

SZAKMAI BESZÁMOLÓ

Téma: Fizikai és kémiai előkezelések hatása lignocellulózok összetételére és termikus tulajdonságaira

Témavezető: Pekkerné Jakab Emma

OTKA nyilvántartási szám: K 081959

Összes megítélt támogatás: 7000 ezer Ft

1. A KUTATÁS CÉLKITŰZÉSEI

A kutatás célja különböző előkezelések hatásának tanulmányozása volt fás és lágyszárú lignocellulóz alapú biomassza anyagok összetételére és a termikus tulajdonságaira. A BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszékével együttműködésben a lignocellulóz alapú bioetanol előállításához használt minták termikus tulajdonságait és a hőbomlás termékeloszlását vizsgáltuk azzal a céllal, hogy kimutassuk a lignocellulózok összetételében az előkezelések hatására bekövetkezett változásokat termikus módszerek segítségével. Kétféle előkezelésen átesett minták összetételét és termikus tulajdonságait tanulmányoztuk. Az egyik mintasorozatban lúggal különböző körülmények között kezelt kendermintákat vizsgáltunk. A másik alkalmazott előkezelés a gőzrobbantás volt, amelynek hatását egyaránt tanulmányoztuk fák és lágyszárú minták összetételére.

A Lett Állami Fakémia Intézet munkatársaival együtt végzett alapkutatásunk célja annak kiderítése volt, hogyan lehet a fából képződő aktív szén mennyiségét és minőségét javítani kombinált savas és lúgos kémiai aktiválás és termikus előkezelések alkalmazásával. Összefüggést kerestünk a minták illótartalma, szervesetlen összetétele és a faszén fizikai paraméterei között, ezáltal megkerestük az aktív szén előállítás optimális előállítási paramétereit.

Fahulladékok pirolitikus hasznosítása során a lignocellulózok hőbomlását befolyásolhatják a jelenlevő adalékanyagok. Többféle mezőgazdasági alapanyag és hulladék pirolitikus hasznosításához végeztünk kísérleteket, amelyek során a különböző szervesetlen és szerves anyagok hatását valamint a kísérleti körülmények szerepét igyekeztünk tisztázni.

A projekt keretében összetett makromolekuláris rendszerek hőbomlását vizsgáltuk termogravimetria-tömegspektrometria és pirolízis-gázkromatográfia-tömegspektrometria segítségével, valamint az anyagok jellemzéséhez szükséges klasszikus analitikai módszerekkel. A hamutartalom összetételét induktív csatolású plazma optikai emissziós spektrometria (ICP-OES) segítségével határoztuk meg.

2. A KUTATÁS SORÁN ELÉRT EREDMÉNYEK

2.1. Lúgos előkezelések hatása a kender összetételére és termikus viselkedésére

A lúgos előkezelést a cellulóz rostok hozzáférhetőségének javítására alkalmazzák különböző ipari eljárásokban (pl. bioetanol gyártásban, textiliparban, szálerősítésű műanyag kompozitok gyártásakor). A BME Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszékével együttműködésben végzett munkánk célja annak kiderítése volt, hogy a bioetanol előállítási

folyamat előkezelési lépéseként alkalmazott híg (1 és 2% m/m) nátrium-hidroxid és kálium-hidroxid oldatokkal végzett roncsolás milyen hatást gyakorol a kender minták összetételére és hőstabilitására.

Megállapítottuk, hogy az autoklávban végzett 1 és 2 óra hosszát tartó 120 és 140°C-os híg lúgos mosás egyaránt befolyásolta a kenderminták összetételét és hőbomlási mechanizmusát. A lúgos mosás hatására a hemicellulóz frakció oldalláncai (főleg az acetyl-csoportok) hidrolizálódtak, így a hemicellulóz bomlása magasabb hőmérsékletre tolódott a megnövekedett hőstabilitás miatt. A hemicellulóz molekulák módosulásán kívül egy részük kioldódása is valószínűsíthető volt a pirolízis termékek csökkenése alapján. A lúgos kezelésnek köszönhetően a lignin labilis oldalcsoportjai is módosultak, ami a pirolízis során keletkező lignin monomerek eloszlásának jelentős módosulását okozta. A konferil-aldehid, a koniferil-alkohol, a szinapil-aldehid és a szinapil-alkohol azok a monomerek, amelyek a leginkább jellemzik egy növényi biomassza ligninjének az eredeti szerkezetét, mivel tartalmazzák mindhárom alifás szénatomot a benzolgyűrűn. Ezeknek a monomereknek a nagymértékű csökkenése arra utalt, hogy a labilisnak tartott γ -CH₂-OH-csoport leszakadt, vagy módosult a lúgos kezelés hatására.

A különböző kísérleti körülmények között elvégzett előkezelés következtében eltérő mértékben változott a minták alkáliion-tartalma, ami a hőbomlási folyamatra különböző hatásokat gyakorolt. Az eredeti kender mintából és a lúggal kezelt minták egy részéből 60°C-on 2 óra hosszát tartó vizes mosással eltávolítottuk az alkáliionok nagyrészét, ezáltal el tudtuk különíteni a lúgos mosás okozta összetételbeli változásokat az alkáliionok okozta termikus mechanizmusban bekövetkező változásoktól. Az alkáliion-tartalom növekedésének eredményeként a cellulóz frakció alacsonyabb hőmérsékleti tartományban szenvedett termikus degradációt. A megnövekedett Na⁺ és K⁺ mennyisége eltolta a bomlási mechanizmust a faszén képződéssel járó fragmentáció felé. Ez nagyobb részben a bomlási mechanizmus megváltozásának köszönhető, kisebb részben pedig annak, hogy az előkezelés során a mintákban felhalmozódott alkáliionok a mérés végén a szenes maradékban maradtak vissza. Ezzel együtt a kisebb molekulatömegű bomlástermékek (pl. víz, metán, CO₂) hozama megnőtt, a nagyobb molekulákat tartalmazó pirolízis olaj és a formaldehid mennyisége lecsökkent. A cellulóz depolimerizációs bomlása háttérbe szorult.

Az eredeti, a mosott, és a lúggal kezelt minták alkáliion-tartalma széles koncentrációtartományban változott, amit ICP-OES módszerrel meghatároztunk. Ezáltal lehetővé vált a termikus paraméterek meghatározása az alkáliion-tartalom függvényében 17 kendermintán. Meghatároztuk a termogravimetriás paraméterek és a tömegspektrometriás intenzitásértékek változását a K⁺ és a Na⁺ tartalom függvényében. Megállapítottuk, hogy a kis molekulatömegű illó termékek (pl. a víz és a metán) valamint a faszén mennyisége a 0-0,2 mmol/g alkáliion-koncentráció tartományban növekedtek a legnagyobb mértékben, majd a tovább növekvő alkáliion-koncentráció már kevésbé befolyásolta a bomlás mechanizmusát. Ugyanebben az alkáliion-koncentráció tartományban a bomlási hőmérsékletek is jelentősen változtak, ami elsősorban az alkáliionoknak a cellulóz hőbomlására gyakorolt katalitikus hatásával magyarázható. Főkomponens-elemzéssel bemutattuk, hogy a termogravimetriás és a tömegspektrometriás paraméterek egyértelműen jellemzőek a kezeletlen, a mosott, a lúgos mosással előkezelt és az előkezelés után mosott kenderminták csoportjaira. A főkomponens elemzés is megerősítette, hogy a termoanalitikai paraméterek változása leginkább az alkáliion-tartalom változásának köszönhető. A lúggal kezelt mintákat ezenkívül a hemicellulóz molekulák módosulása (acetyl-csoportok hidrolízise) és egy részük kioldódása különbözteti meg a kezeletlen mintáktól.

A témából elért eredményekből egy publikáció jelent meg referált folyóiratban [1], ezenkívül az eredmények egy PhD dolgozatban [10] és egy könyvfejezetben [2] kerültek bemutatásra.

2.2. Gőzrobbantás hatása a lignocellulózok összetételére

A gőzrobbantást egyre gyakrabban alkalmazzák a lignocellulóz alapú biomassza minták komplex szerkezetének a fellazítására a bioetanol előállítási folyamatban. A bioetanol előállítás során az enzimes hidrolízis hatékonyságát adalékokkal lehet növelni. A BME Biotechnológia Tanszékén tanulmányozták a polietilén-glikol hatását különböző gőzrobbantott lignocellulóz mintán és eltérő hatást mutattak ki a különféle szubsztrátokon. A legnagyobb pozitív hatást a lucfenyő esetében tapasztalták, míg a lágyszárú növények esetében kisebb hatása volt a PEG adagolásának. Ebben a munkában a mi csoportunk a gőzrobbantott minták ligninjének összetételét hasonlította össze termikus módszerek segítségével. Összefüggést mutattunk ki a lignin funkciós csoportjainak mennyisége és a polietilén-glikol enzimes hidrolízisre gyakorolt hatékonysága között a gőzrobbantott biomassza minták esetében. Megállapítottuk, hogy a fenolos csoportok okozhatják a PEG hatásának csökkenését, mivel megkötik az enzimet.

Termikus módszerek segítségével összehasonlítottuk a kezeletlen, a gőzrobbantott és a forró vízzel mosott lignocellulóz minták hőbomlástermékeit azzal a céllal, hogy kimutassuk a gőzrobbantás hatását a lignocellulózok összetételére. Megállapítottuk, hogy a gőzrobbantás eredményeként a vizsgált fák és a lágyszárú minták hemicellulóz-tartalma nagymértékben lecsökkent, ennek hatására a cellulóz és a lignin frakció relatív mennyisége megnőtt. A faminták esetében az előkezelés jelentősebb változásokat okozott, mert a gőzrobbantás paraméterei érelyesebbek voltak. A gőzrobbantott faminták termogravimetria/tömegspektrometria mérései alapján megállapítottuk, hogy a cellulóz bomlása 80°C-kal alacsonyabb hőmérsékletre tolódott, amit azzal magyaráztunk, hogy a növényi rostok roncsolódása miatt csökkent a cellulóz termikus stabilitása. A cellulóz módosulását a gőzrobbantott minták pirolízis/gázkromatográfia-tömegspektrometria módszerrel mért pirogramján megjelenő új bomlástermék, az 1,6-anhydro- β -D-glükofuranóz jelenléte is jelezte.

A gőzrobbantás eredményeként a minták ligninjének a szerkezete is módosult, amelyet részletesen tanulmányoztunk pirolízis-gázkromatográfia/tömegspektrometria segítségével. Megállapítottuk, hogy az aromás gyűrűhöz kapcsolódó alkil- és alkenil-csoportok lerövidültek, a gvajakol és a sziringol monomerek metoxi-csoportjai demetileződtek. Az előkezelés oxidációs hatását mutatja, hogy több α -oxi-lignin monomer keletkezik a gőzrobbantott mintákból. A bomlástermékek intenzitás adatainak a főkomponens-elemzésével szemléltettük a gőzrobbantás hatását a biomassza minták hőbomlása során keletkező lignin monomerek funkciós csoportjainak az összetételére.

Induktív csatolású plazma - optikai emissziós spektrometria segítségével meghatároztuk a natív és a gőzrobbantott minták hamutartalmának összetételét. Megállapítottuk, hogy a nagy nyomáson, magas hőmérsékleten és vizes közegben lejátszódott gőzrobbantás hatására a minták alkáliion-koncentrációja lecsökkent. Az alkáliionok jelenléte jelentősen befolyásolja a hőbomlási folyamatok mechanizmusát. Ezért vízzel mosott mintákat is készítettünk 60°C-os két óra hosszat tartó vizes mosással, amely kezeléssel az alkáliion-tartalmat lényegesen lehetett csökkenteni. Ezen minták segítségével kiderítettük, hogy a kezeletlen és a gőzrobbantott minták pirolizises termékeloszlásában megfigyelhető különbségeket mennyiben okozza a gőzrobbantott minták megváltozott összetétele és mennyiben befolyásolja a

különböző alkáliion-tartalom. Kimutattuk, hogy a lecsökkent alkáliion-koncentráció eredményeként a biomassa minták bomlási mechanizmusa megváltozott. Az eredeti biomassa mintákban kedvezményezett faszénképződéssel járó fragmentációs mechanizmust háttérbe szorították a depolimerizációs bomlási folyamatok a gőzrobbantott és a vízzel mosott minták esetében.

A témából elért eredményekből két posztert mutattunk be [11,12] és két publikáció jelent meg referált folyóiratban [3,4], valamint részét képezi egy Ph.D. dolgozatnak [10].

2.3. Nanopórusos szenek előállítása kémiai előkezeléssel és hőkezeléssel

Egy égerfa minta és a belőle előállított faszének termokatalitikus lebomlását és aktív szenek előállítását tanulmányoztuk különböző előkezelések alkalmazásával lett együttműködés keretében. Termogravimetria-tömegspektrometria (TG/MS) segítségével meghatároztuk a legfontosabb illó termékek mennyiségét és a képződési hőmérséklet-tartományát savval (H_3PO_4) és lúggal (NaOH) kezelt fa- és faszénmintákból. Megállapítottuk, hogy a foszforsav növeli a karbonizációs folyamat hatékonyságát, míg a lúgos kezelés a faszén aktiválási folyamatára van kedvező hatással. A foszforsavas kezeléssel készült faszén termikus bomlása során nem szabadulnak fel nagy molekulatömegű bomlástermékek, csak nagy mennyiségű víz és gázok (metán, szén-monoxid, szén-dioxid és hidrogén), ami a foszfortartalmú faszén intra- és intermolekuláris dehidratációjára valamint egyéb funkciós csoportok lehasadására utal, és egy hőstabil faszén szerkezet kialakulását eredményezi a kondenzációs reakciók következtében. Ezenkívül a foszforsav jelenléte csökkenti a faszén oxidációját az aktiválás során. A lúgos aktiválás esetében a prekursor kémiai összetételének és szerkezetének jelentős hatása van az aktiválási folyamatra. A TG/MS eredmények azt mutatták, hogy a foszforsavval impregnált fából előállított faszén nátrium-hidroxid jelenlétében történő aktiválása során nagy mennyiségű szén-monoxid szabadul fel a 700-850°C-os hőmérséklet-tartományban, tehát ez a folyamat felelős a pórusos szerkezet kialakításáért. A szén-monoxid képződés az aktiválási folyamat indikátorának bizonyult. A TG/MS eredmények és a pórusszerkezet alapján meghatároztuk az aktív szén termokatalitikus szintézisének optimális körülményeit, és sikerült előállítani kiváló pórusszerkezetű nanopórusos aktív szenet foszforsavas előkezeléssel és lúgos aktiválással.

A témából elért eredményekből egy publikáció jelent meg referált folyóiratban [5].

2.4. Lignocellulózok hőbomlása halogéntartalmú anyagok jelenlétében

Nagyobb hamutartalommal, és így magasabb kloridtartalommal rendelkező lágyszárú növények hőbomlása során megfigyeltük, hogy a szerves klorid atomok reagálnak a szerves anyagokból származó metil-csoportokkal [6]. Fahulladékok pirolitikus hasznosítása során a lignocellulózok hőbomlását befolyásolhatják a jelenlevő szintetikus polimerek és a bennük levő adalékok. Ennek a projektnek a keretében halogéntartalmú szerves anyagok hatását tanulmányoztuk a lignocellulózok hőbomlására.

Fa és a fát alkotó két polimer (cellulóz, lignin) hőbomlását tanulmányoztuk brómozott égésgátló jelenlétében. Megállapítottuk, hogy a cellulóz hőbomlása az égésgátlóéval azonos hőmérsékletre csökkent. A keverék mintákból a legfontosabb cellulóz eredetű bomlástermékek (levoglukozán, hidrox-acetaldehid) mennyisége csökkent, és ugyanakkor a dehidratált bomlástermék mennyisége jelentősen (levoglukozenon) megnőtt. A lignin metil-csoportjai a brómgyökökkel reagálva a metil-bromid képződését segítették elő.

Hasonló változásokat mutattunk ki egy lombosfa és egy tűlevelű fa pirolízisekor poli-vinil-klorid (PVC) jelenlétében. Ebben az esetben is tanulmányoztuk a fákat alkotó legfontosabb makromolekulák hőbomlását PVC jelenlétében, hogy tisztázzuk az egyes komponensek hatását a keverékek hőbomlása során. Megállapítottuk, hogy a metil-klorid keletkezése a lignin metoxil-csoportjaiból lehasadó metil-csoportok és a PVC-ből származó klorid-gyökök közti reakcióhoz rendelhető. A cellulóz bomlástermékeinek intenzitása alapján arra következtettünk, hogy a dehidratációs reakciókat elősegítik a halogéntartalmú adalékok.

A témából egy előadás hangzott el [13] és egy posztert mutattunk be [14] nemzetközi konferencián, és egy publikáció jelent meg referált folyóiratban [7], egy publikációt pedig beküldtünk [8].

2.5. Faminták termikus előkezelése

Különböző szemcseméretű akácfa mintákon termikus előkezeléseket végeztünk három hőmérsékleten (225, 250 és 300°C-on) egy óra hosszát termomérlegben inert gáz atmoszférában azzal a céllal, hogy a biológiai degradációnak jobban ellenálló és nagyobb energiasűrűséggel rendelkező mintákat állítsunk elő. A hőkezelés alatt a tömegspektrométerrel detektáltuk a felszabaduló illó anyagokat. A minták összetételében bekövetkezett változásokat szintén termogravimetria-tömegspektrometria segítségével követtük. Megállapítottuk, hogy a hőkezelés hatására a mintákból keletkező faszén mennyisége megnő. A 250°C-on kezelt mintából a hőbomlás alatt már nem találtunk hemicellulózból származó terméket. A 300°C-os kezelés hatására a cellulóz egy része is elbomlott, ezért ez már túl magas hőmérsékletnek bizonyult. A lignin relatív mennyisége megnövekedett a hőkezelések hatására, emiatt a belőle származó bomlástermékek mennyisége is megnőtt. A lignin funkciós csoportjaiban bekövetkezett változásokat pirolízis-GC-MS-sel detektáltuk.

Az eredményekből egy posztert mutattunk be nemzetközi konferencián [15], és a publikáció készítése pedig folyamatban van.

2.6. Biomassza anyagok termikus vizsgálata

Termogravimetria-tömegspektrometria segítségével vizsgáltunk famintákat, lágyszárú növényeket, víztelenített szennyvíziszapot, valamint ezek keverékét inert és oxidatív atmoszférában. A termoanalitikai és klasszikus analitikai paraméterek főkomponens analízise (PCA) segítségével megállapítottuk, hogy a minták égéshője és a termogravimetriai paramétereik között összefüggés figyelhető meg. A PCA elemzést követően a minták jellegzetes csoportosulásokat mutattak, vagyis a TG és a DTG paraméterek egyértelműen jellemzőek voltak egy-egy csoportra. A szennyvíziszap a növényi mintáktól elsősorban a szenes maradék és a hamu mennyiségében, a bomlás sebességében és a termikus degradáció befejeződésének hőmérsékletében különbözött. A különbség fő okozója a magas szervesanyag-tartalom, ami miatt a szennyvíziszap égéshője és fűtőértéke jóval kisebb, mint a növényi biomasszáké. A lágyszárú növényeket a fáktól elsősorban a cellulózbomlásra jellemző TG paraméterek különböztetik meg. Ezt a jelenséget a magas káliumion-tartalom okozza.

Négy energetikai célra használható lágyszárú biomassza minta (búzaszalma, kukoricaszár, culorcirokszár és rizshéj) termikus viselkedését tanulmányoztuk különböző fűtési

programokkal. A hőbomlás leírására eloszlásos aktiválási energiát feltételező kinetikai modellt alkalmaztunk.

A témából egy posztert mutattunk be [16], és két publikáció jelent meg referált folyóiratban [6,8].

2.7. Kémiai és termikus kezeléssel öregített bőr és pergamen minták összehasonlítása

A munka célja az archívumokban és a könyvtárakban található bőr és pergamen öregedési folyamatainak szimulálása mesterségesen öregített minták alkalmazásával. Összehasonlítottuk a régi, az új és a mesterségesen öregített minták termikus viselkedését és összetételét termikus módszerek segítségével. Megállapítottuk, hogy a lúgosan öregített minták jól modellezik a 300 éves bőr és pergamen mintákat, így elkerülhető az értékes eredeti minták vizsgálata. Ugyanakkor a szerves savakkal történt öregítés nem tűnt hatékonynak.

Az eredményekből egy posztert mutattunk be nemzetközi konferencián [17], és a publikáció készítése folyamatban van.

2.8. Biodízel olaj előállítás melléktermékeinek termikus hasznosítása

Az indiai együttműködés keretében végzett kutatás célja a biodízel olaj kivonása után visszamaradt biomassza anyagból katalitikus pirolízissel bioolaj előállítása. Mezopórusos katalizátorok alkalmazását vizsgáltuk olajmentesített alga és jatropha mintákon. Az alifás pirolízistermékek képződését sikerült elősegíteni katalizátorok alkalmazásával mindkét alapanyagból, míg a kevésbé stabil levoglükozán mennyisége mindegyik katalizátor hatására csökkent.

Az eredményekből egy posztert mutattunk be nemzetközi konferencián [18], és a publikáció készítése folyamatban van.

A jelen OTKA pályázat támogatásával eddig megjelent 7 referált cikkre 2014. júliusig 41 hivatkozás történt a nemzetközi szakirodalomban.

3. AZ OTKA TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT PUBLIKÁCIÓK

3.1. Referált publikációk

1. Zoltán Sebestyén, Zoltán May, Kati Réczey, Emma Jakab, The effect of alkaline pretreatment on the thermal decomposition of hemp, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 105 (2011) 1061-1069 (IF: 1,982, Idézettség: 7)
2. Emma Jakab, Analytical Techniques as a Tool to Understand the Reaction Mechanism, Chapter 3. in „Thermo-Chemical Conversion of Biomass – Recent Advances” eds. A. Pandey, T. Bhaskar, M. Stöcker and R. K. Sukumaran, Elsevier, 2014. pp. 73-106.
3. Bálint Sipos, Mátyás Szilágyi, Zoltán Sebestyén, Raffaella Perazzini, Dóra Dienes, Emma Jakab, Claudia Crestini, Kati Réczey, Mechanism of the positive effect of poly(ethylene glycol) addition in enzymatic hydrolysis of steam pretreated lignocelluloses, *Comptes Rendus Biologies* 334 (2011) 812-823 (IF: 1,804, Idézettség: 5)
4. Zoltán Sebestyén, Emma Jakab, Zoltán May, Bálint Sipos, Kati Réczey, Thermal behavior of native, washed and steam exploded lignocellulosic biomass samples, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 101 (2013) 61-71 (IF: 2.560, Idézettség: 1)
5. Galina Dobeles, Emma Jakab, Aleksandrs Volperts, Zoltán Sebestyén, Aivars Zhurins, Galina Telysheva, Formation of nanoporous carbon materials in conditions of thermocatalytic synthesis, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 103 (2013) 173-180 (IF: 2,560, Idézettség: 1)
6. Zoltán Sebestyén, Ferenc Lezsovits, Emma Jakab, Gábor Várhegyi, Correlation between heating values and thermogravimetric data of sewage sludge, herbaceous crops and wood samples, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 110 (2012) 1501-1509 (IF: 1,982, Idézettség: 4)
7. Zsuzsanna Czégény, Emma Jakab, Marianne Blaszó, Pyrolysis of wood, cellulose, lignin – brominated epoxy oligomer flame retardant mixtures, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 103 (2013) 52-59. (IF: 2,560, Idézettség: 1)
8. Zsuzsanna Czégény, Emma Jakab, János Bozi, Marianne Blaszó, Formation of chloromethane from lignocellulosic materials in the presence of PVC, submitted to *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014.
9. Gábor Várhegyi, Balázs Bobály, Emma Jakab, Honggang Chen, Thermogravimetric study of biomass pyrolysis kinetics. A distributed activation energy model with prediction tests, *Energy & Fuels*, 25 (2011) 24–32, (IF: 2.721, Idézettség: 22)

3.2. Disszertáció

10. Sebestyén Zoltán, Biomassza anyagok jellemzése termikus analízis és analitikai pirolízis alkalmazásával, Ph.D. dolgozat, 2014.

3.3. Előadások és poszterek

11. Z. Sebestyén, E. Jakab, Z. May, B. Sipos, K. Réczey: Thermal Characterization of Steam Exploded Lignocellulosic Raw Materials, The Fourth Annual Workshop of COST FP0602 Biotechnical Processing of Lignocellulosic Raw Materials, Izmir, Turkey, 22 – 24 September, 2010
12. Z. Sebestyén, Z. May, B. Sipos, K. Réczey, E. Jakab: Structural characterization of steam exploded biomass samples by thermal methods, 19th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis Linz, Austria 21-25 May 2012
13. Zs. Czégény, E. Jakab, M. Blazsó, Pyrolysis of wood-, cellulose-, lignin-PVC mixtures, p. CT24. 7th International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials: ISFR 2013, New Delhi, India, 2013.10.23-2013.10.26. New Delhi, 2013
14. Zs. Czégény, E. Jakab, M. Blazsó, Pyrolysis of wood, cellulose, lignin - brominated epoxy oligomer flame retardant mixtures, 19th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis Linz, Austria 21-25 May 2012
15. Zs. Czégény, E. Rajnai, Z. Sebestyén, G. Bakos, E. Jakab: Torrefaction study of some typical Hungarian biomass, 20th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis, Birmingham, 05. 19-23., 2014
16. Sebestyén Z., Lezsovits F., Jakab E. Várhegyi G.: Biomassza minták termikus analízise, 1. MKE Nemzeti Konferencia, Sopron, május 22-25, 2011
17. Z. Sebestyén, C. Carsote, E. Badea, Zs. Czégény, L. Miu, M. Blazsó, J. Madarász, Gy. Pokol, C. Sendrea, E. Jakab: The role of pyrolysis and thermal analysis in the protection of cultural heritage, 20th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis, Birmingham, 05.19-23., 2014
18. Z. Sebestyén, J. Bozi, E. Rajnai, T. Bhaskar, Z. May, I. Borbáth, E. Jakab: Thermoanalytical and chemical characterization of solid byproduct of biodiesel production from algae and jatropha seeds using mesoporous silica catalysts, 20th International Symposium on Analytical and Applied Pyrolysis, Birmingham, 05. 19-23., 2014