

BARTA-RAJNAI ESZTER

Pörkölt kávébab és hőkezelt biomassza

A mai napig nem sikerült tisztázni, ki mikor és hogyan jött rá arra, hogy a kávészemeket pörkölni érdemes, de az bizonyos, hogy ez a felfedezés indította el a kávé mai napig tartó, töretlen útjára. A kávébabpörkölt eljárás (franciául torréfaction) analógiájára, a növényi biomassza pörkölésének gondolata először Franciaországban, az 1930-as években fogalmazódott meg. A technológia fejlesztésével azonban csak az utóbbi évtizedben kezdtek komolyabban foglalkozni. Miért is kedvező a kávébabok és a növényi biomassza anyagok pörkölése?

A kávébabok pörkölése

A zöld kávébab a kávécserje cseresznyére emlékeztető termésének magja, melyből a 195–245 °C közötti pörkölés során barna kávészem keletkezik (1. ábra). A pörkölés olyan lassú hevítési folyamat, mely során az íztelen kávébab mind fizikai, mind kémiai változásokon megy keresztül, melyek hatására kialakul markáns íze és aromája. Pörkölés során a legfontosabb fizikai változás a kávébabok víztartalmának csökkenése, miközben a babok térfogata szén-monoxid és szén-dioxid keletkezése közben jelentősen megnő. A szemekben a növekvő túlnyomás a sejtfalak törékennyé válásakor reccsenő hang kíséretében szűnik meg, ezt a pörkölők „első reccsenésnek” nevezik. A fizikai változások hatására a pörkölt kávé szárazzá, porózussá és örölhetővé válik.

A folyamat során kulcsfontosságú, hogy milyen hőmérsékleten és meddig kezeljük a kávészemeket, hiszen ezek a paraméterek különböztetik meg a pörköltéti szinteket (2. ábra):

– *Fahéjpörkölés* (195 °C): a legvilágosabb pörkölés, mely az első reccsenésig tart. Ez a legkíméletesebb pörkölési eljárás, mely nem nyomja el a kávé zamatát.

– *Amerikai pörkölés* (210 °C): a közepesen barna színűre pörkölt kávé az első reccsenés végén készül el.

– *Bécsi pörkölés* (230 °C): a második reccsenéssel elérhető pörkölés során a szemek közép barna színűvé válnak, rajtuk az

olajcseppek tisztán látszanak, a szemek enyhén savasak, kesernyések.

– *Franciapörkölés* (240 °C): a pörkölés a második reccsenés után fejeződik be, a sötétbarna szemek felülete fényes.

– *Olaszpörkölés* (245 °C): a pörkölés végére az erős sötétbarna színű szemek nagyon fénylenek.

A kávészem összetételét sok tényező befolyásolja (pl. a faj, a termőtalaj, az éghaj-

az aminosavak nukleofil tulajdonságú aminos csoportjával, így létrehozva a pörkölt aromákat és a keserű alkotórészeket, amelyek a kávé ízét meghatározzák. A karamellizáció során a szénhidrátok lebomlanak, majd polimerizációval, kondenzációval új molekulákka egyesülnek. Mindkét folyamat során a színváltozást a nagy molekulák idézik elő, míg az ízek és illatok megváltozásáért a kisebb molekulák a felelősek.



1. ábra. A kávécserje termése, valamint nyers és pörkölt magja (Forrás: www.foodthinkers.com)

lat), azonban általánosságban elmondható, hogy alkotói szénhidrátok, nitrogéntartalmú vegyületek, illékony komponensek, klorogénsavak, karbonsavak, vitaminok, ásványi anyagok és antioxidánsok. Mivel a kávészemek összetétele különböző, nem lehet általános érvényű pörkölési körülményeket meghatározni. Ami a pörkölés

kémiáját illeti, a közel kétezer összetevő aránya a pörkölés során nagymértékben megváltozik. A savasság függ a pörkölési időtől, de a túlpörkölt kávéban az aromák elvesznek,

a csersavtartalom pedig megnő. Fontos megjegyezni, hogy a pörkölésnek köszönhetően szabadul fel a kávébabból a koffein is, ugyanis a nyers kávébabból a koffein a cseresavakhoz kötötten van jelen. A pörkölés két fontos reakciója a Maillard-reakció és a karamellizáció. A Maillard-reakció során a cukrok karbonilcsoportja reagál

A lignocellulóz alapú biomassza hőkezése

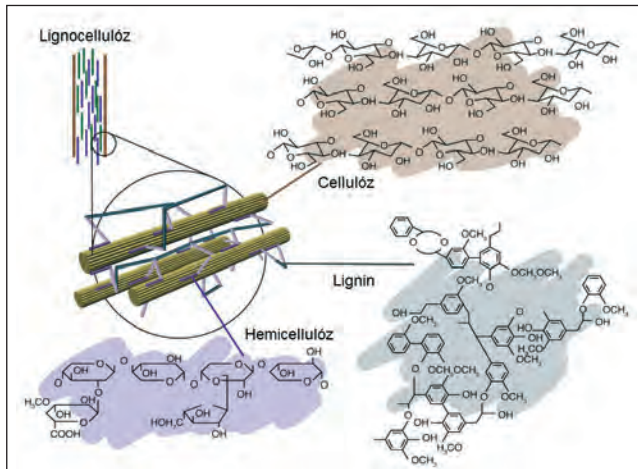
A lignocellulózok a fás- és lágyzárú növények sejtfalát felépítő anyagok, melyek eltérő mennyiségben tartalmaznak cellulózt, hemicellulózt és lignint (3. ábra). A cellulóz a Földön a legnagyobb mennyi-

ségben előforduló biopolimer, amelyben a glükózmonomerek $\beta(1-4)$ -es glikozidos kötéssel kapcsolódnak egymáshoz. A hemicellulóz hetero-poliszacharid, melyet öt és hat szénatomszámú cukrok (pentózok és hexózok) építenek fel. A hemicellulózok védik a cellulózzrostokat, továbbá összekötik a lignint és a cellulózzsálakat egymás-



2. ábra. Zöld (nyers) és különböző hőfokon pörkölt kávészemek (Forrás: www.cafesrichard.fr)

sal. A lignin a Földön a második legnagyobb mennyiségben előforduló, metoxifenol egységekből felépülő térhálós szerkezetű biopolimer. A lágyzárú növények ligninjé alapvetően három vázmolekulából áll: kumaril-alkoholból, koniferil-alkoholból és szinapil-alkoholból. A lombhullató fák koniferil-alkohol és szinapil-alkohol mono-



3. ábra. A lignocellulózok szerkezete (Forrás: Q. Bach: *Wet Torrefaction of Biomass*)



4. ábra. Kezeletlen és különböző hőmérsékleteken előkezelt hazai biomasszainták

Tulajdonságok	Fa (nyers)	Fa pellet	Pörköltfa pellet	Faszén	Szén
Nedvességtartalom (%)	30-45	7-10	1-5	1-5	10-15
Fűtőérték (MJ/kg)	9-12	15-18	20-24	30-32	23-28
Illóanyag-tartalom (%)	70-75	70-75	55-65	10-12	15-30
Kötött szén (%)	20-25	20-25	28-35	85-87	50-55
Sűrűség (kg/dm ³)	0,2-0,25	0,55-0,75	0,75-0,85	~0,20	0,8-0,85
Energiasűrűség (GJ/m ³)	2,0-3,0	7,5-10,4	15,0-18,7	6-6,4	18,4-23,8
Porképzési hajlam	Átlagos	Alacsony	Alacsony	Magas	Alacsony
Hidrofóbitás	Hidrofil	Hidrofil	Hidrofób	Hidrofób	Hidrofób
Biológiai degradáció	Igen	Igen	Nem	Nem	Nem
Örölhetőség	Nehezen	Nehezen	Könnyen	Könnyen	Könnyen
Tárolhatóság	Speciális	Speciális	Jó	Jó	Jó
Minőségbeli változékonyság	Változó	Egyenletes	Egyenletes	Egyenletes	Egyenletes

Táblázat. Különböző biomassza-alapú tüzelőanyagok (nyers fa, fapellet, pörkölt fapellet, faszén és szén) tulajdonságainak összehasonlítása

lenállóbb lesz a baktériumok és gombák okozta biodegradációval szemben, ami a tárolási és szállítási költségek csökkenését is eredményezi. Az előkezelés további előnye, hogy megbontja a biomassza szerkezetét, így a hőkezelt minta aprítása könnyebbé és energiahatékonyabbá válik. A hőkezelés hatására a különféle biomassza-alapanyagokból egységesebb tulajdonságú anyagok nyerhetők, ezáltal ipari berendezésekben hatékonyabban feldolgozhatókká válnak. Az előkezelés két legfontosabb paramétere ebben az esetben is a hőkezelési hőmérséklet és a hozzá tartozó hőkezelési idő. A biomassza-anyagoknál annak az optimális hőmérsékletnek és tartózkodási időnek

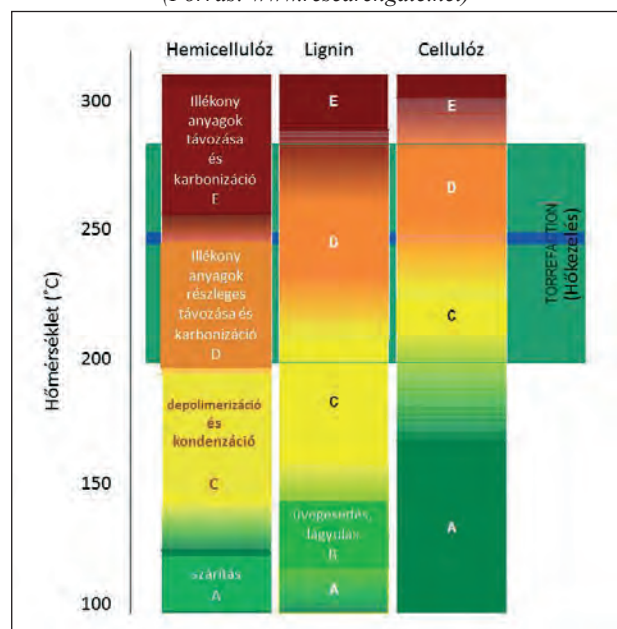
meregységeket tartalmaznak, míg a túlevelő fákból csak koniferil-alkohol alkotja a lignint. A három fő alkotórészen kívül a növények tartalmaznak extrahálható anyagokat, fehérjéket és pektint is. A növények szerkezetlen anyagokat is tartalmaznak, melyek koncentrációját a talaj minősége és összetétele is befolyásolja. Fontos különbség, hogy a faszárú növényekhez képest a lágyszárú növényeknek lényegesen nagyobb a szerkezetlen-tartalma.

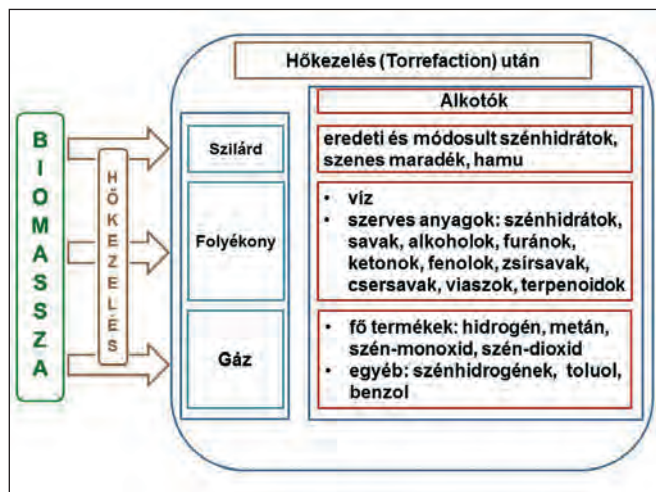
A lignocellulóz energetikai célú felhasználásakor technológiai problémákkal szembesülünk, mivel ezen anyagok ellenálló szerkezetűek, kis energiasűrűségűek, inhomogének, nagy a víz- és oxigéntartalmuk és kisebb az égéshőjük a szénhez és a kőolajhoz képest. Energetikai felhasználásuk első lépéseként fizikai, kémiai, biológiai vagy kombinált eljárással fellazítják ellenálló szerkezetüket. A tüzelést megelőzően a leggyakoribb fizikai előkezelés az aprítás, de kis részecskeméretű, kis sűrűségű alapanyagok esetén bizonyos technológiákhoz tömörítési eljárások szükségesek, mint a pelletálás és a brikettelés. A pelletálásnál hatékonyabb tömörítés érhe-

tő el a lignocellulózok 200–300 °C-os inert atmoszférájú hőkezelésével, az úgynevezett torrefactionnel, mely megváltoztatja a biomassza tulajdonságait, ezáltal az előkezelt biomassza termokémiai (pl. pirólízis, gázosítás, égetés) feldolgozása kedvezőbbé válik (Táblázat). Fontos kiemelni, hogy a biomasszainták esetén a hőkezelés oxigénmentes atmoszférában történik, míg a kávébabok pörkölése oxigén jelenlétében megy végbe.

Az alacsony hőmérsékletű hőkezelés hatására a biomassza fűtőértéke lényegesen megnő, emellett hidrofóbbá válik, így el-

5. ábra. Lombhullató fa egyes alkotóiban bekövetkező változások hőmérséklettartományai a hőkezelés hatására (Forrás: www.researchgate.net)





6. ábra. A hőkezelés során a növényi biomassából keletkező termékek

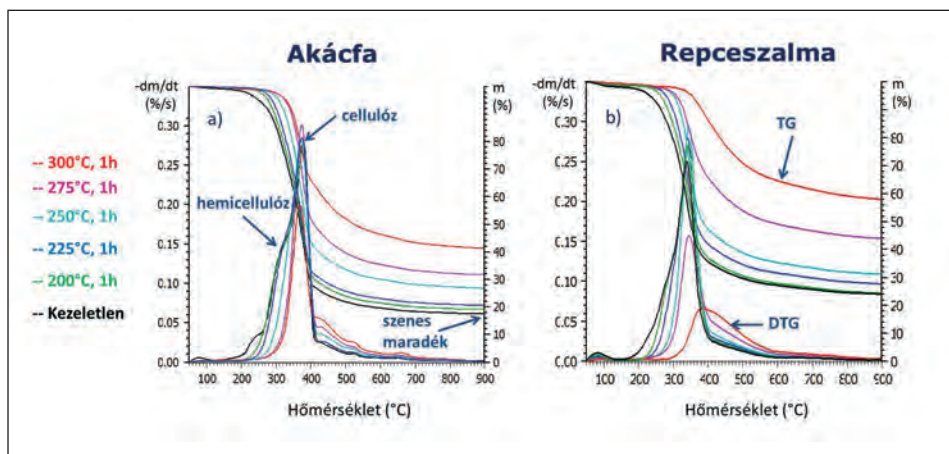
a megtalálása a cél, ahol a minta nedvesség és extrahálható szervesanyag-tartalma már eltávozik a mintából, a hemicellulóz savasságot okozó acetát-csoportjai már leszakadnak a hőkezelés hatására, azonban fontos, hogy a minta cellulóz- és lignintartalma lényegében még ne sérüljön az adott hőmérsékleten, mert az egyúttal jelentős energiavesztéséget is jelentene. A folyamat során a kezeletlen biomassza sárgás színe az előkezelés erélyességének növelésével egyre sötétebb árnyalatúvá változik (4. ábra).

A növényi biomassza termikus tulajdonságait fő komponenseinek kémiai összetétele határozza meg, de a bennük kisebb mennyiségben jelenlevő egyéb alkotók is befolyásolják a hőbomlást. A biomassza-anyagok hőkezelése során egy sor összetett, párhuzamos és egymással versengő reakció megy végbe, melyek sokféle termék képződését eredményezik. A hőkezelés során a fő alkotók kö-

zül a legkevésbé stabil a hemicellulóz, hőbomlása alacsonyabb hőmérsékleten kezdődik meg, mint a két másik alkotóé (5. ábra). Az előkezelés első lépése a szárítás (A), mely során a növényi biomassza nedvességtartalma csökken. A hőmérséklet növekedésével 150 °C környékén kezdődik meg az egyes komponensek depolimerizációja és fragmentációja, valamint a keletkező fragmensek kondenzációja a szilárd fázisban (C). A hőmérséklet további emelésével 200 °C környékén kezdődik meg az illékony anyagok távozása és a karbonizáció (D), mely folyamatok 250 °C felett még intenzívebbé válnak. A lignin esetében a szárítási lépést követően egy üvegesedési, lágyulási folyamat is történik (B), mely tulajdonságát kihasználva, a pelletek készítése során a lignint mint természetes kötőanyag hasznosítható.

A hőkezelés során a szilárd termék mellett folyadék és gázfázisú (főleg szén-monoxid és szén-dioxid) melléktermékek is keletkeznek (6. ábra). Az előkezelési hőmérséklet növelésével a szilárd anyag mennyisége egyre jobban csökken, míg a keletkező folyadékfrakció mennyisége nő. Ez a frakció számos komponensből áll, többek között savakból, gvajakolból, sziringolból, fenolból, és származékaikból, melyek a lignin, a cellulóz és a hemicellulóz hőbomlása során képződnek.

7. ábra. Kezeletlen és a különböző hőmérsékleteken előkezelt akácfa- és repceszalma-minták termogravimetriás eredményei (TG és DTG görbéi)

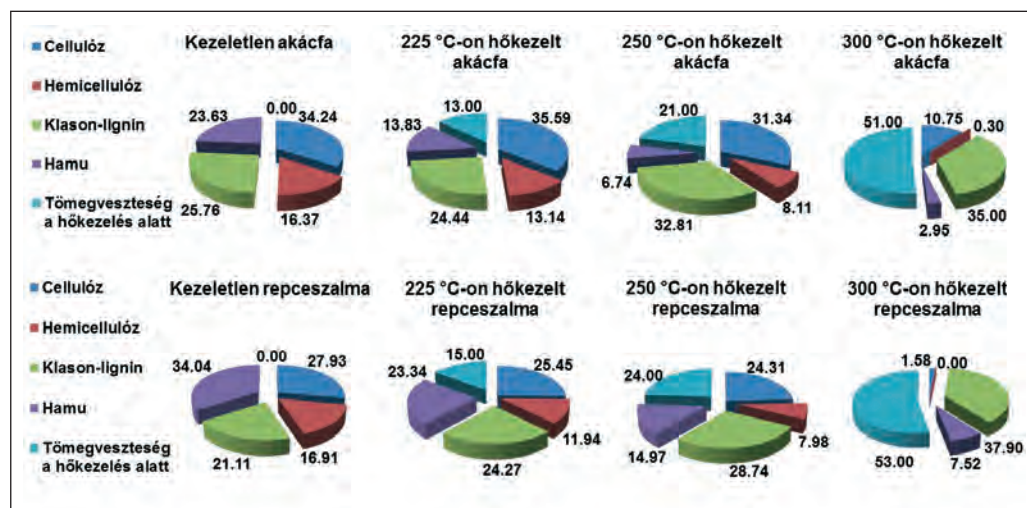


zül a legkevésbé stabil a hemicellulóz, hőbomlása alacsonyabb hőmérsékleten kezdődik meg, mint a két másik alkotóé (5. ábra). Az előkezelés első lépése a szárítás (A), mely során a növényi biomassza nedvességtartalma csökken. A hőmérséklet növekedésével 150 °C környékén kezdődik meg az egyes komponensek depolimerizációja és fragmentációja, valamint a kelet-

Fás és lágy szárú növény hőkezelési tulajdonságainak összehasonlítása

Hasonlóan a kávébabokhoz, a biomassza-anyagok eltérő összetétele sem teszi lehetővé az általános érvényű hőkezelési körülmények megállapítását, ezért azokat minden használni kívánt nyersanyag esetén meg kell határozni. A növényi anyagokban a különböző hőkezelések hatására bekövetkező változások jól vizsgálhatóak termoanalitikai és pirolízis módszerekkel, melyek előnye, hogy bonyolult szerkezetű növényi alapanyagokat vizsgálhatunk anélkül, hogy a minták fő alkotóit elválasztanánk egymástól. Termogravimetria módszerrel lassú felfűtés során meghatározhatjuk a minták termikus degradációjának sajátosságait. A mérés eredménye a termogravimetriás görbe (TG), amely a minta tömegének változását mutatja az idő vagy a hőmérséklet függvényében. Ezt a görbét idő szerint differenciálva kapjuk meg a DTG-görbét, mely a minta tömegváltozásának a sebességét mutatja az idő vagy a hőmérséklet függvényében. A görbe alakjából következtethetünk a minta termikus stabilitására és a hőkezelés hatására bekövetkezett összetételbeli változásokra. A másik alkalmazott módszer a pirolízis-gázkromatográfia/tömegspektrometria (Py-GC/MS), mely során a mintát pillanatszerűen fűtjük fel az adott pirolízis hőmérsékletre (550°C), majd a kapott termékelegyet gázkromatográfiai elválasztás után tömegspektrométer segítségével azonosítjuk. Az illó komponensek minőségi és mennyiségi meghatározása alapján következtethetünk a minta kémiai összetételére, a hőkezelés során történt kémiai változásokra. Kénsavas hidrolízist követő folyadékromatográfiai mérések segítségével a hőkezelt minták cellulóz-, hemicellulóz- és Klasonlignintartalma is meghatározható. Ezen módszerek együttes használatával megkereshetők azok a hőkezelési paraméterek, melyek mellett a minta nedvesség- és extrahálható szervesanyag-tartalma már eltávozik a mintából, a hemicellulóz savasságot okozó acetát-csoportjai leszakadnak, azonban a minta cellulóz- és lignintartalma még nem sérül.

Magyarországon energiatermelés céljára a hazai mezőgazdasági melléktermékek (repceszalma, búzaszalma, kukoricaszár), valamint az energetikai faültvények (akác, fűz, nyár) állnak rendelkezésre. Az azonos hőkezelési hőmérsékleten és ide-



8. ábra. Az akácfa és a repecszalma összetételének változása a szárazanyag százalékában különböző hőmérsékletű hőkezelések hatására

ig előkezelt lágyszárú és a fás szárú növények hőbomlása eltérő, melyet két tipikus magyarországi növényen: az akácfa és a repecszalmán keresztül mutatunk be. A kezeletlen akácfa minta DTG-görbéjén a fő bomlási lépés kezdeti szakaszán látható váll (290 °C körül) a hemicellulóz bomlását, a főcsúcs (378 °C) pedig a cellulóz hőbomlását mutatja (7. ábra). A hemicellulóz-váll a kezeletlen minta esetén a legkarakterisztikusabb, mivel a kezeletlen minta hemicellulóz-tartalma itt még érintetlen. Ez a jól definiált váll a hőkezelési hőmérsékletek növekedésével egyre jobban csökken, majd eltűnik. A lágyszárú minta esetén a cellulóz hőbomlása alacsonyabb hőmérsékleten kezdődik meg (340 °C körül), így a hemicellulóz-váll nem válik el a cellulóz fő bomlási lépésétől. A repecszalma hőbomlási sebességének 40 °C-kal alacsonyabb hőmérsékletre tolodásának oka a lágyszárú növények lényegesen magasabb szerves ásványi anyag-tartalma, ami katalizálja a biomassza cellulóztartalmának hőbomlását. A két anyag összehasonlításakor az is megfigyelhető, hogy a hőkezelési hőmérsékletek emelésével a lágyszárú minta szerves maradékának növekedése láthatóan jóval nagyobb, mint az akácfa minta esetén, melynek oka, hogy az alkáliionok a termikus bomlás mechanizmusát is megváltoztatják és elősegítik a szerves folyamatokat.

A kénsavas hidrolízis eredményeként megállapítható, hogy a 250 °C-on hőkezelt akácfa- és repecszalmaminta hemicellulóz-tartalmának mintegy harmada, míg 300 °C-on a minták teljes hemicellulóz-tartalma elbomlik a hőkezelés során. A cellulóz hőbomlása magasabb hőmérsékleten kezdődik meg. A 250 °C-os hőkezelés hatására mennyisége nem csökken jelentősen, míg 300 °C-on az akácfa

cellulóztartalma a harmadára csökken, a repecszalma cellulóztartalma viszont teljes egészében elbomlik (8. ábra).

A kezeletlen és különböző hőmérsékleteken hőkezelt akácfa- és repecszalmaminták gyors pirolízisének összion-kromatogramjai is eltéréseket mutatnak. Az egyes gázkromatográfiás csúcsok a pirolízis során keletkező termékegy komponenseit mutatják. A pirolízis során keletkező illó termékek főképp a szénhidrátok és a lignin hőbomlástermékei. A cellulóz inert atmoszférában melegítés hatására keletkező fő terméke a depolimerizációval keletkező levoglükozán. Az akácfa mintánál a levoglükozán relatív mennyisége mind a kezeletlen, mind a hőkezelt minták esetében többszöröse a repecszalma levoglükozán-tartalmának. Ennek a különbségnek a magyarázata szintén az alkáliionok katalitikus hatása a minta nem bomló atmoszférában történő hőbontására. A nagy alkáliion-tartalom a kis molekulatömegű bomlástermékek képződését segítik elő, míg a depolimerizációs bomlásmechanizmus háttérbe szorul. A lignin fő bomlástermékei különböző metoxifenol-származékok, mely bomlástermékek jól tükrözik a lignin különböző összetételét a fában és a lágyszárúakban. Az akácfa pirogramjain elsősorban a sziringol- és a gvajakol-származékok dominálnak, ami összhangban van a lombhullató fák ligninjének összetételével. Ezzel szemben a repecszalma esetén mindhárom típusú ligninre utaló termékek megjelennek, a sziringol- és gvajakolszármazékok mellett a fenol és az alkil-fenolok is jelentős mennyiségben keletkeznek. Mindkét minta esetén a különböző hőmérsékletű hőkezelések hatására megváltozik

a lignin-makromolekulák szerkezete, aminek eredményeként a különböző ligninmonomerek és származékaik megváltozott intenzitással jelennek meg.

Az analízisek alapján elmondható, hogy a repecszalma degradációja azonos hőmérséklet és tartási idő értékek esetén lényegesen előrehaladottabb a fás szárú akácfa mintához viszonyítva, melynek oka a lágyszárú növények magasabb alkáliion-tartalma. Egy adott hőmérsékleten hőkezelt akácfa mintához hasonló degradációs fok a repecszalma esetén körülbelül 25 °C-kal alacsonyabb hőmérsékleten érhető el.

A növényi biomasszaanyagok inert atmoszférájú alacsony hőmérsékletű hőkezelésének számos előnye van az eddig alkalmazott tömörítési módszerekhez (brikettálás, pelletálás) képest. Magyarország vállalta, hogy 2020-ra energiaszükségletének 14,65%-át megújuló energiaforrásokból állítja elő. A megújuló energiaforrások közül a biomassza az, amelyet itthon a legnagyobb mértékben hasznosítani tudnánk, ezért a 2020-as terveink eléréséhez a biomassza alacsony hőmérsékletű hőkezelése is hozzájárulhat. ▶

Az írás szerzője a Magyar Tudományos Akadémia Természettudományi Kutatóközpontja és a Tudományos Ismeretterjesztő Társulat közös ismeretterjesztő cikkpályázatán II. díjban részesült.

Irodalom

- P. C. A. Bergman, A. R. Boersma, R. W. R. Zwart, J. H. A. Kiel: Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations, 2005, ECN-C--05-013
- W. F. DeGroot, F. Shafizadeh. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 6 (1984) 217-32
- Y. Sekiguchi, F. Shafizadeh. *J. Appl. Polym. Sci.* 29 (1984) 1267-86
- G. Varhegyi, M. J. Antal Jr., F. Szekely, F. Till, E. Jakab. *Energy & Fuels* 2 (1988) 267-72
- E. Jakab, O. Faix, F. Till, T. Szekely. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 25 (1993) 185-94
- E. Jakab, O. Faix, F. Till. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 40-41 (1997) 171-86
- Cs. Kátai: The history and culture of coffee, *J. of History of Culture, Science and Medicine*, 3 (2012), Vol. 3.No.4
- Coffee chemistry: <http://www.coffeechemistry.com> 2016.04.10.
- Rudnay János: A kávé. Mezőgazdasági Kiadó, 1976. p. 57-59