben a fejezetben a munkám során elért új tudományos eredményeket szeretném összefoglalni. A szakirodalmi kutatás és a mérések során szerzett ismerettel a birtokomban megállapítottam, hogy a fixágyas pirolizis berendezések a látszólagos egyszerűségükkel szemben meglehetősen összetett technikai eszközök. A működésük során a kiinduló anyagból jelentős kémiai és belső energiaátalakítással új termékek jönnek létre, amiket közvetlenül, vagy közvetve felhasználunk. E komplex rendszer minden elemének vizsgálatára és bemutatására már terjedelmi okok miatt sem kerülhetett sor. A választott fixágyas alsó gázelvezetésű rendszernél a konstrukció szempontjából legfontosabb paramétereit megvizsgáltam, majd ipari

közreműködéssel kísérleti berendezés is készült, amelynél az eredményeim jelentős részét validáltam.

1. Laboratóriumi mérőegység és vizsgálati elv kidolgozása

Pirolízisgenerátor hatékonyságának növelése érdekében egy laboratóriumi mérőegységet és annak mérési elvét dolgoztam ki, amit meg is építettem. Azzal különféle strukturájú 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 hamú) 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, ~0,9g/s, amíg 400 °C-on ~0,3g/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 kisérleti 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 = 16,36m^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 körölmények között. A laboratóriumi vizsgálatokra támaszkodva lett megvalósítva egy innovatív 5kWe teljesítményű hő- és villamosenergiát (CHP) elállítani tudó kiserőmű, ami jobb hatásfokkal és jobb minőségű termékgázt képes előállítani, mint az azt megelőző technológiai kialakításúak.

Az energetikai paraméterek laboratóriumi vizsgálataiból kiderült, hogy a különböző eredetű, lágy-és fászárú biomassza melléktermékek analitikai eredményei nem mutatnak markáns eltérést a szakirodalomban találhatóktól. Méréseim alapján alacsonyabb energiatratalmat tapasztaltam, valamint rendszerint magasabb hamutartalmat. Ez a két paraméter szorosan összefügg, hiszen adott térfogatú és tömegű töltetben kevesebb éghető/hsznosíthtó anyag van jelen. 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 laboratüriumi 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 különbőző eredetű és porozitású anyagoknál a töltet alján detektált nyomásváltozásból számos következtetést tudtunk levonni. A folyton változó nyomásértékek nem csak az anyagi szemcsék szerkeztében bekövetkező változást reprezentálta, hanem az egész töltet struktúrájnak formálódását is. A szignifikáns nyomásértékváltozások és a töltet különböző magasságában lévő hőmérsékleti ingadozások a reaktorban található anyag szerkezeti összeomlásáról tanúskodnak.

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 paramtéerekkel 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

PIROLÍZISGENERÁTOROK HATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE

A számos, kiforrottnak mondható biomassza klasszikus termikus felhasználásra (égetés) alkalmas berendezés található a piacon mind lakossági, mind ipari felhasználást tekintve. Annak ellenére, hogy a különböző technológiai kivitelezések stabilak és megbízhatóan működnek, szükséges egy olyan innovatív technológiai fejlesztése, ami jobb hatásfokkal képes üzemelni, alacsony környezeti terhelést okozó emissziós értékekkel. A szakirodalmi áttekintést követően egy meglévő fixágyas, alsó gázelszívású pirolízis technológia továbbfejlesztése mellett döntöttünk, amit alkalmasnak véltünk arra a célra, hogy kedvezőtlen energetikai paraméterekkel rendelkező fás- és lágyszárú melléktermékek befogadására képes.

A kutatómunkám célja az volt, hogy hazánkban és Európában nagy mennyiségben termelődő, máshol nem, vagy csak nehezen felhasznalható alapanyagokat – rossz minőségű puhafa és keményfa apríték, kukoricaszár, biogáz stabiliszap, szeparált trágya – laboratóriumi vizsgálatok során meghatározzam azok energetikai paramétereit, úgy, mint: elemi összetétel, nedvességtartalom, hamutartalom, fűtőérték, hamuolvadási hőmérséklet. A vizsgálatok eredményei valamelyest eltértek a szakirodalomban fellelhető eredményektől, aminek az oka az, hogy szándékosan rossz minőségű alapanyagokat válogattam össze.

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 méretere 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. SUMMARY

INCREASING THE EFFICENCY OF PYROLISYS GENERATORS

There are several mature biomass equipments available on the market which are suitable for classic thermal use (combustion) for both residential and industrial purposes. Despite the fact that various technological implementations are stable and reliable, it is necessary to develop an innovative technology that can operate more efficiently with lower environmental impact emissions.

Following the review of the available literature, we decided to develop further an existing fixed-bed, lower gas extraction pyrolysis technology, which we considered suitable for the purpose of accommodating woody and soft-drying by-products with unfavorable energy parameters.

The aim of my research was to determine via laboratory examinations, various energy parameters (such as elemental composition, moisture content, ash content, calorific value, ash melting temperature) of raw materials produced in large quantities in Hungary and Europe, like poor quality softwood and hardwood chips, corn stalks, biogas stable. The results of the tests differed moderately from the results found in the literature, because I selected poor quality raw materials on purpose.

Upon completion of the analytical studies, I performed examinations using the prototype equipment of the semi-industrial technology which to be developed. However, this also required the design of the laboratory reactor itself and its measurement system. The device has been designed to accept larger samples (500-1500 grams) compared to the standard capability of laboratory sizes, whose weight depends on the particle size and density of the loaded sample. Thus, the data recorded during measurements is reliable. It is important to mention that I have not found any publication on laboratory large-sample studies in either the Hungarian or international literature.

As a next step, based on the experience gained from the data provided the experimental measurements, we could start the design of the small power plant with a capacity of 5 kWe. Laboratory experiments were essential as the behavior of the mentioned c.a 1-1.5 kg samples can be extended to a much larger size, so both sizing and cost could be optimized. During the design of the semi-industrial equipment, the goal was to achieve the highest possible efficiency and to produce gas with the highest possible energy but with the lowest possible tar content. Having achieved these results was due to the unique design of the reactor zone, the way the product gas was discharged, and to the air and water fed in the adeqaute place, and, in the right amount into the system. Compared to the product gas produced by conventional pyrolysis, the higher calorific value was due to the hydrogen released from the injected water. The lower tar content is provided by extraction through the reduction zone, since the long-chain compounds in the gas are fragmented and bound due to the active carbon layers which got high-porosity and high-temperature during the process.

The new scientific results developed during my research can support practicing engineers in the optimal design and construction of such and similar equipment which is capable of pyrolyzing solid biomass. Besides it contributes to produce environmentally conscious, carbon-neutral heat and electricity.

8. MELLÉKLETEK

M1: Irodalomjegyzék

1. A. Demirbas (2004): Combustion characteristics of different biomass fuels, Progress in Energy and Combustion Science, pp. 219-230
2. A. Dhaundiyal, M. Th. Abdulrahman , L. Tóth: 2019 THERMO-KINETICS OF FOREST WASTE USING MODEL-FREE METHODS, Universitas Scientiarum 24(1):1-31, DOI: 10.11144/Javeriana. SC24-1.tofw, Application of Mathematics in Biomass Pyrolysis
3. Antal J., G. Morten (1970): The Art, Science, and Technology of Charcoal Production, Industrial & Engineering Chemistry Research, 42/8, pp. 1-53.
4. A.K. Rajvanshi (1986): Biomass gasification, Published as a Chapter (No. 4) in book "Alternative Energy in Agriculture", Vol. II, Ed. D. Yogi Goswami, CRC Press, 1, pp. 83-102.
5. Asadullah M.: 2014 Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 40: pp. 118–132, DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.132
6. A.V. Bridgwater, -et al. (1999): An overview of fast pyrolysis of biomass, Org. Geochem., pp. 1479 – 1493.
7. Barótfi I. (2000): Környezettechnika, Mezőgazda Kiadó, 650-656. o.
8. Basu P. (2013): Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, Practical design and theory, Second edition, Elsevire, San Diego, p. 529.
9. C. Di Blasl, et al. (2000): Degradation characteristics of straw and washed straw, Thermochim. Acta, 364, pp. 133 – 142
10. C. Di Blasi (2001): Pyrolytic behavior of some wood properties, Combust. Flame, 124, pp. 165 – 177
11. D. Hammerer (2000): Vergasung von Biomasse zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung, Dissertation TU Graz, Institut für Wärmetechnik, pp. 1-4.
12. D. Hammerer (2000): Vergasung von Biomasse zur gekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung, Dissertation TU Graz, Institut für Wärmetechnik, pp. 1-3.
13. de Wild P. (2011): Biomass pyrolysis for chemicals, Tec.Rep., ECN, pp. 1-175.
14. Dhaundiyal, Alok., Tóth, László.: 2020 Modelling of Hardwood Pyrolyzis Using The Convex Combination of The Mass Conversion Points, Journal of Energy Resouces Technology, Monthly by ASME June 2020. Vol. 142/061901-1 No 6.
15. Dhaundiyal A., Tóth L.: 2020 Calculation of Kinetic Parameters of Thermal Decomposition of Forest Waste Using The Monte Carlo Technique, Environmental and Climate Technologies 24(1) DOI:10.2478/rtuect-2020-0010, Conference: CONECT2019 Riga, Latvia Volume: 24, CC BY 4.0
16. Di Blasi C., et al. (2000): Degradation characteristics of straw and washed straw, Thermochim, Acta, pp. 133 – 142., DOI:10.1016/S0040-6031(00)00634-1

17. Dr. ir. Jan Venselaar (1982): Design rules for down draft wood gasifier a short rewiev, pp. 2-24
18. E. Sjöström (1981): Wood chemistry, Academic Press, New York, pp. 1-248.
19. FAO (1986): Wood gas as engine fuel, FAO kiadvány, pp. 1-139
20. Fercher E., Hofbauer H., et al., (1998): Two years experiance with the FICFB Gasification Proceedings of the International Conference Würzburg, Germany, pp. 146-157
21. F. Fock, U. Henrisken, et al., (1998): Demonstration of the vortex process for biomass gasifier, pp. 1-2,
22. F. Lettner, et al. (2007): Latest results of "CleanStGas" - Staged biomass gasification CHP, Proceedings of the 15th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, pp. 18-14.
23. F. Shafizadeh (1984): The chemistry of pyrolysis and combustion, in The chemistry of solid wood (Ed. R.M. Rowell), Advances in chemistry series 207 (Series Ed. M. J. Comstock), American Chemical Society, pp. 489 – 529.
24. Hiller I. és tsai. (1988): Fahulladékok – kitermelés, feldolgozás és széleskörű hasznosítás, OMIKK, Budapest-Sopron, 1-52. o.
25. J.B. Milligran (1994): Downdraft gasification of biomass, PhD thesis, Aston University, Birmingham, UK, pp. 38-72.
26. J. Venselaar (1982): Design rules for down-draught gasifiers a short review, IT Indonesia, pp. 141-143.
27. Kovács Á. (1975): Retortafaszén – Gyártástechnológiai előírás, Erdőgazdasági Vegyi és ipari Vállalat, Budapest., 1-38. o.
28. Lavrov N.V., Surügin A.P. (1965): Az égés- és gázosításelmélet alapjai, Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1-236 o.
29. Lettner F., Haselbacher P., et al. (2007): Latest results of „CleanStGas" – Staged biomass gasification CHP Proceedings of the 15th Europian Biomass Conference & Exhibition, Berlin, pp. 1-83.
30. M. Csizmadia B., Nádori E. (1996): Szilárdságtan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest – Gödöllő – Győr, 1- 575 o.
31. Mészáros E. (2006): Lignocellulóz tartalmú anyagok vizsgálata termikus módszerekkel, PhD disszertáció, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 11-64. o.
32. M.G. Grønli, et al. (2002): Thermogravimetric analysis and devolatilization kinetics of wood, Ind. Eng. Chem. Res., 41 (17), pp. 4201 – 4208.
33. M.J. Antal, et al. (1998): Cellulose pyrolysis kinetics: revisited, Ind. Eng. Chem. Res., 37 (4) pp. 1267 – 1275.
34. Németh K. (1998): A faanyag degradációja, Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, 1-102 o.
35. Parikh P. P., et al. (1988): Design and development of a wood gasifier for I. C. engine applications - New approach for minimization of tar, In Research in Thermochemical Biomass Conversion (A. V. Bridgwater and J. L. Kuester, Eds), Elsevier Applied Science, London, pp. 1071-1087.

36. P. McKendry (2002): Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, Bioresource Technology, pp. 55–63.
37. Pokol Gy. (1998): Modern irányzatok a termikus analízisben, Magyar Kémikusok Lapja, 53. szám, 38 – 44. o.
38. Rajvanshi, K., A. (1986): Biomass gasification, Altemative Energy in Agriculture. Vol. 2., No. 4., pp. 83-102.
39. Szuhi A. (2009): Új termikus technológiák és hagyományos hulladékégetők Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium, 36. o.
40. Szuhi, A. (2013): Az új termikus technológiák környezeti hatásai (pirolízis, elgázosítás és plazma technológia). Humusz Szövetség és Vidékfejlesztési Minisztérium, 14. o.
41. TB. Reed, A. Das (1998): Handbook of biomass downdraft gasifier engine system, SERI, pp. 1-148.
42. T. Reed, A. Das (1994): Handbook of Biomass downdraft Gasifier Engine System, 2nd Edition, Biomass energy Foundation, Zürich/CH, pp. 1-148.
43. T. Reed, A. Das (1998): Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engieni System, Solar Energy Research Institute Technical Libary, Oct 7, pp. 1-129.
44. U. Henriksena U, et al. (2006): The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier, Energy 3, pp .1542–1553.
45. Valyon J., E. Someus (2010): Gáz üzemanyag biomasszából, Agrárium 20. évf. 2010/10 44-45. o.
46. Young, G., C. (2013): Municipal solid waste to energy conversion process, economic, technical, and renewable comparisons, John Will & Sons, Inc., New Jersey, USA, p. 379.

M2: Az értekezés témaköréhez kapcsolódó saját publikációk

Lektorált cikk világnyelven

1. Borges, C.A., Géczi, G., Kovács, K., Horváth, M., **Bácskai, I**., Korzenszky, P. (2015): Examination of energy recovery of brewers' spent grain I. - Chemical process, Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences, Faculty of Biotecnology and Food Sciences, Nitra, Slovakia, doi: 10.15414/jmbfs.2015.5.2.116-119, ISSN: 1338-5178
2. 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
3. **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
4. 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)
5. 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. Tóvári P., Olasz Zs., **Bácskai I.** (2014): Biomassza tüzelőanyagok termokémiai konverziójának laboratóriumi modellezése, Mezőgazdasági Technika, 55. évf. 7. sz. 12-14. o., ISSN: 0026 1890
2. 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
3. Madár V., **Bácskai I.**, A. Dhaundiyal, Schrempf N., Tóth L. (2018): Hő-, villamos energia és szén előállítáa pirolizálással, Mezőgazdasági Technika 59. évf. III. sz. 2-12. o, ISSN 0026 1890
4. Madár V., **Bácskai I.**, A. Dhaundiyal, Schrempf N., Tóth L. (2018): Hő-, villamos energia és szén előállítása pirolizálással, Mezőgazdasági Technika, 59. évf. 2. szám 2-6. o. ISSN 0026 1890
5. **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
6. **Bácskai I.**, Madár V., Tóth L. (2019): Pirolízis berendezés fejlesztését megelőző vizsgálatok, Energiagazdálkodás, 60. évf. 1-2 szám 2-8. o. ISSN 0021-0757

Nemzetközi konferencia kiadvány

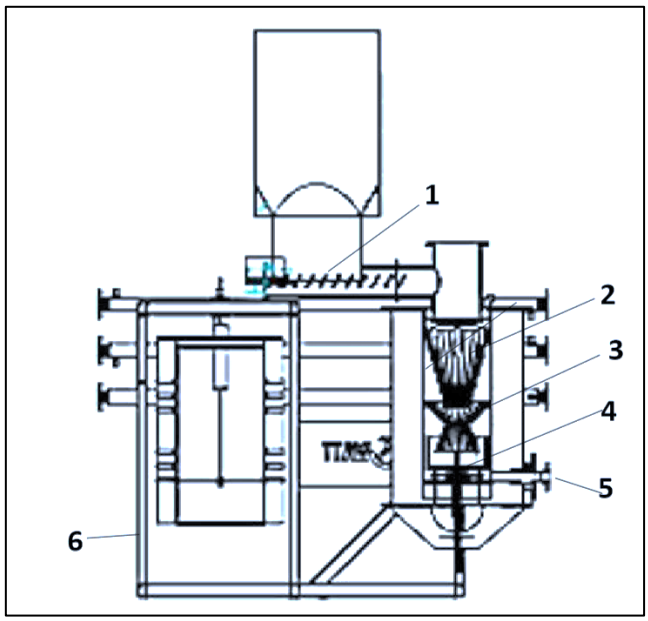
1. Borges C.A., Géczi G., Kovács K., Horváth M., **Bácskai I.**, Korzenszky P. (2015): Examination of energy recovery of brewers' spent grain I. - Chemical process, XIV. International Conference on Risk Factors of Food Chain, Jaworze, Polnad, Poster, October-November 2015, Vol. 5, no. 2
2. **Bácskai I.**, Tóvári P. (2016): Modelling of thermo-conversion process of biomass fuels, Third International Renewable Energy Sources, Krynica, Poland, May 17-20, Book of Abstracts, p. 11, ISBN: 978-83-65180-09-4
3. **Bácskai I.**, Tóvári P. (2017): Innovative thermic utilization of biomass residues, Future Energy Expo 2017, Astana, Kazakhstan, Energy Charter Newsletter, p. 23.

Magyar nyelvű konferencia kiadvány

1. Szabados Gy., Kerekes Zs., **Bácskai I.**, Bereczky Á. (2014): Biotüzelőanyagok motorikus szempontból releváns tulajdonságainak meghatározása és összehasonlítása, XV. Nmezetközi Energetika – Elektrotechnika konferencia, Cluj, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 88–94. o. ISSN 1842–4546

M3: Az 5 kWe teljesítményű félüzemi kisérleti berendezés nézeti és metszeti ábrái

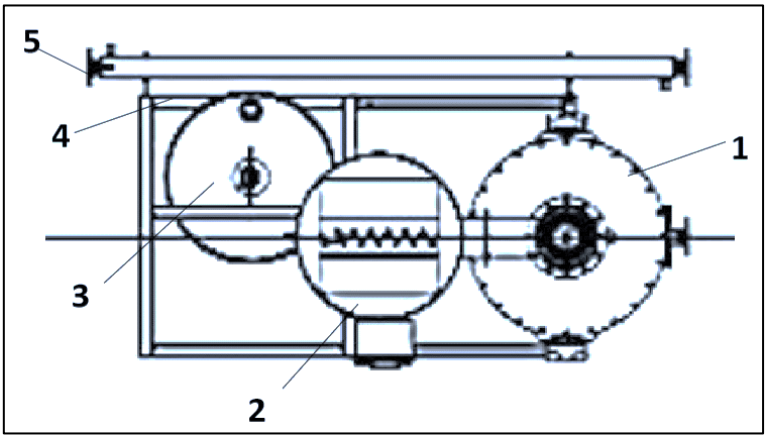
A rendszer nézeti rajza (8.1 ábra)



8.1. ábra A berendezés elölnézete (egyes részletek metszeteivel)

1 adagoló csiga, 2- pirolízis kúp, 3- redukciós kúppár, 4-redukciós rostély a forgó pengével és a kotróval, 5- gáz elszívó nyílás, 6-vázszerkezet

A berendezés felülnézeti ábrája. (8.2. ábra)



8.2. ábra A berendezés felülnézete

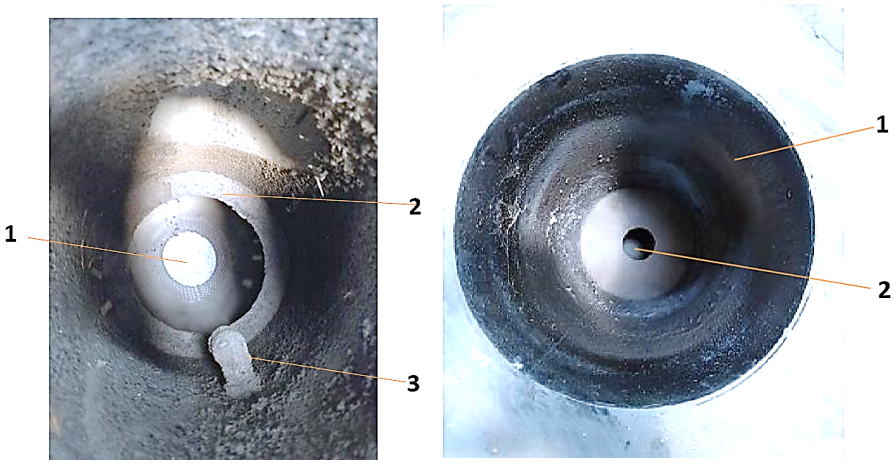
1 – generátor, 2 – előtároló és adagoló, 3 – szűrőrendszer, 4 – vázszerkezet, 5 – csöves hőcserélők

A pirolízálandó alapanyag útja az alábbi ábrákon látható gépelemeken keresztül vezet. (8.3. – 8.7. ábra)

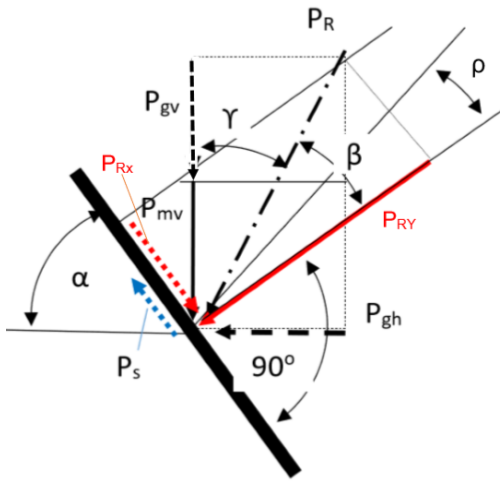
8.3. ábra A berendezés kiviteli példája, 1 - generátor köpeny, 2 - szerelő és adagoló egység, 3 – gáz elszívó vezeték, 4 – gáz levegő hőcserélő, 5 - csöves hőcserélők

8.4. ábra Az anyag betápláló nyílás (1) és az alatta lévő pirolízis kúp (2)

az injektorok bevezető nyílásaival (3) és a csatlakozó a vibrációs adagolóhoz (4)



8.5. ábra A pirolízis kúp a fedél lebontását követően (1) a redukciós kúppár átvezető nyílása, (2) merevítés, (3) táplevegő/vízpermet bevezetés



8.6. ábra A kúpszög és a kialakuló erőviszonyok (α = β+ϒ)

Statikus állapotot tekintve lefolyás akkor van, ha:

$$P_s < P_{RX} \, .$$

Tehát a tolóerő nagyobb, mint a súrlódó.

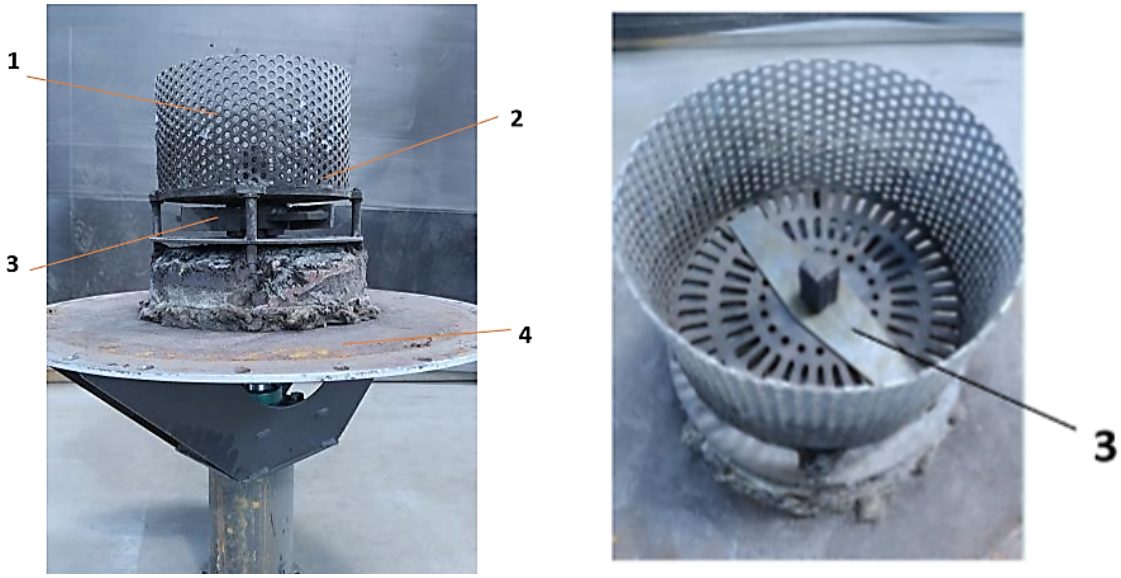
$$P_{RY} \, tg\rho < \; P_{RY} \, tg\beta \, ,$$

$$tg\rho < tg\beta \, ,$$

$$\alpha = \beta + \Upsilon \, .$$

Ha az α értékét csökkentjük a P_s erővel szemben a P_{RX} tolóerő nagyobb lesz, tehát az átfolyás gyorsabbá válik. De ha az α nagy a P_{RX} surlódó erővel (P_S) szemben csökken, s az áthaladási képesség romlik. Végül is az áthajtó nyomóerőnek nagyobbnak kell lennie. Meglévő rendszernél ez csak a nyomáskülönbség növelésével (a vákuum növelésével) érhető el. Végeredményben a:

P_{GV}, nyomáskülönbség = az oxidációs tér nyomása – az elszívó tér adott helyen mért vákuuma.



8.7. ábra Rostélyzat oldalnézetből (1) oldalfal, (2) aljzat, (3) bolygató kés, (4) fenéklemez

Porszűrő (8.8. ábra)

Minőségi szempont alapján a porszűrő jellemzői:

- a portalanítási fok (frakcióktól függően),
- a légtechnikai ellenállás,
- az energiaszükséglet,
- a korrózióállóság,
- a kopásállóság,
- a beruházás költsége és
- a helyszükséglet.

A ciklon gondos tervezése igen lényeges a porszűrő használhatósági ideje szempontjából. Ezért meg kell határozni azt a legnagyobb porszemet, amelyet a ciklon nem választ le. A szűrő minőségét is ehhez szabjuk. E porszemcse valójában (a ciklon szempontjából) az a porszemcse, amelyet még a ciklon képes leválasztani. A legkisebb átmérőjű ún. határszemcse - d_{min} - meghatározása:

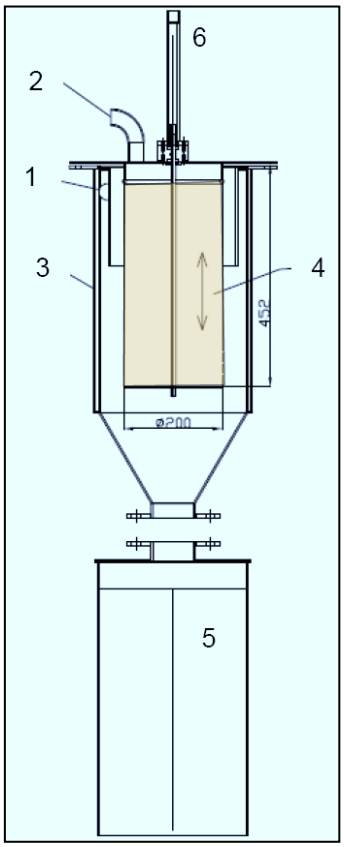
$$d_{min} = \sqrt{\frac{9}{\pi}} \; \frac{r_i}{R_b \; \nu_b} \sqrt{\frac{q_v \; \mu}{\rho_p \; M}}, \tag{8.1}$$

ahol:

- ρ_p= a porral keveredett levegő sűrűsége,
- M= a gáz és porelegy tömegaránya, a fajhő és a gáz entrópiájának aránya,
- r_i= a kiömlő csonk sugara,
- R_b= a beömlő csonk sugara,
- p_p= a környezeti légnyomás,
- v_b= referencia sebesség a bemenő-csonkon,
- q_v= térfogatáram,

– μ= súrlódási tényező (belső fal).

Az összefüggésből következik, hogy a kisebb szemcsék leválasztását segíti, ha a a tangenciálisan (esetleg spirálisan) elhelyezkedő beömlőnyílás mérete megfelelően nagy méretű és alacsony értékű a súrlódásai tényező.



8.8. ábra A porszűrő és ciklon kialakítása

Az ábra jelei: 1 - tangenciális beömlő nyílás, 2 – a szűrt gáz elvezetése (12 Nm^3/h), 3 – köpeny előfűtés, 4 – porzsák feszítő és pneumatikus mozgató (tisztítás), 5 – leválasztott por tárolása, 6 – ellenőrző érzékelők (hő, nyomás)

A szűrő felületi terhelés megválasztható a különböző porok leválasztásakor tapasztalati úton meghatározott értékek alapján. Uf értékre pl. torokgáz esetén 60-70-es érték javasolt. Ezzel pl., ha a kezelendő gáz térfogatáram 200 m^3/ h, akkor a kapott összes szűrő felület:

$$A_{zsf} = \frac{V}{U_f} = 2{,}7\ m^2. \tag{8.2}$$

A választott zsák szűrő anyaga a poliészter (PES), amely viszonylag magas hőmérséklet tűrőképességgel bír, tartósan 140 °C-ot is alakváltozás nélkül elvisel. Nedvességfelvevő képessége alacsony 20 °C-on és 65%-os relatív levegőnedvesség esetében 0,5 % között van, ami nagyobb mértékű duzzadás esetén a szűrő pórusosságát csökkenti, ezáltal növelve a szűrő ellenállását.

A szűrőszövet nyomásveszteségének meghatározása a következő összefüggésből:

$$\Delta P_{sz} = K_c \, \eta_g \, v_{sz} \, , \tag{8.3}$$

ahol:

- ΔP_{sz} = szűrőszövet nyomásvesztesége,
- K_c = szövettől függő állandó érték,
- v_{sz} = belépő sebesség,
- η_g = fagáz viszkozitása.

A zsák belépési pontjánál a közeg áramlási sebessége a térfogatáramból V és a belépési felület nagyságából (A_b) számolható:

$$v_{sz} = \frac{V}{A_b}, \tag{8.4}$$

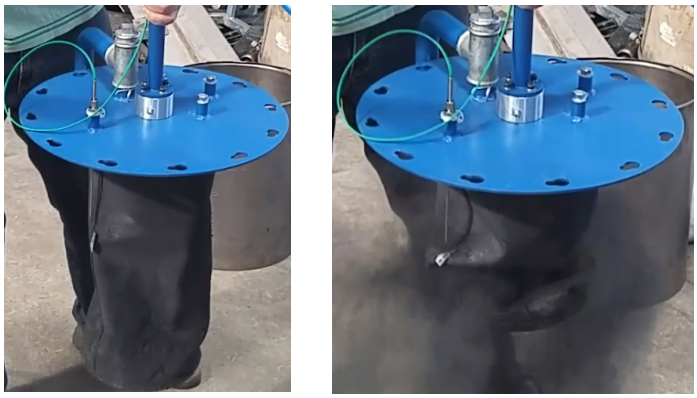
ahol:

- A_b – belépési felület nagysága.

A többszöri tisztítási művelet után is szűrő ellenállása azonos, vagy enyhén emelkedő. A levált porréteg vastagsága is fontos a nyomásesés mértéke szempontjából. A porréteg vastagságát a vivőgáz portartalma és a szűrőtisztítás üteme szabja meg. A megnövekedett nyomásveszteség a reaktor gáz rendszerének a működési zavarát okozza. A gázszállítást működtető gazfúvó ventilátor jelleggörbéjén ilyenkor elmozdul a munkapont, a ventilátor légszállítása nagymértékben csökkenni fog. Ilyenkor szükségessé válik a szűrőtömlők tisztítása.

M4: Zsákszűrő tisztítási folyamata

A kiválasztott zsákszűrő portalalnítási folyamatát a 8.9. ábra, eredményét pedig a 8.10. ábra mutatja be.



Első ütem (összehúzódás)

A szűrő tisztítás elött

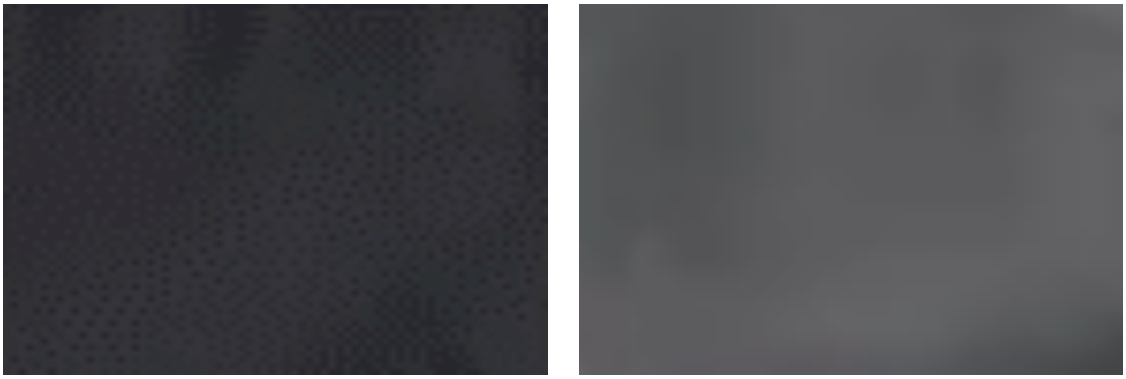
A teljes összehúzódás pillanata

Második ütem (kirugózás)

A kirugózás kezdete A kirugózás vége

Tisztítás előtt Tisztítás után

8.9. ábra Szűrő tisztítási folyamata



A szűrő alsó szeleténél a feleület telitettségét jelző színárnyalat (~5,0 cm^2)

A tisztítás előtt A tisztítás után

8.10. ábra Szűrő tisztítási folymatának eredménye

9. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Dr. Tóth László és Dr. Schrempf Norbert tanár uraknak, hogy lehetőséget adtak disszertációm elkészítésére, valamint hasznos tanácsaikkal irányították kutatómunkámat.

Köszönettel tartozom a Nemzeti Agrárkutatási és Innovációs Központ és a NAIK Mezőgazdasági Gépesítési Intézet vezetőinek, hogy támogatták doktori iskolában való tanulmányaimat.

Szeretném megköszönni a NAIK MGI akkreditált Energetikai Vizsgálólaboratóriumban dolgozó kollégáimnak, hogy a kutatási munkám során a segítségemre voltak.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném köszönetemet kifejezni páromnak Kelemen Mártának, a családomnak és a barátaimnak, hogy az elmúlt néhány évben a szokottnál is türelmesebbek voltak irányomba és szüntelen támogattak munkám során.