

Miskolci Egyetem

Műszaki Anyagtudományi Kar

Kerpely Antal Anyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola



**Étkezdei hulladékok pirolízis útján történő hasznosításának
vizsgálata**

Ph.D. értekezés téziszfüzete

Készítette:

NAGY GÁBOR

Okleveles kohómérnök

Tudományos témavezetők:

Dr. Woperáné Dr. Serédi Ágnes, címzetes egyetemi tanár

Dr. Lovrity Zita, kutató analitikus (Richter Gedeon Nyrt.)

Miskolc

2019.

1. Bevezetés, célkitűzés

Napjainkban a nyersanyagok és az energia iránti igény növekvő tendenciát mutat, mellyel párhuzamosan a képződő hulladékok mennyisége is növekszik. A hulladékok keletkezésének mérséklése, illetve a létrejövő hulladékok kezelése egyre inkább előtérbe kerülő, világméretű környezetvédelmi és gazdasági feladat. Az emberiség élelmezési gondjai is hasonlóan nagy problémát jelentenek, ugyanis annak ellenére, hogy világviszonylatban 870 millió ember éhezik, 1,3 milliárd tonna élelmiszerhulladék keletkezik évente [1]. A jelenlegi tendencia alapján várhatóan az élelmiszerhulladékok mennyisége a jövőben növekedni fog [2], ami kiemelten fontos területté teszi ezen hulladékok felhasználhatóságának vizsgálatát. Az élelmiszerhulladékok legnagyobb arányban a fogyasztás szintjén keletkeznek, elsősorban a fejlett országokban [3]. Ezt bizonyítja az is, hogy egy 2012-ben készített tanulmány szerint [4] az EU-ban keletkező élelmiszerhulladék 56%-a háztartásokból és a közétkeztetésből származik. Egy újabb hasznosítási módszer alkalmazásával csökkenhet a lerakóba kerülő élelmiszerhulladékok mennyisége. Disszertációmban az élelmiszerhulladékok azon csoportjával foglalkozom, amely a vendéglátóipari egységekben, éttermekben és közkonyhákban keletkező ételmaradékokat foglalja magában, ezt a továbbiakban étkezdei hulladéknak nevezem.

A hulladékhierarchiának [5] megfelelően mindenekelőtt a hulladékok keletkezésének elkerülése az elsődleges feladat. Ezt követően a képződő étkezdei hulladék elsősorban ételként vagy takarmányként történő hasznosítása lenne a preferált módszer, de a jelenlegi társadalmi berendezkedésünk erre csak korlátozva ad lehetőséget. Az újrahasználatra közegészségügyi szempontok miatt csak kismértékben van lehetőség. Erre jó példa, hogy a főtt és sült ételeket maximum 3 órán keresztül lehet környezeti hőmérsékleten tárolni, majd ezt követően további 2 napig tartható el 0-5 °C közötti hőmérsékleten [6, 7]. Az újrahasznosítás keretein belül lehetőség van takarmányként felhasználni az étkezdei hulladékot például állatmenhelyeken, de ezt az állatok csak korlátozottan tudják fogyasztani állategészségügyi szempontok miatt [8, 9]. Az ilyen típusú, kis energiasűrűséggel rendelkező anyagok sok esetben hasznosítás nélkül a kommunális hulladékkal együtt hulladéklerakókba kerülnek. 2014-es adatok alapján az EU-28 tagállamaiban keletkező kommunális hulladék közel 30%-a került lerakásra [10], ami Magyarország esetén 2016-ban 51% volt [11]. A hulladékhierarchia lerakástól előnyösebb szintjén helyezkedik el az „Egyéb visszanyerés” kategória. Ide sorolhatók a biokémiai eljárások (pl. biogáz előállítás vagy komposztálás), melyeket többnyire a fejlettebb országokban alkalmaznak. Ezek alternatívái lehetnek a termokémiai gázosító eljárások (pirolízis és elgázosítás), amelyek a biokémiai eljárásokhoz képest gyorsabban megvalósíthatók, valamint ezeket

alkalmazva szélesebb körben felhasználható és értékesíthető termékek előállítására nyílik lehetőség. A termokémiai úton történő hasznosítási lehetőségek közül kutatásaimhoz a pirolízist választottam. Az étkezdei hulladékok ilyen jellegű felhasználása egy új és kismértékben kutatott terület, a vonatkozó szakirodalom minimális, így a tématerület kutatása számos új és értékes eredmény megismerésére ad lehetőséget.

Disszertációm alapvető célja az étkezdei hulladékok hasznosításához kapcsolódó alapkutatás elvégzése volt. Vizsgálataim során négy egymásra épülő kérdésre kerestem a választ:

- 1) Alkalmasak az étkezdei hulladékok a pirolízissel történő hasznosításra?
- 2) Milyen minőségű termékek keletkezése várható az étkezdei hulladékok pirolízise során?
- 3) Milyen adalék alapanyag alkalmazásával lehet gazdaságosabbá tenni az étkezdei hulladékok pirolízisét?
- 4) Hogyan befolyásolható a pirolízis termékek mennyisége és minősége az étkezdei hulladék és az adalékanyag keverék arányát változtatva?

Mivel a szakirodalomban kevés az olyan adat, amely támpontot nyújtana az étkezdei hulladékok pirolízisével kapcsolatban, első lépésként megvizsgáltam számos étel és ezek előkészítése során képződő hulladék összetételét. Ez alapján megválaszolható az a kérdés, hogy *alkalmasak-e ezek a hulladékok a pirolízissel történő hasznosításra*. Az eredményeim alapján megállapítottam, hogy alkalmasak, így a következő lépésben különböző hőmérsékleteken különböző ételkeverékeket pirolizáltam és megvizsgáltam, *milyen termékek keletkeznek*. A kísérletek során keletkező termékek alkalmasak lehetnek további hasznosításra, viszont az alapanyag decentralizált keletkezése és nagy nedvességtartalma miatt a gázosítási technológiát nem lehet gazdaságosan működtetni kizárólag étkezdei hulladékkal. Így a folyamat hatékonyságának növelése érdekében a nedvességtartalmat csökkenteni kell, melyhez a legkisebb energiabefektetéssel megvalósítható lehetőség, ha az alapanyagot egy kisebb nedvességtartalmú anyaggal keverjük és azokat közösen pirolizáljuk. Derivatográfus vizsgálataim eredményei alapján választottam ki, hogy *milyen adalék alapanyag alkalmazásával lehet gazdaságosabbá tenni a folyamatot*. A derivatográfus vizsgálatok jól kiegészítik a pirolízis kísérleteket, melyek alapján a pirolízis optimális hőmérséklet tartománya is meghatározható. Miután kiválasztottam a megfelelő kiegészítő alapanyagot és az optimális hőmérsékletet, különböző arányban kevertem az étkezdei hulladékot és a kiegészítő alapanyagot, majd vizsgáltam, *hogyan befolyásolható a keletkező termékek mennyisége és minősége a keverési arány változtatásával*. Ezek alapján meghatározható volt az az optimális keverési arány, mely alkalmazásával a lehető legnagyobb mennyiségben nyerhető ki értékes termék a vizsgált keverékekből. Vizsgálataim kiterjedtek a termékek energia- és klórtartalmára is.

A bemutatott tudományos eredmények alapot szolgáltatnak az étkezdei hulladékok már meglévő biomassza pirolizáló rendszerekben történő felhasználásához, illetve megalapozzák a nagyobb mennyiségű szintézisgáz termeléséhez szükséges, vízgőzzel történő elgázosítás előkészítését.

2. Alapanyagok, kísérletsorozat

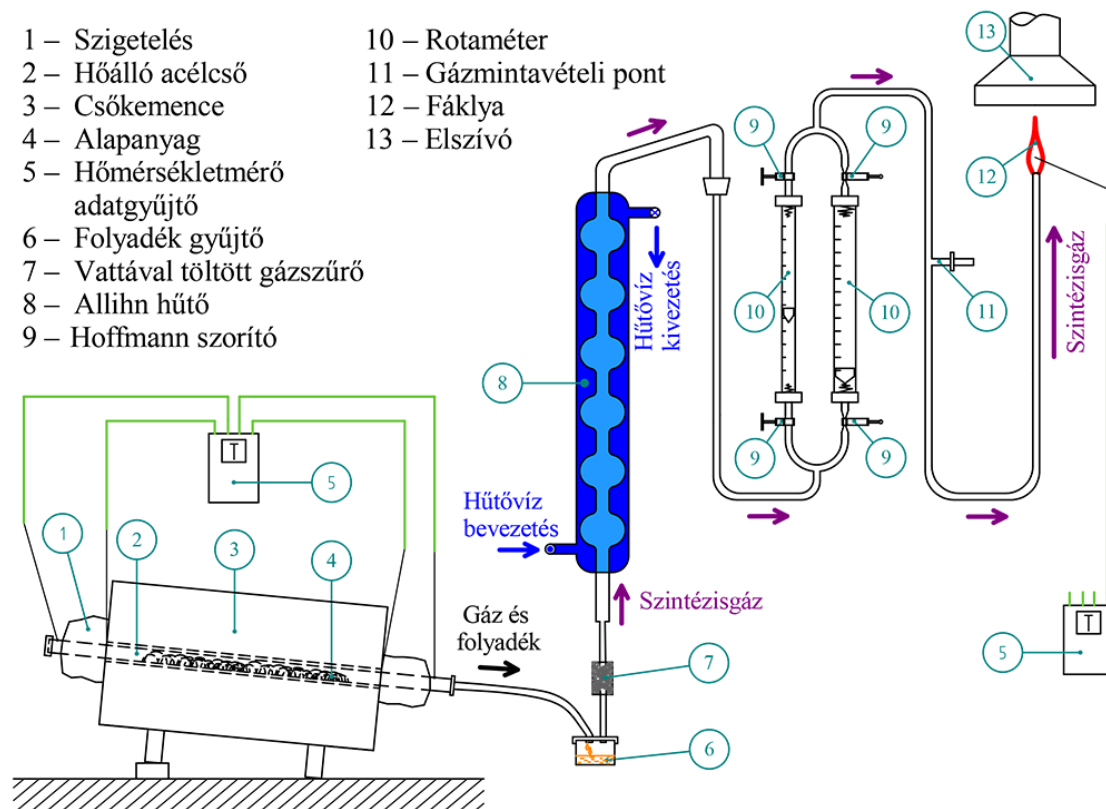
2.1. Az étkezdei hulladékok vizsgálata

Az étkezdei hulladékok pirolízise szempontjából fontos tulajdonságai a szakirodalomból nem ismerhetők meg teljes mértékben. Emiatt 19 féle ételmaradékon és 15 féle, az ételek előkészítése során keletkező növényi maradványon végeztem el a legfontosabb alapanyag vizsgálatokat (nedvességtartalom, hamutartalom és elemi összetétel meghatározás). Az ezek alapján nyert alapinformációkból következtetni lehet arra, hogy a vizsgált alapanyagok alkalmasak lehetnek-e a pirolízissel történő felhasználásra, hasznosíthatóságra.

2.1. Az étkezdei hulladékok pirolízise

Három típusú keveréket készítettem ételmaradékokból: egy tisztán növényi és egy tisztán állati eredetű ételkeveréket, valamint egy olyat, amely állati és növényi eredetű ételeket is tartalmazott. Ezeket különböző hőmérsékletre történő felfűtés, majd hűntartás során pirolizáltam. A pirolízishez összeállítottam egy pirolizáló rendszert, amely az 1. ábrán tekinthető meg.

A keverékek pirolízise előtt, az alapanyag-vizsgálatokhoz hasonlóan, elvégeztem az ételkeverékek nedvességtartalmának, elemi összetételének és hamutartalmának meghatározását. A hamutartalmat és az elemi összetételt a keletkező pirolíziskoksz esetén is megvizsgáltam. Ezeken felül méréseket végeztem a képződő gáz mennyiségét és összetételét illetően.



1. ábra. A kísérleti rendszer sematikus ábrája

2.3. Kiegészítő alapanyagcsoport választása étkezdei hulladékok pirolíziséhez

Az étkezdei hulladékok termokémiai hasznosítását legnagyobb mértékben befolyásoló tényező azok nedvességtartalma. Ez úgy csökkenthető a legkisebb energiabefektetés mellett, hogy egy alapanyag keveréket állítunk elő. A keverék a nagy nedvességtartalmú étkezdei hulladék mellett tartalmaz olyan anyagot is, amely kis nedvességtartalommal rendelkezik és alkalmazható pirolízis alapanyagaként. A kiegészítő adalékcsoportot 20 féle anyag derivatográfus vizsgálata után választottam ki, összehasonlítva egy étkezdei hulladékokból előállított modellkeverék eredményeivel. A modellkeverék az étkezdekben előforduló négy gyakori főételt (főtt rizs, sültburgonya, sült csirkemell, rántott sertésszelet) tartalmazta 1:1:1:1 tömegarányban.

A derivatográfus eredmények alapján azt a kiegészítő anyagcsoport választottam, amely termoanalitikai szempontból a legjobban hasonlít az étkezdei hulladékokra. Az alapanyagok hasonló tulajdonságai miatt közel azonos hőmérsékleteken mennek végbe az egyes folyamatok, melyek során várhatóan hasonló termékek keletkezhetnek, így egyszerűbbé válik a technológia félüzemi/üzemi méretekben történő tervezése.

Azt az anyagcsoportot választottam adalékként, amely a derivatográfus vizsgálatok nedvesség-, illó-, fix-karbon- és hamutartalom, valamint fix-karbon kiégés hőmérséklet eredményei alapján a legmegfelelőbbnek bizonyult. Ez a fás szárú biomasszák csoportja.

2.4. A biomassa adalék hatása a pirolízis termékek mennyiségére és minőségére

A keverékek pirolíziséhez kiindulási anyagként a derivatográfus vizsgálatok során használt, étkezdei hulladékokat modellező keveréket alkalmaztam. A pirolízis vég hőmérsékletének a derivatográfus eredmények alapján meghatározott optimális hőmérsékletet (700 °C) alkalmaztam. A kísérleteket elvégeztem tisztán a modellkeverékkel és a kiválasztott adalékanyaggal is, illetve olyan keverékek esetén, amikor a modellkeverék és az adalék tömegaránya 2:1 és 1:2 volt. A kísérletek során széleskörű vizsgálatoknak vettem alá a négyféle alapanyag keveréket és a termékeket is. A jövőbeni hasznosítás, és a felmerülő lehetséges problémák számbavételével átfogó képet kívántam adni az étkezdei hulladékok pirolízisében rejlő lehetőségekről.

Kutatómunkám során az alapanyagokon és a pirolízis termékeken elvégzett vizsgálatokat az 1. táblázat.

1. táblázat. Az elvégzett vizsgálatok és számított jellemzők

Az anyagok mért vagy számított jellemzői		
Szilárd anyag (alapanyagok és koks)	Folyadék	Gáz
Tömeg	Tömeg	Áramlási sebesség
Nedvesség	Égéshő	Összetétel
Hamu	Klór	Égéshő
Elemi összetétel (C, H, N, S, O)		Fűtőérték
Klór		Adiabatikus láng hőmérséklet
Hamulágyulás		
Égéshő		
Fűtőérték		
Fajlagos felület		
Szemcseméreteloszlás		
Halmazsűrűség		
Termoanalitikai jellemzők		

3. Az eredmények összefoglalása

Disszertációm központi témája az étkezdei hulladékok pirolízissel történő hasznosításának vizsgálata. Laboratóriumi vizsgálatokon és konvencionális pirolízist modellező kísérleteken keresztül kívántam megteremteni az optimális körülményeket ezen hulladékok hasznosításához. A pirolízissel történő hasznosítás elsődleges kritériumának a képződő gáz összetételét választottam, ugyanis a megfelelően nagy szén-monoxid- és hidrogéntartalom alkalmassá teszi a gázkeveréket nagyértékű vegyipari termékek előállítására. A gáz tulajdonságai mellett megvizsgáltam a keletkező folyadékot és szilárd anyagot is annak érdekében, hogy átfogó képet kapjak az egyes pirolízis termékek esetleges felhasználhatóságáról.

Első lépésként megvizsgáltam 19 étel és 15 növényi eredetű konyhai hulladék legfontosabb tüzeléstechnikai jellemzőit (nedvesség- és hamutartalom, elemi összetétel), hogy meghatározzam, ezek az anyagok alkalmasak lehetnek-e pirolízissel történő hasznosításra. Habár elemi összetételük alapján mindkét anyagcsoport megfelelne, nagy nedvességtartalmuk miatt pirolízisük nem lenne gazdaságos. Mivel a növényi maradványoknak átlagosan 75 m/m% volt a nedvességtartalma (17 m/m%-kal nagyobb, mint az ételek esetén), ezek alkalmazása tovább csökkentené az energetikai hatásfokot. Ezért ajánlott külön kezelni a két anyagcsoportot és csak az ételmaradékokat pirolizálni.

Laboratóriumi méretben pirolizáltam különböző ételmaradékokat, hogy igazoljam, a nagy nedvességtartalmuk ellenére ezekből könnyebben kezelhető és tovább hasznosítható termékek állíthatók elő. Ebben az esetben az energetikai hatásfok növelése érdekében javasolt a nedvesség csökkentése a további kísérletek előtt. Elkészítettem három különböző (egy csak növényi eredetű, egy csak állati eredetű és egy állati és növényi eredetű ételeket tartalmazó) ételkeveréket, melyeket 650, 725 és 900 °C-os véghőmérséklet beállításával pirolizáltam. A pirolízis kísérletek eredményei alapján megállapítottam, hogy a pirolízis véghőmérsékletét növelve nő a képződő gáz mennyisége. Ez megfelel a szakirodalomban fellelhető adatoknak. Emellett a pirolízis hőmérsékletét növelve nőtt a gáz szén-monoxid és hidrogéntartalma, valamint csökkent a szénhidrogén tartalma. A reaktor felfűtése során a széndioxid és a szénhidrogének jelenléte volt a meghatározó, viszont állandó reaktorhőmérsékleten szén-monoxid és hidrogén képződik nagyobb mennyiségben. A szénhidrogének és a kénhidrogén a felfűtés során mindhárom keverék esetén maximális értéket értek el: húsételek esetén volt a legnagyobb, növényi eredetű ételek esetén pedig a legkisebb koncentráció csúcs. Az alapanyag konverzió és a pirolíziskokszok összetétele alapján megállapítottam, hogy az optimális pirolízis hőmérséklet 650 és 725 °C között található, ugyanis 725 °C fölött a koksztartalom és a hidrogén- és szén-monoxid tartalma már csak kismértékben csökken a hőmérséklet további növelésének hatására. Az

étkezdei hulladékok legpontosabb modellezése érdekében a továbbiakban 1:1:1:1 tömegarányú keverékét alkalmaztam a főtt rizsnek, sült burgonyának, rántott sertésszeletnek és sült csirkemellnek, ezáltal a keverék tartalmazott növényi és állati eredetű, sült és főtt, valamint zsíros és olajos ételeket is.

Megállapítottam, hogy a nagy nedvességtartalom ellenére az étkezdei hulladékok pirolízis-termékei további felhasználásra alkalmasak. A nedvességtartalom csökkentésével energetikai szempontból előnyösebb állapot érhető el, melyet kisebb nedvességtartalmú kiegészítő alapanyag alkalmazásával kívántam elérni. 20 darab, pirolízis/elgázosítás során alkalmazott anyag derivatográfus vizsgálati eredményeit használtam a megfelelő kiegészítő adalék kiválasztásához. Arra az anyagcsoportra esett a választás, amely az étkezdei hulladékoktól nagyobb fix-karbon- és kisebb illótartalommal rendelkezik, valamint a hőmérséklet növelés hatására végbemenő folyamatok hasonló hőmérséklet tartományban mennek végbe. Ezeknek a kritériumoknak a legjobban a fás szárú biomasszák feleltek meg, melyek közül a további kísérletekhez a tölgyfát választottam, mivel a hőmérsékletnövelés hatására bekövetkező tömegcsökkenés ez esetben hasonlított legjobban az étkezdei hulladékokéhoz. A derivatográfus eredmények alapján az étkezdei hulladékok pirolízis-hőmérsékletének a 700 °C-ot választottam, mivel ezen hőmérsékletet elérve az étkezdei hulladék és a legtöbb fa tömegcsökkenése 94 m/m%-tól nagyobb volt és a további tömegcsökkenés nagyon kismértékű volt. Ez a hőmérséklet az ételmaradékokkal végzett pirolízis kísérleteim során megállapított optimális intervallumon belül található.

Ezt követően pirolízis kísérleteket végeztem a kiegészítő alapanyagként választott tölgy, az étkezdei hulladék, valamint ezek 1:2 és 2:1 tömegarányú keverékét használva. A tölgyfa kis nedvességtartalma miatt az étkezdei hulladék mellé növekvő mennyiségben adagolva csökkentette a képződő folyadék mennyiségét és növelte a gázhozamot illetve a visszamaradó kokszt mennyiségét. A gázösszetétel időbeli változásának jellege minden keverék esetén hasonlóan alakult a korábbi pirolízis kísérletekhez. A reaktor felfűtése során képződő gáz energetikai felhasználásra lehet alkalmas, hőtartás során pedig a nagy H₂ és CO tartalom, illetve ezek aránya alapján a gáz vegyipari alapanyagnak is megfelelhet. Az alapanyag összetevői is befolyásolják a gázösszetételt, a tölgyfa mennyiségét növelve nő a szén-monoxid és a hidrogén mennyisége, illetve képződő gáz mennyisége is. A tölgyfa arányát növelve nő a szilárd formában visszamaradó karbon, ezáltal nő az abból még kinyerhető energia mennyisége is. A kokszt fajlagos felületét és örölhetőségét vizsgálva megállapítottam, hogy az energetikai hasznosítás vagy a kokszt tovább gázosítása lehet az optimális felhasználási lehetőség, amit a kokszt hamujának lágyulási tulajdonságai sem befolyásolják. Az alapanyag és a pirolízis termékek klórtartalmának vizsgálata alapján bebizonyosodott, hogy az ételek nagy mennyiségű klórt tartalmaznak. Pirolízist követően a klór

nagyobb részben a gáz és szilárd, kisebb részben pedig a folyadék fázisban jelenik meg, ezt a termékek további felhasználása során figyelembe kell venni. A pirolízis során keletkező termékek mennyiségére és a koksztégéshőjére következtetni lehet az alapanyagok arányának és nedvességtartalmának ismeretében.

4. A kutatás hasznosíthatósága

A pirolízis során képződő gáz időbeli változásának nyomon követéséhez egy újszerű gázmintavételi eljárást és egy, a komponensek elválasztására alkalmas gázelemzési módszert fejlesztettem ki. Ezen módszereket az oktatásban is alkalmazzuk, szerves részét képezik az Anyagmérnök BSc képzés keretein belül meghirdetésre kerülő Tüzeléstan című tantárgy gyakorlatainak. Emellett kutatásaim lehetőséget biztosítanak a hallgatók bevonására a tudományos életbe, melynek eredményeként 2 TDK dolgozat és 1 diplomamunka is elkészült.

A pirolízis kísérleteim eredményei alapján az étkezési hulladékokból elsődlegesen energetikai felhasználásra alkalmas gáz állítható elő. Azonban folyamatos üzem megvalósításával egyenletesebb és nagyobb szén-monoxid- és hidrogéntartalom érhető el a gázban, ezáltal a gáz nagyértékű vegyi anyagok előállítására is megfelelő lehet.

Disszertációm továbbá rávilágít arra, hogy ezzel a hulladék hasznosító módszerrel bővíthető a pirolízis technológiák alapanyagköre, fás szárú biomasszákkal keverve pedig gazdaságosan pirolizálható, illetve meglévő biomassza pirolizáló rendszerbe adagolva várhatóan nem lesz negatív hatása a termékek minőségére és mennyiségére. Az étkezési hulladékok kis energiasűrűsége miatt a felhasználás csak korlátozott távolságon belül gazdaságos. Tehát a kutatási eredményeim pirolizáló üzemet is magában foglaló ipari parkokban hasznosíthatók, ahol a környékbeli gyárak és üzemek étkezési hulladékot fel tudják használni.

Eddigi kutatási eredményeim megfelelő alapot nyújtanak a pirolízis elgázosítással fejlesztéséhez. 2014-ben világviszonylatban 466 vállalat foglalkozott pörköléssel, pirolízissel és elgázosítással [12], melyekhez különféle anyagokat alkalmaztak. Ez alapján az étkezési hulladékoknak is helye lehet a termokémiai kezelések között.

5. Új tudományos eredmények

1. Étkezdei hulladékokkal végzett vizsgálataim szerint az ételek maradékai a száraz állapotra vonatkoztatott elemi összetételük alapján alkalmasak szintézisgáz előállítására (H/C arány: 2,07, O/C arány: 0,61), ugyan úgy, mint az ételek előállítása során keletkező növényi maradványok (H/C arány: 1,64, O/C arány: 0,81). A két alapanyag nedvességtartalma nagy, az ételeké átlagosan 58 m/m%, a növényi hulladékoké 75 m/m%. Ezért önmagukban vagy szárítás nélkül pirolízissel nem állítható elő belőlük gazdaságosan szintézisgáz.
2. Az ételkeverékek 650, 725 és 900 °C-on végzett pirolízise alapján megállapítottam, hogy az étkezdei hulladékok pirolízisének optimális hőmérséklete az energiafelhasználás figyelembevételével a 650-725 °C közötti tartományban helyezkedik el. Ennek indikátora az alapanyag karbon- és hidrogéntartalmának csökkenése. 725 °C-os pirolízis vég hőmérsékletet alkalmazva a 650 °C alkalmazásához képest az alapanyag karbontartalmának csökkenése 10-20% volt. A hőmérsékletet 900 °C-ra növelve a szilárd formában maradó karbon csökkenése a 725 °C alkalmazásához képest csak további 3-8% volt. 650-ről 725 °C-ra növelve a pirolízis vég hőmérsékletét 6-25%-kal csökkent a hidrogéntartalom, míg 900 °C-ra növelve a hőmérsékletet már csak 1-3% volt a további csökkenés.
3. Derivatográfus vizsgálatok eredményei alapján megállapítottam, hogy az étkezdei hulladékok pirolíziséhez termoanalitikai szempontból a fás- és lágyszárú biomasszák a legmegfelelőbb kiegészítő anyagok. Nedvesség- és illótartalmuk kisebb, fix-karbontartalmuk pedig nagyobb, mint az étkezdei hulladékoknak. A derivatogramok alapján a hőmérsékletnövelés hatására bekövetkező tömegcsökkenések lefolyása hasonló, a 700 °C-ig mért tömegcsökkenések eltérése ± 5 m/m%-tól kisebb.
4. A 700 °C-on végzett konvencionális pirolízis során az étkezdei hulladékokhoz növekvő mennyiségben adagolt tölgyfa növeli a fajlagos gázhozamot, illetve a termék gáz szén-monoxid- és hidrogéntartalmát, emellett csökkenti a szén-dioxid és szénhidrogén tartalmát.

5. Az étkezdei hulladék és a tölgyfa arányának és nedvességtartalmának ismeretében,
700 °C-os, laboratóriumi méretben kivitelezett konvencionális pirolízis esetén a pirolízis termékek számos tulajdonsága egyenletekkel jól közelíthető.

Paraméter	Egyenlet	R ²
Képződő pirolíziskoksz aránya, m/m%	$-0,002x^2 + 0,393x + 13,529$	0,9915
	$-0,010n^2 + 0,064n + 33,749$	0,9925
Képződő folyadék aránya, m/m%	$0,002x^2 - 0,469x + 63,83$	0,9985
	$0,010n^2 + 0,089n + 35,707$	0,9989
Képződő gáz aránya, m/m%	$0,070x + 22,717$	0,9834
	$-0,161n + 30,613$	0,9840
Pirolíziskoksz égéshője, MJ/kg	$-0,001x^2 + 0,106x + 24,109$	0,9919
Pirolíziskoksz fűtőértéke, MJ/kg	$-0,001x^2 + 0,117x + 23,362$	0,9780
Összesen képződő gázmennyiség, l/kg	$0,949x + 130,630$	0,9475
Képződő olajos frakció mennyisége, m/m%	$0,001x^2 - 0,364x + 22,411$	1,0000
Képződő vizes frakció mennyisége, m/m%	$0,001x^2 - 0,170x + 35,106$	0,9966
Képződő kátrányos frakció mennyisége, m/m%	$-0,001x^2 + 0,065x + 6,313$	0,9879

ahol x: az ételkeverékhez adagolt tölgyfa mennyisége tömegszázalékban kifejezve,
n: a keverék nedvességtartalma tömegszázalékban kifejezve.

6. Mérésekkel alátámasztottam, hogy az étkezdei hulladékok jelentős klórtartalommal rendelkeznek, amely átlagosan 4-6-szor nagyobb, mint a szakirodalomban megtalálható, szénkre és biomasszákra megadott értékek. Mérésekkel igazoltam, hogy az étkezdei hulladékok klór tartalma a 700 °C-on végzett konvencionális pirolízis során megoszlik a pirolízis termékek között. Az étkezdei hulladékok esetén a klór 64,1:0,1:35,8 arányban oszlott meg a szilárd, folyadék és gáz fázisok között. Tölgyfa esetén ez az arány 40,1:4,8:55,1 volt. Étkezdei hulladék és tölgyfa keverékek esetén a klór megoszlása az alapanyagok arányának megfelelően változott. A klórtartalom megoszlásának ismerete a termékek tovább hasznosíthatósága szempontjából fontos, amelyet környezetvédelmi és korróziós hatások indokolnak.

6. A disszertáció témájához kapcsolódó, írásban megjelent publikációk

Folyóiratcikkek

1. Gábor Nagy, Ágnes Wopera, Tamás Koós: The Lab-scale and Thermogravimetric Analysis of the Catalytic and Non-catalytic Co-pyrolysis of Oak and Canteen Waste Mixture. *International Journal of Environment and Waste Management*, IF₍₂₀₁₆₎: 0,42; Quartile₍₂₀₁₆₎: Q3 (A cikk elfogadva, megjelenés alatt)
2. Gábor Nagy, Zita Lovrity, János Emmer: A Proposed Cost-Efficient Syngas Examination Method for Small-Scale Gasification Systems. *Journal of Separation Sciences*, IF₍₂₀₁₆₎: 2,415; Quartile₍₂₀₁₆₎: Q2 (A cikk bírált alatt áll)
3. Gábor Nagy, Mária Ambrus: The Development and Efficiency of a Quick and Cost-Efficient Gas Sampling Method for Small-Scale Syngas Experiments. *Journal of Chromatography A*, IF₍₂₀₁₆₎: 3,716; Quartile₍₂₀₁₆₎: Q1 (A cikk bírált alatt áll)
4. Gábor Nagy, Ágnes Wopera, Tamás Koós, Roland Szabó: The pyrolysis of canteen waste and oak mixtures in various ratios. *Energy Sources Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, ISSN 1556-7036, IF₍₂₀₁₆₎: 0,527; Quartile₍₂₀₁₆₎: Q3, 2018. Vol. 40/18, pp.2124-2136.
DOI: [10.1080/15567036.2018.1495774](https://doi.org/10.1080/15567036.2018.1495774)
5. Nagy Gábor, Woperáné Serédi Ágnes: Katalitikus pirolízis modellezése derivatográf használatával. *Energiagazdálkodás*, ISSN 0021-0757 2018. 59. évfolyam, 5. szám, pp. 2-6.
6. Gábor Nagy, Ágnes Wopera, Tamás Koós: The examination of the co-pyrolysis of food and wood I. – Solid residue – *Materials Science and Engineering*, HU ISSN 2063-6792 2016. Vol. 41/1, pp. 105-115.
7. Gábor Nagy, Ágnes Wopera: The examination of the co-pyrolysis of food and wood II. – Syngas – *Materials Science and Engineering*, HU ISSN 2063-6792 2016. Vol. 41/1, 116-126.
8. Nagy Gábor, Woperáné Serédi Ágnes: Étkezdei hulladékok pirolízise – *Energiagazdálkodás*, ISSN 0021-0757 2015. 56. évfolyam 1-2. szám, pp. 55-58.
9. Nagy Gábor, Koós Tamás, Woperáné Serédi Ágnes, Szemmelveisz Tamásné: Ételmaradékok kigázosításához kiegészítő alapanyag választása termoanalitikai vizsgálatok alapján – *Anyagvizsgálók Lapja*, HU ISSN 1787-507 2014. 24. évfolyam 1-2. szám, pp. 33-40.
10. Gábor Nagy, Ágnes Wopera, Tamás Koós: Physical and chemical analysis of canteen wastes for syngas production – *Materials Science and Engineering*, HU ISSN 2063-6792 2014. Vol. 39/2, pp. 59-67.
11. Nagy Gábor, Woperáné Serédi Ágnes: Élelmiszerhulladékok energetikai hasznosítása – *Magyar Energetika*, ISSN 1216-8599 2014/4, pp. 36-39.
12. Woperáné Serédi Ágnes, Nagy Gábor: Biogáz és szintézisgáz energetikai hasznosítása – *Bányászati és Kohászati Lapok*, HU ISSN 0005-5670 2012. 145. évfolyam, 5. szám, pp. 58-62.

Konferenciakiadványban publikált cikkek

1. Nagy Gábor, Woperáné Serédi Ágnes: Tölgyfa és étkezdei hulladékok katalitikus pirolízise – XIV. Kárpát-medencei Környezettudományi Konferencia, ISBN 978-615-00-1645-0 Gödöllő, 2018. április 5-7. pp. 219-224.
2. Nagy Gábor, Kállay András Arnold: Laboratóriumi pirolizáló/elgázosító rendszer megvalósításának gyakorlati nehézségei (poszter) – XIV. Kárpát-medencei

-
- Környezettudományi Konferencia*, ISBN 978-615-00-1645-0 Gödöllő, 2018. április 5-7. pp. 207-213.
3. Gábor Nagy, Ágnes Wopera: Syngas production from canteen waste by pyrolysis – *Tavaszi Szél 2014*, ISBN 978-615-80044-6-6 Debrecen; 2014. pp. 482-491.
 4. Gábor Nagy: Synthesis gas obtained from the pyrolysis of canteen waste (absztrakt) *1st Innovation in Science 2014 – Doctoral Student Conference*, ISBN 978-963-9970-52-6 Szeged, 2014. május 2-3.
 5. Nagy Gábor, Woperáné Serédi Ágnes: Étkezési hulladékok, mint a szintézisgáz előállítás potenciális alapanyagai – *XXVIII. microCAD International Scientific Conference*, ISBN 978-963-358-051-6 2014. április 10-11.
 6. Nagy Gábor, Lovrity Zita, Emmer János: Kreativitás a gázvizsgálat terén, avagy mire használhatók még az infúziós segédeszközök – *Innováció és Kreativitás a Tudományban*, ISBN 2392-6333 Kolozsvár, 2013. december 7.
 7. Nagy Gábor: Szintézisgáz előállításának lehetősége étkezési hulladékok felhasználásával – *Doktoranduszok Fóruma Műszaki Anyagtudományi Kar Szekciókiadványa*, Miskolc, 2013. pp. 13-17.
 8. Nagy Gábor, Lovrity Zita, Emmer János: Gáz halmazállapotú tüzelőanyagok összetételének meghatározása gázkromatográfiás módszerrel – *Tavaszi Szél 2013*, ISBN 978-963-89560-2-6 Sopron, 2013. pp. 364-376.

A tézisfüzet irodalomjegyzéke

- [1] F. Giroto, L. Alibardi, R. Cossu, Food waste generation and industrial uses: A review, *Waste Management* 45 (2015) 32-41.
- [2] Final report - Preparatory study of food waste across EU27, 2010. http://ec.europa.eu/food/safety/food_waste/library/docs/bio_foodwaste_report_en.pdf.
- [3] B. Lipinski, C. Hanson, J. Lomax, L. Kitinoja, R. Waite, *Reducing Food Loss and Waste*, World Resauche Institute, 2013.
- [4] B.C.f.F. Nutrition, *Food waste: causes, impacts and proposals*, Parma, 2012.
- [5] Guidance on applying the Waste Hierarchy, 2011. <https://www.gov.uk/government/organisations/department-for-environment-food-rural-affairs>. (Accessed 08. 10. 2017.).
- [6] 62/2011. (VI. 30.) VM rendelet a vendéglátó-ipari termékek előállításának és forgalomba hozatalának élelmiszerbiztonsági feltételeiről.
- [7] A. Zoltai, *Útmutató a vendéglátás és étkeztetés jó higiéniai gyakorlatához*, Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal, Budapest, 2013.
- [8] A kutyák táplálása, 2015. <http://www.drmero.hu/a-kutyak-taplalasa/>. (Accessed 2018. 12.28.
- [9] K. Csikós, A kutya táplálása. <http://mardel.mard-el.hu/index.php/magazin/kutya/37-a-kutya-taplalasa>. (Accessed 2018. 12. 28.
- [10] Eurostat, *Municipal waste statistics*, 2017. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics. (Accessed 12.12. 2017).
- [11] Az egyes hulladékfajták mennyisége a kezelés módja szerint (2004–). http://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ur006.html. (Accessed 12. 20. 2017).
- [12] G. Kutney, *The state of pyrolysis in Canada*, Sixth Element Sustainable Management, 2015.