

A faanyag mint energetikai anyagforrás

- A világ favagyona ~300 milliárd m³. Évente 3 - 4 milliárd m³ kitermelés.
 - Ipari fa (~ 50%)
 - Kémiai és energetikai hasznosítás (tüzelő- és rostanyag: ~ 50%) → 1.5 milliárd m³/év
 - További kémiai hasznosítás (vegyszerek előállítása, kinyerés, stb.: elenyésző mennyiségben, de jelentős anyagi értéket képvisel)
-
- Fotoszintézis végterméke. C-H, C-O, és O-H kötések: *Oxidálható*.
 - Elégetés levegővel, oxigénnel. Termékek: CO₂, H₂O. Oxigénhiány esetén: CO.



Száraz faanyag: 48-50% C, 43-44% O, 5-6% H.

ΔH : reakcióhő (negatív: exoterm reakció, pozitív: endoterm reakció)

A faanyag mint energetikai anyagforrás

A fakomponensek számított és mért égéshője (exoterm)

Fakomponens	Égéshő számított érték	Égéshő mért érték
	(kJ/kg)	(kJ/kg)
cellulóz	17 443	17 030–17 995
holocellulóz	–	18 344–18 441
xilán	18 037	–
xilán (deacetilezett)	17 790	–
hemicellulóz	–	10 670–17 954
lignin $C_9H_{8,77}(OCH_3)_{1,58}$	25 129	–
lignin	–	21 180–26 740
etanol-benzol extrakt	–	34 500–40 500

Néhány fontosabb fafaj égéshője (exoterm)

Fafaj	Égéshő (kJ/kg)
Lucfenyő	19 950–21 100
Vörösfenyő	19 750–20 058
Tölgy	19 605–19 992
Bükk	19 720–19 910
Akác	19 620–17 010
Nyár	18 815–18 855

Faanyag égéshőjének meghatározása számítással a tiszta komponensek égéshőjéből, vagy kalorimteriás méréssel.

Égéshő: egységnyi tömegű tüzelőanyag tökéletes elégetésekor keletkezett hőmennyiség. A keletkező és az eredetileg jelen lévő víz cseppfolyós halmazállapotú és állandó 20 °C hőmérsékletű (ie: nem párolog el.).

Fűtőérték: egységnyi tömegű tüzelőanyag tökéletes elégetésekor keletkezett hőmennyiség. A keletkező és az eredetileg jelen lévő víz gőzhalmazállapotban van jelen és állandó 20 °C hőmérsékletű (ie: elpárolog).

A faanyag mint energetikai anyagforrás

A víz párolgáshője: 2514 kJ/kg
A metanol párolgáshője: 1100 kJ/kg
Az etanol párolgáshője: 841 kJ/kg

$$\dot{E} = \Delta H_C \cdot C\% + \Delta H_H \cdot (H\% - 1/8 \cdot O\%)$$

\dot{E} – égéshő (kJ/kg)

ΔH_C – elemi szén égéshője

ΔH_H – elemi hidrogén égéshője

C%, H%, O%: a megfelelő elemek
százalékos mennyisége

$1/8 \cdot O\%$ - hőt nem leadó, oxigénhez
kötött hidrogén. Nem oxidálható.

$(H\% - 1/8 \cdot O\%)$ – diszponibilis, nem
kötött hidrogén. Oxidálható.

$$F = \dot{E} - \Delta H_{\text{víz}} \cdot (9 \cdot H\% - H_2O\%)$$

F – fűtőérték (kJ/kg)

$\Delta H_{\text{víz}}$ – a víz párolgáshője (kJ/kg)

H_2O – a fa nedvességtartalma (%)

H% - a fa H tartalma (%)

$9 \cdot H\%$ - a fa elégetése során
keletkező víz százalékos aránya

A faanyag mint energetikai anyagforrás

A fa energetikai sajátosságai

- Kémiai összetétel (lignin, járulékos anyag tartalom, víztartalom)
- Térfogati sűrűség, porozitás, fajlagos felület

A fagáz előnyös tulajdonságai

- Jobb éghetőség mint az aprított faanyag esetében.
- Gyorsan indítható, szabályozható égés.
- Nem igényel légfelesleget.
- Fagáz előállítása: a fa elégetése magas hőmérsékleten a szükségesnél kevesebb oxigén jelenlétében.



generátorgáz képződési reakciók

- Reakciók vízzel (*vízgázképződési reakciók*)



A faanyag mint energetikai anyagforrás

Alapanyag	Kihozatali értékek		Gázösszetétel %	
	Fűtőérték (kJ/Nm ³)	Gáztérfogat (Nm ³ /kgfa)	Levegővel	Oxigénnel
Fa alapanyagon				
A gáz fűtőértéke	5900–6700		CO ₂ 5–12	23
A gáz térfogata	2,5–3,5		CO 22–27	40
– melyből lepárlási gáz	0,15–0,25		H ₂ 15–23	26
	CH ₄		2,5–3,8	5,0
	N ₂		40–60	0,5
Faszén alapanyagon				
A gáz fűtőértéke	10 000–11 000			
A gáz térfogata		1,8–20		

Generátorgáz összetétele és fűtőértéke levegővel, illetve oxigénnel történő előállítás esetén.



Egy fagáz üzeműre átalakított Ford traktor.



A generátorgáz elégetése során lejátszódó reakciók:



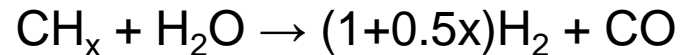
Fluidizált ágyas fagáz üzem (Güssing, Ausztria).

A faanyag mint energetikai anyagforrás

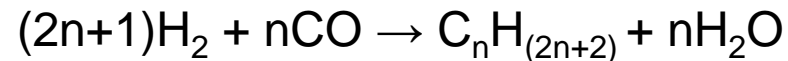
A fa cseppfolyósítása

- Előzmények: szén katalitikus cseppfolyósítása (hidrogénezése). Cél: illékony szerves vegyületek előállítása. Fischer-Tropsch szintézis: kőszénből folyékony szerves vegyületek (pl. metanol) gyártása. Pl. műbenzin előállítása.

1. Szintézisgáz előállítás (szén, fa, biomassza):



2. szintézis



- Fa cseppfolyósítása:

1. Vizes vagy bázikus közegben. 200-250 °C-on, katalizátor segítségével.

2. Szerves oldószerben, H₂ vagy CO atmoszférában végrehajtott redukció. 70-280 bar nyomás, 200-400 °C. Termékek: illékony szerves vegyületek, gázok.

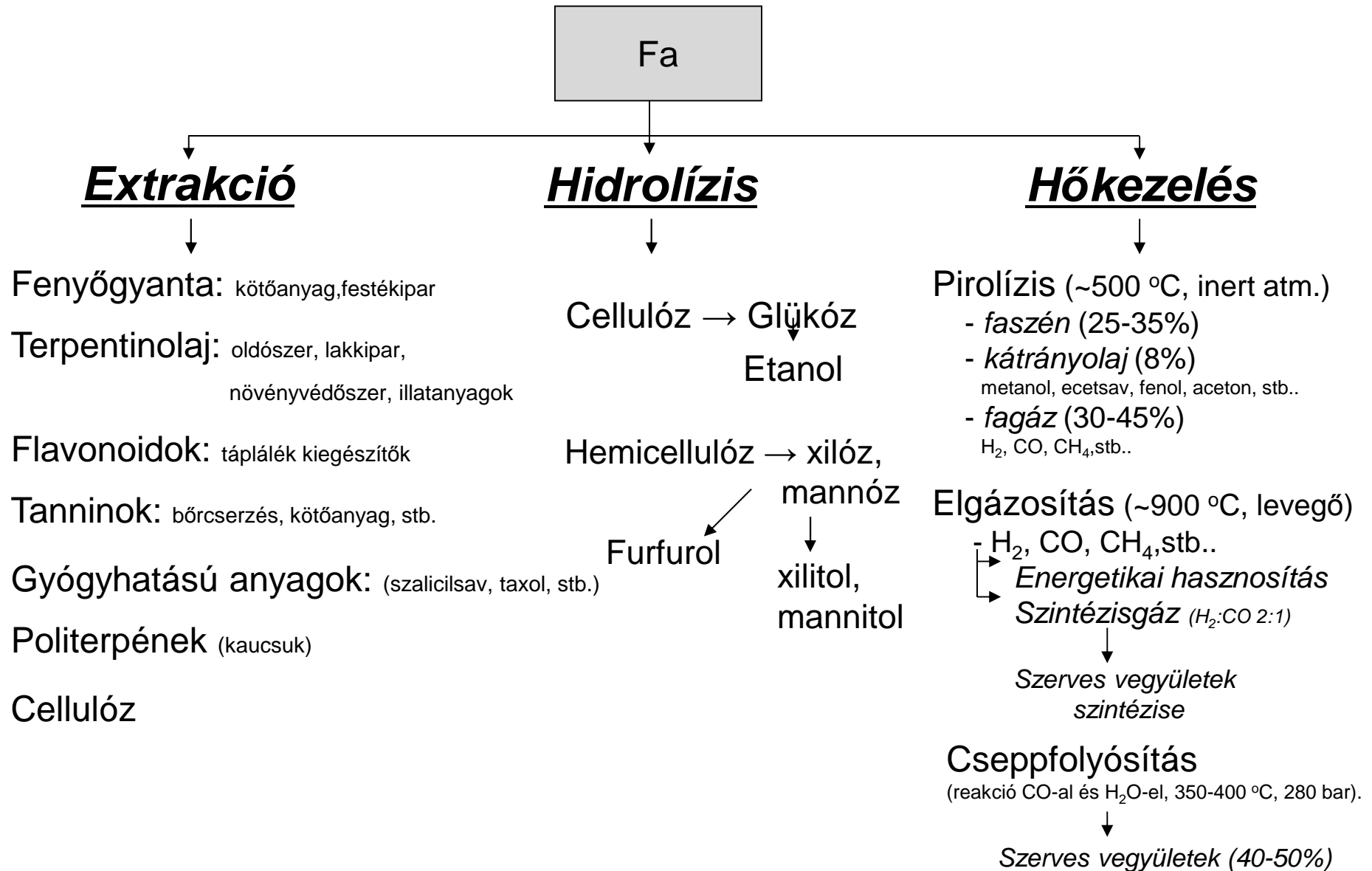
A faanyag mint kémiai anyagforrás

A kémiai feldolgozás klasszikus módszerei

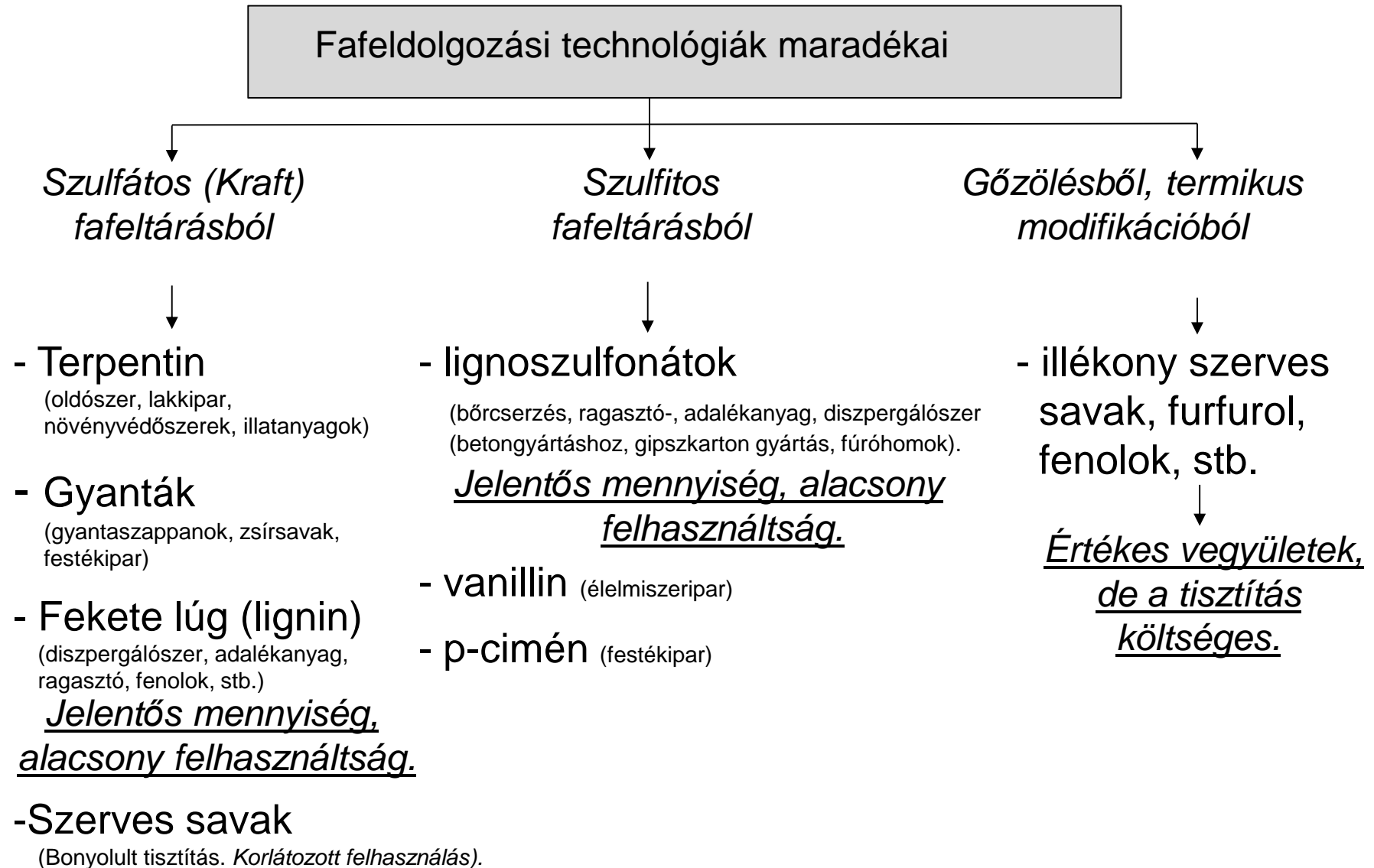
Felhasznált faanyag

- Ipari fa (~ 50%)
- Energetikai és kémiai hasznosítás ~ 50%
 - *Eddigi főbb irányok:* rostanyag és cellulózgyártás
 - *További kémiai hasznosítás:* (vegyszerek előállítása, kinyerés, stb.: elenyésző mennyiségben, de jelentős anyagi értéket képviselhet...)

A faanyag kémiai feldolgozásának klasszikus módszerei



A faanyag kémiai feldolgozásának klasszikus módszerei



A faanyag mint kémiai anyagforrás

Előnyök 😊

- Nagy mennyiségben rendelkezésre álló, megújuló nyersanyag
- Sokféle vegyületet tartalmaz
- Kémiai szintézis lehetősége
- Számos ipari alkalmazási lehetőség

Hátrányok ☹️

- Bonyolult átalakítási, tisztítási technológiák szükségesek
- Hasznosítás eddig csak speciális alkalmazásokban kis volumenben
- Faanyag szállítása, kezelése energiaigényes
- Van olcsóbb kémiai alapanyag a fa helyett (de meddig..?)

A faanyag kémiai feldolgozásának jövője

Meghatározó tényezők

- A fosszilis energiahordozók jövőbeni hozzáférhetősége
- Versenyképesség más alapanyagokkal
- Környezetvédelmi előírások, törekvések (CO₂ kibocsátás, stb.)

A faanyag kémiai feldolgozásának jövője

Jövőbeli irányok

- „Tiszta” kinyerési (extrakciós) módszerek kidolgozása
- Biofinomítás – „zöld” alapanyagok előállítása (üzemanyag és vegyipari alapanyag)
- Új, hatékonyabb eljárások kifejlesztése
- Fahulladékok (fűrészpor, kéreg, vágástéri apadék, stb.) fokozottabb felhasználása
- Lehetséges ipari alkalmazások:
 - Építőipar (kompozitok, ragasztók, gyanták)
 - Közlekedés (üzemanyagok, pl. etanol, metanol, etilén, stb.)
 - Egészségügy (gyógyászat, higiénia, táplálkozás, stb.)
 - Vegyipar (festékek, műanyagok, energiahordozók)
 - Faanyag (kémiai) modifikációja...

A faanyag kémiai feldolgozásának jövője



Fluidizált ágyas fagáz üzem
(Güssing, Ausztria).
Alapanyag: fahulladék

ARBOFORM® „Flüssigholz“ / „liquid wood“	ARBOFILL®	ARBOBLEND®
<p><i>Our granules ARBOFORM®, ARBOBLEND® and ARBOFILL® can be processed with injection moulding, extrusion, calendering, blow moulding, deep drawing or pressing into moulded parts, half-finished product, sheets, films oder profiles.</i></p>		

Lignin (papírgyártásból) + rostanyag (len, kender, cellulóz, stb) -> termoplasztikus anyag
(hangszerek, karóra, sampondoboz, autokárpit, furnér, precíziós sablonok, fegyverek, nyomtatott áramkör hordozók, számítógépház, stb.)
5000 tonna/év. (Tecnaro GmbH, Németország)

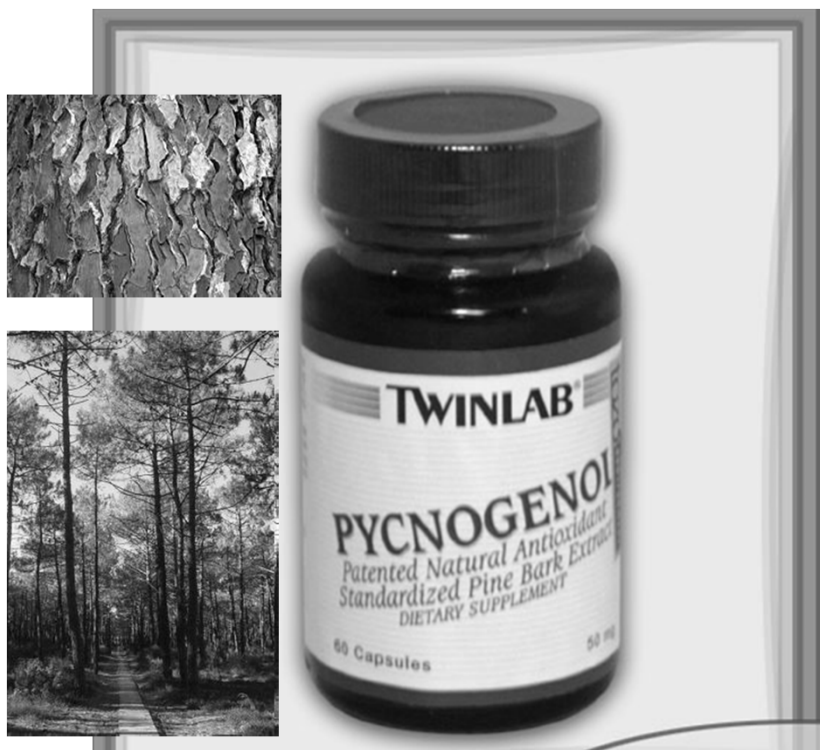


Nógrádi Erdőkémia Kft., Magyarország

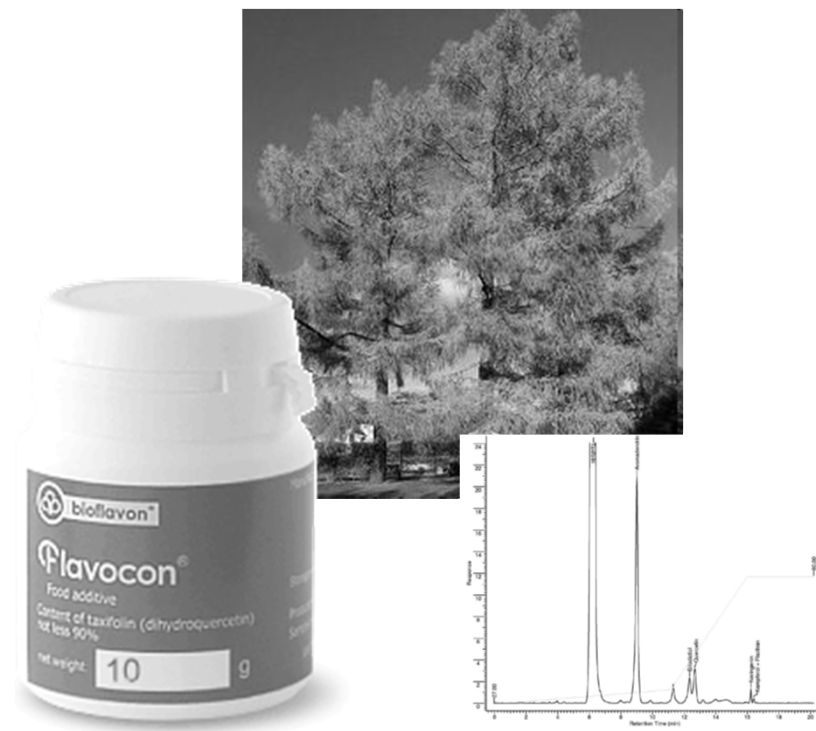
**Metanol előállítása kommunális-
és erdészeti hulladékokból**
Enviro-Pharm Kft., Magyarország

A faanyag kémiai feldolgozásának jövője

Új termékek faanyag és fakéreg járulékos anyagaiból.



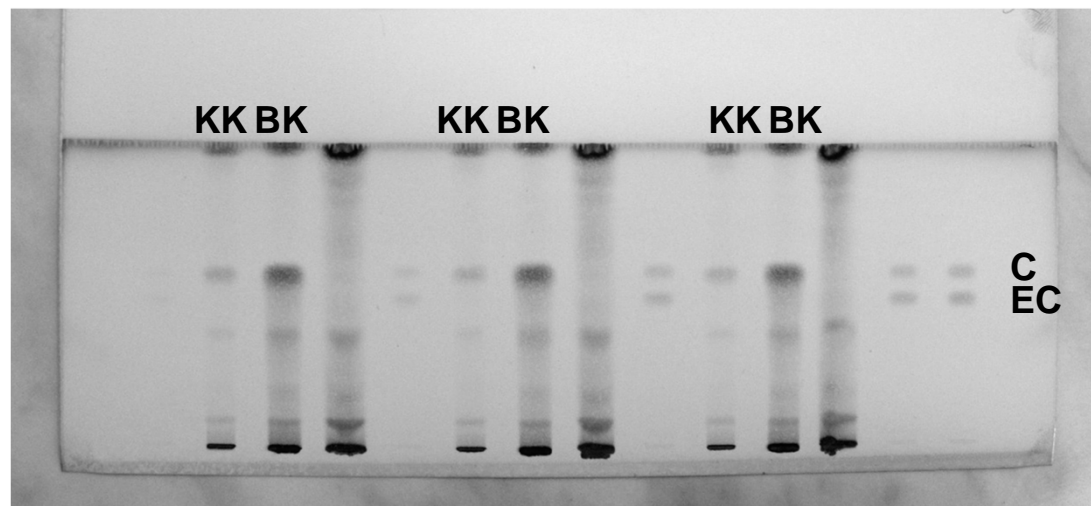
A tengerparti fenyő (*Pinus maritima* L.) kérgéből előállított táplálék-kiegészítő készítmény.



Szibériai vörösfenyő (*Larix sibirica* L.) tönkjéből kivont és előállított táplálékkiegészítő szer. (90% dihidrokvercetin, 10% kvercetin, naringenin,kaempferol, eriodictiol, stb...)

A faanyag kémiai feldolgozásának jövője

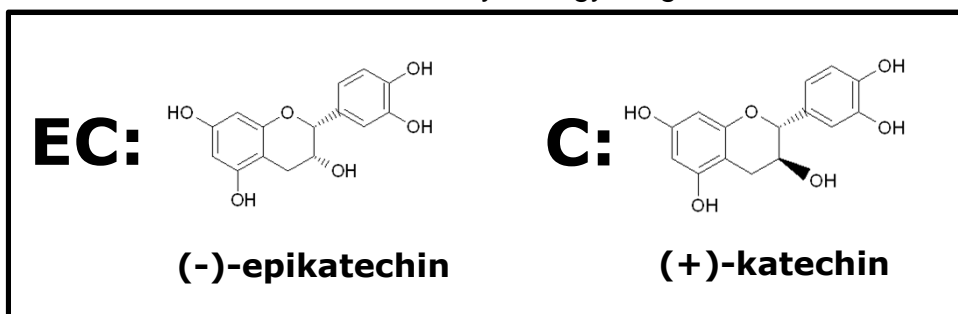
Antioxidáns flavonoidok kinyerése hazai fafajok kérgéből.



Katechinek vékonyréteg kromatográfiás elválasztása kocsányos tölgy kérgéből.



A kocsányos tölgy kérgé

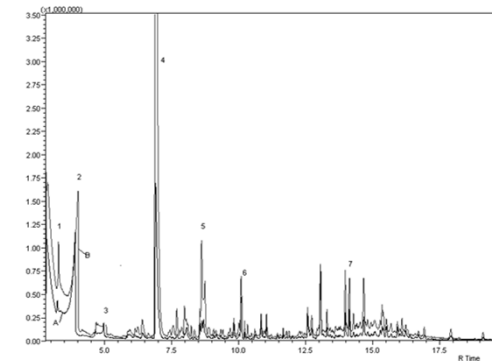
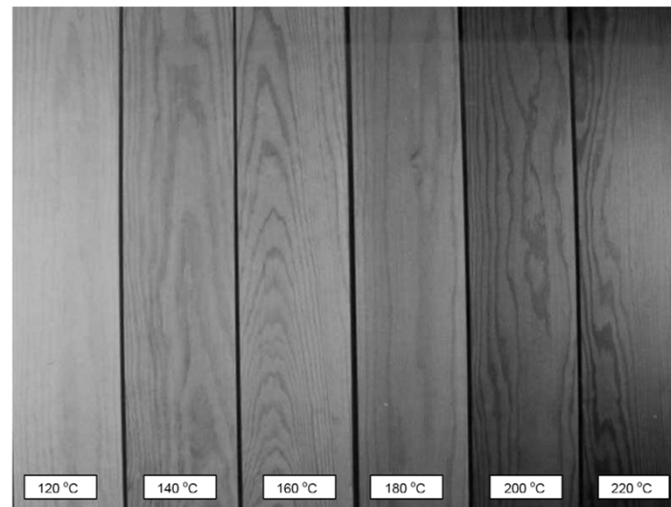


Antioxidáns, gyökfogó hatás

- Táplálék kiegészítő
- Légszűrők (klíma berendezés)
- stb.

A faanyag kémiai feldolgozásának jövője

Faanyag termikus modifikációja (termokémiai átalakítása)



- Méretstabilitás, szín, tartósság javul
- Vegyszermentes kémiai feldolgozás
- Új anyagvizsgálati módszerek fejlesztése, technológia nyomon követése.

A faanyag kémiai feldolgozásának jövője

Faanyag termikus modifikációja (termokémiai átalakítása)

- Kondenzvíz hasznosítása (probléma, korrozív)

Kezelt fafaj	Ecetsav	Hangyasav	Furfurol	5-metil-Furfurol	Gvajakol	2.6-dimetoxi-fenol	Vanillin
Köris	49.6	7.0	1.81	2.34	0.660	0.059	0.217
Tölgy	108.1	13.6	25.53	6.46	0.115	0.166	0.416

Kondenzvíz összetétel (g/liter)



- Vegyületek kinyerése kondenzvízből
- Hasznosítás alapanyagként (pl. műgyanták előállítása)

A faanyag mint kémiai anyagforrás

A faanyag mint rostforrás

- A cellulóz és a farost a világon az egyik legnagyobb mennyiségben termelt ipari anyag.

Csoportosítás:

- Mechanikai rostosítás (mechanical pulping):
 1. Facsiszolatgyártás (groundwood)
 2. Farostgyártás
 - a, mechanikai fafeltárás
 - b, kémiai-mechanikai rostosítás
 - c, termomechanikai rostosítás
 - d, kémiai-termomechanikai rostosítás
- Kémiai fafeltárás (chemical pulping):
 1. Félcellulózgyártás
 2. Nagyhozamú cellulózgyártás
 3. Cellulózgyártás
 - a, Szulfitos fafeltárások
 - b, Lúgos fafeltárások (szulfátos eljárás)
 - c, nem hagyományos eljárások

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Facsiszolatgyártás (groundwood)

-Egyik legrégebbi technológia. Duzzasztás, majd csiszolás csiszolókövel nagy fordulaton. Malomban vagy őrlőben utókezelés, majd lappá préselés.

- Tulajdonságok:

- „fa” tartalmú papírok előállítása (kartondoboz, tapéta, stb)
- olcsó
- jó optikai tulajdonságok
- jó nyomtathatóság
- alacsony tartósság, rossz szakíthatóság

Ma alkalmazott leggyakoribb facsiszolat gyártási eljárások:

- GW (SGW) (stone groundwood): csiszolás csiszolókövön atmoszférikus nyomáson. Vízhőmérséklet: 70-75 °C. Hozam: 98.5%.
- PGW (pressure groundwood): nyomás alá (2.5 bar) helyezett farönk csiszolása. Permetező víz hőmérséklete: 100 °C. Hozam: 98.5%.
- PGW-S (super pressure groundwood): nagy nyomás alá (4.5 bar) helyezett farönk csiszolása. Permetező víz hőmérséklete: 100 °C. Hozam: 98.5%.
- TGW (thermo groundwood): atmoszférikus csiszolás. Permetvíz hőmérséklet: 80 °C vagy magasabb. Hozam: 98.5%.

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Farostgyártás

- Örléses rostosítási eljárás. Tárcsás, kúpos őrlőkön történő aprítás. Különböző nyomáson és hőmérsékleten, vagy vegyszerek hozzáadásával a megfelelő rostméret kialakítható. PI: csomagolópapír, tapéta, stb.

- Tulajdonságok:

- jó fényvisszaverő képesség (fényesség)
- sima felület
- jó alakíthatóság
- erősebb (kevésbé szakítható) mint a facsiszolatból készült papír.
- Eljárástól függően a hosszú rostok aránya megnövelhető.

A ma alkalmazott leggyakoribb farostgyártási eljárások:

- RMP (refiner mechanical pulp): klasszikus eljárás. Atmoszférikus őrlés tárcsás őrlővel.

Faforgács mosása, esteleges előgőzölése majd őrlése. 97.5%

- PRMP (pressure refiner mechanical pulp): ua. mint az RMP, csak megemelt nyomáson és hőmérsékleten. 97.5%

- TMP (thermomechanical pulp): előmelegítés túlhevített gőzzel, majd őrlés magas nyomáson (3-5 bar) és hőmérsékleten (140-150 °C). 97.5%.

- CMP (chemimechanical pulp): vegyileg előkezelt fa őrlése vagy normál vagy emelt nyomáson és hőmérsékleten. 80-95%.

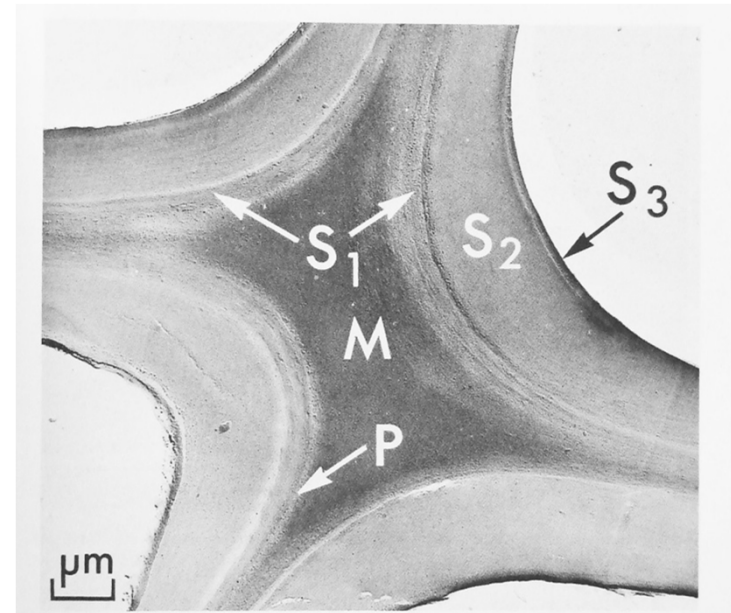
- CTMP (chemitermomechanical pulp): faforgács nyomás alatti őrlése viszonylag kíméletes körülmények közt. 90%.

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

Félcellulózgyártás

- Összetételét tekintve a cellulóz és a farost közé esik.
- Középlamella kémiai (lúgos) feltárása (lignin észleges kioldása, hemicellulózok részleges oldása) majd mechanikai rostosítás.
- A lejátszódó folyamatok hasonlóak mint a cellulózgyártás során végbemenő reakciók.
- Termék osztályozása feltárási fok alapján (kappa-szám).
- Papíripari felhasználás.



A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

Cellulózgyártás

- A többi fakomponens oldhatóvá tétele és eltávolítása a faanyagból.
- Az eltávolítandó anyag és a feltáró vegyszerek közti reakció. (diffúzió a sejtfalon keresztül, reakció, termékek diffúziója az oldatba).
- Lúgos fafeltárási eljárások
- Szulfitos eljárások

- Lúgos feltárási eljárások
 - Szulfátos (Kraft-eljárás)
 - Szódás eljárás

Kraft-eljárás.

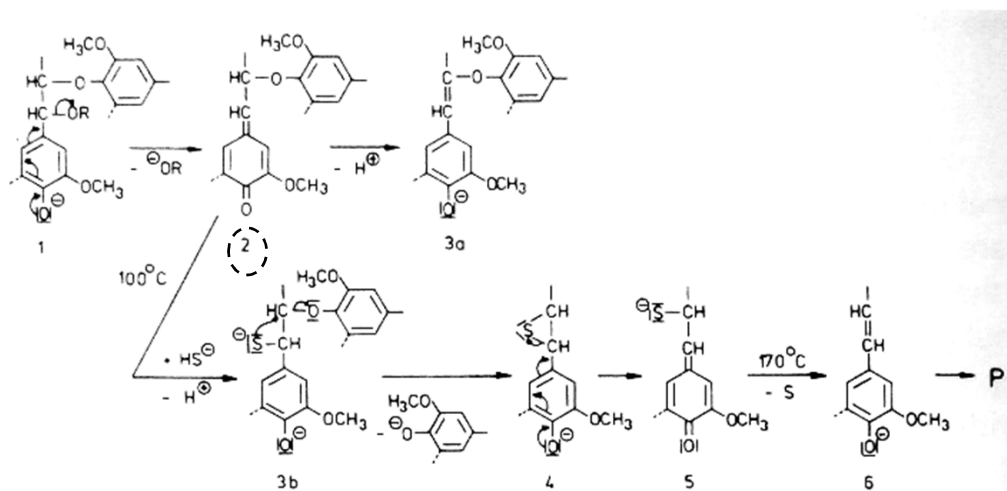
- Világ cellulóztermelésének 80%-át ezzel az eljárással termelik.
- Nem fafaj függő.
- Viszonylag rövid főzésidő (4-6 óra)
- Feltáró vegyszer regenerálható.
- A termelt rost kiváló mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik.
- Hátrány: szulfátcellulóz sötét színű. Fehériteni kell.

A faanyag mint kémiai anyagforrás

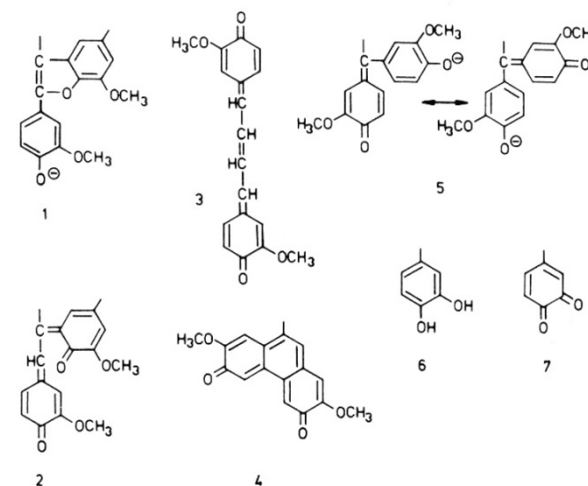
Kémiai fafeltárás

Kraft-eljárás

- Lignin átalakítása (molekulatördelődés, kis molekulatömegű, oldható termékek keletkezése).
- A lignin depolimerizációjából keletkező kinonmetidek kondenzálódnak, ebből keletkeznek a sötét termékek.
- Lignin 100%-a, a hemicellulózok közel 40%-a oldódik ki.



A β -aril-éter kötések hasadása lúgos közegben a jelenlévő szulfid- és hidrogén-szulfid ionok hatására. (2: kinonmetid)

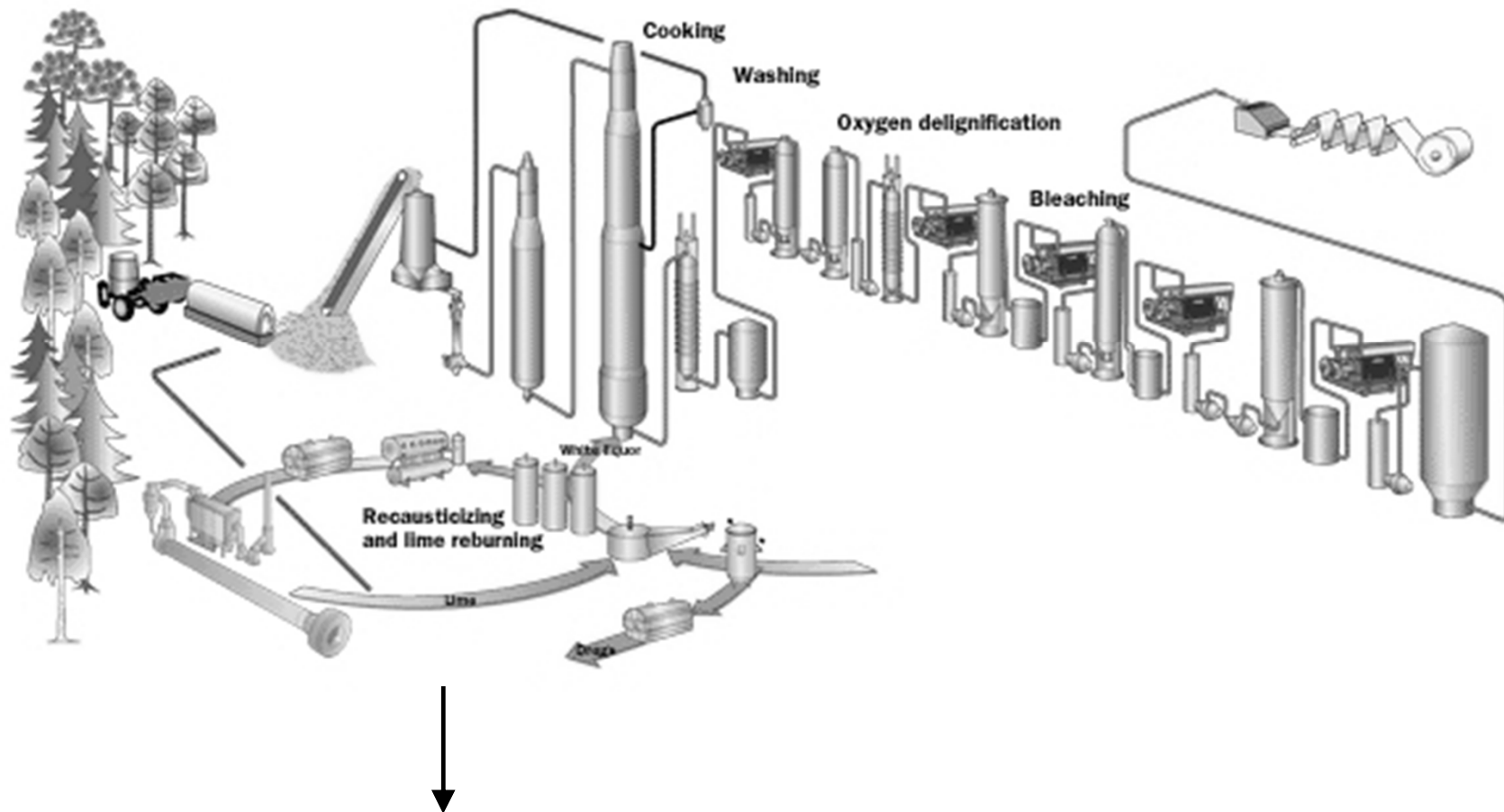


A lignin bomlásából majd a termékek (pl. kinonmetidek) kondenzációjából keletkező kromofórok (színes vegyületek).

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

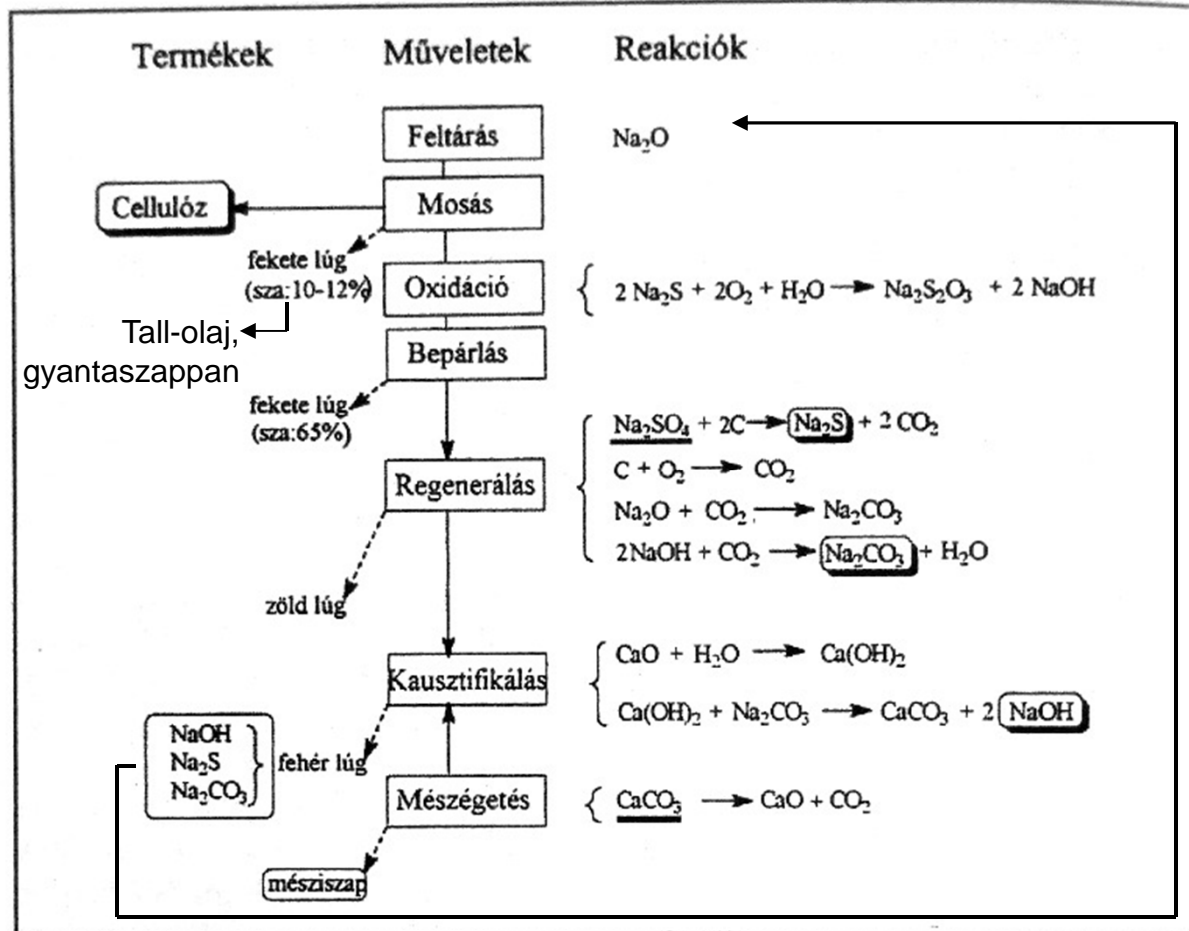
Kraft-eljárás



A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai felfertás

Kraft-eljárás

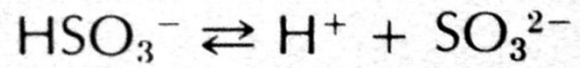
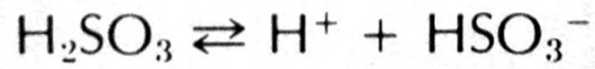
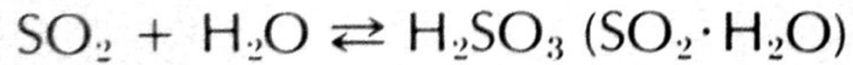


A feltárószer a NaOH. A szulfid- és hidrogén szulfid ionok az aril-éter kötések hasadását segítik elő, gyorsítják a depolimerizációt.

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

Szulfitos eljárások



Savas eljárások (pH=1-2, 40%-os H_2SO_3 tartalom).

Biszulfitos eljárások (pH=4.5, 100%-os HSO_3^- tartalom).

Szulfitos eljárások (pH=9, 100%-os SO_3^{2-} tartalom).

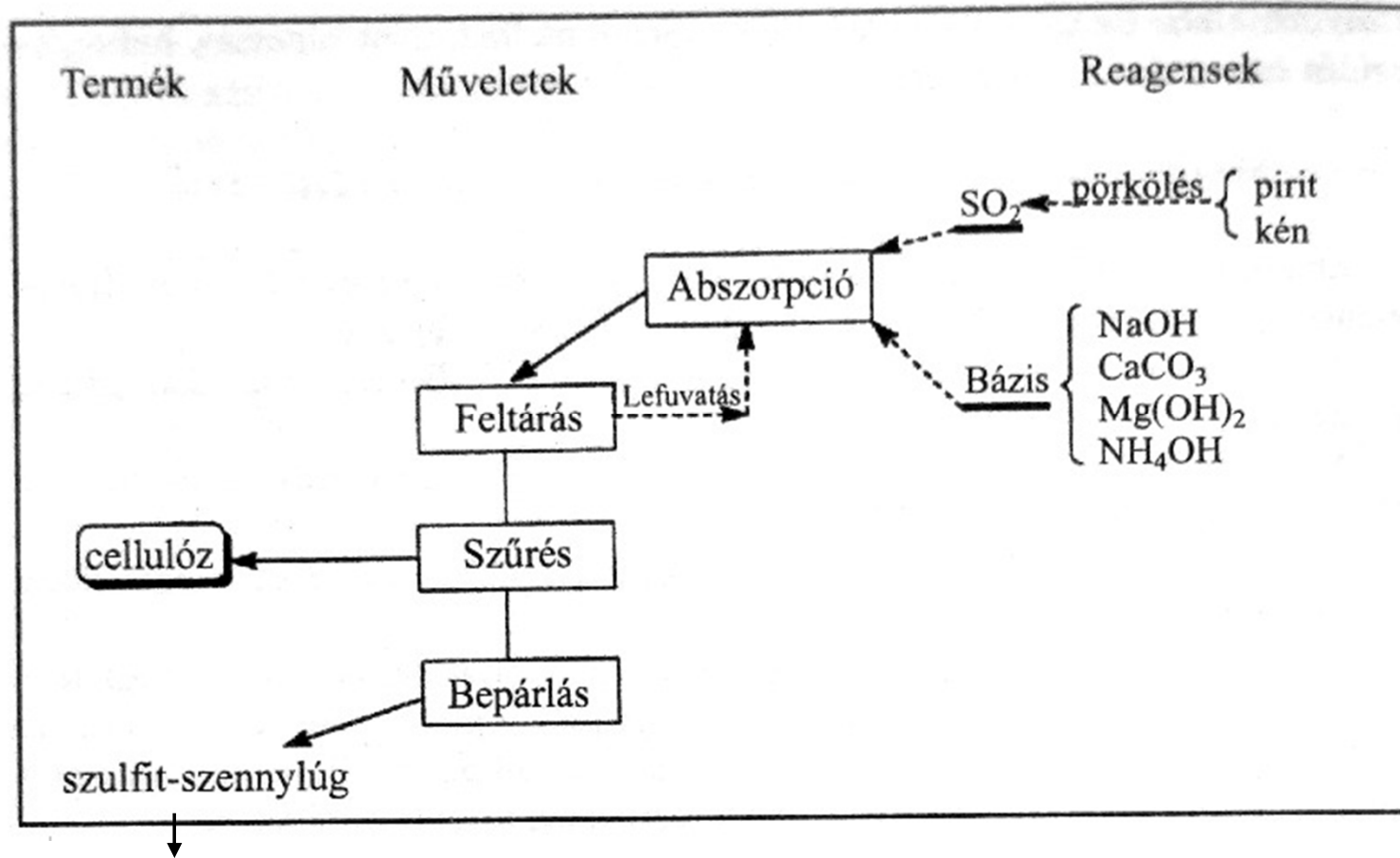
Savas és semleges közegben a lignin α helyzetben szulfonálódik. Hidrofilitás és a vízdoldhatóság növekszik. A szulfonsavcsoport a β -aril kötés hasadását is eredményezi. A molekulatömeg csökkenése kisebb mint a lúgos eljárásokban.

Főzési ciklus 6-8 óra.

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

Szulfitos eljárás sémája



Bepárlás és elégetés vagy kémiai hasznosítás (lignoszulfonátok [diszpergálószer: bőrcserzéshez, betongyártáshoz bekeverő anyagként, gipszkartonhoz, fúróhomok], vanillin).

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

A cellulóz fehéritése

Cél: világosság növelése, telítettség csökkentése

- Lignin megőrző fehérités: kromofór csoportok átalakítása nem színes csoportokká (ritkább).
- Lignineltávolító fehérités: a kromofór csoportokat tartalmazó vegyületek (lignin) eltávolítása (gyakoribb).
- Oxidatív és redukzív fehérités
- Gyökös, anionos és kationos fehérités.

Eljárás	Vegyszer	Szimbólum
Klórozás	Cl ₂	C
Alkáli extrakció	NaOH	E
Hipokloritos kezelés	NaOCl+NaOH	H
Klór-dioxidos kezelés	ClO ₂	D
Peroxidos kezelés	H ₂ O ₂ +NaOH	P
Oxigénes kezelés	O ₂ +NaOH	O

Lignineltávolító oxidatív fehéritési módszerek.

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

A cellulóz fehéritése

Eljárások	Szimbólum
Szulfitos és biszulfitos cellulóz	
háromlépcsős eljárás	C-E-H
négylépcsős eljárás	C-E-H-D
négylépcsős eljárás	C-E-D-H
ötlépcsős eljárás	C-E-D-H-D
Szulfátos cellulóz	
háromlépcsős eljárás	C-E-H
négylépcsős eljárás	C-E-H-D
négylépcsős eljárás	C-D-E-D
négylépcsős eljárás	O-C-E-H
négylépcsős eljárás	O-D-O-D
ötlépcsős eljárás	C-E-H-D-D
hatlépcsős eljárás	C-E-H-D-E-D
hatlépcsős eljárás	O-C-E-D-E-D
hatlépcsős eljárás	O-C-D-E-H-D

Ipari fehéritési eljárások

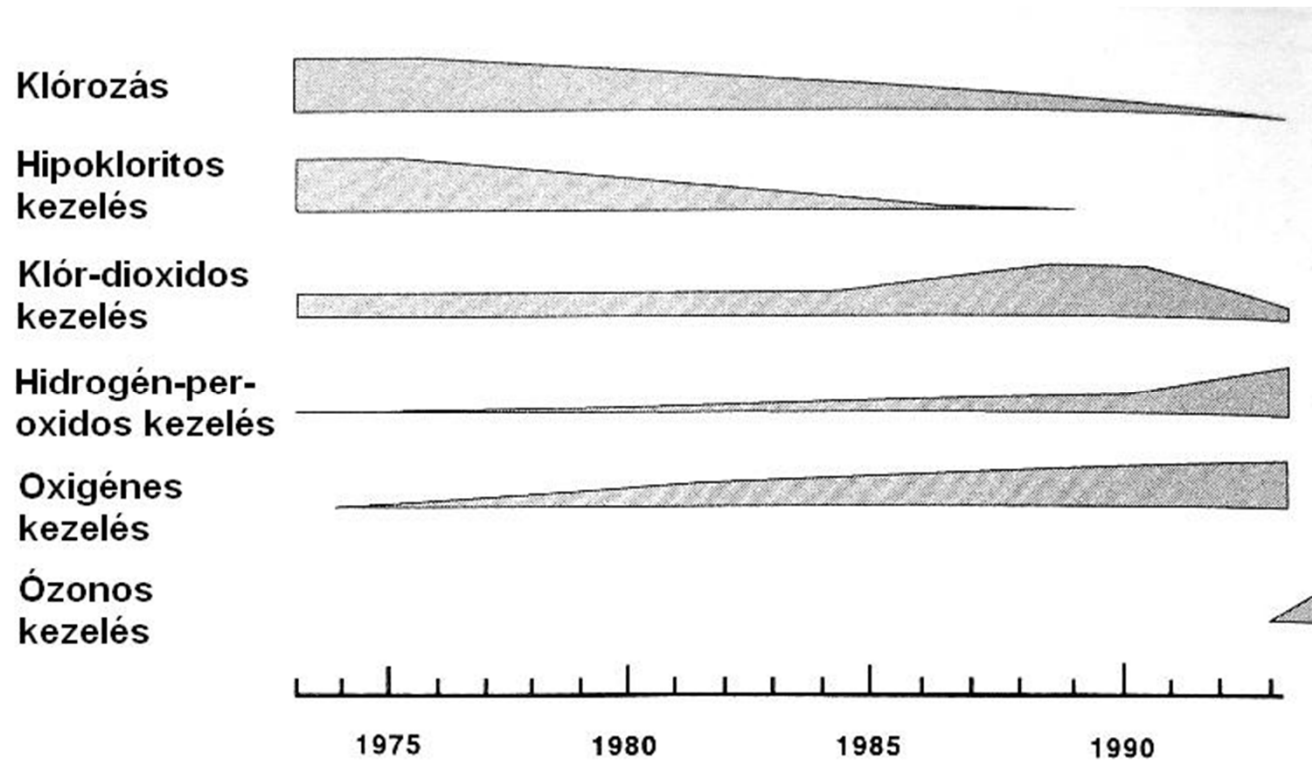
Period (decades)	Sequence	Comments ^b
1880	H	
1910	HEH	
1930	CEH, CEHEH	
1950	CEHDED, CEDED	
1960	(C + D)EHDED	
1970	(C + D)(E + P)HD(E + P)D	D = 0–15%
1980	O(C + D)(E + P)D(E + P)D	D = 0–15%
1985	O(DC)(EO)D(E + P)D	D = 20–60%
1990	O(DC)(EPO)D(E + P)D	D = 40–90%

Ipari fehéritési eljárások alakulása az idővel.

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

A cellulóz fehéritése



A különböző lignin eltávolító fehéritési eljárások alkalmazásának változása Svédországban

A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

A faanyag hidrolízise

- Furfurolgyártás (oldószer, műanyaggyártás, furángyanták, poliuretánok, stb.)
- A faanyag cukrosítása
- A faanyag komplex hidrolízise

A fakomponensek kémiai hasznosítása

- A cellulóz kémiai hasznosítása (hidrolízis, glükóz fermentációja)
- A lignin kémiai hasznosítása (elvileg sok lehetőség, gyakorlatilag kevés alkalmazás; diszpergálószer, emulgeátor, stabilizátor, ragasztó, fenolok, vanillin.)
- Hemicellulózok kémiai hasznosítása. (Cukrok előállítása, édesítőszer, furfurol.)
- Járulékos anyagok kémiai hasznosítása
 - Élő fa megcsapolása (fenyőbalzsam → terpentinolaj + fenyőgyanta. Alkalmazások: terpentinolaj: oldószer, lakkipar, növényvédőszer, illatanyagok. Gyanta: kötőanyag papíriparban, lakk-, műanyag-, ragasztó-, festékipar.)
 - Faanyag extrakciója (pl. tönkből: polifenolok, gyanta)
 - Kéreg és a levelek extrakciója (hidrolizálható és kondenzált tanninok: bőrcserzés; táplálék kiegészítők, kemoterápiás szerek, gyógyhatású készítmények, stb.)

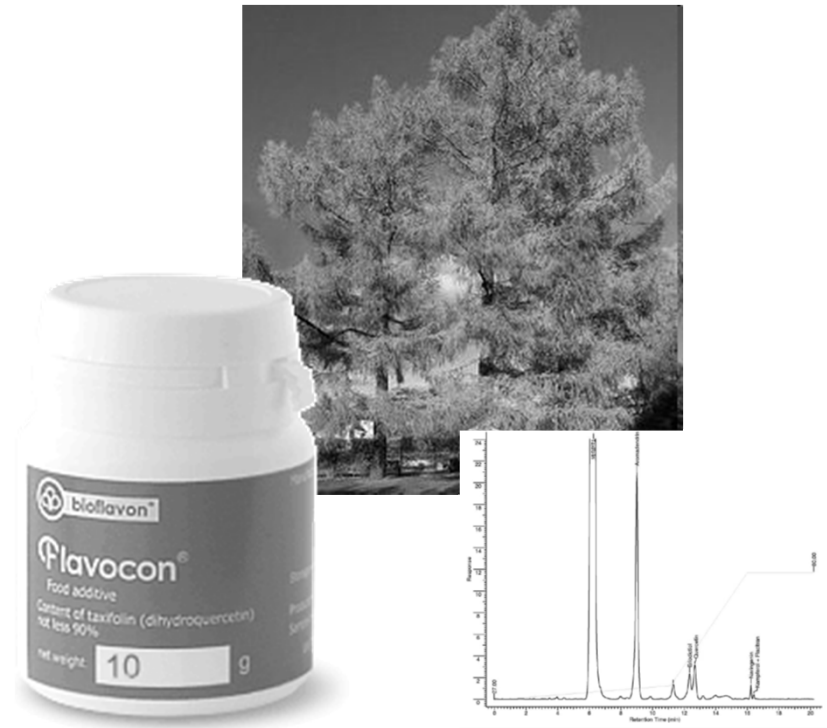
A faanyag mint kémiai anyagforrás

Kémiai fafeltárás

- Termékek faanyag és fakéreg járulékos anyagaiból.



A tengerparti fenyő (*Pinus maritima* L.) kérgéből előállított táplálék-kiegészítő készítmény.



Szibériai vörösfenyő (*Larix sibirica* L.) tönkjéből kivont és előállított táplálékkiegészítő szer.

Összetétel: 90% dihidrokvercetin, 10% kvercetin, naringenin, kaempferol, eriodictiol, stb...)