



SZENT ISTVÁN EGYETEM
ÉLELMISZERTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

**BÚZAKORPA ÉS PAPÍRHULLADÉKOK
BIOETANOL CÉLÚ HASZNOSÍTÁSÁNAK
MODELLEZÉSE**

FARKAS CSILLA

Doktori (PhD.) értekezés tézisei

Budapest

2019

A doktori iskola

megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

tudományága: Élelmiszertudományok

vezetője: **Simonné Dr. Sarkadi Livia DSc**

egyetemi tanár

SZIE, Élelmiszertudományi Kar

Élelmiszerkémiai és Táplálkozástudományi Tanszék

Témavezetők: **Dr. Nguyen Duc Quang PhD**

egyetemi tanár

SZIE, Élelmiszertudományi Kar

Sör- és Szeszipari Tanszék

Rezessyné Dr. Szabó Judit PhD

egyetemi magántanár

SZIE, Élelmiszertudományi Kar

Sör- és Szeszipari Tanszék

A doktori iskola- és a témavezetők jóváhagyó aláírása:

A jelölt a Szent István Egyetem Doktori Szabályzatában előírt valamennyi feltételnek eleget tesz, a műhelyvita során elhangzott észrevételeket és javaslatokat az értekezés átdolgozásakor figyelembe vette, ezért az értekezés védési eljárásra bocsátható.

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

1 A MUNKA ELŐZMÉNYEI ÉS CÉLKITŰZÉSEI

Az erdészetben, a mezőgazdaságban és egyéb, növényi biomassza feldolgozásán alapuló ágazatok (cellulóz- és papíripar, textilipar stb.) tevékenységei során keletkező melléktermékek és hulladékok (lignocellulóz biomassza) nagy hányadát - becslések szerint akár 60-80 %-át is - összetett szénhidrátok (cellulózok, hemicellulózok) teszik ki. Ezen típusú növényi biomassza kezelése, hasznosítása ma nagyrészt hagyományos eljárásokkal (állati takarmány és alom, komposztálással talajjavító szerves trágya, közvetlen elégetéssel hő- és villamos energia) történik, azonban az elmúlt időszakban e kiaknázatlan energiahordozók alternatív hasznosítási lehetőségeinek feltérképezése intenzíven kutatott területté vált. A növényi maradványok bioenergetikai célú hasznosítása (biogáz, biohidrogén, bioetanol, biobutanol stb.) egy lehetséges megoldást kínál a hosszabb távon fenntartható energetikai rendszerek és hulladékgazdálkodás kiépítéséhez, valamint a primer (fosszilis) energiahordozók felhasználásának csökkentése által a környezet szennyezés mérsékléséhez. Az intenzív nemzetközi kutató-fejlesztő munkáknak köszönhetően néhány kísérleti üzem szintjén megvalósult a másodgenerációs bioetanol előállítás, azonban kereskedelmi szinten igazán nagy áttörést nem sikerült elérni. A problémát a lignocellulózok összetett és a biokémiai hatásokkal szemben ellenálló szerkezetének a feltárása, ezáltal a szénhidrátok kinyerése okozza, ami a későbbi enzimes cukrosítás és etanol fermentáció kihozatalát, sikerét lényegesen meghatározza. A lignocellulóz-alapú biomasszának rendkívül heterogén az összetétele. Számos tényező, közöttük a növény típusa, a termesztés környezeti paraméterei, továbbá a félkész- és késztermékek előállításánál használt adalék- és kísérőanyagok (mint papír esetén is) is hatással vannak a stabil szerkezet kialakítására. Emiatt általánosan megállapítható, hogy nem áll rendelkezésre olyan egységes előkezelési módszer, ami minden esetben eleget tenne a technológiai és gazdasági kívánalmaknak.

Az elmúlt években nagy érdeklődés mutatkozott a lignocellulózok mikrobiális előkezelésére, amelynél a mikroorganizmusok az általuk szintetizált cellulolitikus és az egyéb hidrolitikus, valamint oxidatív enzimeikkel végzik el a szerkezet lazítását és a szénhidrát polimerek részbeni (vagy akár teljes) bontását. A módszer előnye az iparban alkalmazott fizikokémiai módszerekkel szemben a környezetbarátisága és kíméletessége, azonban az alacsony hatékonysága miatt még termelési szintre nem emelkedett. A papír-alapú biomassza rosttartalmának előkezelésénél, tisztításánál alkalmazott hagyományos módszerek (mosás és áztatás, flotáció) mellett kedvező hatást írtak le a besugárzásos technikáknál, valamint a különböző biopolimerek adszorbensként történő alkalmazása esetén is. Ezen új módszerek

vonatkozásában azonban kevés információ áll rendelkezésünkre, ami azok fejlesztését, továbbá a gazdaságos etanol előállítás kivitelezését is megnehezíti.

Doktori kutatómunkámban célul tűztem ki két, összetételében és szerkezetében eltérő növényi eredetű biomassza - búzakarpa és papír-alapú hulladékok - etanol célú hasznosításának tanulmányozását, a kritikus technológia műveletek: előkezelés, enzimes cukrosítás és etanolfermentáció hatékonyságának fokozását az elérhető cukor- és etanolhozam növelése érdekében. E két szubsztrátumot a magas cellulóz tartalom miatt választottam a második generációs bioetanol előállítás modellezéséhez.

Doktori munkám során az alábbi részfeladatokat terveztem:

A búzakarpa szubsztrátum előkezelése

- Különböző mezofil, komposztból is izolálható korhadást okozó gombák, valamint élesztők beszerzése és törzsfenntartása.
- A beszerzett törzsek laboratóriumi szinten történő alkalmazása biodegradációs kísérletekhez, kontrollált körülmények között, finoman őrölt búzakarpa szubsztrátumon. A törzsek szelektálása.
- A kiválasztott törzsek társíthatóságának vizsgálata, két és három törzs közötti kölcsön(ös)hatások feltérképezése.
- Az előkezelés paramétereinek: a szabad nedvességtartalom, a kémhatás, a konídiumok aránya, az időben eltolt beoltási technikák tanulmányozása a kialakított, mikrobiális konzorcium esetén.

A papír-alapú szubsztrátumok előkezelése

- Különböző fizikai és fiziko-kémiai módszerek: az áztatás és mosás, a besugárzásos technikák, felületi adhézió elvén működő eljárások (flotáció és kitozán-alapú biopolimerek) alkalmazása a papírostokon lévő festékanyagok és egyéb nemkívánatos komponensek eltávolításához.

Az előkezelt biomassza enzimes hidrolízise és alkoholos erjesztése

- Enzimes cefrészési technológia fejlesztése az erjeszhető cukortartalom növeléséhez.
- Különböző erjesztési technikák: mono- és vegyes kultúrás etanolfermentáció, valamint szeparált cukrosítás és erjesztés alkalmazása és fejlesztése.

2 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Kísérleteimhez két növényi eredetű ipari (mellék)terméket, búzakorpát (*Triticum aestivum* L.) (Alnatura GmbH, Ausztria) és kommunális papír hulladékot - irodai papírokat és nyomtatott újságpapírok - használtam.

A búzakorpa biológiai előkezelésénél az összesen 35 komposztból izolált, korhadást okozó mikroorganizmus - ezek között 11 *Aspergillus*, 7 *Penicillium*, 1 *Mucor*, 2 *Phanerochaete*, 3 *Rhizopus* és 5 *Trichoderma* fonalagomba törzs, valamint 3 *Candida* és 3 *Pichia* élesztőgomba törzs - a Mezőgazdasági és Ipari Mikroorganizmusok Nemzeti Gyűjteményétől (NCAIM, Budapest) és a Nemzetközi Mikológiai Intézettől (IMI, Surrey, Engham, United Kingdom) származott. A biodegradáció folyamatának modellezését a törzsekkel önállóan, valamint a törzsek rangsorolását követően kialakított konzorciumokkal, csökkentett nedvességtartalom mellett, 30 °C-on, 7 esetenként 9 napon át vezettem. A mikrobiális konzorcium teljesítményének optimalása érdekében néhány kritikus paraméternek: a kémhatás (pH=3-7), a nedvességtartalom (citrát-foszfát puffer és a búzakorpa aránya 4:1 és 7:1 közötti), konzorcium százalékos eloszlása, valamint az inokulálási technika hatását is vizsgáltam. Az oldott szénhidrát tartalom változását naponkénti mintavételezéssel követtem nyomon.

A papír-alapú kommunális melléktermékek előkezeléséhez alkalmazott fizikai és fizikai-kémia módszerek, vegyszerek használatával és anélkül (kontroll, vizes közegek), durva, aprított mintákon és rostsuszpenzió történt. A flotálási kísérleteket az általam kialakított laboratóriumi méretű oldottlevegős flotáló (DAF) berendezésben, 1 % (m/v) konzisztencia mellett, szerves oldószerként az előzetes kísérletek során kiválasztott etanolt alkalmazva (10-50 %, v/v), 30 °C-on és 50 °C-on, 5, 15 és 30 percen át tartott. A besugárzásos technikáknál 1 (m/v) %-os rostsuszpenziókat (szintén etanol vizes oldatában, 15 v/v %), 5, 15 és 30 percen át, 30 °C-on, mikrohullám esetén 750 W, ultrahangos kezelés esetén 50-60 Hz mellett kezeltem. A kitozánt rákpáncél eredetű kitinből, deacetilezéssel állítottam elő, és annak használatával 2 különböző adszorbens változatot: a glutáraldehiddel keresztkötött kitozánt és Ca-alginát gélyöngyökön rögzített kitozánt készítettem. A biopolimerek abszorpciós tulajdonságát eltérő adszorbens mennyiség (2,5-20 m/v %), kezelési idő (5, 15 és 30 perc), hőmérséklet (30, 35, 40, 45, 50 és 55°C) és kémhatás (Na-acetát puffer: pH=3,5-5,5 és citrát-foszfát puffer: pH=6,5) mellett, 100 ppm, Carbon black színező pigmentet tartalmazó modell tinta oldatoknál, állandó 220 rpm fordulatszámú rázatási sebességen követtem nyomon. A papír mintákat a szelektált adszorbenssel az előző kísérletek során optimált paraméterek mellett kezeltem. A bioszorbensek abszorpciós teljesítményének meghatározása spektrofotometriás úton történt.

Az enzimes cukrosításhoz ipari enzimekészítményeket és enzimpreparátumokat (Novozymes A/S, Denmark) alkalmaztam, tisztán és keverékek formájában. Az előkezelt búzakorpa enzimes bontásához *Trichoderma reesei* által termelt cellulózt (Celluclast®1.5L), *Aspergillus niger* eredetű cellobiázt és *Thermomyces lanuginosus* által termelt xilanázt, az előkezelt papír minták esetén az említett cellulóz készítmény mellett *Aspergillus niger* eredetű amiloglükózidázt (AMG 300L) használtam. A hidrolizátumok cukor tartalmának etanollá konvertálásához a *Lanchancea* és *Kluyveromyces* élesztő törzseket, valamint a *Zymomonas mobilis* baktérium törzset a Mezőgazdasági és Ipari Mikroorganizmusok Nemzeti Gyűjteménye (NCAIM, Budapest), a szárított *Saccharomyces cerevisiae* (Levuline Fb) fajélesztőt a svájci Danstar Ferment A.G. Kft. biztosította. Az erjesztési kísérletek során különböző technikák erjesztési profiljait tanulmányoztam, tiszta és vegyes kultúrák (ezen eseteknél az inokulálás 1:1 arányban történt) alkalmazásával, 30°C-on, 7 napon át. A szénhidrát- és etanoltartalom nyomon követése naponkénti mintavételezéssel történt.

3 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

Kutatómunkám két, éves szinten igen nagy mennyiségben keletkező, cellulózban gazdag növényi melléktermék bioenergetikai (etanol célú) hasznosítására irányult. A másodgenerációs lignocellulóz-alapú bioetanol gyártástechnológia műveleti lépéseinek modellezésénél az alapanyag előkezelése, az enzimes hidrolízis, valamint a hidrolizátumok cukor tartalmának etanollá konvertálása során elért eredményeket az alábbiakban ismertetem.

A búzakarpa etanol célú hasznosításának modellezése

Az összetett növényi mátrix biológiai előkezelése során összesen 35 korhadást okozó mikroorganizmust (élesztő- és fonalgomba törzseket) rangsoroltam a biodegradációs teljesítményük alapján. Az oldatba átvihető szénhidrátok mennyisége és összetétele (mono-, di-, tri- és oligoszacharidok) fajonként eltérő mintázatot mutatott, ami a celluláz és egyéb hidrolitikus, valamint az oxidatív enzimek aktivitásbeni különbözőségére, továbbá azok hiányosságára utal. A vizsgált törzsek többsége a 3. és 5. nap között érte el a maximális bontási aktivitást. A *Penicillium* törzsek bizonyultak a leghatékonyabbaknak, esetükben az elméleti szénhidrát hozam 20-24 %-nak adódott, és sorrendben az *Aspergillus*, a *Trichoderma*, a *Mucor*, a *Rhizopus*, a *Phanerochaete*, valamint a *Candida* és *Pichia* törzsek követték. A szelektálási munka eredményeként 6 törzset: az *A. brasiliensis* F.00892, az *A. niger* F.00632, az *A. wentii* F.00167, a *P. chrysogenum* F.00814, a *P. granulatum* F.00913 és a *T. viride* F.00795 törzset emeltem ki, amelyeket a továbbiakban társítva, konzorciumokban vizsgáltam. A 18 különböző, 2 és 3 tagú konzorciumok bizonyították, hogy a törzsek közötti szinergens kölcsönhatás eredményeként nagyobb oldható szénhidrát hozam érhető el, mint a törzsek egyedi alkalmazásával. Megállapítottam, hogy az *A. niger* F.00632, a *P. chrysogenum* F.00814. és a *T. viride* F.00795 törzsek azonos arányú társítása kiemelkedően nagy szénhidrát konverziót eredményez (416 mg/g), az elméleti hozamnak 50 %-a oldatba került. A továbbiakban a búzakarpából kinyerhető szénhidráttartalom növeléséhez a konzorcium bontási mechanizmusát meghatározó környezeti tényezőket vizsgáltam. A működési paraméterek optimalizálásával 67 %-os (588 mg/g sz. búzakarpa) biokonverziós hatékonyságot értem el 3 napos előkezelést követően: 30 °C-on, pH=5,0 értéken, 10^7 konídium/g sz.a (megoszlása: 60 % *A. niger* F.00632, 25 % *P. chrysogenum* F.00814 és 15 % *T. viride* F.00795) inokulálási konídium szám, és kontrollált nedvességtartalom (citrát-foszfát puffer és búzakarpa 5:1 arányban) mellett.

A biológiailag előkezelt búzakarpa enzimes bonthatóságának vizsgálatánál megállapítottam, hogy az általam használt ipari enzimek készítmények (celluláz, cellobiáz és

xilanáz) dózisának növelése 55 °C-on, pH=5,5 értéken, 220 rpm rázatási sebességen 24 órás reakciót követően kedvezően hatott a szénhidrátok monomerekké történő bontására. Meghatároztam, hogy az enzimes cefrézésnél a celluláz (2100 U/g), a cellobiáz (780 U/g) és a xilanáz (7000 U/g) enzimkeverékként való alkalmazásával technológiai szempontból ígéretes glükóz hozam, az elméleti 53 %-a (454,5 mg/g búzakorpa) érhető el.

A továbbiakban feltérképeztem néhány etanol termelő mikroorganizmus szénhidrát hasznosítását és erjesztési tevékenységét búzakorpa hidrolizátumokon. A vizsgált törzsek között a szárított *Saccharomyces cerevisiae* és a *Kluyveromyces marxianus* Y.00959 élesztő törzs, valamint a *Zymomonas mobilis* subsp. *mobilis* B.01327^T baktérium törzs az enzimesen nem kezelt cefrék (5-7 m/v % redukáló cukortartalom) erjesztésével hasonló mértékű, 2,4 (v/v) % és 2,8 (v/v) % közötti, etanol termelést mutatott 30 °C-on. A vizsgált törzseknél a baktérium nagyobb glükóz toleranciát mutatott az enzimesen kezelt cefrék esetén. E baktériummal a 15-20 (m/v) % cefrékben 4,6 (v/v) % és 5,1 (v/v) % közötti etanol koncentrációkat mértem. A ko-fermentációs kísérletek eredményeként meghatároztam, hogy a két élesztő szimultán alkalmazása és emellett az időben eltolva rátáplált baktérium kultúra intenzívebb erjesztési dinamikát biztosít. Ezen erjesztési technikával sikerült elérnem 7,6 % (v/v)-os etanol tartalmat, továbbá a cefrékben visszamaradt erjeszthető cukrok mennyisége is lényegesen csökkent.

A papírhulladékok etanol célú hasznosításának modellezése

A papírhulladékok minél hatásosabb tisztítása (festékmentesítés) érdekében különböző előkészítési műveleteket teszteltem. A technikák közül kedvezőbb rosttisztulást értem el alkoholos flotálással, a mosási és besugárzásos technikákkal szemben, ami az enzimes konverzió hatáskörében is mutatkozott. Eredményeim arra mutattak rá, hogy a szerves oldószerként etanol alkalmazása a festékmentesítés hatékonyságát 25 % (v/v) koncentrációban már jelentősen növelte. Meghatároztam az alkoholos flotációs cella működési paramétereit rostsuszpenzió esetén: 1 % (m/v) rost tartalom, 25 % (v/v) etanol koncentráció 50 °C és 30 perc. Az adszorpciós technikák körében a kitozán biopolimer, valamint annak két módosított változata: a glutáraldehiddel térhálósított kitozán és a Ca-alginát gélyöngyökön rögzített kitozán egyaránt mutatott adszorpciós tulajdonságot modell festék oldatokban (100 ppm), azonban a vizsgálati körülmények között eltérő stabilitással voltak a Carbon black színező pigmentek megkötése iránt. A működési paraméterek optimalizálásával meghatároztam, hogy a Ca-alginát gélyöngyökön rögzített kitozán igen hatásos (80-86 %) megkötést eredményez 1,5 g dózisban az alábbi paraméterek között: 10 % (m/v) rost tartalom, 30-35 °C, pH=6-6,5, 220

rpm rázatási sebesség és 30 perc tartózkodási időtartam. Ezen adszorpciós technikát adaptálva a papír rostok előkezeléséhez megállapítottam, hogy a rostsuszpenzió 10 %-ával azonos bioszorbens dózis használata mellett ugyanazon festékanyag 86 % hatékonysággal távolítható el.

Az előkezelt rostsuszpenzió enzimes hidrolízisének a celluláz (2100 U/g) és amiloglükozidáz (320 U/g) enzimkeverékként történő alkalmazásával a flotációs technika esetén 21 % és 56 % közötti szénhidrát hozamot (a glükóz hozam 16 % és 33 % közötti), az bioszorbens alkalmazása esetén pedig 65 %-os szénhidrát hozamot értem el 55 °C-on, pH=5,5 értéken, 220 rpm rázatási sebességen 24 órát követően.

Az erjesztési kísérleteknél az élesztők etanol produktivitását elkülönítet, hagyományos alkoholos erjesztéssel vizsgáltam. A vizsgált élesztők esetén a szárított *Saccharomyces cerevisiae* élesztő kismértékben több etanolt termelt újságpapír keverék, valamint a kontrollként használt irodai papír hidrolizátumokon is, mint a *Lanchancea* élesztő törzsek. Ezen élesztő alkalmazásával összehasonlítottam két erjesztési technikának, az elkülönített etanolfermentációnak (ShF), valamint a szimultán cukrosítási és erjesztési technikának (SSF) a hatékonyságát is. Az etanoltermelés egyik esetben sem érte el a gazdaságos szintet. A ko-fermentációs erjesztésekkel a cukrok hasznosítását részben sikerült növelnem, azonban az etanol hozam az amúgy is alacsony glükóz koncentráció miatt igen csekély növekedést mutatott. Az etanol koncentráció mind a szárított élesztő és a *Lanchancea thermotolerans* Y.00775 élesztő törzs, mind a szárított élesztő és a *Zymomonas mobilis* subsp. *mobilis* B.01327^T törzs azonos arányú (1:1) társításával újságpapír keverék hidrolizátumon 1,2 (v/v) % és 1,3 (v/v) %, irodai papír hidrolizátumon pedig 2,2 (v/v) % és 2,7 (v/v) % etanolt termelt.

Összességében elmondható, hogy a kutatómunkám során elért eredmények ígéretesek, azok kellő ismeretet szolgáltatnak a lignocellulózt tartalmazó növényi maradványok etanol célú hasznosításának további mérnöki fejlesztéséhez.

4 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Új mikrobiális konzorciumot alakítottam ki a komposztból izolálható korhadást okozó, mezofil gombákból az *Aspergillus niger* F.00632, a *Penicillium chrysogenum* F.00814 és a *Trichoderma viride* F.00795 törzs társításával. Megállapítottam, hogy az általam kialakított konzorcium alkalmas a búzakarpa szubsztrátum biológiai előkezeléséhez.
2. Optimáltam az általam kialakított gomba konzorcium működését a búzakarpa szubsztrátumnál a maximális oldatba vihető szénhidrát tartalomra törekedve. Az optimális biológiai előkezelési paraméterei a következők: 30 °C, 5:1 a búzakarpa és a citrát-foszfát puffer aránya, pH=5,0, 107 konídium/g szubsztrátum (megoszlása: 60 % *Aspergillus niger* F.00632 törzs, 25 % *Penicillium chrysogenum* F.00814 törzs és 15 % *Trichoderma viride* F.00795 törzs). Ebben az esetben akár 3 napos időtartam alatt a búzakarpanyában lévő szénhidrát tartalom 63 % -a átvihető az oldatba.
3. Kísérleti úton bizonyítottam, hogy a biológiailag előkezelt búzakarpanyánál az egy lépéses enzimes szénhidrát konverzió kereskedelmi celluláz (*T. reesei*, 2100 U/g), cellobiáz (*A. niger*, 780 U/g) és xilanáz (*T. lanuginosus*, 7000 U/g) enzimek készítmények (55 °C, pH=5,5, 220 rpm rázatási sebesség, 24 óra) alkalmazásával a glükóz kihozatal több, mint négyszeresére is növelhető.
4. Bebizonyítottam, hogy a Ca-alginát gélyöngyökön rögzített kitozán alkalmas a nyomtatott papíron lévő festékanyagok adszorpciójára. Carbon black festék pigmenteket tartalmazó modell oldat (100 ppm) alkalmazásával meghatároztam a maximális adszorpciós kapacitását és az optimális technológiai paramétereket, amelyek a következők: 1,5 g bioszorbens, pH=6-6,5, 30-35 °C, 30 perc tartózkodási idő. E módosított kitozánnal akár 80-85 % rögzítési hatékonyság is elérhető.
5. Új cefrészési technológiát dolgoztam ki a papír hulladékok etanol célú hasznosítására. A Ca-alginát gyöngyökön rögzített kitozánnal történő előkezelést követő enzimes hidrolízisnél a kereskedelmi celluláz (*T. reesei*, 2100 U/g) és amiloglükozidáz (*A. niger*, 320 U/g) enzimek készítmények alkalmazásával (50 °C, pH=5,5, 24 óra) az elméleti szénhidráthozamnak a 65 % -a érhető el.

6. Új ko-fermentációs technológiát dolgoztam ki a biológiailag előkezelt búzaborpa hidrolizátum alkoholos erjesztésére. Az etanolfermentáció a szárított *Saccharomyces cerevisiae* (Levuline Fb) és *Kluyveromyces marxianus* Y.00959 élesztő 1:1 arányával (10 %, m/v) indítandó, majd a 3. napon célszerű a *Zymomonas mobilis* subsp. *mobilis* baktérium kultúra (10 %, m/v) inokulálása. E technikával 20 % (m/v) redukáló cukortartalom esetén 7,6 % (v/v) etanol koncentráció érhető el, 30 °C-on, 7 napos erjesztést követően.

5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A lignocellulóz-alapú biomassza hasznosítása ma még nem érte le azt a szintet, amit a környezetvédelmi érdekek kívánnak. A lignocellulózok biofinomításával, az összetevők frakcionálását követően, különböző bioenergetikai termékek állíthatók elő. A kutatók és a gyártók számára az értéknövelt hasznosítási technológiák kivitelezése során komoly problémát okoz a növényi maradványok előkezelése, ami a technológia költségeinek akár 40 %-át is kiteheti. Az előkezelés azonban nem csak e szempontból kritikus művelet, az etanol célú kutatások is igazolták, hogy a növényi szerkezet feltárásával az elméleti cukorhozam akár 90 %-a, míg annak elvetésével kevesebb, mint 20 %-a nyerhető ki, ami a későbbi etanol termelés hatékonyságára igen nagy hatással van.

A kutatómunkám során két, összetételükben eltérő, az etanol előállítás modellezéséhez kiváló bázist biztosító növényi eredetű maradványon, a búzakarván és papír-alapú hulladékon követtem le a nélkülözhetetlen előkezelési műveletek mellett, az enzimes cukrosítás és etanolfermentáció lépését is. Az előkezelési technikáknál mind a két esetben sikerült hatásos módszert kivitelezni. A búzakarva mikrobiális szerkezet bontásánál kiválasztott, tudatosan kialakított 3 tagú konzorcium esetén további kutatási lehetőségnek tartanám más, mezofil, valamint termofil (és termotoleráns) szervezetek (gombák, baktériumok) szelektálását és a kölcsönhatások vizsgálatát, valamint más szerves anyagok (búzaszalma, kukoricacsutka stb.) lebontásának teljes képezését laboratóriumi szinten. A papír minták esetén nem a szénhidrátok összetett és ellenálló szerkezetének lazítása okozott megoldandó problémát, hanem a növényi rostokon, illetve azokban lévő színezőanyagok és egyéb adalékanyagok eltávolítása. E kísérleteim során elsősorban az alkoholos flotálás, valamint a Ca-alginát gélyöngyökön rögzített kitozán bioszorbens alkalmazása bizonyult sikeresnek. Az adhéziós kötődésen alapuló technikák esetén a környezeti paraméterek változtatása viszonylag könnyen gyengítette a kötéseket (deszorpció), amit további fejlesztések tervezéséhez ad lehetőséget.

Az enzimes szénhidrát konverzió során sikerült mindkét esetben az erjeszhető cukor hozamot kedvezően növelni. Azonban a hidrolizátumokban jelentős mennyiségi polimerek és oligomerek maradtak, ami kezelhető lehetne további hidrolitikus enzimek alkalmazásával. Feltételezhetően, a lignin jelenléte is csökkenthette az enzimek aktív kapcsolatát a szénhidrát molekulákkal, ami az előkezelés során a lignin elemésztésével, valamint lignint bontó, oxidatív enzimek használata mellett mérsékelhető lenne. Az etanolfermentáció, a hidrolizátum típusától, összetételétől, valamint az erjesztési technikától függően eltérő etanol hozamokat eredményezett. E kísérleteim során a búzakarva hidrolizátum esetén sikerült elérnem a már

gazdaságosnak tekinthető etanol koncentrációt, azonban a fermentlevek szénhidrát tartalma jelentős maradt. Hasonlóan alakult a papír minták esetén is a nem erjesztett szénhidrát tartalom, emellett az el nem távolított színezék, illetve az egyéb komponensek az etanol-termelő mikroorganizmusok erjesztési hatékonyságát visszaszorították. Ennek megoldásaként az előkezelt minták szeparálása, valamint a tisztítási technikák (meglévők és újak) fejlesztése javasolt.

6 ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

Tudományos folyóiratok közleményei

- Kálmán Dénes, **Csilla Farkas**, Ágoston Hoschke, Judit M. Rezessy-Szabó, Quang D. Nguyen (2013): Bioethanol fermentation of Jerusalem artichoke using mixed culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces marxianus*. *Acta Alimentaria* 42: 10-18.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/AAlim.42.2013.Suppl.2>. **IF: 0,384**
- Csilla Farkas**, Judit M. Rezessy-Szabó, Vijai Kumar Gupta, Duy H. Truong, László Friedrich, József Felföldi, Quang D. Nguyen (2019): Microbial saccharification of wheat bran for bioethanol fermentation. *Journal of Cleaner Production* 240: 118289.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118269> **IF: 6,395**
- Csilla Farkas**, Judit M. Rezessy-Szabó, Vijai Kumar Gupta, Erika Bujna, Olivia Csernus, Vuong D. Nguyen, Abd El-Latif Hesham, Anthonia O'Donovan, Quang D. Nguyen (2019): Chitosan-based biopolymers as deinking agents in pretreatment process of printed paper and ethanol fermentation of its hydrolysate. *Waste Management* (bírálat alatt)
- Csilla Farkas**, Judit M. Rezessy-Szabó, Erika Bujna, Tuan M. Pham, Klára Pásztor-Huszár, László Friedrich, Rajeev Bhat, Quang D. Nguyen (2019): Batch and fed-batch ethanol fermentation of cheese-whey powder with mixed cultures of different yeasts. *Journal of Cleaner Production* (bírálat alatt)

Nemzetközi konferenciák és kiadványaik

- Farkas Csilla**, Csernyák Ferenc, Pál Bence, Óvári Gergő, Rezessyné Szabó Judit, Nguyen Duc Quang: Bioethanol - Mezőgazdasági és ipari hulladékok energetikai célú hasznosítása. XX. Jubileumi Nemzetközi Környezetvédelmi és Vidékfejlesztési Diákkonferencia Szolnoki Főiskola, Szolnok, 2014. szeptember 26-27.
- Csilla Farkas**, Bence Pál, Gergő Óvári, Judit M. Rezessy-Szabó, Quang Duc Nguyen: Effects of enzymatic pretreatment on alcoholic fermentation of waste paper. *23rd European Biomass Conference and Exhibition*, Vienna, Austria, 2015. június 1-4.
- Csilla Farkas**, Anikó Reinberger, Judit M. Rezessy-Szabó, Ágoston Hoschke, Quang D. Nguyen: Screening fungal strains for biological pretreatment of wheat bran. *23rd European Biomass Conference and Exhibition*, Vienna, Austria, 2015. június 1-4.
- Csilla Farkas**, Judit M. Rezessy-Szabó, Quang Duc Nguyen: Alcoholic fermentation of enzymatic hydrolysed waste paper with mono- and co-culture of yeasts and bacteria. *Food Science Conference*, Szent István Egyetem, Budapest, 2015. november 18-19.
- Csilla Farkas**, Judit M. Rezessy-Szabó, Quang Duc Nguyen: Effect of fungal multi-cultures on biological pretreatment of wheat bran. *Food Science Conference*, Szent István Egyetem, Budapest, 2015. november 18-19.
- Csilla Farkas**, Judit M. Rezessy-Szabó, Flóra Sebők, Csaba Dobolyi, Quang D. Nguyen: Effects of new thermophilic fungal isolates on bioconversion and saccharification of some lignocellulosic biomasses. *EuroFoodChem XIX Conference*, Szent István Egyetem, Budapest, 2017. október 4-6.

Hazai konferenciák és kiadványaik

- Farkas Csilla**, Rezessyné Szabó Judit, Nguyen Duc Quang: Biodegradációs modell kísérletek a lignocellulóz tartalmú mezőgazdasági melléktermékek kezelésére különböző penészgomba törzsek alkalmazásával. *Fiatal Biotechnológusok II. Országos Konferenciája* „FIBOK 2016”, Szent István Egyetem, Gödöllő, 2016. március 21-22.
- Farkas Csilla**, Rezessyné Szabó Judit, Nguyen Duc Quang: Búzakorpa szilárd fázisú előkezelése különböző fonalas gombák alkalmazásával. *Műszaki Kémia Napok*, Pannon Egyetem, Veszprém, 2016. április 28.
- Farkas Csilla**, Kolpaszky Dániel, Rezessyné Szabó Judit, Nguyen Duc Quang: Biodegradációs modell kísérletek lignocellulóz alapú biomassza kezelésére fonalas gomba multikultúrák alkalmazásával. Magyar Mikrobiológiai Társaság 2016. évi Nagygyűlése és XII. Fermentációs Kollokvium, Keszthely, 2016. október 19-21.
- Farkas Csilla**: Gombakonzorciumok jelentősége a lignocellulóz tartalmú nyersanyagok biológiai előkezelésére. MTA Kémiai Osztály, Élelmiszer-tudományi Tudományos Bizottság, *Élelmiszer-biotechnológia Munkabizottság*, Szent István Egyetem, Budapest, 2016. november 2.
- Balla Noémi Szonja, **Farkas Csilla**, Nguyen Duc Quang: Flotációs eljárás hatékonyságának fokozása a nyomtatott papír festékanyag tartalmának eltávolítására. *Műszaki Kémia Napok*, Pannon Egyetem, Veszprém, 2017. április 25-27.
- Lesták Lea, **Farkas Csilla**, Rezessyné Szabó Judit, Nguyen Duc Quang: Modell kísérletek a lézernyomtatott papír festékanyag tartalmának eltávolítására kitozán biopolimer alkalmazásával. *Műszaki Kémia Napok*, Pannon Egyetem, Veszprém, 2017. április 25-27.
- Puhl Dóra, **Farkas Csilla**, Rezessyné Szabó Judit, Nguyen Duc Quang: Biológiai úton előkezelt búzakorpa alkoholos erjesztése mono- és vegyes kultúrák alkalmazásával. *Műszaki Kémia Napok*, Pannon Egyetem, Veszprém, 2017. április 25-27.
- Farkas Csilla** Cellulóz tartalmú növényi anyagok biológiai előkezelése és etanol célú hasznosítása. „SZIE Kiváló Tehetségei” Konferencia, 13. SZEKCIÓ: ÉTK (doktori képzés, doktorjelölt, posztdoktor I-II.), Szent István Egyetem, Budapest, 2018. február 9.