



---

# Enzimológia

## Celluláz enzimek

---

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék



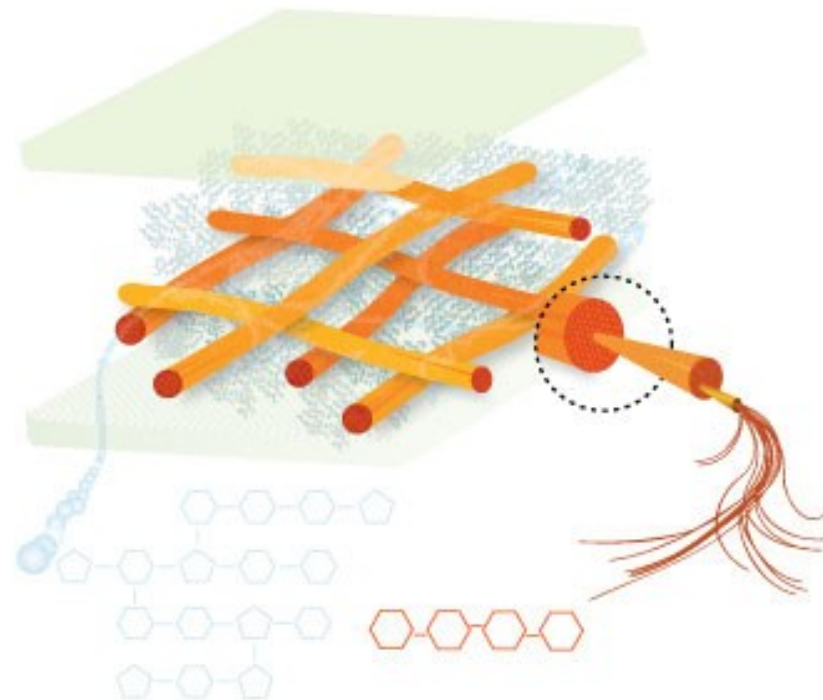


# Cellulóz

Cellulose

## Cellulóz

- lineáris homopolimer
- monomer: **glükóz**
- **$\beta$ -1,4-es kötés**
- egy-egy cellulózlánc hossza **2.000-15.000 glükóz egység** (DP, polimerizációs fok)
- a fa szárazanyag-tartalmának **35-50%**-át teszi ki
- az elsődleges sejtfalban és a
- a többrétegű másodlagos sejtfalban is  
a fibrillák eltérő orientációt mutatnak a másodlagos sejtfal egyes rétegeiben



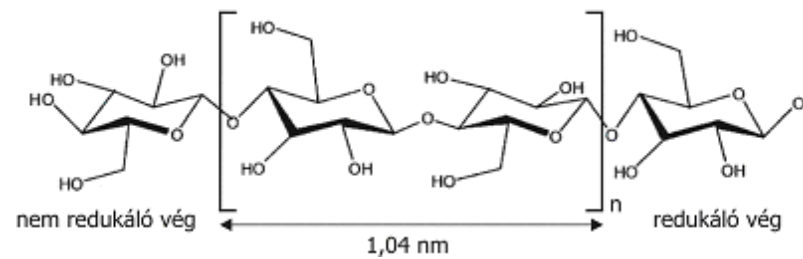


# Cellulóz

Cellulose

## Cellulóz

- monomer: **glükóz**
- egymáshoz képest 180°-kal elfordulva
- ismétlődő egység: **cellobióz**



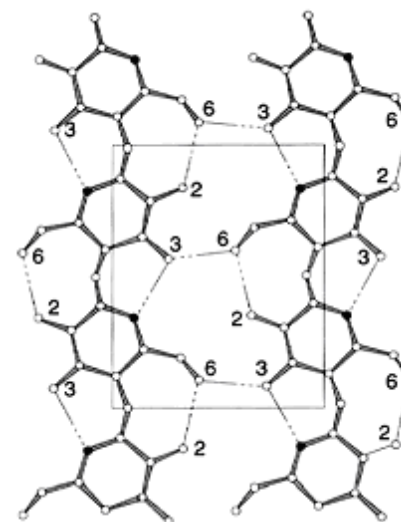


# Cellulóz

Cellulose

## Cellulóz

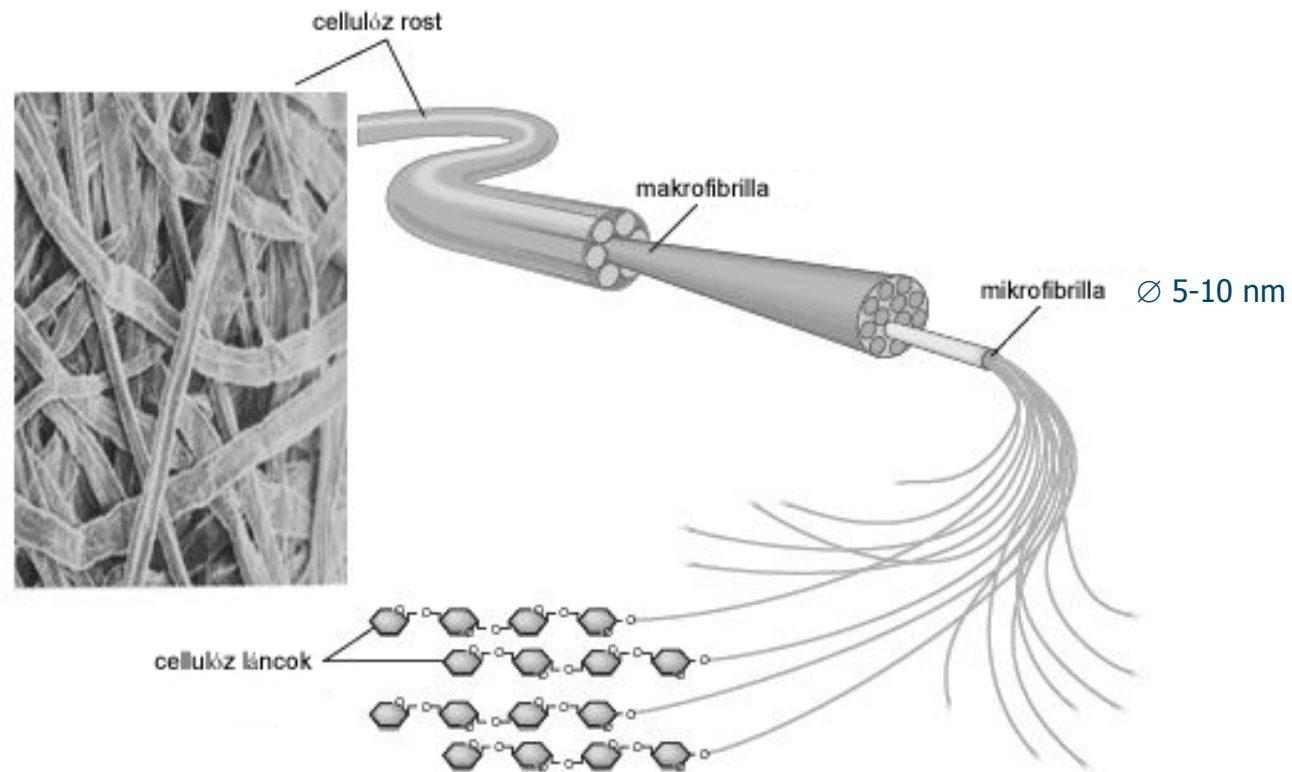
- szomszédos cellulózláncok között  
**H-kötések** és **van der Waal's erők**
- láncon belül:  
**intramolekuláris H-kötések**
- nagy számban:  
rendezett **kristályos** szerkezet  
kevésbé rendezett:  
**amorf**, kevésbé ellenálló
- kristályosság foka  
= f (növény)  
ált. 50-90%  
**kristályossági index CI 0.5-0.9**





# Cellulóz

Cellulose



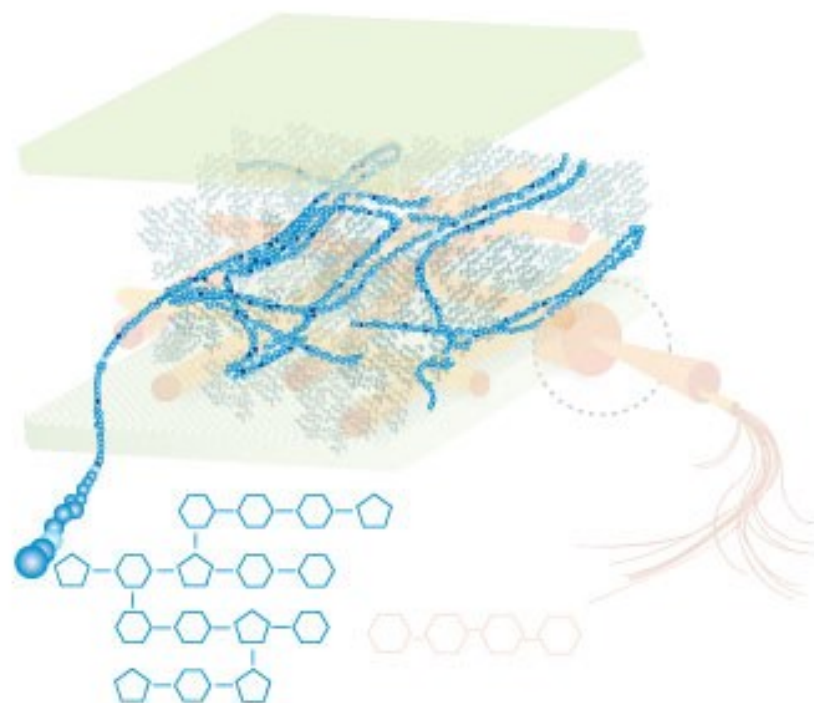


# Hemicellulóz

Hemicellulose

## Hemicellulóz

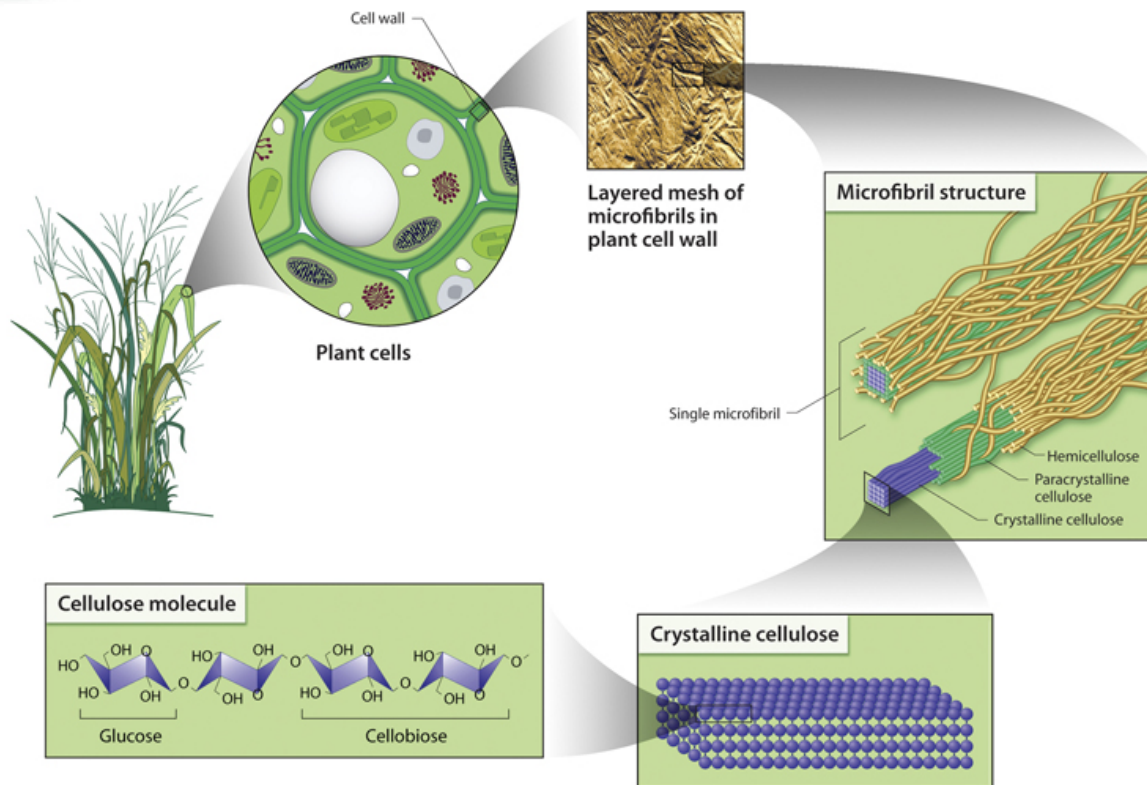
- **alkáli-oldható** növényi poliszacharidok
- **elágazó heteropolimerek**
- monomer: glükóz, xilóz, mannóz, galaktóz, arabinóz
- acetil-, metil-csoportok
- vázban  $\beta$ -**1,4** (néha **1,3**) kötés oldalláncnál  $\alpha$ -**1,2; 1,3; 1,6**
- egy-egy polimerlánc hossza **100-200** monomer egység (**DP**, polimerizációs fok)
- a fa szárazanyag-tartalmának **15-25%**-át teszi ki
- főleg az elsődleges sejtfalban
- cellulózzal H-kötés (és van der Waal's) kapcsolat





# Növényi sejtfal

Plant cell wall





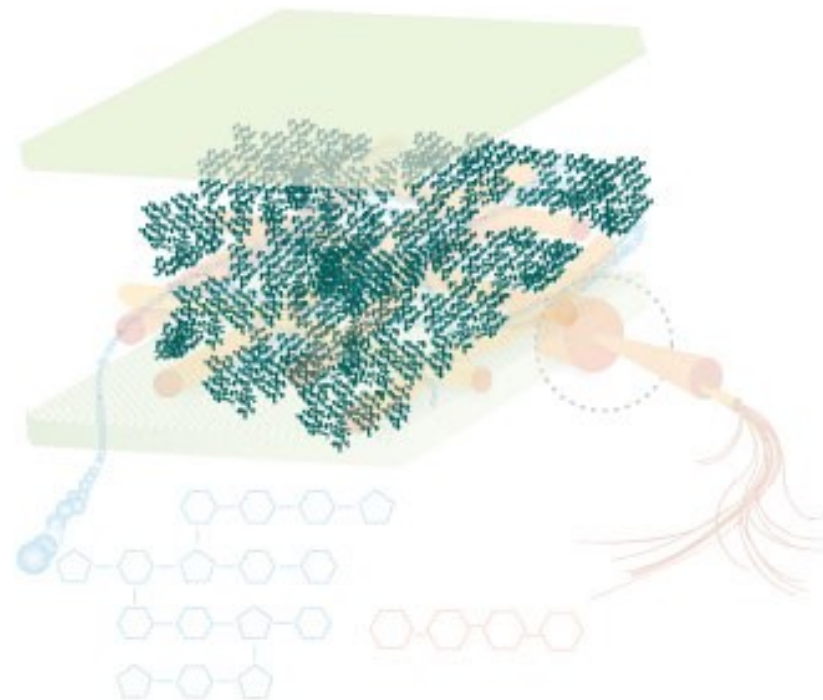


# Lignin

Lignin

## Lignin

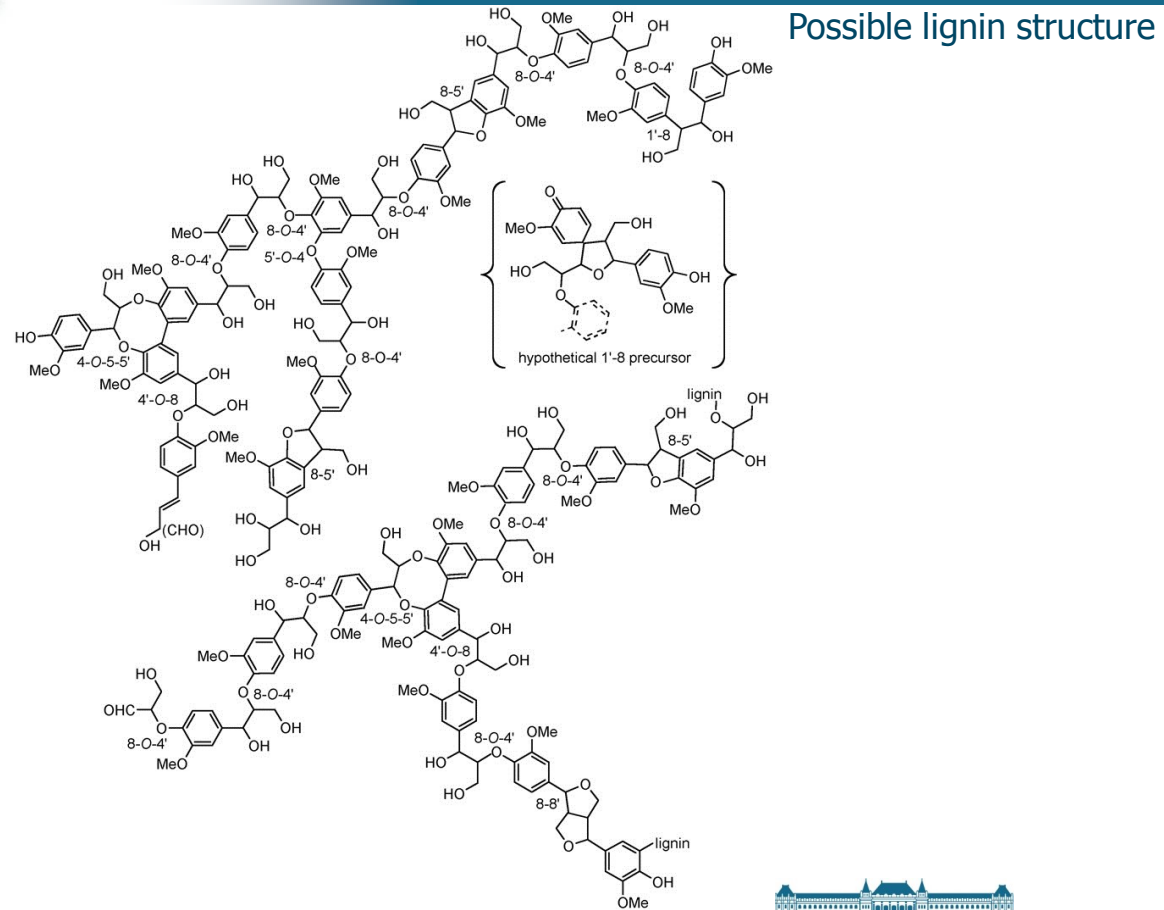
- szilárd, ellenálló
- **hidrofób makromolekula**
- **fenil-propán váz**
- felépítésében 3 fahéj-alkohol származék vesz részt:
  - p-kumáralkohol
  - koniferilalkohol
  - szinapilalkoholdehidrogenáz → makromolekuláris lignin
- észter kötések
- tűlevelű és keményfa esetén eltérő számú metoxi-csoport
- a fa szárazanyag-tartalmának **20-25%-át teszi ki**
- észterkötések a hemicellulózokkal







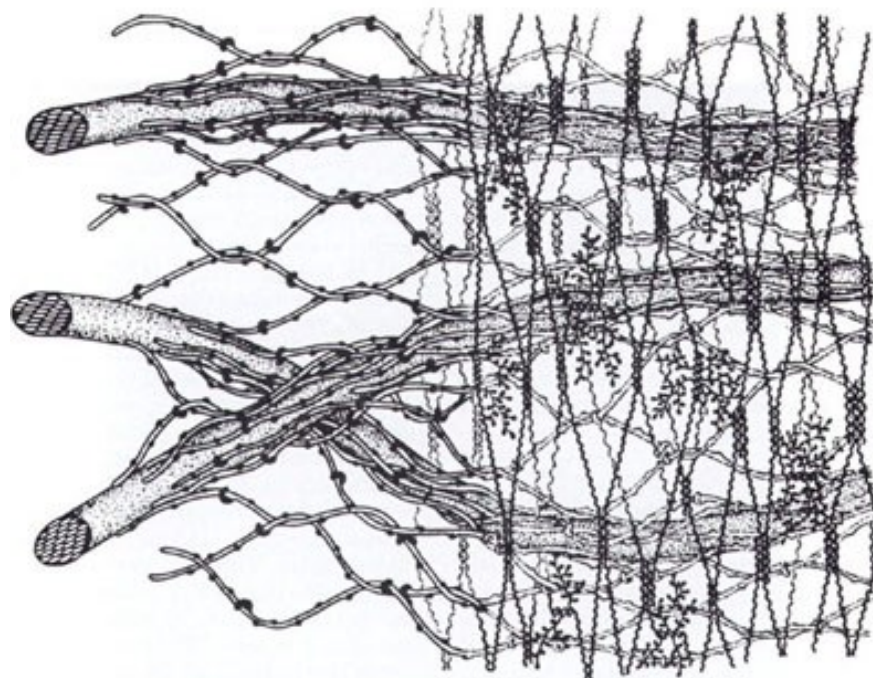
# Lehetséges lignin szerkezet





# Elsődleges sejtfal

Primary cell wall

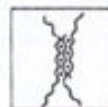


## Elsődleges sejtfal

- **egyrétegű**
- a cellulóz fibrillák orientációja rendezetlen
- **fiatal sejtekre** jellemző
- **80-90% poliszacharid**
  - cellulóz
  - hemicellulóz (glükánok)
  - pektin
    - PGA – poligalakturonsav
    - RG - ramnogalakturonán
- **10-20% fehérje**



Xyloglucan



PGA junction zone



RG I with arabinogalactan side-chains

# Másodlagos sejtfal

Secondary cell wall



## Másodlagos sejtfal

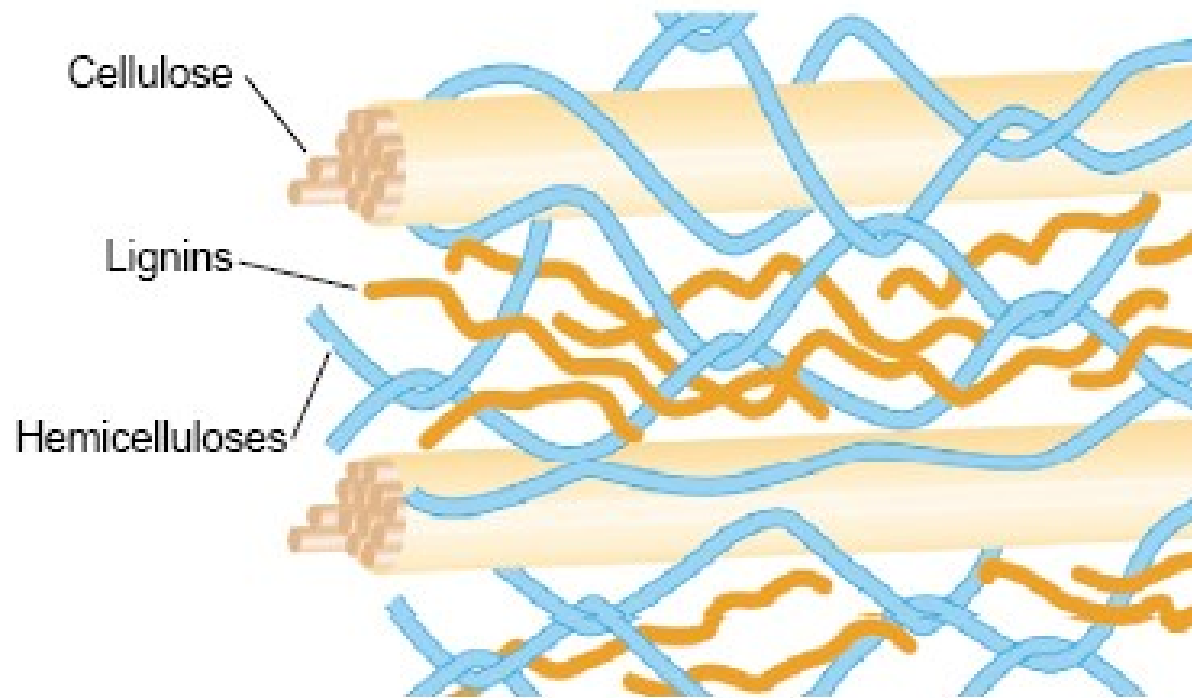
- **többrétegű**
- a cellulóz fibrillák orientációja rétegenként **rendezett**
- **érett sejtekre jellemző**
- kevesebb pektin
- több **cellulóz**
- más felépítésű **hemicellulózok** (xilánok)
- **lignin**

Figure 1. Secondary cell-wall (CW) structure. Components are arranged so that the cellulose microfibrils and hemicellulosic chains are embedded in lignin. Specific linkages and components of non-core lignin are shown for a generalized grass secondary CW. Non-core lignin components include *p*-coumaric (pCA), ferulic (FA), *p*-hydroxybenzoic (BA), sinapic (SA), and cinnamic (CA) acids.





# Lignocellulózok szerkezete





# Celluláz termelő mikroorganizmusok

## Baktériumok:

- Aerob: *Pseudomonas*, *Actinomyces*
- Fakultatív aerob: *Bacillus*, *Cellulomonas*
- Anaerob: *Clostridium*

## Gombák:

- Aerob: ***Trichoderma***, ***Penicillium***, ***Aspergillus***, *Sporotrichum*,



## ***Trichoderma reesei* RUTC30**

- lágy rothasztó gomba
- mutáns törzs (jobb celluláz termelés)



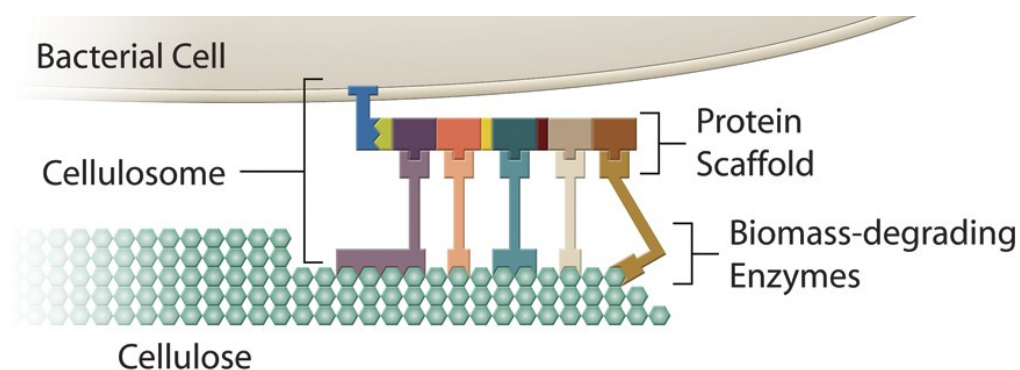


# A lignocellulóz **mikrobiális** bontása

Microbial lignocellulolytic machinery

## Baktériumok

- sejthez kötött enzimek, **celluloszóma**: multienzim komplex
- mind cellulóz-, mind hemicellulóz-bontó enzimek
- pl. *Clostridium thermocellum*
- a glikozid-hidrolázok egy tartó-fehérjéhez kapcsolódnak, mely egyidejűleg a cellulóz felszínéhez és a baktérium sejthez is kötődik
- a szinergizmusban működő enzimek optimálisan helyezkednek el
- a sejt-szubsztrát kapcsolatnak köszönhetően a termék a baktérium sejt közelében képződik





# A lignocellulóz mikrobiális bontása

Microbial lignocellulolytic machinery

## Gombák

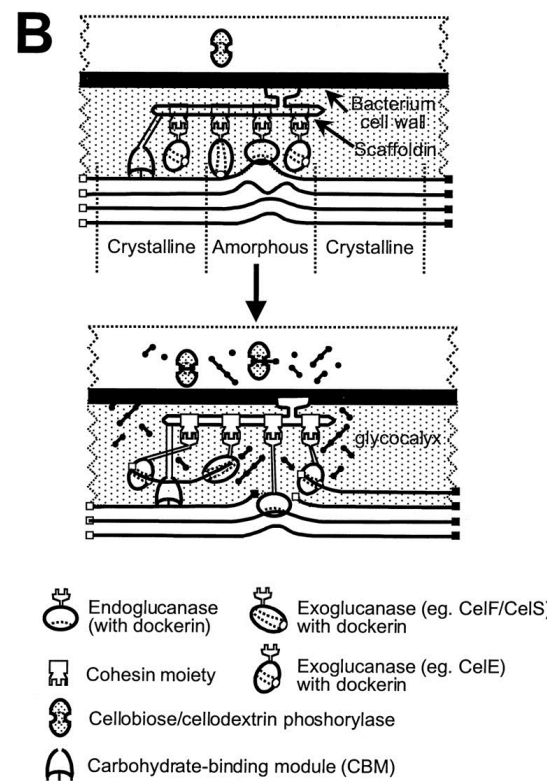
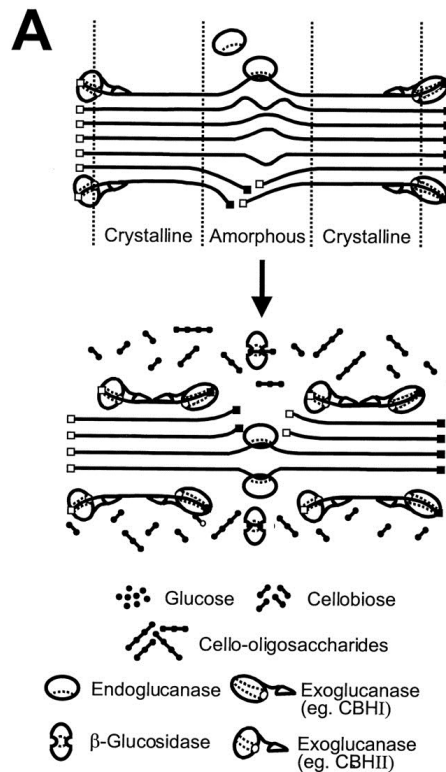
- gombafajok széles spektrumára jellemző
- *Trichoderma*, *Penicillium* és *Aspergillus* fajok
- Mandels és Sternberg 14.000 gombafaj gyűjtése és jellemzése
- a legtöbb gomba az általa termelt cellulolitikus enzimeket kiválasztja  
→ **extracelluláris**  
⇒ szélesebb körben vizsgált
- a fa lebontásában szerepet játszó gombafajok
  - lágý,
  - barna és
  - fehér korhadást okozó gombák
- lágý és barna: a lignint nem vagy csak kismértékben képesek lebontani
- fehér: a lignin teljes lebontása oxidatív úton  
lignin-peroxidáz, mangán-peroxidáz, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-képző enzimek (glükóz-oxidáz), lakkázok





# A lignocellulóz mikrobiális/enzimes bontása

Microbial lignocellulolytic machinery



Schematic representation of the hydrolysis of amorphous and microcrystalline cellulose by noncomplexed (A) and complexed (B) **cellulase systems**. The solid squares represent **reducing ends**, and the open squares represent nonreducing ends. **Amorphous** and **crystalline** regions are indicated. Cellulose, enzymes, and hydrolytic products are not shown to scale.



# Celluláz enzimrendszer

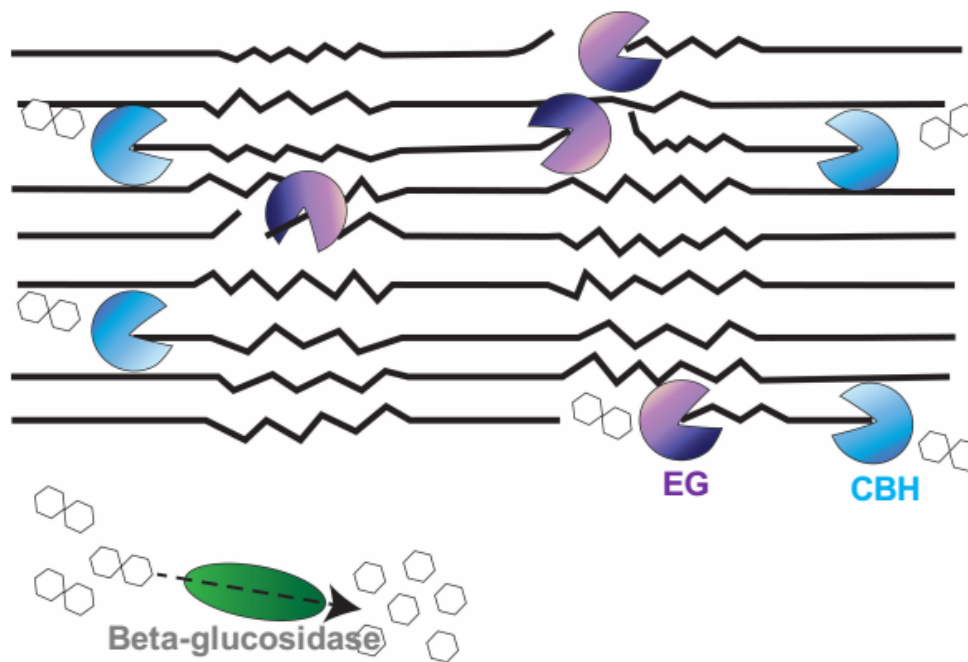
Enzim neve	EC kód	További elnevezések	Működés
Endo-(1,4)- $\beta$ -D-glükanáz	EC 3.2.1.4	Endoglükanáz (EG I és II)	Az amorf cellulózt és cellulodextrineket támadják véletlenszerűen.
Exo-(1,4)- $\beta$ -D-glükanáz	EC 3.2.1.91	Cellobiohidroláz (CBH I és II)	A kristályos cellulózt támadják, cellobiózt hasítanak le a molekula végéről.
1,4- $\beta$ -D-glükózidáz	EC 3.2.1.21	Cellobiáz	Cellobiózból glükózt szabadít fel.



# A lignocellulóz mikrobiális/enzimes bontása

Microbial lignocellulolytic machinery

## Enzymatic hydrolysis of cellulose





# A lignocellulóz mikrobiális/enzimes bontása

Microbial lignocellulolytic machinery

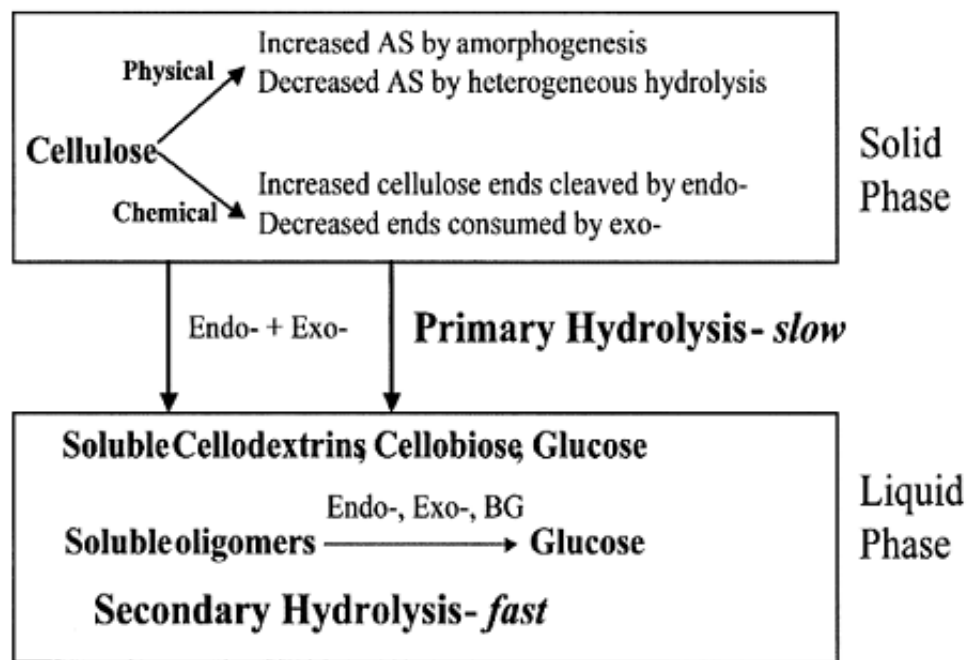


Figure 3. Mechanistic hypothesis of enzymatic hydrolysis for cellulose by *T. reesei* cellulase.



## Hogyan mérjük az enzimek mennyiségét?

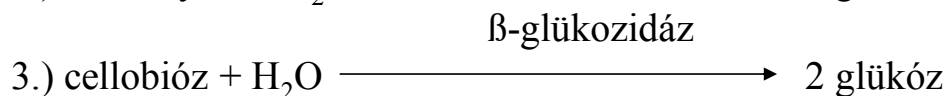
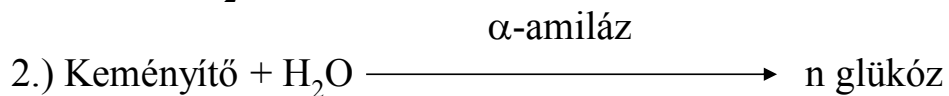
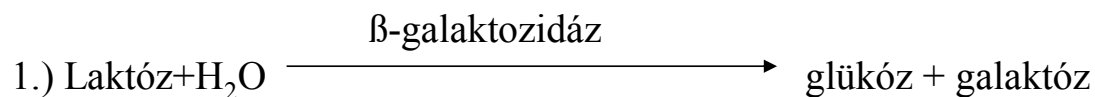
**Enzimaktivitás**, az enzimek legfontosabb tulajdonsága

**IUPAC 1 Ee:**

1 ml enzimoldat

1  $\mu$ mol termék képződését katalizálja

1 perc alatt



Enzim aktivitás meghatározásához definiálni kell a **körülményeket**:

E, S, T, pH, t, Termék

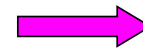


# Celluláz aktivitás mérése

---

## Probléma:

- komplex celluláz rendszerek
- heterogén cellulóz szubsztrátok.



*Különböző mérési  
módszerek.*

*1984. IUPAC: Standard mérési módszerek kidolgozása.*

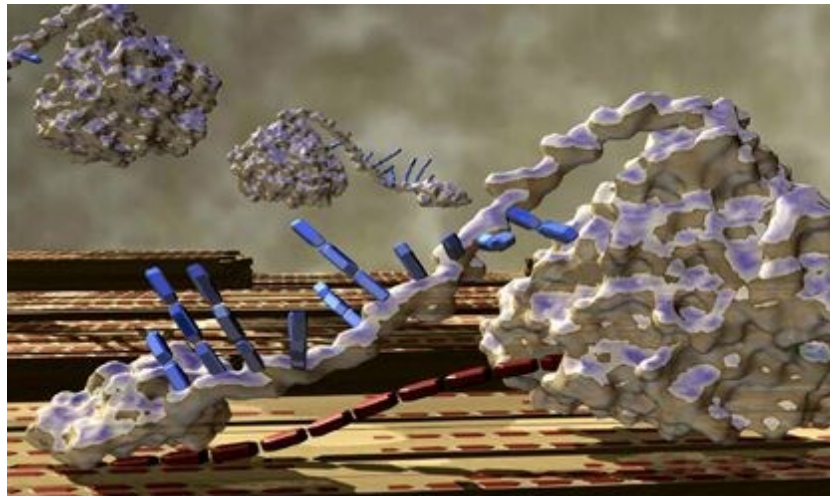
FPA (Filter Paper Activity)  
CMC-áz  
Termék redukáló cukortartalom  
meghatározása DNS módszerrel





# Domén szerkezet

szubsztrát-kötő domén – kapocs régió – katalitikus domén



A cellulóz-kötő domén (CBD/CBM) szerepe:

- nem csak a kristályos cellulózhoz való kötődés (a katalitikus domén is adszorbeálódik)
- a kristályos szerkezet fellazítása - az egyes cellulóz láncok „kiemelése” a rendezett szerkezetből, mely ezáltal hozzáférhetővé válik a CD számára





# Cellulázok csoportosítása

Classification of cellulases

## **A hasítás helye szerint / By type of reaction catalyzed**

- Exoglükánázok / cellobiohidrolázok (CBH) Enzyme Commission: EC 3.2.1.91
- Endoglükánázok (EG) EC 3.2.1.4
- $\beta$ -glükózidázok (BGL) / cellobiázok EC 3.2.1.21

## **Termelő szervezetek szerint / Occurance**

- gomba eredetű / fungal
- bakteriális eredetű / bacterial

## **A katalitikus alegység aminosav sorrendje szerint / AA sequence of CD**

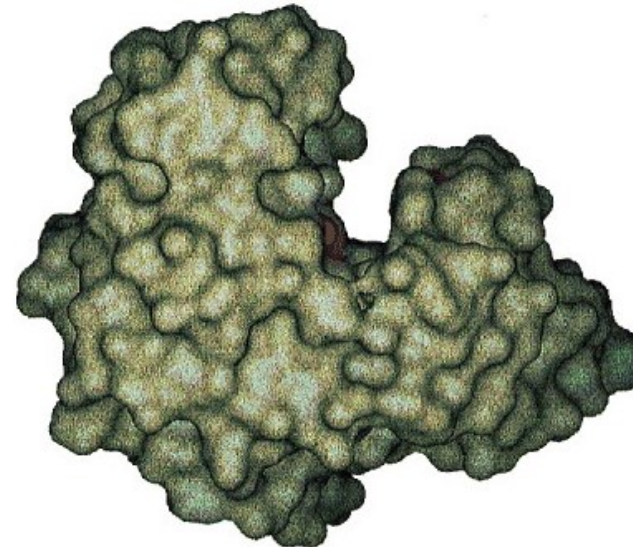
- glikozid-hidroláz enzimek csoportosítása
- tükrözi a szerkezeti homológiát és az egyes enzimek közti fejlődéstörténeti kapcsolatot
- <http://www.cazy.org/>
- jelenleg 118 GH családot különböztetnek meg
- a családokon belül
  - azonos elrendezésű enzim molekulák
  - a katalitikus AA-maradékok helyzete egységes
  - nem csak endo- ill. exoenzimeket tartalmaznak (molekula-szerkezet  $\neq$  hasítási mód)



# Endoglükánázok

Endoglucanases

- **aktív centrum** a katalitikus domén **árokszerű** részében
- **random** hasítás  
(néhányik processzív módon)
- **amorf cellulóz**, oligomerek,  
cellulózszármazékok hidrolízise
- egy adott mikroba által termelt többféle EG:  
eltérő pI érték, méret, CBD megléte/hiánya
- glikozilált enzimek
- méret kb. 4x4x2 nm  
1 glükóz egység kb. 0.5 nm  
⇒ kb. 10 glükóz egység hosszúak

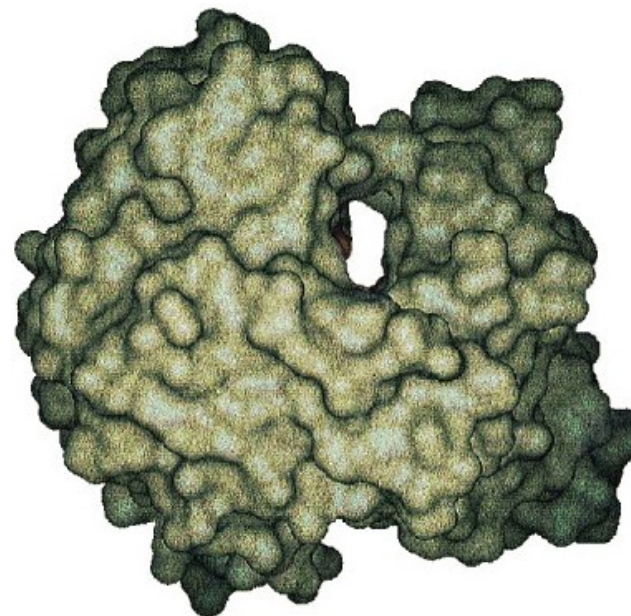




# Cellobiohidrolázok

Cellobiohydrolases

- aktív **kristályos cellulózon**  
itt a **CBD szerepe** meghatározó
- **processzív** működés  
**a láncon folyamatosan haladva**
- lassú DP csökkenés
- **aktív centrum az „alagútban”**  
bizonyos körülmények között felnyílhat  
endo aktivitást eredményezve
- fő termék: **cellobióz**  
kis mennyiségben: glükóz és cellotrióz
- két csoport:  
**redukáló** vagy **nem-redukáló** végről
- **Trichoderma** legnagyobb mennyiségben  
termelt celluláza
- cellobióz **termékinhibíció**
- glikozilált enzimek





# $\beta$ -glükózidázok

$\beta$ -glucosidases

- **cellulózon nem aktív**
- **cellobióz (és DP 3-6) hidrolízise**  
⇒ CBH és EG termékgátlás csökkentése
- transzglykolízis (glikozidkötés létrehozása)
- szerep a celluláz indukcióban
- Trichoderma kis mennyiségben termeli  
gyakran elégtelen mennyiségben  
⇒ **általában a cellulázok külső BGL  
kiegészítést igényelnek**



## *Trichoderma reesei*

---

### ***Trichoderma* fonalas gombafajok**

- a talaj domináns mikroorganizmusai szinte minden éghajlaton
- legtöbb *Trichoderma* törzs aszexuális spórákkal szaporodik, teleomorfja a *Hypocrea* (aszkomicitesz nemzetség)

### ***Trichoderma reesei* mezofil lágy-korhasztó gomba**

- talajban és növényi hulladékon
- egyike a legjobb extracelluláris celluláz-termelőeknek, széles körben tanulmányozott
- II. világháború idején izolálták, vad típusú törzse: **QM6a**
- eredeti elnevezése: *Trichoderma viride*, de a törzs eltér, új fajként, *T. reesei* néven azonosították
- A *Trichoderma reesei* anamorf (ivartalan szaporodás), teleomorf (ivaros szaporodás) párja: *Hypocrea jecorina*
- legtöbbet alkalmazott *T. reesei* törzsek:
  - **QM9414 mutáns** (ATCC 26921): 1970-es évek elején izolálták a QM6a-hoz képest kétszeres enzimaktivitás és produktivitás
  - **Rut C30 mutáns** (ATCC 56765): produktivitása jelentősen meghaladja a QM6a-ét a celluláz-expresszió nem glükóz-represszált  $\Rightarrow$  glükóz-tartalmú táptalajon is termel cellulázt



# *Trichoderma reesei* cellulázok

Cellobiohidrolázok (CBH)

## **CBHI** (Cel7A, Swiss-Prot P62694)

- *T. reesei* teljes expresszált cellulázok **közel 60%-a**
- a cellulózlánc **redukáló** végéről indul
- CD: 10 kötőhely, alagútja kb. 50 Å hosszú
- **terméke kristályos cellulózon:** cellobióz (80-90%), glükóz (10-15%), cellotrióz (néhány %)

## **CBHII** (Cel6A, Swiss-Prot P07987)

- a *T. reesei* által termelt cellulolitikus enzimek **kb. 20%-a**
- a cellulózlánc **nem-redukáló végére** specifikus
- kevésbé processzív mint a CBHI
- CD: 4 kötőhely, alagútja kb. 20 Å hosszú



# *Trichoderma reesei* cellulázok

Endoglükanázok (EG)

## **EGI** (Cel7B, Swiss-Prot P07981)

- *a T. reesei* teljes expresszált cellulázok közel **5-10%-a**
- **oldható cellulóz-származékokon** (CMC, HEC) mutatja fő aktivitását (glikozil-transzferáz és xilanáz aktivitás is)
- CD: 4 kötőhely, AA sorrend nagyfokú homológia a CBHI (Cel7A)-ével (kb. 45% azonosság)

## **EGII** (Cel5A, Swiss-Prot P07982, eredetileg EGIII-ként jelölve)

- termelt mennyisége *a T. reesei* cellulázok **1-10%-a**
- glikoprotein, a molekula 15%-át szénhidrát teszi ki
- teljes aktivitás **oldható szubsztrátokon**, jelentősen csökkent aktivitást mikrokristályos cellulózon
- CD: 5 kötőhely

## **EGIII** (Cel12A, Swiss-Prot O00095)

- termelt mennyisége csupán tized %-a a teljes celluláz proteineknek
- **nem rendelkezik CBD-vel és linker régióval**
- kapcsolódó szénhidrát nincs a fehérjén, nem glikoprotein
- kis molekulatömeg
- semleges (neutrális) izoelektromos pont (pI)

## **EGIV, EGV**





# *Trichoderma reesei* cellulázok

$\beta$ -glükózidázok (BGL)

## **BGLI** (Cel3A)

- **extracelluláris cellobiáz**
- >50% a sejtfalhoz kötve marad
- katalizálja a cellobióz hidrolízisét, cellooligoszacharidok nem redukáló végéről glükóz egységeket hasít le
- mennyiségének növelése a cellulóz bontása során növeli a redukáló cukor keletkezésének sebességét  $\Rightarrow$  a teljes celluláz komplex  $\beta$ -glükózidáz aktivitása limitálja a cellulóz teljes hidrolízisét
- szerepet játszik az **oldható inducer keletkezésében** (szoforóz)

## **BGLII** (Cel1A)

- **intracelluláris  $\beta$ -glükózidáz**
- a cellobióz mellett hidrolizálja a cellotriózt és -tetraózt, kis mértékben a szoforózt is bontja
- cellotetraózból glükóz és cellotrióz  $\Rightarrow$  nem bontja a belső, **csak a szélső glikozidos kötést**
- transzglykoziláz aktivitással rendelkezik, a cellobiózból elsősorban cellotriózt, glükózból szoforózt és cellobiózt állít elő
- semleges pH optimum ( $\leftrightarrow$  extracelluláris *T. reesei* cellulázok)



## Trichoderma reesei

---

Optimális sejtnövekedési hőmérséklet: 32-35°C, enzimtermelés: 25-28°C.

Általában 28 °C-on végzik a fermentációt.

indukálni kell az enzimtermelést, lehetséges induktorok:

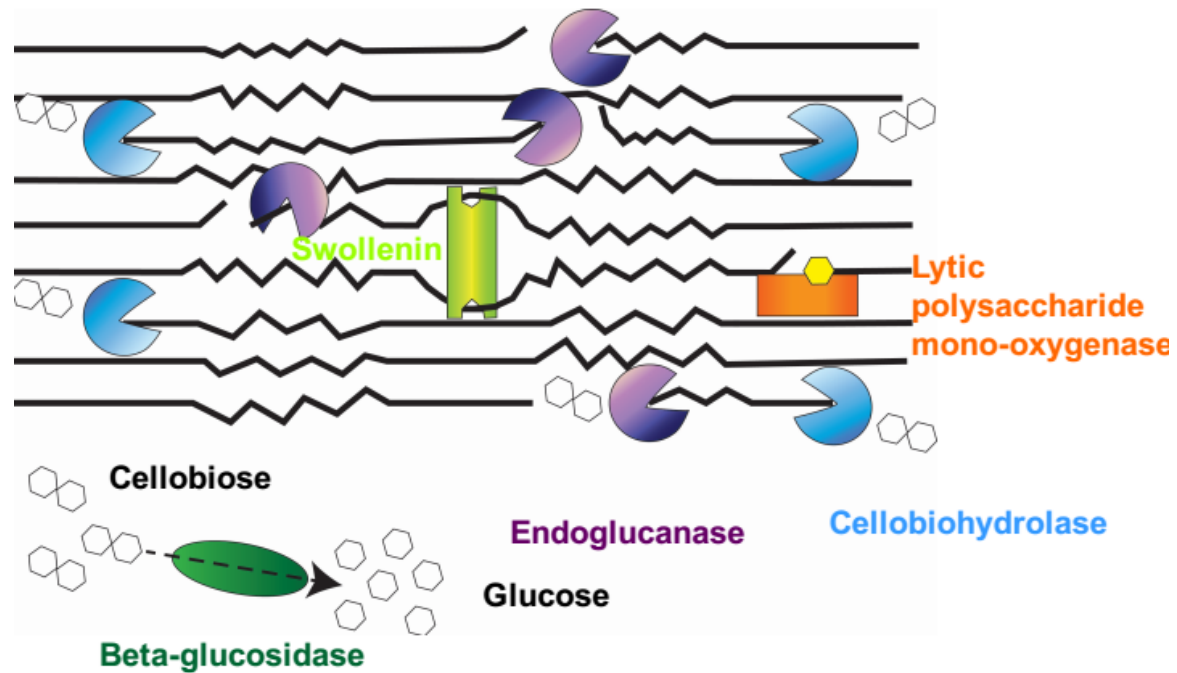
cellulóz, cellobióz, laktóz, szoforóz (glükóz diszaharid  $\beta$ -1,2-kötéssel).

- pH optimum: 4,8-6,0 között.
- Életciklusa: lag, exponenciálisan növekvő (pH~3), stacionárius és hanyatló fázis. A fermentáció 4-5. napja körül az enzimaktivitás állandósul. A kezdeti szakaszban alacsony  $\beta$ -glükozidáz aktivitás mérhető.
- Az extracelluláris enzimek aggregátumot képezhetnek. (Hat fehérjéből áll, celluláz,  $\beta$ -glükozidáz és xilanáz aktivitást mutat.)





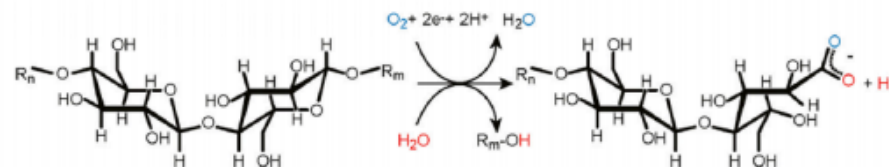
## The new paradigm for cellulose hydrolysis





## Lytic polysaccharide mono-oxygenase

- Oxidative action that depends on the presence of divalent metal ions and an electron donor
- Flat substrate-binding surface
- Capable of cleaving crystalline cellulose
- Bacterial LPMOs classified as CMB33, now reclassified to AA10
- Fungal LPMOs classified as GH61, now classified to AA9



**Figure 3 Summary of the oxidative cleavage of cellulose.** In the case of cleavage by CelS2, a CBM33, and PcGH61D [17] the only oxidized sugars observed are aldonic acids, as indicated in this figure. Other members of the GH61 family seem to generate additional oxidized species, with oxidation at C4 or C6 (see Quinlan et al. [13] and Phillips et al. [16] for further discussion).

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2





# Cellulázok alkalmazása

---

- Élelmiszeripar
- Takarmányozás
- Textil ipar
- Papír ipar
- Vegyipar
- Gyógyszeripar
- Bioüzemanyag





# Felhasználás

Application

## **Textilipar**

- farmerkoptatás, végkikészítés

## **Cellulóz- és papírgyártás**

- rostosítás, fehérités, szilárdság, víztelenedés fokozása, festéktelenítés

## **Mosószeripar**

- bolyhosodás csökkentése

## **Takarmány**

- emészthetőség javítása

## **Élelmiszeripar**

- sütőipar: tészta minőségének és a termék eltarthatóságának javítása
- kávémagok csírázásának gyorsítása
- olívaolaj préselés
- gyümölcsle: sejtfal megbontása → kinyert gyümölcsle mennyisége↑
- sör, bor: minőségjavítás, termelés fokozása

## **Második generációs üzemanyag alkohol előállítás**





# Textilipar

cellulase enzymes for textile industry

## Farmerruházat koptatása / Ageing of denim

### kőkoptatás / stone-washing

- 1980-as évek eleje
- habkő → gép- és termék-rongálódás, portermelődés
- savas mosás: részben jobb, de más problémák

### bio-koptatás / biostoning

- **1980-as évek** végétől (első kereskedelmi termék 1987 Novo)
- először **habkővel együtt, a fakítás gyorsítására**
- **savas EG-okkal:** a felületi szálak gyengítése, a szálvégek „levágása”
- → indigó festék fellazul → mechanikai hatással eltávolítják a felületről + **a puhaságot is növelik**
- 1980-as évek közepén véletlenül fedezték fel a fakító-hatást, amikor puhításra használták
- probléma: festékrészecskék visszatapadása / back staining + farmeranyag gyengül, szilárdság ↓
- *T. reesei* EGII
- **ma: semleges EG-okkal**
- lakkázokkal





## Textíliák végkikészítése / Finishing

- enzimés kezelés → növeli a puhaságot
- főleg **mesterséges szálaknál**, melyek megfelelő kikészítés nélkül **durva tapintásúak**
- Lyocell: fonál szerves oldószerben (N-metilmorfolin N-oxid) oldott fa cellulózból (mint a Viszkóz, de ott NaOH+CS<sub>2</sub>)  
fibrillák enzimés hidrolízise → foszlásra való hajlam csökkentése

## A használat okozta bolyhosodás megszüntetése / Biopolishing, biofinishing

- bolyhosodás megelőzése ill. megszüntetése
- mosószerekben
- főleg savas endoglükánáz enzimekkel
- kilógó rövid szálak, mikrofibrillák „**levágása**” → simább felület, élénkebb szín

## döntően *Trichoderma* és *Humicola* eredetű enzimek



# Textilipar

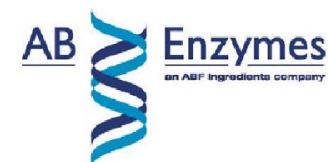
cellulase enzymes for textile industry

## „Ecostone” celluláz

- semleges és savas cellulázok (endoglükanázok)

## „Ecostone” lakkáz

- oxidálja az indigó festéket, koptatásra vagy fehéritésre



## Cellusoft, DeniMax, Novoprime, Valumax

- celluláz / endoglükanáz

## DeniLite, Novoprime Base

- lakkáz

## Aquazym, Novoprime D

- $\alpha$ -amiláz  
keményítő adagolása a szövetszálak védelmére  
feldolgozás után enzimmel kíméletesen, szelektíven eltávolítható





# Cellulóz- és papíripar

enzymes for pulp and paper industry

- **Bio-mechanikai rostosítás**

kismértékű bontás a **mechanikai rostosítás energia-igényének csökkentésére** első őrlés után (akkor jobb az enzim hozzáférése)

- **Bio-fehérités**

oxidáz enzimekkel (lignin-peroxidáz, lakkáz, mangán-peroxidáz) **roncsolják a rostok lignin-tartalmát** hemicellulázokkal fokozzák a **lignin eltávolítását** (indirekt hatás) *T. reesei* EGI (xilánáz aktivitása miatt)

- **A festékeltávolítása hulladékpapírból**

**ma főleg:** vegyszeres technológia lúgos pH – sárgulás  
fejlesztés: festékrészecskék leválasztása a **cellulóz részleges hidrolízisével**

- **Szekunder rostok víztelenedésének javítása**

nagy vízkötő képességű anyagok hidrolízise



# Víztelenedés javítása

drainage improvement

## ▪ Enzim

- teljes celluláz / hemicelluláz komplex – *T. reesei*
- hemicellulázok – hatástalanok / csekély hatás
- cellobiohidrolázok – hatásuk nem jelentős
- **endoglükanázok – kulcskomponens**

## ▪ Mechanizmus

- **finom rostok hidrolízise** (nagy fajlagos felület, könnyen támadható)
- rost külső rétegének, ill. az azon elhelyezkedő mikrofibrillák hidrolízise: „**peeling effect**”
- **rostok felületén lévő** amorf, gélszerű poliszacharid réteg hidrolízise
- az enzim, mint fehérje (retenciós szerekhez hasonlóan) → kis **rostok flokkulálódása**

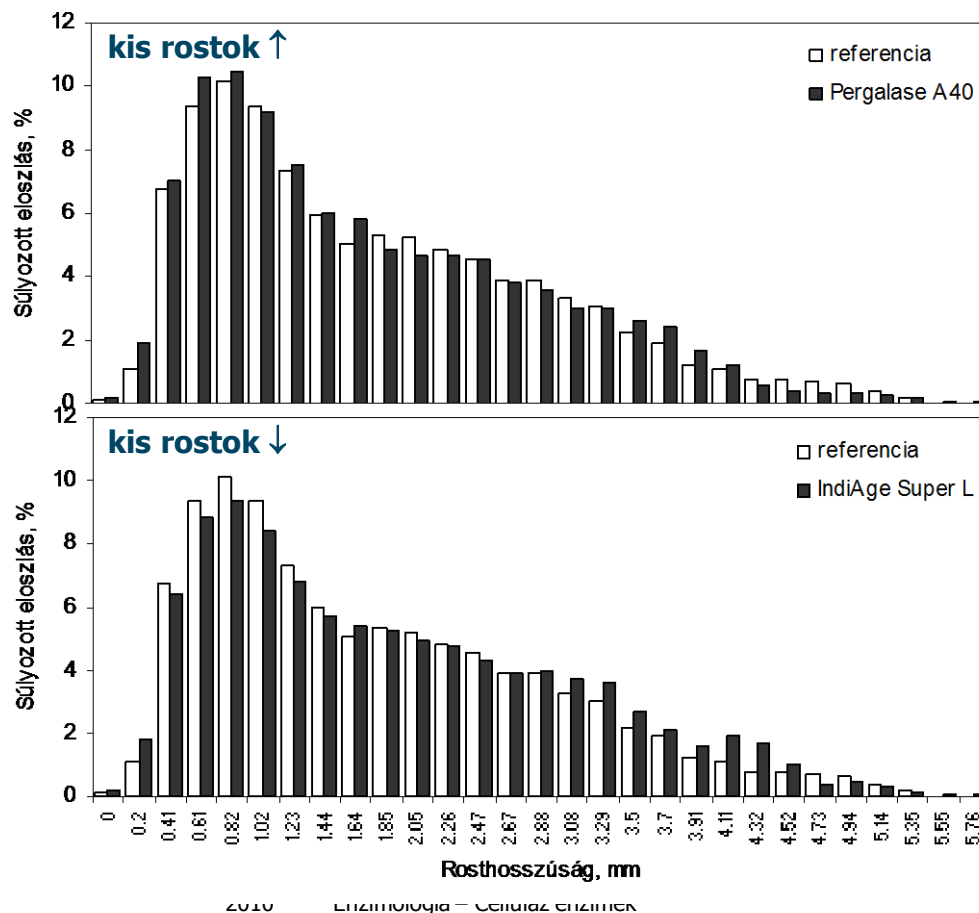
## ▪ Eredmény

- őrlés fokozása – szilárdság növelése
- gyengébb minőségű alapanyag felhasználása
- nagyobb hígítás - a lapszerkezet javítása
- **gyorsabb víztelenedés** - a papírgép sebességének növelése



# Cellulóz- és papíripar

enzymes for pulp and paper industry



## Kisméretű rostok hidrolízise

rosthossz-eloszlás  
(Kajaani rost-analízis)

- **Pergalase A40 (Genencor)**

papíripar: szekunder rostok víztelenedésének javítására

**teljes celluláz / hemicelluláz komplex**

- **IndiAge S. L (Genencor)**

textilipar: farmerárak végkikészítése („biostoning”)

**endoglükánáz (EGIII, TrCel12A )**

savas endoglükánáz (pH 5-6)  
CBD nélkül, 25 kDa



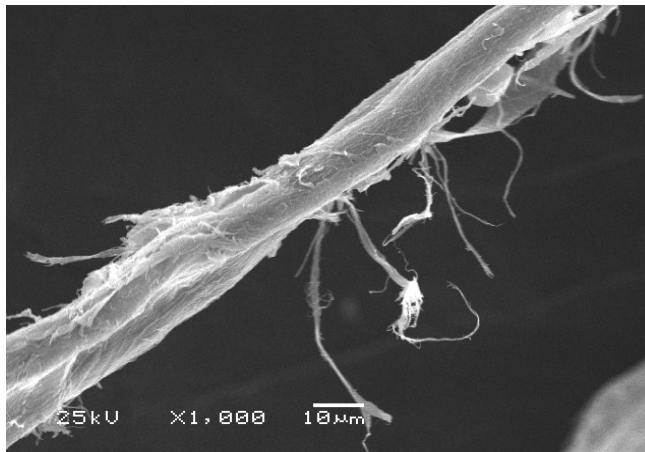


# Cellulóz- és papíripar

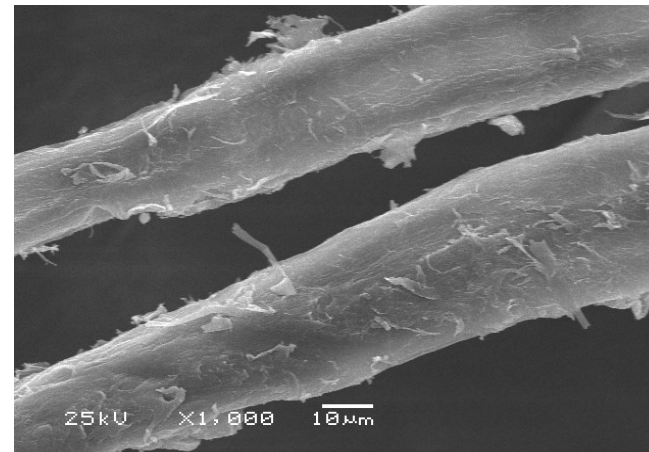
enzymes for pulp and paper industry

**Felületi mikrofibrillák hidrolízise**  
pásztázó elektron mikrográf

**Referencia** – enzimes kezelés nélkül



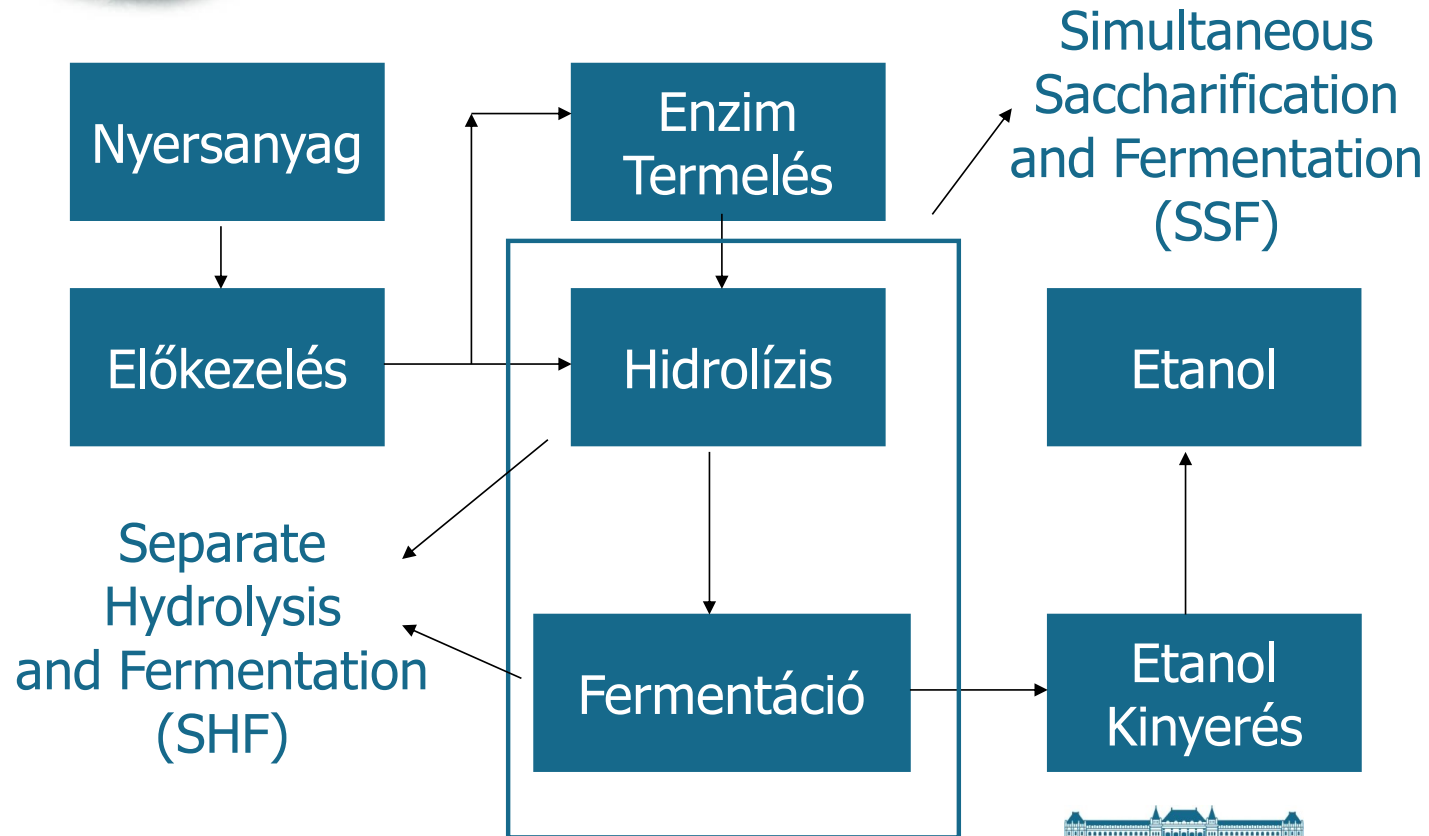
**IndiAge Super L** – TrCel12A (EGIII)  
10-szeres E dózis







# Bioüzemanyag előállítás





## Üzemanyagalkohol lignocellulózokból

---

- A jövőben nagy jelentőségű ipar lehet
- Jelenleg komoly kutatás és fejlesztés
- Kísérleti üzemek, félüzemek, demonstrációs üzemek már vannak
- Az USA-ban 2015-ben már 8,3 millió liter lignocellulóz alapú üzemanyag etanolt gyártottak (58 milliárd liter kukorica alapú etanol mellett)
- Az EU-ban Olaszországban (Crescentino) épült fel a világ eddigi legnagyobb lignocellulóz alapú üzemanyag alkohol gyára, 2013 októberében adták át 75 millió liter/év tervezett kapacitással. Tervezett feldolgozandó nyersanyagok: búzaszalma, rizsszalma, Arnudo donax (nád).