



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Fizikai Kémia és Anyagtudományi Tanszék
Műanyag- és Gumiipari Laboratórium

TEXTIL BIOTECHNOLÓGIA:
ENZIMEK HATÁSA A CELLULÓZ ALAPÚ SZÁLASANYAGOK
TULAJDONSÁGAIRA

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Tézisfüzet

Írta: Koczkáné Csiszár Emília

2018

1 BEVEZETÉS

Az elmúlt időszakban az ún. fehér biotechnológia térhódítása, vagyis a hagyományos technológiák biotechnológiai úton történő megvalósítása figyelhető meg számos iparágban. A kilencvenes évek közepén a textilkikészítésben is hasonló változásokat indított el a környezetbarát technológiák, valamint az új és szokatlan tulajdonságú textil termékek iránt megnövekedett társadalmi és fogyasztói igény. Ettől az időszaktól kezdve beszélhetünk textil biotechnológiáról, ami a vegyszeres textilkikészítési folyamatok helyettesítésére alkalmas enzimkatalizált folyamatokat vizsgálja. Az elmúlt két évtizedben a textil biotechnológia volt a textilipari kutatás legdinamikusabban fejlődő területe és ez volt a mi fő kutatási területünk is. A textil biotechnológia új szemléletet kínált a hagyományos, víz-, vegyszer- és energia-intenzív kezelésekkel szemben, hiszen az enzimek enyhe körülmények között alkalmazhatók és a kísérőanyagokra specifikusan hatnak. Kezdetben olyan alapvető kérdésre kerestük a választ, hogy milyen aktivitású enzimekkel módosíthatók a feldolgozás és felhasználás szempontjából fontos szál tulajdonságok. Később az enzimes folyamatok hatékonyságának a növelésével foglalkoztunk.

A legfontosabb természetes szál a pamut, ami a világ szálanyag fogyasztásának közel 25 %-át teszi ki. Más cellulóz alapú szálanyagok (pl. len, kender) részesedése kisebb 1 %-nál. A növényi eredetű szálanyagok polimer alkotói és kismolekulás természetes kísérőanyagai ideális szubsztrátumok az enzimek számára. A kilencvenes évek második felében a világon az elsők között kezdtük vizsgálni a cellulóz alapú szálanyagok (pamut és len) bioelőkészítését és biofehérítését, ami a nem-cellulóz kísérőanyagok (viaszok, pektinek, színes komponensek, lignin-tartalmú kísérőanyagok és pamutmaghéj maradványok) enzimekkel segített eltávolítását, és ennek révén a hidofil szálfelület kialakítását és a megfelelő fehérség elérését jelenti. Foglalkoztunk a cellulóz alapú szálanyagok biokikészítésével is, és enzimes kezeléssel módosítottuk például a lenrost kémiai összetételét és morfológiáját, ami a végső kelmetulajdonságok jelentős változását eredményezte. A kétezres évek elejére a bioelőkészítés és biokikészítés területén az alapkutatástól eljutottunk az ipari megvalósításig és a kutatási eredményeinket sikeresen bevezetett üzemi technológiák is megerősítették.

A kutatómunka során főként kereskedelmi forgalomban kapható hidrolitikus enzimeket (pektináz, xilanáz, celluláz) alkalmaztunk, továbbá szilárd fázisú fermentációval (SSF) nyers enzimek készítményeket állítottunk elő egy adott cél megvalósítására. Egyedülálló megoldásnak bizonyult, hogy a fermentáció során a szénforrás, valamint az enzimkatalizált reakció szubsztrátuma azonos volt. A pamut és a len lignin-tartalmú kísérőanyagainak a hatékony

degradációjához ugyanis pamutmaghéj hulladékon, illetve nyers lenroston, mint szénforráson állítottunk elő hidrolitikus és oxidatív aktivitással rendelkező enzimkomplexeket.

A közelmúltban az időigényes enzimes folyamatok hatékonyságát kisfrekvenciás ultrahangos besugárzással, valamint atmoszférikus hidegplazma előkezeléssel növeltük. A kisfrekvenciás ultrahang által keltett kavitáció a fázis áramlási viszonyainak a megváltoztatásával, az anyagszállítás fokozásával, valamint a részecskeméret csökkentésével; az atmoszférikus hidegplazma kezelés pedig a szálfelület aktiválásával, részleges degradációjával, valamint a felületen lévő polimer alkotók hozzáférhetőségének a növelésével járult hozzá a heterogén fázisú enzimkatalizált folyamatok eredményességének a növeléséhez.

Az ultrahang alkalmazása során szerzett ismeretek két új és ígéretes kutatási területet nyitottak meg számunkra. A világon elsőként alkalmaztuk a kisfrekvenciás ultrahangot a szilárd fázisú fermentációval termelt nyers enzimek kinyerésének a fokozására. Az enzimeket ezt követően a bioelőkészítésben és a biofehérítésben használtuk. Emellett cellulóz nanokristályokat (CNC) állítottunk elő cellulóz alapú szálanyagokból, és bizonyítottuk, hogy a kavitáció nemcsak az egyedi nanorészecskék méretét és az aggregáció mértékét befolyásolja, hanem hat a nanokristályos cellulóz szuszpenziók és az azokból készült termékek (pl. filmek) tulajdonságaira is. A nanokristályos cellulóz textil hulladékból is előállítható, így a cellulóz alapú textíliák életciklust követő felhasználása a nanokristályos cellulóz alapanyagaként a textil hulladékok egy ígéretes újrahasznosítását jelentheti a közeljövőben.

Kutatómunkámban mindvégig a cellulóz alapú szálanyagok kikészítésével foglalkoztam. Ez volt a témája a műszaki doktori (Lignin szerepe a pamut lúgos főzésében, BME, 1989) és a kandidátusi értekezésemnek (Natív cellulóz alapú szálanyagok hatékony előkészítése, 1998) is. Több mint húsz éve foglalkozom enzimes textiltechnológiákkal. Kutatómunkám felhasználás orientált alapkutatás, amelyben komplex módon vizsgáltam a cellulóz alapú szálanyagok heterogén fázisú enzimkatalizált folyamatait, új, a textiltechnológiákban eddig nem használt biotechnológiai, fizikai, kémiai és anyagtudományi módszerek alkalmazásával. Értelmeztem a lejátszódó folyamatok és a szál tulajdonságok széleskörű jellemzése alapján levont anyagtudományi következtetések textiltechnológiai következményeit. A tradicionálistól eltérő módszereket és az anyagtudományi vizsgálatokat olyan területen alkalmaztam, ahol hosszú időn keresztül tapasztalati úton alakultak ki és fejlődtek az eljárások, a lejátszódó folyamatok és a szál tulajdonságok mélyebb ismerete nélkül. Doktori értekezésemben a textil biotechnológia területén elért eredményeimet foglaltam össze.

2 A KUTATÓMUNKA CÉLJA ÉS LEGFONTOSABB TERÜLETEI

A kutatómunka során tanulmányoztuk a cellulóz alapú szálanyagok (főként pamut és len) szerkezeti polimerjeinek (cellulóz, hemicellulózok, lignin) és egyéb kísérőanyagainak (pektin, viaszok, keményítő anyag) enzimkatalizált degradációs folyamatait; vizsgáltuk a kisfrekvenciás ultrahangos besugárzás és az atmoszférikus hidegplazma kezelés hatását a heterogén fázisú enzimes folyamatok hatékonyságára. Anyagtudományi vizsgálatokkal széleskörűen jellemeztük a szálanyagok felületi és tömbi tulajdonságaiban bekövetkező változásokat, a feldolgozás és felhasználás szempontjából fontos tulajdonságok meghatározására pedig klasszikus vizsgálati módszereket alkalmaztunk. A kutatómunka öt területre bontható és az alább felsorolt kérdések megválaszolására koncentrált:

I. **Bioelőkészítés:** Különböző aktivitású hidrolitikus enzimeket alkalmaztunk a szálfelület nem-cellulóz komponenseinek a degradációja és a hidrofil szálfelület létrehozása céljából, továbbá a pamutmaghéj lignocellulóz rendszerének a bontására. A bioelőkészítés hatékonyságának növelésére komplexképzőt adtunk az enzimes kezelőoldathoz. A kutatómunka során a következő kérdésekre kerestük a választ:

- milyen enzimek eredményesek a hidrofil szálfelület kialakításában?
- milyen enzimek hatnak a pamut maghéj szennyeződésére; milyen mértékű maghéjdegradációt eredményeznek, és hogyan befolyásolják az enzimes kezelést követő vegyszeres folyamatban a maghéjdegradációt?
- hogyan hat az EDTA komplexképző a pamut és a len nem-cellulóz kísérőanyagainak az enzimkatalizált hidrolízisére?
- befolyásolja-e az EDTA komplexképző a pektináz és xilanáz enzimek aktivitását?
- hogyan változnak a szálfelületi jellemzők és a tömbi tulajdonságok?
- hogyan módosulnak a technológiai jellemzők: a fehérség és fehérlíthatóság, valamint a színezhetőség?

II. **Biofehérítés:** A szálanyagok színes – lignin-tartalmú – kísérőanyagai a bioelőkészítésben hatékony hidrolitikus enzimekkel nem degradálhatók. Eltávolításuk azonban elősegíthető xilanáz enzimes előkezeléssel, a degradációjuk pedig oxidatív enzimekkel katalizálható. A kutatómunka során egyrészt ipari xilanáz enzimet alkalmaztunk, másrészt szilárd fázisú fermentációval állítottunk elő nyers enzimeket. Mivel a szilárd fázisú fermentációban a szilárd szubsztrátum, mint szénforrás kémiai összetétele befolyásolja a termelt enzimek aktivitását, ezért ebben a kísérletsorozatban pamutmaghéj hulladék, valamint nyers lenrost volt a szilárd szubsztrátum. A hidrolitikus és oxidatív aktivitással rendelkező nyers enzimeket aztán a pamutszöveten lévő maghéj szennyezés degradációjára, valamint a

nyers len bioelőkészítésében alkalmaztuk. A kutatómunka során arra a kérdésre kerestük a választ, hogy:

- a xilanáz enzimmel végzett előkezelés, mint előfehérítés befolyásolja-e a pamut és a len lignin-tartalmú kísérőanyagainak a degradációját és eltávolítását?
- a szilárd fázisú fermentációval előállított, hidrolitikus és oxidatív aktivitással rendelkező nyers enzimek hatékonyak-e a pamutmaghéj degradációjában és a len lignin-tartalmú kísérőanyagainak az eltávolításában?
- hogyan hatnak a szilárd fázisú fermentációval előállított enzimek a szálanyag színére és befolyásolják-e a fehéríthetőségét?

III. **Biokikészítés:** A biokikészítés során a len és len-tartalmú szövetek fogásjavítása volt a cél, amelyet kombinált enzimes-vegyszeres, valamint intenzív mechanikai kezeléssel értünk el. A kutatómunka során arra a kérdésre kerestük a választ, hogy:

- a celluláz-hemicelluláz enzimmel végzett kezeléssel milyen – a végső felhasználás szempontjából fontos – új tulajdonságok alakíthatók ki, és milyen, már meglévő tulajdonság módosítható?
- a kombinált technológia egyes részfolyamatai milyen mértékben járulnak hozzá a végső szövet tulajdonságokhoz?
- a szövet szálanyag összetétele hogyan befolyásolja a tulajdonságok változását?

IV. **Hatékonyaságnövelés (Bioelőkészítés, biokikészítés) – ultrahang, atmoszférikus hidegplazma:** A heterogén fázisú enzimkatalizált folyamatok hatékonyságának a növelésére kisfrekvenciás ultrahangos besugárzást és atmoszférikus hidegplazma kezelést alkalmaztunk. Az 'ultrahang-enzim', az 'ultrahang-szubsztrátum', valamint az 'ultrahang-enzim-szubsztrátum' kölcsönhatásokat a cellulóz-celluláz reakcióban jellemeztük. A plazmával végzett kísérletek során annak a felderítésére törekedtünk, hogy milyen szálfelületi változások befolyásolják a plazmakezelés után alkalmazott enzimes kezelést. A kutatómunka elsősorban a következő kérdések megválaszolását célozta:

- milyen hatást gyakorol a kisfrekvenciás ultrahang az ipari celluláz enzim aktivitására, a szubsztrátum részecskeméretére és a heterogén fázisú enzimes folyamat hatékonyságára?
- hogyan alakul a hagyományos módszerekkel kevertetett/rázott rendszerben és az ultrahangos besugárzás mellett végrehajtott enzimes folyamatok során a termékképződés sebessége, és hogyan befolyásolja ezt a cellulóz szubsztrátum formája és a hangforráshoz viszonyított helyzete?
- hogyan módosítja az atmoszférikus hidegplazma a szálfelületi tulajdonságokat és milyen az elért hatás tartóssága?

- hogyan változik az atmoszférikus hidegplazma kezelés hatására a szál- és fonalfelület polimer alkotóinak a hozzáférhetősége az enzimek (celluláz, pektináz és amiláz) számára, és ez hogyan befolyásolja a szálanyagok textil biotechnológiai folyamatainak (biokikészítés, bioelőkészítés, enzimes írtelenítés) a lejátszódását?

V. **Legújabb kutatások – SSF, CNC:** A kismegnyújtásos ultrahangot két új, a textil biotechnológiától különböző területen is alkalmaztuk. A biofehérítési kísérletekhez kapcsolódó SSF során az ultrahangos térben zajló kavitációt a nyers enzimek kinyerésének a fokozására használtuk. Az 'ultrahang-szubsztrátum' kölcsönhatás tanulmányozása során szerzett ismereteinket felhasználva, az ultrahangos besugárzást a cellulóz nanorészecskék kinyerésének az elősegítésére és aggregációs hajlamának a csökkentésére alkalmaztuk. Mindkét kutatás kapcsolódik a jelen dolgozat témaköréhez, ugyanakkor más területen is hasznosítható eredményekkel szolgálhat. A kutatás során a következő kérdések megválaszolása volt a célunk:

- milyen hatást gyakorol az kismegnyújtásos ultrahang a szilárd fázisú fermentációval nyert nyers enzimek aktivitására?
- hogyan viszonyul egymáshoz a hagyományos módszerekkel és az ultrahangos besugárzással segített enzim-extrakció eredményessége?
- hogyan befolyásolja az ultrahangos besugárzás a kristályos nanocellulóz részecskeméretét, valamint a CNC-szuszpenziók és az azokból készült filmek tulajdonságait?

3 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

Nyers laza pamutot, len előfonalat, továbbá különböző kikészítési fokú pamut- és lenszövetet, féllen szövetet, valamint len-poliészter keverékszövetet vizsgáltunk. A pamut-maghéj degradációjának a tanulmányozásához a laza pamut mechanikai tisztításából származó tisztítási hulladékot használtuk.

A bioelőkészítés és biokikészítés kísérletek egy részéhez különböző enzimgyártó cégektől származó, savas, semleges vagy lúgos közegben aktív ipari enzimet (pektináz, celluláz, xilanáz, amiláz, lakkáz) használtunk. Az EDTA komplexképző enzimaktivitásra kifejtett hatásának a meghatározásához a hígított ipari pektináz és xilanáz enzimoldathoz EDTA-t adagoltunk széles koncentráció tartományban, és mértük a jellemző aktivitás értékeket az EDTA-koncentráció függvényében.

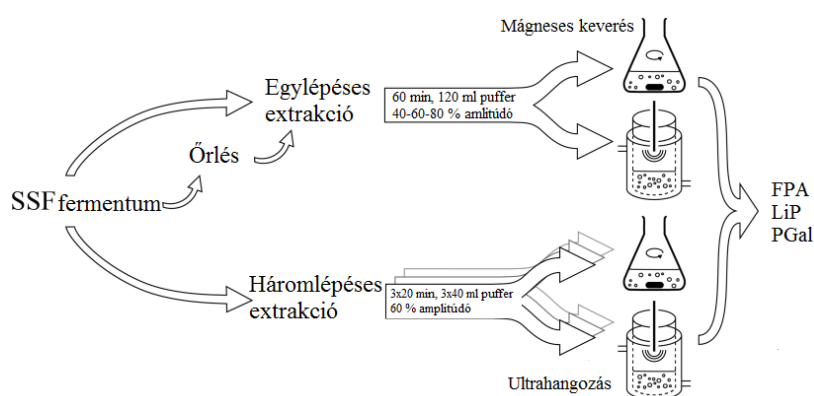
Pamutmaghéj hulladékon, valamint aprított nyers lenroston, mint táptalajon a BME ABÉT Tanszék törzsgyűjteményéből származó törzsekkel (*Aspergillus oryzae*, *Aspergillus giganteus*, *Phanerochaete chrysosporium*, *Trichoderma virens*), szilárd fázisú fermentációval állítottunk elő enzimeket. Az enzimek extrakcióját pufferrel szobahőmérsékleten, horizontális rázatással vagy ultrahangos besugárzás mellett vizsgáltuk. A felülúszóból enzimaktivitást mértünk. A nyers enzimoldatot, valamint a szilárd fermentumot a bioelőkészítés és biofehérítés kísérletekben használtuk.

A szálasanyagok enzimes kezelését az enzimek optimális pH és hőmérséklet tartományában, puffer oldatban végeztük. Vizsgáltuk az enzimkoncentráció, a kezelési idő, a rendszer mozgatása (pl. vertikális vagy horizontális rázás, mágneses keverés) és az enzimoldatba adagolt komplexképző hatását a szubsztrátum (szövet, pamutmaghéj) tulajdonságaira. A poliszacharidok enzimkatalizált hidrolízisét a felszabaduló redukáló cukor koncentrációval jellemeztük, amit di-nitro-szalicilsav reagenssel fotometriásan határoztunk meg. Az enzimes kezelést követően a szöveten visszamaradó keményítő mennyiségét a keményítő-jód kék színreakción alapuló teszttel minősítettük, a visszamaradó pektint pedig a megkötött Ruténium vörös bázikus színezék mennyisége alapján határoztuk meg. A szövet maghéjtartalmának a kvantitatív jellemzésére képanalízist alkalmaztunk.

A nyers, a bioelőkészített, valamint a hagyományos módon előkészített lenszövetek visszamaradó színes komponenseinek a mennyiségét a szövet hidrogén-peroxid fogyasztásával jellemeztük, amit jodometriás titrálással határoztunk meg. A bioelőkészített, valamint a bioelőkészített és fehérített szövet színezhetőségét reaktív színezékekkel vizsgáltuk, az értékeléshez pedig színmérést alkalmaztunk.

Az ultrahangos kísérletekhez bemezőfejes ultrahangos reaktort alkalmaztunk, és az enzimreakciót termosztálható kettősfalú üvegreaktorban végeztük. A plazmakezelést diffúziókoplanáris felületi akadálykísülés (DCSBD) típusú plazmareaktorral, levegő atmoszférában végeztük. Egy kísérletsorozatban parázskísülés (GD) plazmát alkalmaztunk levegő és argon atmoszférában.

Az őrölt lenrost szubsztátumon SSF-fel termelt nyers fermentumok ultrahanggal segített extrakcióját citrát pufferrel végeztük egy- és három-lépéses extrakciót alkalmazva. Vizsgáltuk a szilárd fermentumok őrlésének a hatását is az ultrahanggal segített egy-lépéses extrakció során. Az enzimkinyerés eredményességét a nyers enzimdát hidrolitikus és oxidatív enzimaktivitásával jellemeztük (1. ábra).



1. ábra. A szilárd fázisú fermentációval előállított enzimek ultrahanggal segített egy- és három-lépéses extrakciójának a vázlata

Mért aktivitások: FPA – szűrőpapír lebontó, LiP – lignin peroxidáz, PGal – poligalakturonáz

Golyósmalomban őrölt cellulóz forrásból (fehérített pamut, fehérített len, újrahasznált pamut) kénsavas hidrolízissel nanokristályos cellulózt állítottunk elő. A CNC szuszpenziót ultrahangoztuk, majd a szuszpenzióból öntéssel filmet készítettünk.

A szálanyagok enzimikus kezelése során a felületi és tömbi tulajdonságokban bekövetkező változásokat főként klasszikus textilvizsgálatokkal (pl. nedvesedőképeség, folyadék-szívás, pektin-tartalom, polimerizációs fok, hajlítási merevség, esés, szakítószilárdság, stb.) jellemeztük, amelyek alkalmasak a szálanyag fizikai, kémiai és viselési tulajdonságainak a meghatározására. Anyagtudományi vizsgálatokat (pl. FT-IR ATR, XRD, XPS, UV-VIS, SEM, TEM, AFM, IGC, PSA, stb.) alkalmaztunk a kémiai összetételben, a pórusszerkezetben, a kristályszerkezetben, valamint a szárfelületi tulajdonságokban az enzimikus és vegyszeres kezelés, valamint a plazmakezelés hatására bekövetkező változások követésére, továbbá a cellulóz nanokristályok, a vizes CNC szuszpenzió, valamint a CNC-filmek tulajdonságainak a jellemzésére.

4 ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatómunkánkban elsősorban a bioelőkészítésre és a biofehérítésre koncentráltunk, és célunk volt a természetes kísérőanyagok enzimkatalizált degradációja és eltávolítása révén jó nedvszívóképességű és megfelelő fehérségű szálanyag előállítása. Bizonyítottuk, hogy a xilanáz enzimek hatékonyak a bioelőkészítésben. Az elemi szál legkülső részének vázát egy cellulózból, hemicellulózokból és pektinekből felépülő hálós szerkezet képezi, amit egy amorf és változatos összetételű viaszos mátrix vesz körül. A polimer alkotók enzimkatalizált degradációja és eltávolítása a viaszos anyagok eltávolítását eredményezi a szálfelületről. Mivel a hemicellulózok döntően xilánok, a szakirodalomban javasolt celluláz és pektináz enzimeken kívül a xilanázokkal is jól nedvesedő szálfelület nyerhető. A pamutmaghéjban is a xilánok a legfontosabb hemicellulóz alkotók. A xilanázok egyrészt közvetlenül a xilán enzimkatalizált degradációja révén segítik a maghéjdegradációt, másrészt közvetett módon hatnak, és a lignin-szénhidrát komplex megbontásával lehetővé teszik a lignin kioldódását az enzimes kezelés után alkalmazott vegyszeres folyamatokban. A lignin eltávolítását a visszamaradó maghéj fragmentumok világosodása is bizonyítja. A folyamat hasonló a papíriparban alkalmazott xilanázos biofehérítéshez.

Hidrofil szálfelületet kaptunk a pektin enzimes degradációja révén is. A folyamatot részletesen vizsgálva megállapítottuk, hogy a savas pektin molekulák között keresztkötést létesítő kalcium-ionok komplexbe vitele (például EDTA-val) egy nyitottabb és az enzim számára hozzáférhetőbb szerkezetet eredményez. Az enzim-EDTA-szubsztrát rendszerben, az enzim és az EDTA szinergizmusa révén, az enzimkatalizált reakció is és a fémion-extrakció is eredményesebb. Feltételezésünk szerint a kalcium-ionok komplexálása révén kialakuló nyitott szerkezet a lenben is és a pamutmaghéjban is elősegíti az enzimek hozzáférhetőségét a szerkezeti polimerekhez, azaz a pektinhez, a xilánhoz és a cellulózhoz, és fokozza azok degradációját. Az eredmények azt is bizonyították, hogy a lignocellulózok (mint például a nyers len és a pamutmaghéj) egyes polimer alkotóinak a módosítása a többi polimer hozzáférhetőségét és reakcióképességét is módosítja. Bizonyítottuk azt is, hogy az EDTA nem módosítja a vizsgált ipari pektináz és xilanáz enzimek aktivitását.

A kétezres évek elejére nyilvánvalóvá vált, hogy a pamutmaghéjak nem megfelelő eltávolítása gátolja a bioelőkészítés széleskörű elterjedését. A bioelőkészítés során alkalmazott hidrolitikus enzimekkel ugyanis a pamutmaghéj lignin-holocellulóz rendszere csak részlegesen bontható. A lignin degradációja oxidatív enzimekkel katalizálható. Egy egyedülálló megoldást alkalmaztunk: szilárd fázisú fermentációval állítottunk elő enzimeket pamutmaghéj hulladékon, mint szénforráson, hogy elősegítsük szubsztrát-specifikus enzimkomplex

indukálódását, és ezáltal a pamut bioelőkészítésében eredményes lignin-bontó enzimek előállítását. A kiválasztott törzsek hidrolitikus (celluláz, xilanáz, pektináz) enzimeket, továbbá lakkázt és lignin peroxidázt termeltek. Az így nyert nyers enzimoldattal és magával a szilárd fermentummal végezve a bioelőkészítést, a szöveten lévő maghéjak mennyisége (terület és/vagy darabszám) a kiindulási érték 60 %-ára csökkent, ami megegyezik a hagyományos lúgos főzéssel elérhető maghéjdegradáció mértékével. A nyers hidrolitikus és oxidatív enzimek a len lignin-tartalmú kísérőanyagainak a bontásában és eltávolításában is hatékonyak bizonyultak.

A szál legkülső rétegében lévő nem-cellulóz kísérőanyagok eltávolítása révén módosultak a szálasanyagok felületi és tömbi tulajdonságai. Megváltozott a felület kémiai összetétele, csökkent a pamut hidrofób jellege, ami a felületi energia, és ezáltal a felületi szabadenergia diszperziós komponensének (γ_s^d) a növekedését okozta. A szálban visszamaradó pektin mennyisége, valamint az inverz gázkromatográfiával nyert eredményeink azt bizonyították, hogy a szálfelület egy részét a pektináz enzimes kezelést követően is viasz borítja. A viasz eltávolítása tehát csak részleges, de a mértéke elegendő ahhoz, hogy szálfelület jól nedvesedő legyen a kezelést követően. A színes kísérőanyagok eltávolítása is részleges, és emiatt a bioelőkészített szövet fehérsége nem éri el a lúgos főzöttét. Enyhe hidrogén-peroxidos fehéritéssel azonban a különböző módon előkészített szövetek közötti színekülönbség jelentősen csökkenthető. Az enzimmel kezelt szövet fehérithetősége ugyanis jobb, mint a hagyományosan főzött szöveté, ami az enzimes kezelés során kialakuló nyitott szálszerkezettel és a hidrogén-peroxid jobb hozzáférhetőségével magyarázható. A bioelőkészítés kisebb kísérőanyag eltávolítással eredményezett megfelelő tisztítást és nem okozott számottevő cellulóz degradációt és szakítószilárdság romlást.

A bioelőkészített pamutszövetek – oxidációs fehérités közbeiktatása nélkül – színezhettek reaktív színezékekkel. Az enzimmel és vegyszeresen előkészített, majd színezett szövetek között a színekülönbség, kis színezék koncentrációk esetén, az előkészített szövetek között meglévő színekülönbséggel arányos. Nagyobb színezék koncentrációknál, vagy enyhe hidrogén-peroxidos fehérités beiktatását követően azonban szabad szemmel már nem érzékelhető a színekülönbség a színezett szövetek között.

Enzimekatalizált folyamatokkal a felhasználó számára fontos végső szál tulajdonságok is módosíthatók. Kutatómunkánkban a len és len-tartalmú szövetek lágyítására egy enzimes kezelést is magában foglaló kombinált – enzimes, vegyszeres és mechanikai – folyamatot alkalmaztunk. Megállapítottuk, hogy az intenzív mechanikai hatással együtt alkalmazott celluláz-hemicelluláz enzimes kezelés javítja a szövet esését és fogását, és jelentősen módosítja a szövetszint. Az is nyilvánvalóvá vált, hogy a kombinált folyamatban a lenrost kevésbé

rugalmas fás alkotói kitörnek, a rostfelület fibrillálódásából származó elemi szálak pedig letörnek, jelentős tömegvesztéseget, továbbá a gyakorlatban még elfogadható mértékű szakítószilárdság romlást okozva. Kutatási eredményeink hozzájárultak egy új – és hosszú ideig sikeresen alkalmazott – ipari technológia kifejlesztéséhez.

Az elmúlt években végzett kutatásaink bizonyították, hogy a heterogén fázisú enzimkatalizált folyamatok eredményesebbek kisméretű ultrahangos besugárzás alkalmazásával. A szilárd felszín közelében szétropanó kavitációs buborékok extrém körülményeket teremtenek az enzimdátában, amelyek az enzimre is és a szubsztrátumra is hatnak, a folyadékfázisban pedig intenzív áramlásokat keltenek. Mindezek együttesen befolyásolják a heterogén fázisú enzimkatalizált folyamatok lefutását. Megvizsgáltuk az 'ultrahang-enzim' kölcsönhatást, és bizonyítottuk, hogy az ipari celluláz enzim szűrőpapír lebontó aktivitása akár 25 %-kal is csökkenhet az ultrahangos besugárzás intenzitásától függően. Sokkal ellenállóbbnak bizonyultak az ultrahangos besugárzással szemben az SSF-fel előállított enzimek. Az ultrahang a szilárd szubsztrátumra is hat és már rövid ultrahangos besugárzás is jelentősen csökkenti a részecskeméretet; a lenporét nagyobb mértékben, mint a pamutporé, ami első sorban a lenrost elemi szálakra bontásának (dezintegrálódásának) a következménye. Az ultrahang növeli a celluláz enzimmel végzett biokikészítés során a termékképződés sebességét. A bioelőkészítés során alkalmazott ultrahangos besugárzás hatására pedig fokozódik a természetes kísérőanyagok eltávolítása.

Atmoszférikus hidegplazma előkezeléssel is jelentősen befolyásolhatók a heterogén fázisú enzimes folyamatok, mivel a plazma módosítja a cellulóz alapú szálanyagok felületi tulajdonságait. Hat a nyers pamutszövet vetülék fonalait alkotó elemi szálak legkülső, viaszban és más nem-cellulóz kísérőanyagokban gazdag rétegére, valamint a láncfonalak felületén lévő keményítő irányagra. Megváltoztatja az eloszlásukat a szálfelületen, degradálja azokat és hozzájárul a részleges eltávolításukhoz. Az alkalmazott hidegplazma teljesítményétől és a kezelés időtartamától függően a szálfelület hidrofilitása jelentősen javul. Bizonyítottuk, hogy a szálfelületet borító viaszréteg eltávolítása vagy elvékonyítása következtében a felület polimer alkotói (pektinek, cellulóz) detektálhatóvá válnak. Celluláz enzimes reakcióval pedig azt bizonyítottuk, hogy a nyers pamut felületének eróziója megnöveli a felület cellulóz alkotóinak a hozzáférhetőségét az enzimek számára, és elősegíti az enzim-szubsztrát kölcsönhatás létrejöttét, ami előfeltétele az enzimkatalizált reakciónak. A plazmakezelés az enzimes irtelenítést is befolyásolja. Egyrészt növeli a szövetfelület hidrofilitását, javítja a nedvesedőképességet, és ezáltal növeli a keményítő irányag hozzáférhetőségét az enzim számára. Másrészt degradálja és részlegesen eltávolítja a keményítőt. Mindkét hatás hozzájárul az enzimes irtelenítés időtartamának a jelentős csökkentéséhez. Az argon atmoszférában végzett plazmakezelés eredményesebb a nyers lenszövet nedvesedőképességének a javításában, mint a

levegő-plazma. Kismértékben hatékonyabb a bioelőkészítés is az argon atmoszférában végrehajtott plazmakezelés után, mint levegő-plazmagáz alkalmazásakor.

Újabban az ultrahangos térben zajló kavitációt a textil biotechnológiától eltérő, de ahhoz kapcsolódó két kutatásban alkalmaztuk. Elsőként használtuk az ultrahangot a szilárd fázisú fermentációval előállított enzimek kinyerésére és ezzel rámutattunk az ultrahang egy új és ígéretes alkalmazására. Nyers lenroston termelt enzimek extrakcióját vizsgálva bizonyítottuk, hogy a lenrost felületén és belső pórusaiban megkötődött extracelluláris enzimek nagy hatékonysággal vihetők oldatba, és a nyers enzimoldatban – a hagyományos, rázatással végzett extrakcióhoz képest – többszörös enzimaktivitások mérhetők. Bizonyítottuk, hogy a nyers enzimek kinyerése tovább javítható a szilárd fermentumok őrlésével, valamint az extrakciós lépések számának a növelésével.

A kisméretű ultrahangos kezelésnek fontos szerepe van a nanokristályos cellulóz előállítása és a CNC-szuszpenziók felhasználása során is. A savas hidrolízist követően a nanokristályok a kavitáció révén könnyen elválaszthatók egymástól és kinyerhetők. A kavitáció segíti nanokristályok vizes suszpenziójában kialakuló aggregátumok egyedi nanorészecskékre bontását is, és ezáltal befolyásolja a CNC-szuszpenzióból előállított termékek (pl. vékony filmek) mechanikai és optikai tulajdonságait.

A szálanyagok felületi és tömbi tulajdonságainak a módosítását célzó enzimkatalizált folyamatokat világszerte intenzíven kutatták az elmúlt években, és mostanra – elsősorban a pamutkikészítésben – több enzimmel végzett folyamat ipari technológiává vált. Mára már kialakult az a biotechnológiai háttérpar is, amely egy adott feladat megvalósításához optimálisan alkalmazható enzimeket nagy mennyiségben és gazdaságosan képes előállítani. Az új technológiák környezetbarát megoldást kínálnak a végtermékek viselési, használati és esztétikai tulajdonságainak a módosítására. A vevői igényeknek megfelelő speciális tulajdonságok pedig hozzájárulnak a textíliák felhasználási körének a bővítéséhez.

5 TUDOMÁNYOS TÉZISEK*

- T1. Elsőként bizonyítottam, hogy a xilanáz enzimek hatékonyak a cellulóz alapú szálanyagok bioelőkészítésében. A xilanázok – hasonlóan a celluláz és pektináz enzimekhez – hidrofil szálfelületet és jó nedvszívóképességű szövetet eredményeznek, amelynek a színegyenletessége kiváló. Bizonyítottam azt is, hogy a xilanázok katalizálják a pamutmaghéj lignocellulóz rendszerében a xilánok hidrolitikus bontását és ezáltal elősegítik az enzimes kezelés után alkalmazott vegyszeres folyamatokban a lignin degradációját és eltávolítását. Ez utóbbit a visszamaradó pamutmaghéj világosodása is bizonyít. ^{1, 7}
- T2. Elsőként bizonyítottam, hogy a bioelőkészítés hatékonysága jelentősen növelhető az enzimoldathoz adagolt EDTA komplexképzővel. Bizonyítottam azt is, hogy az EDTA – a vizsgált koncentráció tartományban – nem csökkenti a hidrolitikus enzimek domináns (pektináz és xilanáz) aktivitásait. Az EDTA módosítja a szubsztrátum (lenszövet, pamutmaghéj) szerkezetét azáltal, hogy eltávolítja a pektin makromolekulák között keresztkötetést létesítő kalcium-ionokat. Az enzim és az EDTA szinergizmusa révén az enzim-EDTA-szubsztrátum rendszerben az enzimkatalizált reakció is és a fémion-extrakció is hatékonyabb. Igazoltam, hogy komplexképző alkalmazásakor a pamutmaghéj enzimes degradációja, valamint a len bioelőkészítése eredményesebb. ^{2, 5, 6}
- T3. Elsőként bizonyítottam, hogy a szilárd fázisú fermentációval pamutmaghéj és lenrost szubsztrátumokon előállított szubsztrát-specifikus, hidrolitikus és oxidatív aktivitással rendelkező enzim-komplexek hatékonyak a pamutmaghéj és a len lignin-tartalmú kísérőanyagainak a degradációjában. A nyers enzimoldattal végzett kezelés a szubsztrátumok (pamutmaghéj, szövet) jelentős világosodását eredményezi. Ez alapján tehát bizonyítottam azt is, hogy a szilárd fázisú fermentációval termelt enzimek eredményesen alkalmazhatók a kombinált bioelőkészítés-biofehérítés folyamatban. A nyers enzimoldat hidrolitikus enzimjei a hidrofil szálfelület kialakításában, az oxidatív enzimek pedig a biofehérítésben vesznek részt. Igazoltam, hogy a szilárd fázisú fermentációval nyert fermentumok közvetlenül is alkalmazhatók a bioelőkészítésben, és eredményességük felülmúlja az extrakcióval nyert nyers enzimoldatokét. ^{8, 9, 10}
- T4. Megállapítottam, hogy a hagyományos lúgos főzés során a pamutból eltávolított természetes kísérőanyagok mennyisége többszöröse a bioelőkészítéssel eltávolítható mennyiségnek. Anyagtudományi vizsgálatokkal bizonyítottam, hogy a bioelőkészítés során a pektin és a pamutviasz eltávolítása csak részleges, így a szálfelület egy részét a kezelést követően is viasz borítja. Csökken a szálfelület hidrofób jellege, ami a felületi energia és

* A tézispontok után megjelenő számok a tézis alapjául szolgáló és a 6. fejezetben felsorolt angol nyelvű publikációk sorszámát jelzik.

ezáltal a felületi szabadenergia diszperziós komponensének a növekedését eredményezi. A bioelőkészített pamut felületi szabadenergia értéke csak kismértékben marad el a lúgos főzöttétől és mindkét előkészítési mód jól nedvesedő szövetfelületet eredményez. A nyers pamuthoz képest jelentősebb elektrondonor jelleggel bír a viasz eltávolítását célzó enzimes és vegyszeres előkezelések után visszamaradó hidrophil szálfelület.^{11, 12, 14, 15, 22}

- T5. Megállapítottam, hogy a cellulóz alapú szálanyagok színes kísérőanyagainak az eltávolításában a lúgos főzés eredményesebb, mint a bioelőkészítés, így a bioelőkészített szövet fehérsége elmarad a hagyományosan főzött szövet fehérségétől. A lúgos főzés és a bioelőkészítés után a szövetek között mérhető színekülönbség enyhe hidrogén-peroxidos fehérités hatására jelentősen csökken, vagy eltűnik. Bizonyítottam, hogy a bioelőkészített lencszövet fehéreíthetősége jobb, mint a lúgos főzött szöveté. A pektin enzimes eltávolítása a szálfelületről és a sejtközi állományból ugyanis a pórusszerkezet változását okozza és az oxidációs fehérités vegyszereivel szemben megnövelt hozzáférhetőségű szálszerkezetet eredményez.^{3, 14}
- T6. Bizonyítottam, hogy a bioelőkészített szövetek az enzimes kezelés után, fehérités nélkül színezhetők reaktív színezékekkel. A bioelőkészített és a hagyományosan főzött szövetek között a színezést követően mérhető színekülönbség a kiindulási szövetek között meglévő színekülönbség, valamint az alkalmazott színezékkoncentráció függvénye. Kis színezékkoncentrációk esetén a színekülönbség nagy és szemmel érzékelhető. A bioelőkészítés után alkalmazott enyhe hidrogén-peroxidos fehérités jelentősen csökkenti a bioelőkészített és hagyományosan főzött szövetek között a színezést követően mérhető színekülönbséget.³
- T7. Bizonyítottam, hogy az enzimes kezelést is magában foglaló kombinált kikészítési technológia részfolyamatai a lencszövet (100 %) tulajdonságait jelentősen módosítják, a lencsétartalmú (pamut/lencs és lencs-poliészter) szövetekre pedig mérsékelt a hatásuk. Az enzimes kezelés és a magas hőmérsékleten végrehajtott mechanikai kikészítés (törés) egymás utáni alkalmazása eredményes a szövetek esésének és fogásának a javításában, ugyanakkor lencszövet esetén jelentős szakítószilárdság csökkenést okoz. Az enzimes kezelésnek köszönhetően a szövetszín világosabb és kevésbé telített.⁴
- T8. Elsőként bizonyítottam, hogy a kisfrekvenciás ultrahang az ipari celluláz enzim szűrőpapír lebontó aktivitását csökkenti. Az enzimaktivitás az ultrahangos besugárzás intenzitásának és időtartamának a növelésével arányosan csökken. Reflektor alkalmazása a kisebb intenzitású ultrahangos besugárzás enzimaktivitásra gyakorolt hatását fokozza. Bizonyítottam azt is, hogy a kisfrekvenciás ultrahangos besugárzás lényegesen kisebb mértékben hat a szilárd fázisú fermentációval előállított nyers enzimek aktivitására, mint az ipari cellulázéra. Még az intenzív ultrahangos besugárzás sem módosítja a *T. virens* TUB-F498 törzsszel termeltetett nyers enzimidat szűrőpapírlebontó, poligalakturonáz, lakkáz és

lignin-peroxidáz aktivitását. Ugyanakkor – a besugárzás paramétereitől függő mértékben – csökken az *A. oryzae* NRRL 3485 által termelt nyers enzimkeverék lignin-peroxidáz aktivitása.^{16, 18, 19}

- T9. Bizonyítottam, hogy a fehéritett pamutcellulóz celluláz enzimes hidrolízise ultrahanggal besugározva – az ultrahang enzimaktivitás-csökkentő hatása ellenére – sokkal eredményesebb, mint a kontrollként szolgáló mágnesesen kevertetett rendszerben. A termékképződés sebessége függ a szubsztrátum formájától (őrölt, darabolt, lapszerű) és az ultrahangos kezelés paramétereitől. Bizonyítottam azt is, hogy a kisméretű ultrahang a szilárd fázisú fermentációval termelt nyers enzimekkel végzett kombinált bioelőkészítés-biofehérítés folyamat eredményességét is fokozza.^{15, 16, 18, 23}
- T10. Elsőként bizonyítottam, hogy az atmoszférikus hidegplazma kezelés, ami a pamut elemi szálak legkülső rétegének az erózióját okozza, növeli a szálfelület polimer alkotóinak (cellulóz, pektin) a hozzáférhetőségét az enzimek számára. A viaszréteg részleges degradációját követően kialakuló, oxigénben gazdag hidrophil felületen a nyers pamut celluláz enzimes hidrolízisének inkubációs periódusa a felére csökken, a végtermék koncentráció pedig többszöröse a kontroll – nem plazmázott – szövetnél mért értéknek. A plazmakezelés hatására bekövetkező felületkémi és -morfológiai változások nem módosítják számottevő mértékben a szálanyag tömbi tulajdonságait.^{13, 17, 21}
- T11. Bizonyítottam, hogy a plazmakezelés fokozza a keményítő irányag enzimes degradációját. A plazmakezelésnek köszönhetően az amiláz enzimmel végzett írtelenítés kezdeti szakaszában a keményítő hidrolízise nagy sebességgel megy végbe, az enzimoldat végső redukáló cukor koncentrációja azonban elmarad a nem plazmázott nyers szövet esetén mért értéktől. Ez utóbbi indirekt bizonyíték annak, hogy a plazmakezelés csökkenti a nyers pamutszövet láncfonalait borító keményítő irányag mennyiségét. Mindkét folyamat hozzájárul a plazmakezelést követően alkalmazott enzimes írtelenítés időtartamának a jelentős csökkentéséhez.²¹
- T12. Bizonyítottam, hogy a GD-plazma argon atmoszférában eredményesebb a nyers lenszövet nedvesedőképességének a javításában, mint a levegő-plazma. Kisméretben hatékonyabb a pektináz enzimmel végzett bioelőkészítés is az argon atmoszférában végrehajtott plazmakezelés után, mint levegő plazmagáz alkalmazásakor. A plazmakezelés a szövetszín megváltozását okozhatja. Az elszíneződés a plazmakezelést követően alkalmazott pektináz enzimmel végzett bioelőkészítés hatására megszűnik.¹³
- T13. Elsőként bizonyítottam, hogy a kisméretű ultrahang, mint új és ígéretes "downstream" technika, alkalmas a szilárd fázisú fermentációval előállított nyers enzimek kinyerésének a hatékonyabbá tételére. A kisméretű ultrahangos besugárzásnak köszönhetően a szilárd fermentumok pufferes extrakciója során a nyers enzimoldat oxo-

datív és hidrolitikus enzimaktivitása többszörösére növelhető a kontroll extrakcióhoz (rázatott rendszer) viszonyítva. A kisméretű ultrahang képes a fermentumok őrlésével már hatékonyabbá tett enzimextrakció, valamint a többlépéses extrakció eredményességének a további fokozására is.^{18, 19}

- T14. Igazoltam, hogy a kisméretű ultrahang jelentős szerepet játszik a cellulóz nanokristályok előállítása és a CNC-szuszpenziók felhasználása során. A kavitáció elősegíti a savas hidrolízist követően a nanorészecskék kinyerését, és hozzájárul a CNC aggregátumok egyedi nanorészecskékre bontásához. Bizonyítottam, hogy az ultrahangos besugárzás időtartamának a növelésével csökken a nanokristályok aggregációja, és a kevésbé aggregálódott nanorészecskéket tartalmazó szuszpenziókból öntéssel és szárítással előállított CNC-filmek szakítószilárdsága és optikai tulajdonságai kedvezőbbek.^{20, 24}

6 KÖZLEMÉNYEK*

A DOLGOZAT ANYAGÁT KÉPEZŐ ANGOL NYELVŰ KÖZLEMÉNYEK

1. Csiszár, E., Urbánszki, K., Szakács, G. (2001) Biotreatment of desized cotton fabrics by commercial cellulase and xylanase enzymes. *Journal of Molecular Catalysis, B: Enzymatic*, 11, 1065-1072.
IF: 1,408;
2. Csiszár, E., Losonczai, A., Szakács, G., Rusznák, I., Bezúr, L., Reicher, J. (2001) Enzymes and chelating agent in cotton pretreatment. *Journal of Biotechnology*, 89, 271-279.
IF: 1,651;
3. Losonczai, A., Csiszár, E., Szakács, G., Kareela, O. (2004) Bleachability and dyeing properties of biopretreated and conventionally scoured cotton fabrics. *Textile Research Journal*, 74(6), 501-508.
IF: 0,54;
4. Csiszár, E., Somlai, P. (2004) Improving softness and hand of linen and linen-containing fabrics with finishing. *AATCC Review*, 4(3), 17-21.
IF: 0,434;
5. Csiszár, E., Losonczai, A., Szakács, G., Bezúr, L., Kustos, K. (2004) Influence of EDTA complexing agent on biopreparation of linen fabric. *Biocatalysis & Biotransformation*, 22(5/6), 369-374.
IF: 1,053;
6. Losonczai, A., Csiszár, E., Szakács, G., Bezúr, L. (2005) Role of the EDTA chelating agent in bioscouring of cotton. *Textile Research Journal*, 75(5), 411-417.
IF: 0,54;
7. Csiszár, E., Losonczai, A., Koczka, B., Szakács, G., Pomlényi, A. (2006) Degradation of lignin-containing materials by xylanase in biopreparation of cotton. *Biotechnology Letters*, 28(10), 749-753.
IF: 1,134;
8. Csiszár, E., Szakács, G., Koczka, B. (2007) Biopreparation of cotton fabrics with enzymes produced by solid-state fermentation. *Enzyme and Microbial Technology*, 40, 1765-1771.
IF: 1,969;
9. Csiszár, E., Szakács, G., Koczka, B. (2008) Effect of hydrolytic and oxidative enzymes produced by solid-state fermentation on greige linen fabric. *Biocatalysis & Biotransformation*, 26(5), 422-429.

* A textilkémia területén viszonylag kevés nemzetközileg elismert folyóirat van, és ezek közül csak néhánynak van impakt faktora. A tudományterület elfogadottan legjelentősebb folyóirata az elsősorban kutatási eredményeket közlő amerikai *Textile Research Journal*, amelynek az impakt faktora 2017-ben csupán 1,443 volt (2004-ben 0,54). A legjelentősebb, elsősorban technológiai jellegű kutatási eredményeket közlő folyóirat pedig a szintén amerikai *AATCC Review*, amelynek impakt faktora 2017-ben csupán 0,33 volt (2004-ben 0,43).

- IF: 1,17;
10. Csiszár, E. (2008) Enzymes in preparatory and finishing processes of cotton and linen fabrics. *Cellulose Chemistry and Technology*, 42(9-10), 577-581.
IF: 0,262;
 11. Csiszár, E., Fekete, E. (2010) Characterization of the surface properties of differently scoured cotton by inverse gas chromatography at infinite dilution. *Textile Research Journal*, 80(13), 1307–1316.
IF: 1,102;
 12. Csiszár, E., Fekete, E. (2011) Microstructure and surface properties of fibrous and ground cellulosic substrates. *Langmuir*, 27, 8444-8450.
IF: 4,186;
 13. Karaca, B., Csiszár, E., Bozdogan, F. (2011) Effects of atmospheric plasma pre-treatments on pectinase efficiency in bioscouring of linen fabrics. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 31(4), 623-633.
IF: 1,798;
 14. Csiszár, E. (2012) Surface properties and residual chromophore content of differently pretreated linen fabrics. *Textile Research Journal*, 82(19), 2030-2040.
IF: 1,135;
 15. Csiszár, E., Fekete, E., Tóth, A., Bandi, É., Koczka, B., Sajó, I. (2013) Effect of particle size on the surface properties and morphology of ground flax. *Carbohydrate Polymers*, 94, 927-933.
IF: 3,916;
 16. Szabó, OE., Csiszár, E. (2013) The effect of low-frequency ultrasound on the activity and efficiency of a commercial cellulase enzyme. *Carbohydrate Polymers*, 98, 1483-1489.
IF: 3,916;
 17. Szabó, OE., Csiszár, E., Tóth, A. (2015) Enhancing the surface properties of linen by non-thermal atmospheric air-plasma treatment. *Open Chemistry*, 13, 1-7.
IF: 1,127;
 18. Szabó, O.E., Csiszár, E., Tóth, K., Szakács, G., Koczka, B. (2015) Ultrasound-assisted extraction and characterization of hydrolytic and oxidative enzymes produced by solid state fermentation. *Ultrasonics & Sonochemistry*, 22, 249-256.
IF: 4,556;
 19. Szabo, OE., Csiszár, E., Koczka, B., Kiss, K. (2015) Ultrasonically assisted single stage and multiple extraction of enzymes produced by *Aspergillus oryzae* on a lignocellulosic substrate with solid-state fermentation. *Biomass and Bioenergy*, 75, 161-169.
IF: 3,249;
 20. Csiszar, E., Kalic, P., Köböl, Á., Ferreira, E.P. (2016) The effect of low frequency ultrasound on the production and properties of nanocrystalline cellulose suspensions and films. *Ultrasonics & Sonochemistry*, 31, 473-480.
IF: 4,218;
 21. Szabó, OE., Csiszár, E., Koczka, B., Tóth, A., Klébert, Sz. (2016) Enhancing the accessi-

bility of starch size and cellulose to enzymes in raw cotton woven fabric by air-plasma pretreatment. *Textile Research Journal*, 86(8), 868-877.

IF: 1,443;

22. Fekete, E., Csiszár, E. (2017) Characterization of the surface energy of cellulosic fibres in fibrous and ground forms by IGC and contact angle measurements. *Fibers and Polymers*, 18(7), 1255-1262.
IF: 1,353;
23. Szabó, OE., Csiszár, E. (2017) Some factors affecting efficiency of the ultrasound-aided enzymatic hydrolysis of cotton cellulose. *Carbohydrate Polymers*, 156, 357-363.
IF: 5,158;
24. Csiszár, E., Nagy, S. (2017) A comparative study on cellulose nanocrystals extracted from bleached cotton and flax and used for casting films with glycerol and sorbitol plasticisers. *Carbohydrate Polymers*, 156, 740-749.
IF: 5,158;

A TÉMÁHOZ KAPCSOLÓDÓ MAGYAR NYELVŰ KÖZLEMÉNYEK

1. Csiszár, E., Losonczi, A. Szakács, G. (2000) Biotechnológia alkalmazása a textiliparban. *Magyar Textiltechnika*, LIII, 27-34.
2. Urbánszki, K., Csiszár, E., Szakács, Gy., Klébert, Sz. (2001) Enzimes pamutelőkészítés. Celluláz, pektináz és xilanáz enzimek hatása írtelenített pamutszövetek tulajdonságaira. 1. rész. *Magyar Textiltechnika*, LIV, 35-38.
3. Csiszár, E., Urbánszki, K., Szakács, Gy., Losonczi, A. (2001) Enzimes pamutelőkészítés. Celluláz, pektináz és xilanáz enzimek hatása írtelenített pamutszövetek tulajdonságaira. 2. rész. *Magyar Textiltechnika*, LIV, 116-120.
4. Csiszár, E. (2002) Minőség és biotechnológia a textiliparban. *Magyar Textiltechnika*, LV(1), 27-29.
5. Losonczi, A., Csiszár, E., Szakács, Gy. (2002) Enzimes pamutelőkészítés komplexképző jelenlétében. 1. rész. *Magyar Textiltechnika*, LV(6), 186-189.
6. Losonczi, A., Csiszár, E., Szakács, Gy. (2002) Komplexképzők szerepe az enzimes pamutelőkészítésben. IN-TECH-ED '02 Műszaki Fejlesztés és Oktatás a textil- és ruházati iparban. TMTE 2002, 208-214.
7. Losonczi, A., Csiszár, E., Szakács, Gy. (2003) Enzimes pamutelőkészítés komplexképző jelenlétében. 2. rész. *Magyar Textiltechnika*, LVI(1), 22-25.
8. Losonczi, A., Csiszár, E. (2003) A pektinek jellemzője és enzimes degradációja. *Papír-
ipar*, XLVII(3), 96-100.
9. Losonczi, A., Csiszár, E. (2004) Komplexképzők és alkalmazásuk a textiliparban. *Magyar Textiltechnika*, LVII(3), 54-57.
10. Csiszár, E. (2009) Kiváló minőségű cellulóz alapú textíliák előállítása környezetbarát technológiákkal. *Magyar Textiltechnika*, LXII(2), 56-58.
11. Szabó, OE., Csiszár, E. (2011) Enzimes textiltechnológiai folyamatok hatékonyságának

- növelése kismegkvenáás ultrahang alkalmazásával. *Magyar Textiltechnika*, LXIV(3), 99-102.
12. Tóth, A., Csiszár, E. (2011) Az atmoszférikus plazma és alkalmazási lehetőségei a textil-kikészítésben. *Magyar Textiltechnika*, LXIV(4), 158-161.
 13. Szabó, OE., Csiszár, E. (2014) Kismegkvenáás ultrahang alkalmazása az enzimés textil-technológiai folyamatokban. *Magyar Textiltechnika*, LXVII(3), (online).
 14. Csiszár, E., Nagy, S. (2017) Kristályos nanocellulóz – Egy ígéreates új nanoanyag. A kristályos nanocellulóz előállítás, jellemzése és felhasználása. *Magyar Textiltechnika*, LXIX(3), (online).
 15. Nagy, S. Csiszár, E. (2018) Cellulóz nanokristályok jellemzése és felhasználása átlátszó filmek előállítására. A cellulózforrás és az adalékanyagok hatása a filmtulajdonságokra. *Magyar Textiltechnika*, LXXI(4), (online).

7 A KUTATÁSI EREDMÉNYEK GYAKORLATI HASZNOSÍTÁSA

CELLULÓZ ALAPÚ KÖTÖTT KELMÉK BIOELŐKÉSZÍTÉSÉNEK ÉS BÍOKIKÉSZÍTÉSÉNEK ÜZEMI MEGVALÓSÍTÁSA

2005-ben és 2006-ban, az *Easton Kft.* hódmezővásárhelyi telephelyén (a GVOP-AKF-3.1.1.-2004-05-0520/3.0 pályázat keretében), a vállalat legfontosabb termékcsaládjainak [pamut, pamut-len (70/30 %) és pamut-kender (85/15%) kötött kelmék] a bioelőkészítését és biokikészítését üzemeltítettük szakaszos technológiában. A nagyüzemi bioelőkészítést kereskedelmi forgalomban lévő pektináz enzim és komplexképző együttes alkalmazásával valósítottuk meg. Az enzimes és vegyszeres technológiával előállított végtermékek tulajdonságait összehasonlítva megállapítható, hogy nem különbözik a fehérség, a nedvszívóképesség és a színegyenletesség, továbbá a színezett minták között a színkülönbség kisebb volt 1-nél. A bioelőkészített kelmének lényegesen nagyobb volt a szakítószilárdsága mind az előkészítés és mind a végkikészítés után, továbbá jobb volt a fogása és az esése, amit a kisebb hajlítási merevség értékek bizonyítanak.

A nagyüzemi biokikészítés célja lágy fogású, csökkentett pillingesedési (felületi bolyhozódási) hajlamú kelmék előállítása; színezett termékek esetén pedig a hamvas kelmefelület és a viseletes hatást keltő külső kép kialakítása volt. A biokikészítés eredményes volt a szárfelületen megkötődött színezék részleges eltávolításában. A fakítás együtt járt a színegyenletesség romlásával, ami kedvezett a viseletes hatásra emlékeztető kelmekép kialakításának. Az alkalmazott enzimes kezelés csökkentette a kelme merevségét és javította az esést, továbbá nem rontotta számottevően a szakítószilárdságot. A kötött kelmék kikészítésére alkalmazott enzimes technológia sikerességét jelzi, hogy az *Easton Kft.* a konfekcionálásra kerülő termékeinek jelentős hányadánál alkalmazta az enzimes fakítást. 2007-ben a vállalat árbevételének 71,6 %-a enzimmel kezelt (bioelőkészítés és/vagy biokikészítés) kelme értékesítéséből származott.

LEN- ÉS LEN-TARTALMÚ SZÖVETEK NAGYÜZEMI BÍOKIKÉSZÍTÉSE

A T7 tézisponthoz kapcsolódó kutatómunkában (az OMFB ALK-00239/98 pályázat keretében), 2001-ben kidolgoztunk egy kombinált végkikészítési technológiát len- és len-tartalmú szövetek nagyüzemi lágyítására, amely egy enzimes kezelést is magában foglalt. Az enzimes technológia nagymértékben hozzájárult a szövetek esésének és fogásának a javításához, valamint módosította a szövetszínt. A Pannon-Flax Győri Lenzővő Rt. a technológiát 2013-ig folyamatosan alkalmazta.