

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**Nehézfémekkel szennyezett bányaterületről származó fás szárú
biomassza égetéssel történő ártalmatlanítási feltételeinek
vizsgálata**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Kovács Helga
okl. műszaki menedzser

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI
TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE, GÉPÉSZETI
ANYAGTUDOMÁNY, GYÁRTÁSI RENDSZEREK ÉS FOLYAMATOK

Vezetője: Dr. Tisza Miklós
a műszaki tudományok doktora, egyetemi tanár

Tudományos vezetők:

Dr. Tolvaj Béla, egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki- és Informatikai Kar
Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke

Dr. Szemmelveisz Tamásné, egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar
Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék

2013.

**Nehézfémekkel szennyezett bányaterületről származó fás szárú
biomassza égetéssel történő ártalmatlanítási feltételeinek
vizsgálata**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Kovács Helga
okl. műszaki menedzser

Tudományos vezetők:

Dr. Tolvaj Béla, egyetemi docens

Dr. Szemmelveisz Tamásné, egyetemi docens

2013.

Bíráló bizottság tagjai:

elnök:

Prof. Dr. Tisza Miklós
tanszékvezető, egyetemi tanár
ME - Mechanikai Technológiai Tanszék

titkár:

Dr. Marosné dr. Berkes Mária
egyetemi docens
ME – Mechanikai Technológiai Tanszék

tagok:

Prof. Dr. Barótfi István
tanszékvezető, egyetemi tanár
SZIE – Épületgépészet Létesítmény- és Környezettechnika Tanszék

Dr. Gróf Gyula
tanszékvezető, egyetemi docens
BME - Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék

Prof. Dr. Szabó Szilárd
tanszékvezető, egyetemi tanár
ME - Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke

Prof. Dr. Szűcs István
egyetemi tanár
ME - Energia és Minőségügyi Intézet

Hivatalos bírálók:

Dr. Böhm József
egyetemi tanár
ME - Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

Dr. Kiss István
intézeti igazgató
Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., Biotechnológiai
Intézet

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

A világ népességének növekedésével párhuzamosan jelentkező egyre nagyobb energiaigény folyamatos kihívást jelent mind az energiaellátás, mind az ipari termelés területén. Ehhez kapcsolódóan szinte minden esetben számolni kell a különböző szennyezések környezetbe kerülésével, amely azonban egyúttal a környezetvédelmi előírások szigorítását és a betartásukhoz szükséges technológiák fejlődését is eredményezte.

A környezetszennyezések okozta károk csökkentése, megszüntetése napjainkban kiemelt jelentőséggel bír. Fontos szempont, hogy a technológiai fejlődés olyan irányba hasson, amely a lehető legkisebb környezeti szennyezéssel jár (BAT – Best Available Techniques). A múlt évszázadban nem tulajdonítottak nagy jelentőséget ezeknek az irányelveknek, így az alkalmazott technológiák jelentős környezeti károkat okoztak és hagytak maguk után. Magyarországon az ipari szerkezetváltást követően számos olyan szennyezett (barnamezős) terület maradt hátra, amelyek további hasznosítása feltételezi a terület szennyezettségének megszüntetését, kármentesítését. Az ilyen, „örökségül maradt” szennyeződések legveszélyesebb jellemzői, hogy rejtve vannak, és a talajban és talajvízben hosszútávon toxikus hatásúak.

Az ipari tevékenységek során alkalmazott technológiák és technikák okozta szennyezések között találkozhatunk egy jellemzően toxikus szennyezéssel, a nehézfémekkel történő talaj- és vízszennyezéssel. Nehézfém szennyezés alakulhat ki például a bányák (meddőhányók) és fémfeldolgozó üzemek környezetében. A nehézfémek természetes körülmények között is előfordulnak a környezetben, amelyek az élővilág nyomelem szükségleteit fedezik, így kis mennyiségben nem jelentenek élettani kockázatot.

Akár van látható jele, akár nincs, a nehézfémekkel szennyezett területeken a legfontosabb feladat a szennyeződések terjedésének megakadályozása és koncentrációjának csökkentése. A szennyezők eltávolítására a talajból, a talajvízből, a felszín alatti és a felszín feletti vizekből számos kármentesítési technológia és eljárás létezik. Ezek közül az egyik a fitoextrakció, amely a növények talajból történő tápanyagfelvevő képességét használja ki. Ennek előnye, hogy környezetbarát módon vonja ki a szennyezett területről a nehézfém szennyezőket, amelyek aztán a növény szövetekben halmozódnak fel és kerülnek raktározásra. Ez a kármentesítési technológia nemzetközileg is jól ismert és széles körben alkalmazott eljárás, de a folyamat során a nehézfémek csak áthelyeződnek a talajból a növényekbe, azaz a talaj nehézfém koncentrációja csökken, míg a növényekben megnövekszik. Az így keletkező biomassa kezelése a benne megtalálható nehézfémek miatt fokozott körültekintést igényel, annak kezeléséről és ártalmatlanításáról gondoskodni kell.

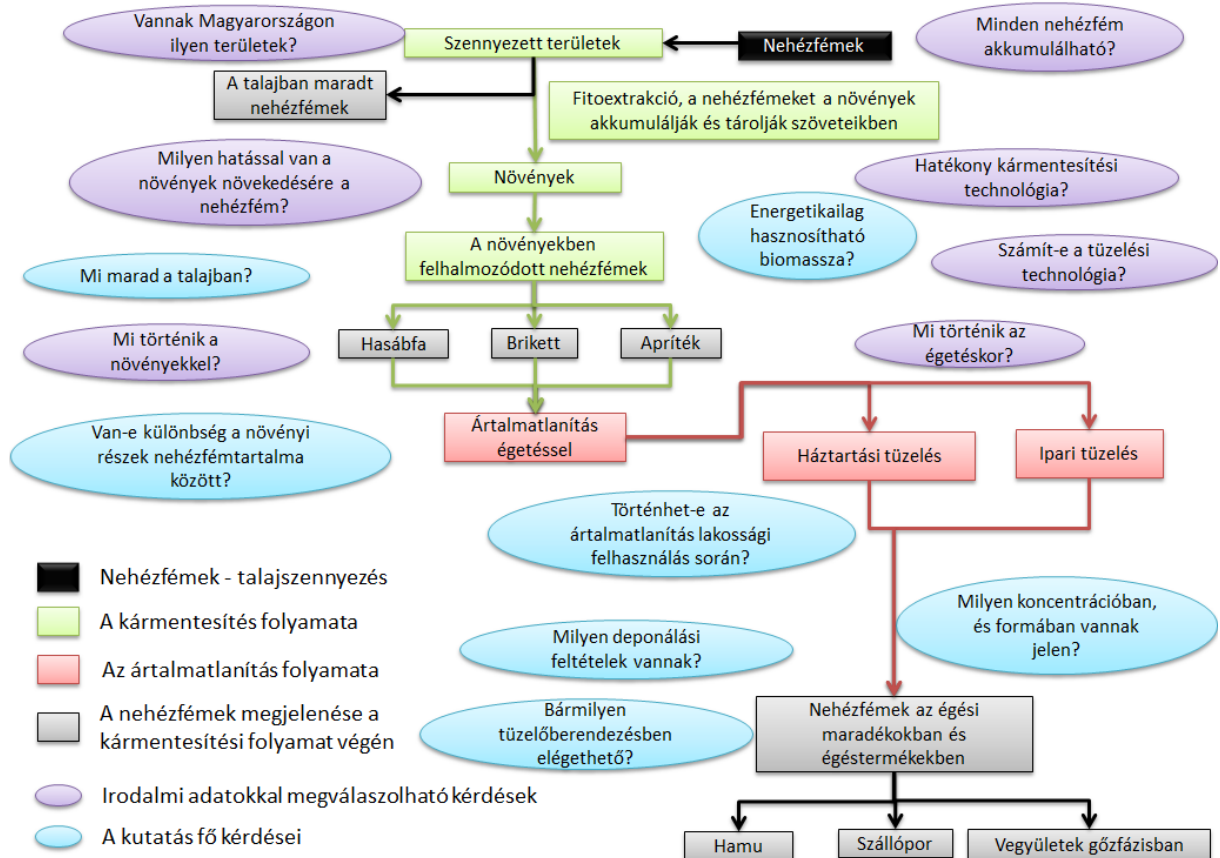
A nehézfémekkel szennyezett biomassa ártalmatlanítására több módszer is elterjedt, mint pl. a kioldás, komposztálás vagy égetés. Disszertációm témájaként a nehézfémekkel szennyezett biomassa égetéssel történő ártalmatlanítását választottam, mert ez az eljárás még számos megoldandó feladatot rejt.

A biomasszák égetéssel történő ártalmatlanításával lehetővé válik a növények energetikai hasznosítása is, de kiemelt figyelmet kell fordítani a tüzelés okozta környezetszennyezés elkerülésére. Az égetéskor keletkező káros anyagok mennyiségét (CO , NO_x , szilárdanyag tartalom) a tüzelőanyag tulajdonságai és a tüzelési technológia befolyásolja leginkább. Nehézfémekkel szennyezett biomassa égetésekor nemcsak a „szokásos” károsanyag kibocsátással kell számolnunk, hanem a tüztérből kikerülő gáz-gőz- és szilárd halmazállapotú nehézfémek problémáját is vizsgálni kell. Az egyes nehézfémek más-más arányban jelennek meg a tüzelés különböző szakaszaiban, így vannak olyan elemek, amelyek többnyire a tüztéri hamuhoz kötötten maradnak, és vannak olyanok, amelyek vegyületei gáz-gőz halmazállapotban távoznak a füstgázzal. Ezek az arányok nagymértékben függenek a tüztér hőmérsékletétől és a nyomástól, tehát az alkalmazott tüzelési technológiától. Ezek a gáz-gőz halmazállapotú, a füstgáz elvezető rendszerben áramló nehézfém vegyületek a hőmérséklet csökkenésével folyamatosan kondenzálódnak a füstgázban található pernyére és az elvezető rendszer szilárd felületeire. A füstgáz kilépő hőmérsékletétől függően szilárd- és gáz (gőz) halmazállapotban is számítani kell a nehézfémek és vegyületeik emissziójára. Ez azt jelenti, hogy a szennyezett növények égetése potenciális környezetszennyezést jelent, ezáltal a nehézfémekkel szennyezett biomassa nem sorolható a hagyományos biomassa tüzelőanyagok közé.

Magyarországon több olyan rendelet van érvényben, amely a tüzelés során fellépő károsanyag kibocsátás maximális értékét határértékekkel rögzíti, de ezek csak a 140 kW névleges teljesítmény fölötti tüzelőberendezésekre érvényesek. Határértékek vonatkoznak pl. a CO , NO_x , SO_2 , vagy szilárd anyag tartalomra, viszont a nehézfém kibocsátásokra nincsenek egységes környezetvédelmi előírások. Az égetéskor keletkező hamura a deponálási határértékeket tartalmazó rendeletek vonatkoznak, amelyek meghatározzák annak kezelési feltételeit. Ezek az előírások nehézfémekre is kiterjednek, azonban betartásukat csak ellenőrzésekkel lehet követni, amely nem valósítható meg minden működő tüzelőberendezésre. Ez azt jelenti, hogy ha az égetés során keletkező égéstermékek szennyezőnek bizonyulnak a környezetre nézve, akkor a rendeletek hatálya alá nem eső, üzemeltetésében nem ellenőrizhető berendezések alkalmatlanok az ártalmatlanításra (égetésre). A szennyezett biomassa ártalmatlanítása összeköthető az energetikai hasznosítással, azonban a fent említett problémák miatt a tüzelőberendezés és tüzelési technika megválasztása kiemelt jelentőséggel bír, tüzelőanyagként történő kezelése kizárólag az ártalmatlanítási (égetési) folyamat nyomon követésével történhet.

A környezetbarát ártalmatlanítási (égetési) technológia meghatározásához ismernünk kell a nehézfémekkel szennyezett biomassa tüzelésekor keletkező anyagáramokat, és azok környezeti hatásait. Kutatási munkám során két különböző tüzelőberendezésben más-más tüzelési technikával, vizsgáltam, hogy milyen feltételek szükségesek a környezetbarát ártalmatlanítási folyamathoz. Az 1. ábrán a kutatási munka folyamatát mutatom be. A folyamatábra a nehézfémek útját mutatja a talajba történő bekerüléstől (fekete színnel) a kármentesítés folyamatán keresztül az ártalmatlanítás végtermékeiben való megjelenésig (szürke színnel). Egyrészt a fitoextrakciós folyamat (zöld színnel) eredményeként a

nehézfémek megjelennek a növényekben és az abból készült tüzelőanyag típusokban, másrészt bizonyos mennyiségben visszamaradnak a talajban. Ez az arány a kármentesítéstől és annak hatékonyságától függ.



1. ábra. A kutatómunka elvi sémája

A nehézfémeket tartalmazó, égethető biomassa ártalmatlanítási folyamatának (piros színnel) következtében a nehézfémek a tüzeléskor keletkező szilárd és gáz (gőz) halmazállapotú égéstermékekben, égési maradékokban jelennek meg (szürke színnel).

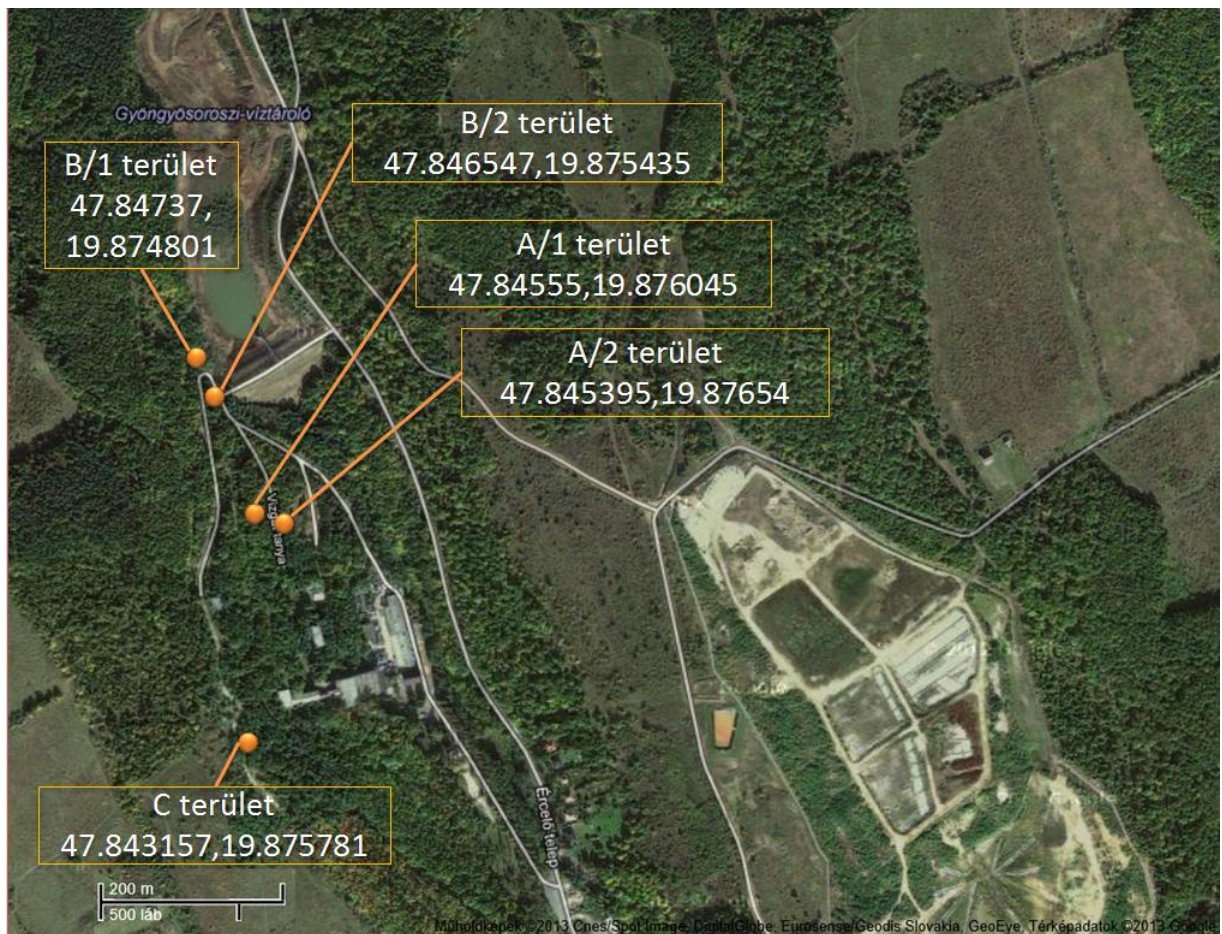
A folyamatábrán lila színnel jelöltem azokat a kutatás során felmerülő kérdéseket, amelyekre a szakirodalom megadta a választ, kékkel pedig azokat, amelyekre nem. Utóbbi kérdésekre építve határoztam meg a kutatási munka célkitűzéseit.

Célkitűzések

1. Szennyezett területről származó, nehézfémekkel szennyezett fás szárú növények
 - a. energetikai hasznosítási lehetőségének vizsgálata laboratóriumban végzett tüzeléstechnikai mérésekkel és számításokkal,
 - b. tüzeléstechnikai tulajdonságainak összehasonlítása nem szennyezett területről származó fák adataival,
 - c. növényi részeiben a nehézfémek eloszlásának kémiai elemzése,
 - d. égetéssel történő ártalmatlanítási lehetőségeinek kritikai elemzése.
2. A nehézfémekkel szennyezett biomassza égetési feltételeinek elsősorban környezetvédelmi szempontú vizsgálata a tüzelőanyag előkészítettségének és a tüzelési technika figyelembevételével. Égetési kísérletek elvégzése különböző tüzelési technológia alkalmazásával.
 - a. Háztartási tüzelőberendezésben végzett égetési kísérlettel a következő paraméterek vizsgálata:
 - i. az égéskor keletkező szilárd égési maradék (hamu) deponálási lehetőségeinek meghatározása,
 - ii. az égetés során keletkező füstgáz szilárd- és gáznemű légszennyezőinek kvalitatív és kvantitatív elemzése környezetvédelmi szempontból,
 - iii. a használt tüzelési technológia alkalmasságának megállapítása az ártalmatlanításra.
 - b. A mérési eredmények alapján annak megállapítása, hogy a szennyezett növények égetéssel történő ártalmatlanítása végezhető-e háztartási tüzelőberendezésben.
 - c. Félüzemi égetési kísérlet elvégzése 0,5 MW teljesítményű kazánban a következő paraméterek vizsgálatára:
 - i. a tüzelőberendezés porleválasztási technológiájának alkalmassági vizsgálata a pernye emisszió meghatározásával,
 - ii. anyagmérleg meghatározása a rendszerbe be- és onnan kilépő nehézfémekre és vegyületeikre, ehhez hamutartalom vizsgálat, és a szilárd égéstermékek (hamu, pernye) kémiai elemzése a rendszer több pontján,
 - iii. az alkalmazott tüztér hőmérséklet mellett a füstgázzal gáz-gőzhalmazállapotban távozó nehézfémek mennyiségének meghatározása laboratóriumi és félüzemi körülmények között.
 - d. A mérési eredmények alapján annak megállapítása, hogy a szennyezett növények égetéssel történő ártalmatlanítása végezhető-e a vizsgált ipari tüzelőberendezésben.

3. Nehézfémekkel szennyezett fás szárú biomasszából előkészített tüzelőanyagok legkedvezőbb előkészítettségének (hasáb, brikett, apríték) meghatározása az égetési kísérletek eredményei és tapasztalatai alapján.

A kutatásomhoz mintavételezett növények olyan területről származnak, amelynek talaja bizonyítottan nehézfémekkel szennyezett, így barnamezőnek minősül. A barnamezős terület Gyöngyösoroszi mellett található (2. ábra). A körzetben 1926-tól 1986-ig folytattak ipari ólom- és cinkérc bányászatot, melynek során szennyeződött a térség talaja.



2. ábra. A kijelölt mintaterületek

2. VIZSGÁLATI ÉS KÍSÉRLETI MÓDSZEREK

A nehézfémekkel szennyezett fás szárú növények tüzeléssel történő ártalmatlanítása energetikai hasznosítással, hőtermeléssel összekapcsolható, de annak vizsgálata, hogy ez milyen körülmények között nem okoz környezetszennyezést, elengedhetetlen a felhasználás előtt. Hőtermeléshez történő felhasználhatóság elemzésekor nem elegendő csak a legális fakitermelés útján tűzifaként vagy aprítéként a tüzelőanyag piacra kerülő biomassa mennyiséget figyelembe venni. Számolni kell azzal, hogy a faanyag nem ellenőrzötten kerül betakarításra, elsősorban lakossági felhasználás céljából. A két eset között azért kell különbséget tenni, mert a fás szárú biomassa égetését nagymértékben befolyásolja az alkalmazott tüzelőberendezés és a tüzelési technológia. A háztartásokban használatos hőtermelő rendszerek jellemzően egészen más paraméterekkel üzemelnek, és más előírások vonatkoznak rájuk, esetenként azok hatálya alá egyáltalán nem esnek. Ha a szennyezett növények szabályozatlanul kerülnek az ilyen kisteljesítményű tüzelőberendezésekbe, akkor égetésük (ártalmatlanításuk) törvényileg nem szabályozott, így nem ellenőrizhető. Ez abban az esetben engedhető meg, ha az égetés semmilyen környezetre gyakorolt káros hatással nem jár. Ennek megállapítására az első égetési kísérletet kisteljesítményű, háztartásokban gyakran használt tüzelőberendezéssel terveztem meg. A kísérlet elvégzésére kontrollálatlan körülmények között, füstgáztisztító technológia nélkül került sor.

A gyakorlatban hőtermelési célból üzemeltetett szilárd tüzelőanyagú tüzelőberendezések azonban nem csak a háztartásokban, hanem a kommunális és az ipari ágazatban is használatosak. Ezek a berendezések jellemzően nagyobb teljesítményű rendszerek, amelyekre számos környezetvédelmi törvény és rendelet vonatkozik. A szabályozásoknak köszönhetően ezek a rendszerek ellenőrizhetők, azonban a nagy nehézfém-tartalmú biomassa égetésekor várható környezetvédelmi problémákra és azok megoldására fel kell készíteni a rendszert és az üzemeltetőket. Arra vonatkozóan, hogy az ilyen rendszerek alkalmasságát vizsgáljam a szennyezett növények ártalmatlanítására, a második égetési kísérletet egy üzemi teljesítményű tüzelőberendezésben végeztem el. Kiemelt figyelmet fordítottam továbbá a mérési eredmények értékelésekor az ártalmatlanítás (égetés) során felmerülő környezetvédelmi problémák megoldására.

A fentiek alapján a vizsgálatokat az alábbi két tüzelőberendezés típusra végeztem el:

- a szennyezett növények elégetése háztartási tüzelőberendezésben hasáb és brikett formában (elsősorban lakossági felhasználás, füstgáztisztítás nélkül, hamudeponálás lehetősége szabadon),
- a fák aprítás utáni elégetése ipari kazánban (automatikus adagolórendszer és füstgáztisztító berendezés).

Az égetési kísérletek megkezdése előtt laboratóriumi mérésekkel ellenőriztem, hogy a vizsgált nehézfémekkel szennyezett fás szárú növények alapvető tüzeléstechnikai tulajdonságai mutatnak-e különbséget az átlagos összetételű fákra jellemző értékekhez képest. A mérést

mind az öt famintára külön-külön elvégeztem mind hasábfa, mind brikett tüzelőanyagra, és elemeztem, hogy a tüzeléstechnikai paraméterek függenek-e az alapanyag előkészítettségétől.

A fentiek szellemében az első égetési kísérlethez a kiválasztott 5 különböző fás szárú növényből 25-30 kg mennyiségű mintát vettem. Ennek a mennyiségnek a begyűjtéséhez – főleg a vékony törzsű akácfa és nyírfa esetében – több fát kellett kivágnunk egy-egy fajtából.

A barnamezőről származó fás szárú biomassa tüzelőanyagként való gazdaságos felhasználása feltételezi a tüzeléstechnikai paramétereinek ismeretét. A növényi biomassa tüzelőanyagként történő alkalmazásakor a gazdasági és környezetvédelmi szempontú megítéléshez a következő tulajdonságok ismeretére van szükség:

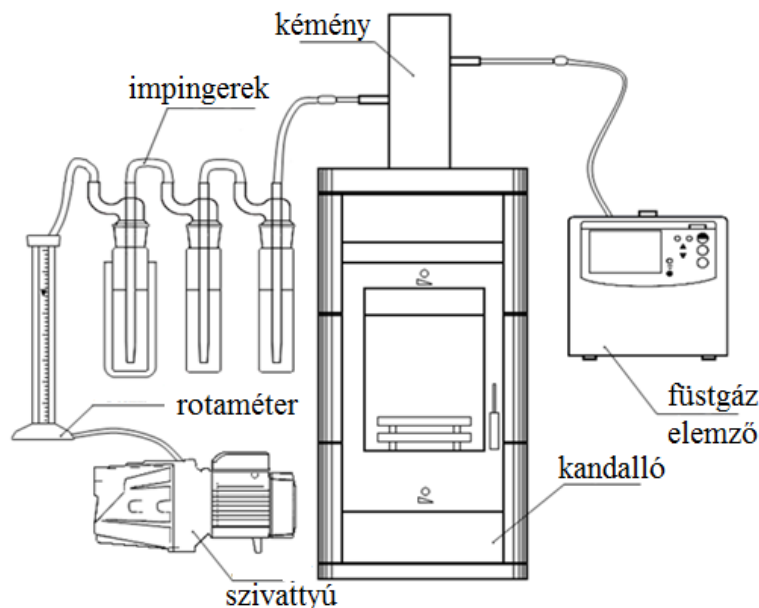
- Fűtőérték (gazdasági szempontból),
- Nitrogén és kén tartalom (környezetvédelmi szempontból),
- Hamutartalom (deponálandó mennyiség és összetétel – környezetvédelmi szempontból)
- A tüzelőanyagban a hőmérséklet növekedés hatására zajló folyamatok (tüzelési technológia szempontjából),
- A hamulágyulási tulajdonságok a szilárd égéstermékek hatása a tüzelőberendezésre (tüzeléstechnika szempontjából).

A fent felsorolt tulajdonságok meghatározásához a következő szabványos vizsgálatokat végeztem el:

- Fűtőérték számításához:
 - összes nedvesség meghatározása,
 - hidrogén tartalom meghatározása elemanalízissel,
 - égéshő meghatározása kaloriméterrel.
- A tüzelőanyag nitrogén és kén tartalmát elemanalízissel határoztam meg.
- Az égetés után visszamaradó hamu mennyiségének meghatározásához megmértem a minták hamutartalmát.
- A tüzelőanyagban a hőmérséklet növelésének hatására lezajló folyamatok meghatározására termoanalitikai vizsgálatot végeztem.

A szennyezett talajon növekvő fákra jellemző, hogy az egyes szennyező kémiai elemek más-más eloszlásban vannak jelen a növényi részekben. Ennek igazolására kémiai analízist végeztem a fa különböző részeiben felhalmozódott nehézfémek eloszlására vonatkozóan. A kémiai összetétel vizsgálatakor elsősorban a mintaterületen felhalmozódott és a már kis koncentrációban is veszélyes elemeket határoztuk meg. A komponensek meghatározása láng-atomabszorpciós spektrometriával történt.

A háztartási tüzelőberendezésben történő ártalmatlanítás lehetőségének vizsgálatokor a következő mérőkörrel (3. ábra) felszerelt rendszerrel dolgoztunk.



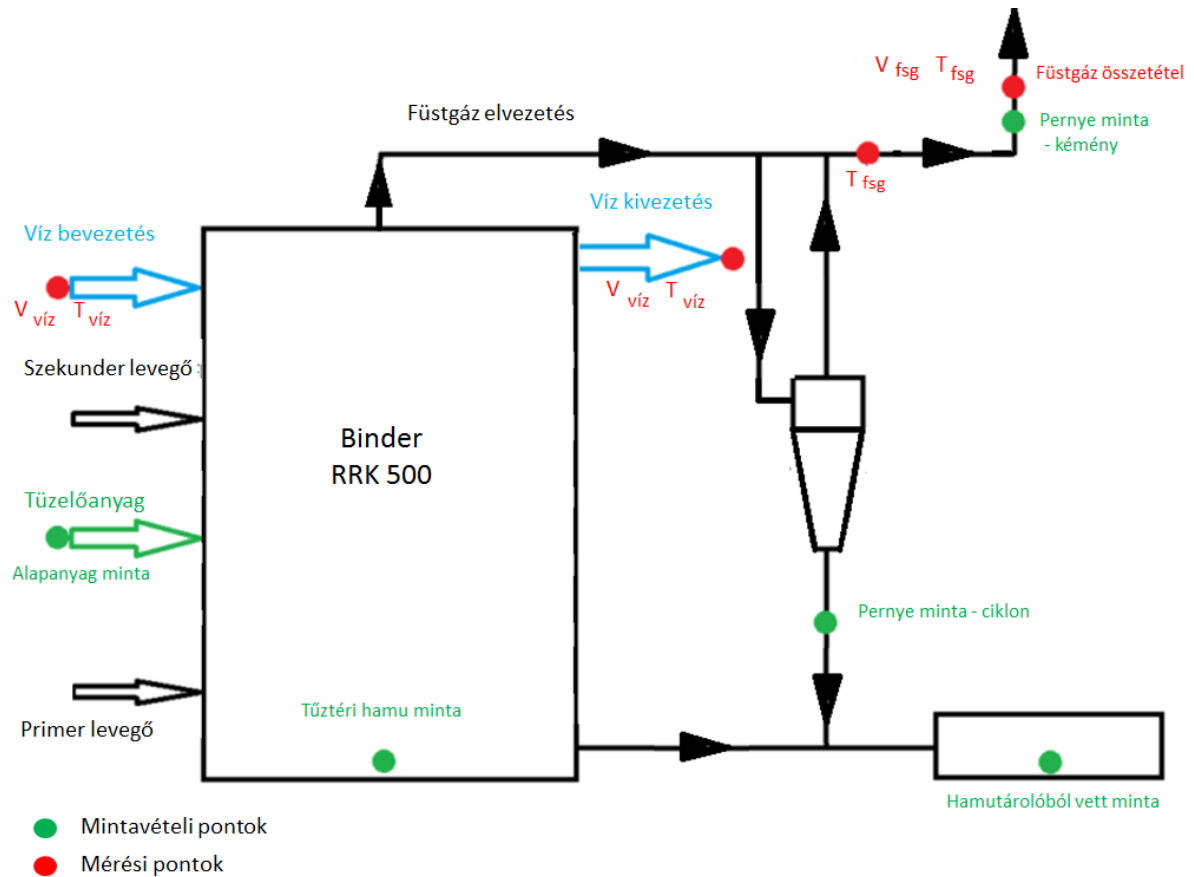
3. ábra. A háztartási tüzelőberendezésben történő ártalmatlanítás mérőköre

A szilárd légszennyezők meghatározására “nedves” elnyeletési módszert alkalmaztunk. A füstgáz csokon mért huzat 10-30 Pa között ingadozott. A valóságos égési folyamatot modellezve, úgy irányítottuk a tüzelést, hogy minden egyes mintavétel alatt legyen adagolási szakasz is, tehát a mért értékek “kedvező” tüzelési folyamatot és ún. “kормozó” szakaszt is tartalmazzanak. A füstgáz összetételét HORIBA PG-250 típusú gázelemzővel mértük.

A nehézfémekkel szennyezett biomassza elégetésekor nem csak a füstgázban található por mennyisége, hanem annak összetétele is fontos tényező. Az égetési kísérletek tüzelőanyag igényét figyelembe véve korlátozott mennyiségű minta állt rendelkezésre, amely nem tett lehetővé 20-25 percnél tovább tartó égetési kísérletet. A füstgázból vett szilárd légszennyező minta minden esetben csekély mennyiségű volt, ami a további kémiai elemzést nem tette lehetővé. Emiatt döntöttem a szkennig elektronmikroszkópos - mikroszondás vizsgálatok mellett.

A tüzelés során keletkező égési maradék elhelyezésének (deponálásának) lehetőségeit a hamu kioldódási tulajdonságai határozzák meg, ezért erre vonatkozó kémiai vizsgálatokat végeztünk láng-atomabszorpciós módszerrel, a kioldódási értékeket mg/kg egységben határoztuk meg. A vizsgálatot két oldószerezrel végeztük el, az egyik, a savas közeg a hamu teljes nehézfém-tartalmának-, a másik, a desztillált vizes közeg pedig az esővíz hatására történő kioldódásának jellemzésére ad lehetőséget.

A félüzemi kísérletet két famintával végeztük el, amelyeket a laboratóriumi mérések és az első égetési kísérlet eredményei alapján választottam ki. Annak igazolására, hogy a félüzemi kísérlethez kiválasztott kazán alkalmas-e a szennyezett növények környezeti kockázat nélküli ártalmatlanítására, meghatároztuk a tüzeléskor keletkező füstgáz gáznemű légszennyezőit és a szilárd égési maradék mennyiségét.



4. ábra. A kazán mérési- és mintavételi helyeinek azonosítása

A kísérleti kazán gyárilag beépített mérőpontokkal rendelkezik, de az égetési kísérlet időtartamára kiegészítő mérő- és mintavételi pontokat alakítottunk ki (4. ábra). A mérési pontokat és mért jellemzőket piros színnel-, a mintavételi helyeket és a mintavétel célját zöld színnel jelöltem.

Az ábra jelöléseinek megfelelően a következő méréseket és mintavételeket végeztük el:

- A kazán működésének ellenőrzése céljából:
 - az előremenő és visszatérő víz hőmérséklete és térfogatárama,
 - a primer és szekunder levegő térfogatárama (a levegő hőmérséklete megegyezik a környezeti hőmérséklettel),
 - tüztér hőmérséklete a tüzelőberendezésbe beépített hőelemmel,
 - kazán falának hőmérsékletei (5 ponton).

- A tüzelés ellenőrzésének céljából:
 - az elégetett tüzelőanyag mennyisége (az elégetett tüzelőanyag mennyiségét az odaszállított és visszamaradt minta mennyiségének különbségéből számítottam ki),
 - a füstgáz hőmérséklete (2 ponton) és térfogatárama (*a füstgáz hőmérsékletét hőelemmel, a térfogatáramot pedig Pradtl-csővel mértük*),
 - a füstgáz O_2 és CO_2 tartalma (*a füstgáz gáznemű összetételét HORIBA PG-250 típusú hordozható gázelemzővel mértük*).
- Az égetési kísérlet céljainak elérése érdekében:
 - a füstgázban található szilárd- és gáznemű (NO_x , CO) szennyezők mennyisége (a füstgáz gáznemű összetételét HORIBA PG-250 típusú hordozható gázelemzővel mértük),
 - Mintavételek:
 - a tüztéri hamu (*A kazán tüztéréből hamu mintát mindkét fafajtaival végzett kísérlet során 3-3 alkalommal vettem (5. ábra)*),
 - a hamutárolóban lévő szilárd égési maradék (hamu+ciklon által leválasztott por) (*A hamutárolóban visszamaradó égési maradékból az égetési kísérletek végén vettem mintákat*),
 - a ciklon alatt leválasztott szilárd anyag (*A ciklon által leválasztott szilárd anyagból a ciklon alatti elvezető csőben kialakított mintavételi helyen vettem mintát, mindkét kísérlet során 3 alkalommal*),
 - a kéményen kijutó szilárd anyag (*A kibocsátott szilárd anyag kvalitatív és kvantitatív meghatározását a kémény szabványos mérőtoldattal kiképzett mintavételi helyén végeztem el, annak mennyiségét S-20-as jelű ciklonszonda alkalmazásával, gravimetrikus módon határoztuk meg. A mérés során izokinetikus elszívást alkalmaztunk. A szilárd anyagból mintát tölgyfa esetén 5, a nyárfa esetén 6 alkalommal vettünk*).



5. ábra. A tüztér és a tüztéri hamu fényképe

A laboratóriumi mérések eredményeit az égetésre szánt alapanyag minősítésére használtam, így a minták tüzeléstechnikai- és termoanalitikai tulajdonságait összevettem a szakirodalmi adatokkal. Az eredmények alapján a különböző fajtájú és előkészítettségű (hasáb, brikett) fákat is összehasonlítottam.

Az égetési kísérleteknél a kitűzött céloknak megfelelően fő feladatomból az volt, hogy az eredményekből következtetéseket vonjak le a szennyezett biomassa tüzelhetőségi feltételeire vonatkozóan. A környezeti kockázat értékeléséhez a Magyarországon jelenleg is érvényben lévő rendeleteket és határértékeket megállapító szabványokat alkalmaztam.

A szilárd és gáznemű égéstermékek mennyiségére vonatkozó eredmények közvetlenül nem minden esetben hasonlíthatók össze a határértékekkel, ezért esetenként az eredeti tüzelőanyagra vissza kellett származtatni az adatokat.

A szilárd égési maradékok és a füstgáz szilárd anyag tartalmának kémiai összetétele több szempontból is jelentőséggel bír. A teljes kémiai összetétel eredményei közvetlenül összehasonlíthatók a talajvédelmi határértékekkel, így megállapítható a hamu talajra szabadon történő deponálhatósága. A szilárd égési maradék desztillált vizes kioldódási tulajdonságát azonban átszámítás után lehet összevetni a vonatkozó rendeletben meghatározott határértékekkel, ezzel meghatározva a hamu hulladéklerakóba való elhelyezésének feltételeit.

A vizsgált minták összehasonlításához az égetési kísérletnél a mérési eredmények közvetlenül nem minden esetben használhatók. Így a tüzelőanyagokból égetéskor keletkező hamu veszélyességének mértéke csak akkor összehasonlítható, ha a minták eltérő hamutartalmát is figyelembe vesszük.

6. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- T1. A növényi részekben, szakirodalmi tanulmányokban fellelhető nehézfém eloszlásokra vonatkozó állításokat igazolva, laboratóriumi mérésekkel számszerűsítve bizonyítottam, hogy a vizsgált mintaterületről származó fás szárú növények esetében a cink 78-81%-át, a réz, a kadmium, az ólom, a króm, a nikkel, a kobalt és a vas 60-68%-át a kisebb ágakban, rügyekben és kéregben halmozódik fel. *(folyóirat cikk: 3,5)*
- T2. Mérésekkel bebizonyítottam, hogy a 800 °C körüli tüztér hőmérsékleten történő tüzelés során a fában akkumulált cink 76-88%-a, réz 91-92%-a, kadmium 92-93%-a, ólom 95-100%-a, króm 94-99%-a, nikkel 95-96%-a, kobalt 89-99%-a és vas 71-83%-a távozik a tüztérből gáz-gőz halmazállapotban. A füstgázzal távozó nehézfémek vegyületei egyrészt a füstgáz elvezető rendszer felületeire és a pernyére kondenzálódnak, így kiemelt figyelmet kell fordítani a füstgáz porleválasztására. Másrészt egyes nehézfém vegyületek gáz-gőz fázisban távoznak a füstgázzal. A füstgáz hőmérsékletének 105-130 °C-ra hűtése levegővel lehetővé teszi, hogy a füstgázban lévő nehézfémek ne távozzanak gáz-gőz halmazállapotban, valamint a szövet szűrő alkalmazása megakadályozza a pernye távozását a környezetbe.
- T3. A mintaterületről származó, nehézfémekkel szennyezett fás szárú biomassza önállóan történő ártalmatlanítása (égetése) során keletkező nagy nehézfém-tartalmú hamu elsősorban a króm és a kadmium tekintetében veszélyes hulladéknak minősül, ezért deponálása csak veszélyes hulladéklerakóban történhet. *(folyóirat cikk: 4,6)*
- T4. Kísérleti méréseimmel bizonyítottam, hogy a háztartási tüzelőberendezésekben nem szabad ártalmatlanítani (fűtési célra felhasználni) a nehézfémekkel szennyezett fás szárú növényeket. Ennek oka, hogy a hamutárolóban visszamaradó szilárd égési maradék veszélyes hulladék, és a porleválasztás hiánya és a nagy füstgáz hőmérséklet miatt a füstgázzal jelentős mennyiségű szilárd és gáz-gőz fázisú nehézfém távozik a környezetbe, ami légszennyezést okoz. *(folyóirat cikk: 1,2)*

7. A TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK HASZNOSÍTÁSI LEHETŐSÉGEI

Kutatási eredményeimmel a kármentesítés során keletkező, megnövekedett nehézfém tartalommal rendelkező fás szárú növények égetéssel történő ártalmatlanítási feltételeit határoztam meg. Az eredmények közvetlenül is közvetetten is hasznosíthatók több tudományterületen.

A tézisekbe foglalt kutatási eredmények gyakorlati alkalmazásai

Számos olyan rekultiválásra váró terület található Magyarországon (elsősorban lezárt hulladéklerakók és elhagyott bányaterületek), amelynek környezetében a nagy nehézfém koncentráció bizonyítottan toxikus környezeti és élettani hatásokkal jár. Ezeken a területeken energianövény termesztésével elvégezhető a kármentesítés, majd meghatározott tüzelési technológiával a kitermelt biomassa ártalmatlanítható és energetikailag hasznosítható is egyben. A nehézfémekkel szennyezett növények égetéssel történő ártalmatlanítását közvetlenül energetikai célokkal összekötve alternatív lehetőség biztosítható akár kisebb települések energiaellátási problémáinak csökkentésére. Olyan kistépülések esetében például, amelyeknek önkormányzati tulajdonban nehézfémekkel szennyezett, így további hasznosításra alkalmatlan területek vannak, a kármentesítés során termelődött biomasszát, annak ártalmatlanítására alkalmas berendezésben elégetve részben vagy egészben fedezhető az önkormányzati épületek hőenergiaigénye.

A kutatási eredmények hasznosítása az oktatásban

Környezeti mérnökképzés tananyagába beépítve felhívható a hallgatók figyelme, hogy nehézfémekkel szennyezett területek növényekkel történő kármentesítése esetén gondoskodni kell a keletkező biomassa ártalmatlanításáról. Energetikai mérnökképzésben résztvevő hallgatók az eredmények bemutatásával felkészíthetők arra, hogy ha pályafutásuk során nehézfémekkel szennyezett biomassa tüzelőanyaggal találkoznak, akkor milyen környezetvédelmi problémával kell számolniuk, és ezek hogyan oldhatók meg.

A kutatási eredmények hasznosítása más kutatók számára

Disszertációm két egymástól elkülönülten kezelt tudományterületet, a kármentesítési technológiák tudományát és az energiatermeléssel kapcsolatos kutatásokat köti össze. Ezt a kapcsolódási pontot a kutatási területen dolgozó szakemberek munkájuk során hasznosíthatják.

További kutatási irányok

A kutatási eredményeim rámutattak arra a problémára, hogy a hazai környezetvédelmi szabályozások nincsenek felkészülve a nehézfémekkel szennyezett biomassa tüzelőanyagként történő hasznosítására. A tüzelőanyag összetételének szabályozásával ez jól kontrollálható.

A kutatási eredmények alapján elkészült nehézfém anyagmérlegben tapasztalt nagy input-output különbség további vizsgálata szükséges. Ennek első lépése a füstgázzal gáz fázisban távozó nehézfém vegyületek mennyiségének meghatározása laboratóriumi, majd üzemi körülmények között.

8. A DISSZERTÁCIÓ TÉMAKÖRÉBEN KÉSZÜLT PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

A. Nemzetközi és hazai folyóiratokban megjelent cikkek

1. Á. Wopera, H. Kovács, K. Szemmelveisz, P. Tóth: Air pollution at firing of different wood types, Materials Science and Engineering, Series II., Volume 35. (No. 2), 2010, pp. 61-73. ISSN 1789-7661
2. Kovács H., Kőrösi V., Szemmelveisz K.: A "Biofinom" projekt nehézfémekkel szennyezett területéről származó 5 fás-szárú növényfaj égési jellemzőinek és gáznemű légszennyezőinek összehasonlító vizsgálata, Környezetvédelmi Füzetek, Felelős szerkesztő: Schönviszky Gáldi Anna, 2010, pp. 67-82. ISSN 0866-6091
3. H. Kovács, O. Bánhidi, K. Szemmelveisz: The division of chemical elements in ligneous parts, Materials Science and Engineering, Series II., Volume 36. (No. 2), 2011, pp. 41-50., ISSN 1789-7661
4. Kovács Helga, Szemmelveisz Katalin, Palotás Árpád Bence: Nehézfémekkel szennyezett bányaterületről származó nyír, fenyő és akác eltüzelésekor keletkező hamu deponálásának lehetőségei, Energiagazdálkodás, 53. évfolyam 2012. 1. szám, pp. 3-7.. ISSN 0021-0757.
5. H. Kovács, K. Szemmelveisz: Bányászati területek nagy nehézfém-tartalmú talajának hatása a növényvilágra és a növények telepítésével elérhető kármentesítési lehetőség vizsgálata, hulladékOnline, 3. évfolyam, 2. szám, 2012, ISSN 2062-9133
6. H. Kovács, K. Szemmelveisz, A. B. Palotas: Solubility analysis and disposal options of combustion residues from plants grown on contaminated mining area, Environmental Science and Pollution Research, DOI 10.1007/s11356-013-1673-2, April 2013, ISSN 0944-1344 (print), ISSN 1614-7499 (online) (*IF: 2,651*)

B. Nemzetközi és hazai konferencia kiadványokban megjelent cikkek

1. Kőrösi V., Kovács H.: A „Biofinom” projekt varható eredményeinek vizsgálata a barnamezős területeken történő hasznosíthatóság tükrében, I. Biofinom Workshop konferencia kiadvány, 2008, ISBN 978-963-9732-86-5, p. 9-11.
2. H. Kovács, K. Szemmelveisz, B. Tolvaj: Energetic Utilization Analysis of Ligneous Plants Grown in a Contaminated Area, XXIV. microCAD International Scientific Conference, 2010, ISBN 978-963-661-925-1 Ö ISBN 978-963-661-906-0, p. 49-54.
3. Kovács H., Kőrösi V.: A „Biofinom” projekt keretein belül kiválasztott fásszárú biomasszák tüzeléstechnikai összehasonlító vizsgálata, II. Biofinom Workshop konferenciakiadvány, 2010, ISBN 978-963-88122-3-0, p. 23-27.
4. H. Kovács, P. Tóth, K. Szemmelveisz: Examination Of Ligneous Biomass Polluted With Heavy Metal, 18th European Biomass Conference, Lyon, 2010, ISBN 978-88-89407-56-5, p. 1122-1127.
5. Kovács H., Szemmelveisz K.: Nehézfémekkel szennyezett különböző típusú hasábfá minták elégetésekor keletkező égési maradék vizsgálata, Tüzeléstechnika 2010, 43. Ipari Szeminárium, Dunaújváros

6. Kőrösi V., Kovács H.: Nehézfémekkel szennyezett biomassza tüzeléstechnikai vizsgálata – Gázhalmazállapotú légszennyezők, III. Biofinom Workshop konferencia kiadvány, 2010, ISBN 978-963-9754-22-5, p. 47-49.
7. Kovács H., Wopera Á., Szemmelveisz K.: Barnamezőről származó fás-szárú növények tüzelésekor keletkező füstgázban található szállópor vizsgálata, III. Biofinom Workshop konferenciakiadvány, 2010, ISBN 978-963-9754-22-5, p. 37-45.
8. H. Kovács, K. Szemmelveisz: Solution properties of the ash of log samples contaminated with heavy-metals, XXV. microCAD Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, 2011, ISBN 978-963-661-956-5, p. 1-6.
9. H. Kovács, Á. Wopera, K. Szemmelveisz: Air pollutants formed during the combustion of Sorghum pellet coming from industrial brownfield lands, XXV. microCAD Nemzetközi Tudományos Konferencia, Miskolc, 2011, ISBN 978-963-661-956-5, p. 7-11.
10. Kovács H., Woperáné S. Á., Szemmelveisz T. né: Analysis of Heavy Metal Containing Biomass Combustion from the Aspect of Energy Utilization, 10th International Conference on Heat Engines and Environmental Protection, Balatonfüred, ISBN 978-963-313-029-2, p. 171-176.

C. Monografikus jellegű kiadványban megjelenő cikkek:

1. Kovács H., Szemmelveisz K.: Nehézfémekkel szennyezett fák hamujának szintereződési- és lágyulási tulajdonságai, Tudáshálózat és Klaszterépítés NORRIA kötet, 2011, pp. 184-190. ISBN 978-963-88345

D. A disszertáció témájához kapcsolódó kutatási jelentések

1. Fás-szárú növények tüzelhetőségének és szilárd égéstermékének (hamu) vizsgálata, kutatási zárójelentés, ME- Tüzeléstani Tanszék, 2009., p. 60.
2. Fás-szárú növények tüzelhetőségének és égési maradékának komplex tüzeléstechnikai és környezetvédelmi vizsgálata kutatási zárójelentés, ME- Tüzeléstani Tanszék, 2010., p. 110.

6. SUMMARY

Today's energy industry has to face the challenge of increasing energy demand accelerated by rapid population growth. Closely related to subsequent production and supply problems, the substantial emission of various pollutants into the environment are a matter of concern, entailing tighter control mechanisms and the development of green technologies. The ablation of negative environmental impacts and the diminution of damage caused by released contaminants are questions of prime importance.

As for Hungary, several heavily contaminated sites have been left behind by old, obsolete industrial plants – even decades after the change of the industrial structure. The re-utilization of these "brownfield areas" is only possible if hazardous materials are removed and the sites are remediated. Toxic emissions deriving from industry-related activities typically involve soil and water pollution with heavy metal components. Today, several processes and technologies are known for the effective removal of toxic materials from soil, groundwater, surface and subsurface water resources. Among others, phytoextraction is a special recultivation technique, which takes advantage of the nutrient uptake capacity of plants (the ability of plants to accumulate and retain trace elements, like metals from the soil). However, once phytoextracted biomass contains considerable amounts of heavy metals, it should be treated with special caution and be disposed as hazardous waste. Allowing the utilization of the organic matter for energy purposes, combustion (incineration) is an effective way to recover and dispose contaminated wooden biomass, yet it requires strict procedural and safety measures for the prevention of environmental pollution. Besides "usual" safety risks, heavy metal compounds released from the combustion zone as vapour-gas or solid phase should be considered an additional risk factor when contaminated organic waste is burnt. Different fractions of heavy metal components are likely to be discharged during the various phases of the combustion process. Certain elements remain absorbed in the bottom ashes, others leave the combustion zone dissolved as vapour-gas phase in the flue gas. As the vapour-gas flow enters the exhaust system of the combustion utility, dropping temperature gets the heavy metal compounds condense on the fly ash or on the walls and inner surfaces of the flue gas stack.

In Hungary, the emission of gaseous and particulate pollutants are maximized by limit values set by governmental regulations pertaining to industrial combustion systems above 140 kW nominal capacity. At present, no unified environmental standard applies for heavy metal emissions. The treatment of burning ashes is within the scope of "deposition limit values" and other regulations concerning hazardous waste deposition. If combustion residuals are qualified as hazardous, any utilities exempt from the regulations actually in force are considered improper for degradation purposes (burning). In order to specify the most environmental-friendly degradation (burning) technologies, it is necessary to get exact knowledge of the material flow processes involved in the combustion of contaminated biomass and the environmental impacts of this process. In my dissertation, I examined different combustion utilities and burning technologies to identify the most optimal conditions for an environmentally-friendly and effective disposal of contaminated wooden biomass.

Aims

- 1.** Performing complex measurement tests and data analysis for the evaluation of woody plants from the sample plot contaminated with heavy metals:
 - a)** conducting combustion measurements and calculations to determine possible ways of biomass utilization for energy purposes
 - b)** comparing the experimental results (i.e. the burning properties of the wood) with data of woody plants from non-contaminated sites
 - c)** performing chemical analyses for the distribution of heavy metals in the distinctive wooden parts
 - d)** preparing a critical analysis of disposal alternatives via burning.

- 2.** Identifying the optimal burning conditions for contaminated biomass, including fuel preparation and combustion technologies, with special respect to environmental requirements. Performing laboratory experiments using different combustion equipment.
 - a)** Performing combustion experiments using a domestic heating device to study the following parameters:
 - i.** indicators of the disposal potentials of solid combustion residue (ash)
 - ii.** qualitative and quantitative analysis of gaseous and particulate pollutants in the flue gas, with special respect to environmental requirements
 - iii.** study on the applicability of the respective combustion technology for disposal purposes
 - b)** The analysis of measurement data to show whether contaminated wooden biomass can be safely disposed by burning in domestic heating devices.
 - c)** Performing a pilot combustion experiment by using a furnace of 0.5 MW capacity to study the following parameters:
 - i.** the monitoring and control of the pilot combustion process
 - ii.** applicability test for the dust removal technology of the pilot combustion furnace by analysing fly ash emission rates
 - iii.** material flow calculations regarding various heavy metal components and compounds entering and leaving the system, including: the study of ash content, and chemical analyses of solid combustion residuals (ash, fly ash) produced from the distinctive phases of the combustion process
 - iv.** with respect to the applied temperature, the determination of the various heavy metal fractions leaving the combustion zone as vapour-gas phase with the flue gas, under laboratory and pilot conditions.
 - d)** The analysis of measurement data to show whether contaminated wooden biomass can be safely disposed by combustion in the respective combustion utility (i.e. the pilot furnace).

- 3.** Based on the measurement results, determining the most optimal way of fuel preparation for contaminated wooden biomass, for purposes of safe disposal by combustion.

9. NEW SCIENTIFIC ACHIEVEMENTS

- T1.** Based on qualitative results reported in the available literature on the distribution of heavy metal contaminants in distinctive plant parts, I proved by quantifiable laboratory measurement data that approximately 78 to 81% of Zn and 60 to 68 % of Cu, Cd, Pb, Cr, Ni, Co and Fe are accumulated in the barks, sprouts and smaller twigs of the sampled woody plants (from phytoremediated sites). (*Article No.3 and 5*)
- T2.** I proved by laboratory measurements that by burning the wood at about 800 °C in the combustion chamber, 76-88% of the Zn, 91-92% of the Cu, 92-93% of the Cd, 95-100% of the Pb, 94-99% of the Cr, 95-96% of the Ni, 89-99% of the Co and 71-83% of the Fe accumulated in the wood is emitted as vapour-gas phase from the combustion zone. The chemical compounds of the heavy metals present in the flue gas partly condense on the surface zones of the exhaust system (i.e. the flue gas stack) and on the solid particles of fly ash. Thus, special attention should be paid to capturing the dust from the released gas. The application of a tissue filter helps retaining the fly ash within the system. Another fraction of heavy metal compounds are released as vapour-gas phase. The cooling of the flue gas to about 105-130 °C is necessary to prevent these toxic heavy metal compounds from being dispersed in the atmosphere as vapour-gas phase.
- T3.** With respect to Cr, Cd and other heavy metal components present in the bottom ashes left from the separate treatment (*burning*) of the contaminated wooden biomass, the leftovers should be treated as hazardous waste, and be disposed in hazardous waste landfills. (*Articles No.4 and 6*)
- T4.** I proved by experimental results that woody plants containing heavy metal compounds should/must not be disposed via combustion (or utilized for heating purposes) in domestic heating devices for two reasons: a) the solid residual waste left in the bottom ash holder is considered hazardous material, and b) due to the lack of dust removal from the flue gas produced, substantial amounts of heavy metals are emitted as solid and vapour-gas phase into the atmosphere, causing subsequent air pollution. (*Articles No.1 and 2*)