

Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Kar
Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet



Elhasznált LCD panelek mechanikai úton történő előkészítése, különös tekintettel az indium visszanyerésére

TDK dolgozat

Szerző: Oláh Beáta

Műszaki földtudományi alapszak (BSc),
Nyersanyagelőkészítési szakirány

Konzulensek: Dr. Faitli József
intézetigazgató, egyetemi docens

Dr. Nagy Sándor
tudományos munkatárs

Miskolc, 2013

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés

- 1.1. Kritikus elemek
- 1.2. A CriticEL projekt

2. Szakirodalmi áttekintés

- 2.1. A folyadékkristályos kijelzők kialakulása
- 2.2. Az LCD kijelzők elterjedése
- 2.3. Kritikus elemek az LCD eszközökben
- 2.4. Az LCD panel felépítése, működése
- 2.5. Feldolgozási technológiák

3. A kísérletek során használt eszközök, berendezések és azok működése elve

- 3.1. Optikai mikroszkóp
- 3.2. Pásztázó elektronmikroszkóp
- 3.3. Univerzális laboratóriumi kemence
- 3.4. Forgótárcsás nyírómű
- 3.5. Ultrahangos tisztító berendezés
- 3.6. Kalapácsos törő

4. Kísérleti vizsgálatok

- 4.1. Feldolgozási technológia
- 4.2. Mintavételezés, bontás
- 4.3. Szerkezet, összetétel vizsgálata
- 4.4. Kísérletek a polarizáló fóliák leválasztására
- 4.5. Előaprítás
- 4.6. A folyadékkristály eltávolítása
- 4.7. Aprítás kalapácsos törőben
- 4.8. Teljes anyagmérleg
- 4.9. A kémiai vizsgálatok eredményei és azok értékelése

5. Összefoglalás, megállapítás

6. Köszönetnyilvánítás

7. Felhasznált irodalom

1. Bevezetés

1.1. Kritikus elemek

Az Európai Unió 2011-ben az ásványi nyersanyagokhoz való hozzájárásról készített legelső helyzetfelmérésében –korlátozott elérhetőségük miatt- kritikus elemmé nyilvánított 14 elemet. Ezek közé tartozik az antimon, a berillium, a fluorit, a gallium, a germánium, a grafit, az indium, a kobalt, a magnézium, a nióbbium, a platínacsoport elemei, a ritkaföldfémek, a tantál és a volfrám. Ezek az elemek, egyedi tulajdonságaik miatt a mai csúcstechnológia termékeinek gyártásához nélkülözhetetlenek [12]. Egy 2012-es tanulmány szerint az LCD televíziók gyártásához 2010 és 2015 között a ritkaföldfémek teljes felhasznált mennyiségének 30%-át fordítják. Ennek egy része az elektromos alkatrészekhez, más része a fényforrásokhoz szükséges [14].

Könnyen belátható, hogy ezen elemek biztosítása az európai gazdaságban nélkülözhetetlen, azonban nyersanyag készleteik Európától távoli régiókban összpontosulnak, ahonnan beszerzésük bizonytalan (1. ábra) [12].



1. ábra: Kritikus nyersanyagok kitermelése a világon [13].

1.2. A CriticEL projekt

Kutatásomat a CriticEL - "Nemzetközi együttműködésben megvalósuló alapkutatás a kritikus nyersanyagok hazai gazdaságfejlesztő potenciáljának kiaknázására" TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV -2012-0005 projekt keretein belül végeztem. A kutatási programban a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karának Ásványtani és Földtani Intézete, Bányászati és Geotechnikai Intézete, Geofizikai és Térinformatikai Intézete, valamint a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézete vesz részt. E projekt foglalkozik Magyarországon az Európai Unió által kritikusnak minősített 14 elemmel.

Ezen elemek közé tartozik az indium, mely a folyadékkristályos kijelzők egyik fontos összetevője. A projektben a feladatom LCD kijelzők mechanikai előkészítése volt, hogy abból az indium a további feldolgozás során kinyerhető legyen.

2. Szakirodalmi áttekintés

A kutatás első lépéseként a folyadékkristályos kijelzők kialakulásával, működésével, térhódításával és az eddigi feldolgozási technológiákkal kapcsolatos szakirodalmakat, cikkeket tanulmányoztam. A fejezet átfogó képet ad a folyadékkristályos kijelzők újrahasznosításának fontosságáról és lehetséges módszereiről.

2.1. A folyadékkristályos kijelzők kialakulása

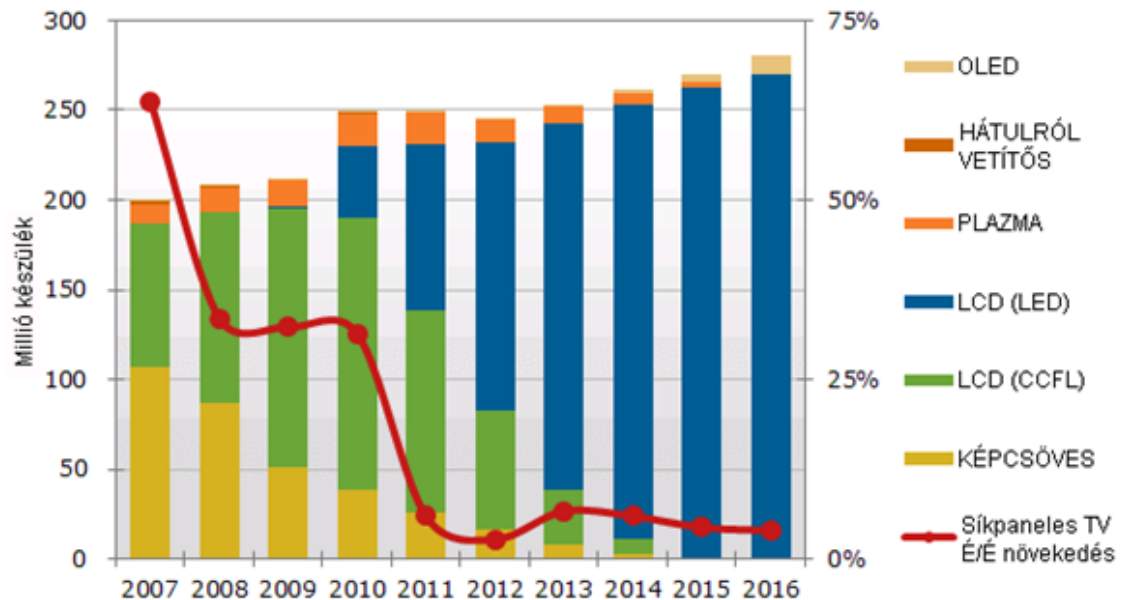
A folyadékkristályok felfedezése már 1888-ban megtörtént Friedrich Reinitzer osztrák botanikus által, aki megfigyelte, hogy a répából kinyert koleszterinnek két olvadáspontja is van, a két pont között pedig a folyadékokat és a kristályos anyagokat egyaránt jellemző tulajdonságokkal bír. Ezután kezdődött e különleges anyagok részletesebb vizsgálata. A princetoni David Sarnoff kutatóközpont mérnökei és tudósai, George Heilmeier vezetésével kidolgoztak egy technológiát a folyadékkristályok által szórt fény elektromos vezérlésére, így 1968-ra elkészült a kezdetleges folyadékkristályos kijelző. Az első hétköznapi használatú LCD-t a James Ferguson vezette International Liquid Crystal Company (ILIXCO) fejlesztette ki 1972-ben, akik először karórákban alkalmazták azt, ezzel megalapozva egy olyan iparágat, ami a mai napig LCD kijelzők millióit termeli évente a teljesség igénye nélkül síkképernyős televíziókhoz, mobiltelefonokhoz, laptopokhoz és egyéb eszközökhöz [18].

2.2. Az LCD kijelzők elterjedése

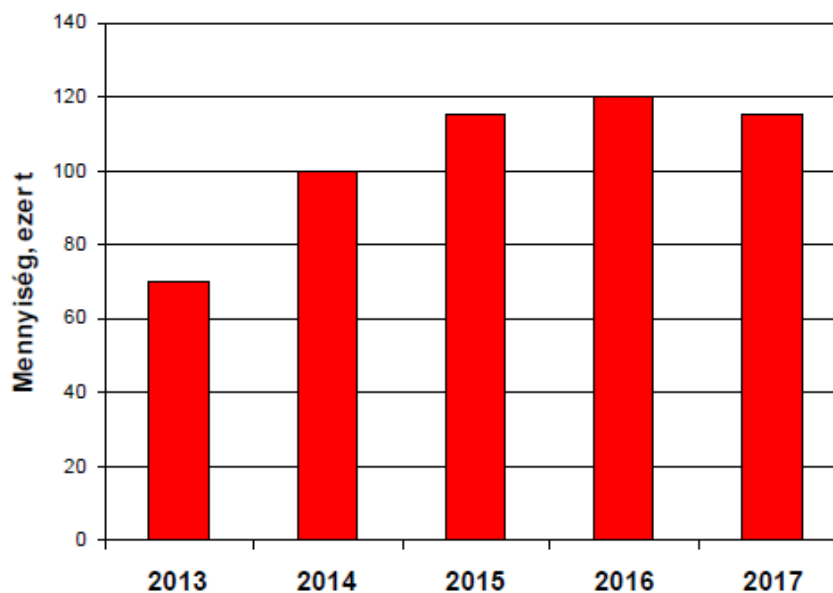
A folyadékkristályos kijelzők számos előnnyel rendelkeznek a katódsugárcsöves (CRT) elődjeikkel szemben, amiből talán a leglényegesebb az energiafogyasztás. Hogy példaként említsek egyet, egy Samsung Syncmaster 763 MB típusú 17 '' CRT monitor fogyasztása 72 W, míg a hasonló méretű, ugyanezen márka Business LCD monitorának maximum energiafogyasztása 20 W. Láthatjuk tehát, hogy ez harmad akkora energiaigényt jelent az LCD javára. Másik lényeges szempont a helyigény és a tömeg, amiben szintén a folyadékkristályos megjelenítő a jobb. A fent említett CRT monitor tömege 16 kg, míg az LCD monitoré alig 4,5 kg [17]. Ebből következik, hogy a katódsugárcsöves képernyőkkel összevetve a folyadékkristályos megjelenítők alkalmazása jóval kisebb hulladékmennyiség keletkezésével jár.

Ezen előnyök megléte (nem beszélve a tökéletes képgeometriáról és élességről) vezetett a folyadékkristályos kijelzők tömeges megjelenéséhez és erősen növekvő eladási

számához. A statisztikák alapján megállapítható, hogy ez a tendencia a jövőben sem változik majd, sőt, az LCD kijelzők eladása és ezzel együtt a keletkező hulladék mennyisége a következő 3 évben még biztosan növekedni fog (2. és 3. ábra).



2. ábra: TV technológiák világpiaci trendje [19]



3. ábra: Előrejelzés a hulladék LCD kijelzők mennyiségének alakulásáról 2013 és 2017 között [20]

Napjainkra tehát kulcsfontosságúvá vált az elhasznált LCD eszközök újrahasznosítása, különös tekintettel a benne található, viszonylag nagy mennyiségű kritikus elem visszanyerésére.

2.3. Kritikus elemek az LCD eszközökben

Kritikus elemek szempontjából a folyadékkristályos kijelzők két alkatrésze érdemel figyelmet. Ezek közé tartozik maga a panel, illetve a háttérvilágítás.

A panel egyik legfontosabb alkotója az indium. Előnye, illetve tulajdonságai, amelyek miatt mással nem helyettesíthető az LCD panelekben: az átlátszósága, a vezetőképessége, illetve a magas hőállósága [3].

Maga az indium indium-ón-oxid (ITO) formában, elektródaként van jelen a panelekben. Az indium-ón-oxid az indium(III)-oxid (In_2O_3) és az ón(IV)-oxid (SnO_2) keveréke, mely rendszerint 80-90 % In_2O_3 -ot tartalmaz [6]. Az elektród réteg vastagságával és az indium tartalommal kapcsolatban jelentős eltérések találhatók a szakirodalmakban (1. táblázat).

1. táblázat: Az ITO réteg vastagsága és indium tartalma a szakirodalmak szerint [2, 3]

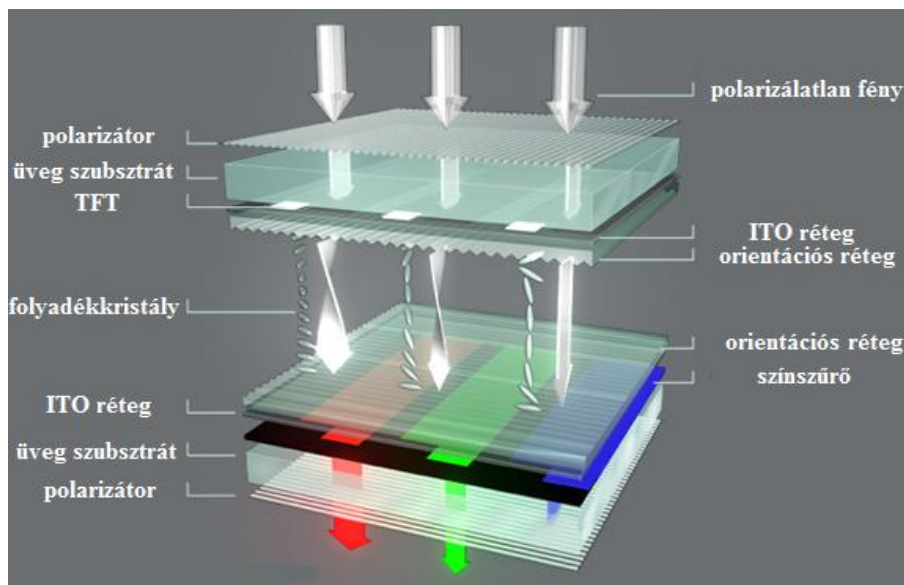
Szakirodalmak összehasonlítása							
	ISI, 2009	Socolof et al, 2005	Martin, 2009	Becker et al, 2003	Bogdanski, 2009a	Bogdanski, 2009b	Böni & Widmer, 2011
Fajlagos ITO [mg/m ²]	4000	7176	700	192	72	192	300
ITO réteg vastagság [nm]	1667	2990	292	80	30	80	125
In- tartalom [mg/m ²]	3120	5597	546	150	56	150	234

Az indiumot cink ércek bányászata során, annak melléktermékeként állítják elő. A primer nyersanyagból kinyerhető indium fajlagos mennyisége lényegesen alacsonyabb, mint az LCD kijelzőkben, tehát az elhasznált folyadékkristályos kijelzők igen fontos alternatív indium-források.

A háttérvilágítást jellemző kritikus elemek a ritkaföldfémek, mint az ittrium, eurórium, lantán, cérium, terbium és gadolínium. Ezek legnagyobb mennyiségben a régebbi típusú LCD kijelzőkben használt CCFL fénycsövek alkotói, a LED megvilágítású eszközök - melyek kezdik leváltani hidegkatódos társaikat- kevesebb ilyen elemet tartalmaznak [3].

2.4. Az LCD panel felépítése, működése

Ahhoz, hogy megismerjük a benne lévő értékes anyagok elhelyezkedését, tudnunk kell hogyan is épül fel maga a panel (4. ábra).



4. ábra: Az LCD panel szerkezete [15]

A panel két üveglapból áll, melyeken egy-egy polarizátor található. Az egyik üveglap a CF (colour filter), másik pedig a TFT (thin film transistor) üveg, egyiken színszűrő réteg, másikon pedig vékonyréteg tranzisztorok vannak. Mindkét üveglapon megtalálható a vezető tulajdonságú indium-ón-oxid (ITO:indium-tin-oxid) réteg, illetve ezen egy-egy orientációs réteg. Az így felépülő két lap között található a folyadékkristály, melynek mennyisége a megjelenítő felületen mindössze $0,5 \text{ mg/cm}^2$ [1], mégis ez a panel lelke, hiszen képes megváltoztatni a rajta áthaladó fény polarizációját, aminek mértéke a rá kapcsolt feszültséggel szabályozható. A feszültséggel való ellátás a tranzisztorok feladata. Mivel az LCD panel önálló fénykibocsátásra nem képes, a technológia háttérvilágítással egészül ki, melyet a folyadékkristályok orientációjuktól függően engednek át [21].

Az LCD-modul részei a panelen és a háttérvilágításon kívül a NYÁK lemezek, a kábelek és a szerelvénykeret.

2.5. Feldolgozási technológiák

2000 óta különböző technológiákat fejlesztettek ki az LCD hulladékanyagok újrahasznosítására, melyekben lényegesebb eltérés a panelek feltárási módjában van. Az értékes indium eltávolítása általában savas extrakcióval történik.

Li és munkatársai 2009-ben egy olyan technológiát mutattak be, ahol mind a környezetvédelmi, mind az újrahasznosítási szempontok jó hatásfokkal teljesülnek. Első lépésben kézi szétszereléssel távolítják el a műanyagokat és a CCFL fénycsőeket, valamint a nyomtatott áramköröket. A fő technológia három lépcsőből áll.

1. a polarizáló film termikus módszerrel, 230°C-on való eltávolítása az „ép” monitor felületéről,
2. a folyadékkristályok aprítás utáni ($x < 5\text{mm}$) ultrahangos mosása,
3. az indium savas extrakciója.

A termikus kezelés segítségével a polarizáló fólia több, mint 90 százalékban eltávolítható. Az ultrahangos tisztítási lépcsőben ipari detergenssekkel, 40 KHz vibrációs frekvencián 10 perc alatt eltávolítható a folyadékkristályok 85%-a [9].

Lee és társai 2013-ban szintén bemutatnak egy technológiát az indium kinyerésére, ahol Li-ékhez hasonlóan kézi szétszereléssel kezdik a műveletet, azonban ezután bolygómalomban 5 mm alá aprítják az LCD-t és termikus módszerrel választják le a polarizátor fóliát, ultrahangos tisztítással pedig a folyadékkristályokat. Az ITO-t az üveggel együtt nagyenergiájú golyósmalomban (HEBM) 1100 1/min fordulatszám mellett mikronos méretre őrlik. Ezután jön a savas oldás és keverés [8]. A fenti két feldolgozási technológia közös pontjai az 5 mm szemcseméret alá való aprítás, a folyadékkristály eltávolítása ultrahang segítségével, illetve a polarizáló fóliák termikus úton történő leválasztása. A különbség a kettő között, hogy Lee és társai ezután beiktatnak egy bolygómalomban történő őrlési folyamatot is.

A tématerület egyik legfrissebb publikációjában (2013) Zhao társaival az LCD panel többrétegű fóliáinak üvegről történő eltávolítására különböző technikákat mutat be és értékeli. A savval történő lemaratást rossz hatásfokú technológiának tartják, így kísérleteikben a fóliák eltávolítását egyrészt királyvíz, másrészt csiszolópapír használatával végezték. Eredményeik szerint a királyvizes fémeltávolítás nagyon alacsony hatásfokú, azonban a csiszolópapírral mindent sikerült eltávolítani az üveg felületről, az indium a többi anyaggal együtt a csiszolóporba került. Elektronmikroszkópos és EDS (Energy Dispersive Spectrometer) vizsgálataik során arra a következtetésre jutottak, hogy a színszűrő (CF) rétegben majdnem tízszer több az indium, mint a TFT rétegben, ezért ezt a kétféle réteget külön kell választani a feldolgozás során. A rétegek közti folyadékkristályokat szerves oldószerekkel történő lemosással távolították el majd

desztillációval nyerték vissza. Vizsgálataik szerint a legjobb leválasztási hatásfokot (98,59%) acetonnal történő lemosással kapták [11] [7]

3. A kísérletek során használt eszközök, berendezések és azok működési elve

A fejezet az elvégzett kísérleteim során használt eszközök, berendezések leírását, működési elvét tartalmazza.

3.1. Optikai mikroszkóp

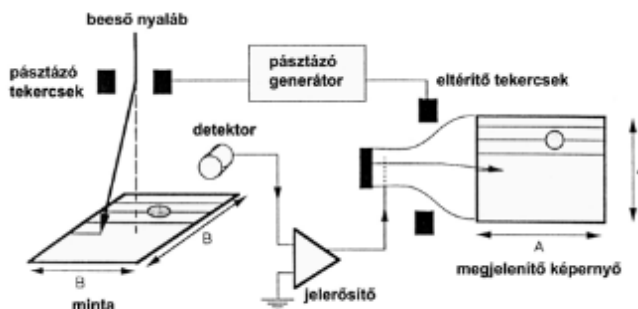
Az optikai mikroszkópok működésének alapja, hogy a mintán áthaladó vagy arról visszaverődő fénysugarakat nagyított képpé alakítja. A LCD panelek szerkezetének vizsgálata során a tanszéki Nanoeljárástechnikai Laboratóriumban található 5, 10, 20, 50 és 100-szoros nagyítású objektívekkel felszerelt Zeiss AXIOSKOP 2 MAT optikai mikroszkópot használtam (5. ábra).



5. ábra: A tanszéki Zeiss Axioskop optikai mikroszkóp [saját készítésű fotó]

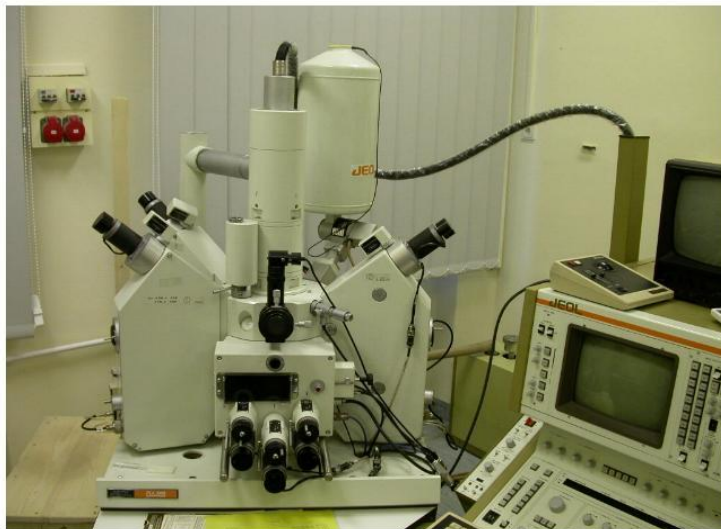
3.2. Pásztázó elektronmikroszkóp

A pásztázó elektronmikroszkóp (Scanning Electron Microscope - SEM) egy olyan elektronoptikai eszköz, amely a vizsgálandó anyag felületét elektronágyúból előállított elektronnyalábokkal pásztázza végig. Ezek az elektronok kölcsönhatásba lépnek a minta atomjaival, az elektronok és a minta kölcsönhatásából származó szekunder és visszaszórt elektronok, illetve röntgen fotonok intenzitását az arra alkalmas detektor érzékeli (6.ábra). A mikroszkópokkal szerkezeti és összetételbeli adatokat is nyerhetünk [5] [10].



6. ábra: A pásztázó elektronmikroszkóp működése [5]

A méréseimhez a Miskolci Egyetem Ásvány- és Kőzettan Tanszékének remX vezérléssel felszerelt JEOL JXA-8600 energiadiszperzív detektoros, 25 kV-os, 20 mA-es Superprobe mikroszondáját használtuk, a műszert Dr. Zajzon Norbert kezelte (7. ábra).



7. ábra: Az Ásvány- és Kőzettan Tanszék JEOL JXA-8600 Superprobe mikroszondája [16]

3.3. Univerzális laboratóriumi kemence

Vizsgálataimhoz CLASSICMECHANIK 2013/117 típusú kemencét használtam (8. ábra).



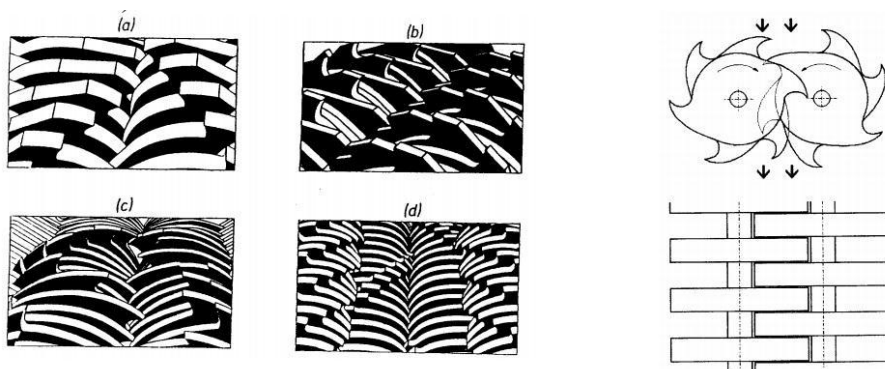
**8. ábra: A tanszéki CLASSICMECHANIK 2013/117 típusú univerzális kemence
[saját készítésű fotó]**

A berendezés főbb paraméterei:

Égéstér szélessége:	190 mm
Égéstér magassága:	110 mm
Égéstér mélysége:	280 mm
Teljesítmény:	2,3 kW
Maximális üzemi hőmérséklet:	1000 °C

3.4. Forgótárcsás nyírómű

A berendezés működése 2 párhuzamosan elhelyezkedő rotor egymással szembeni, kis kerületi sebességgel (3-4 m/s) történő mozgásán alapszik. Az aprítás az egymással szemben forgó és egymásba nyúló tárcsák oldalélei által történik (9. ábra). A jellemző igénybevételek a nyírás, vágás és tépés. A leaprított anyag méretét a tárcsák szélessége és a fogak tárcsánkénti száma befolyásolja. A hulladékelőkészítés jellemző berendezése.



9. ábra: Forgótárcsák kialakítása [4]



10. ábra: Az előaprításhoz használt tanszéki TD 600 tárcsás daraboló [saját készítésű fotó]

A berendezés paraméterei:

Garat:	520×310 mm
Tárcsa átmérő:	200 mm
Tengelyek távolsága:	200 mm
Fordulatszám:	46 1/min
Motor frekvencia:	50/60 Hz
Teljesítmény:	11/12,6 kW

3.5. Ultrahangos tisztító berendezés

Az ultrahangos tisztítás működésének alapja a folyadékban fellépő kavitáció, mely során a képződött apró légbuborékok a nehezen hozzáférhető részekben is mechanikusan fellazítják a szennyeződéseket.

Méréseimhez a tanszéki Fritsch Laborette 17.002. ultrahangos fürdőt használtam (**11. ábra**). A berendezés egy kádból (amely a generátort is tartalmazza), egy ketrecből és egy nagy ütésálló műanyag fedőből áll. A kádból a folyadékot egy csapon át lehet leengedni.



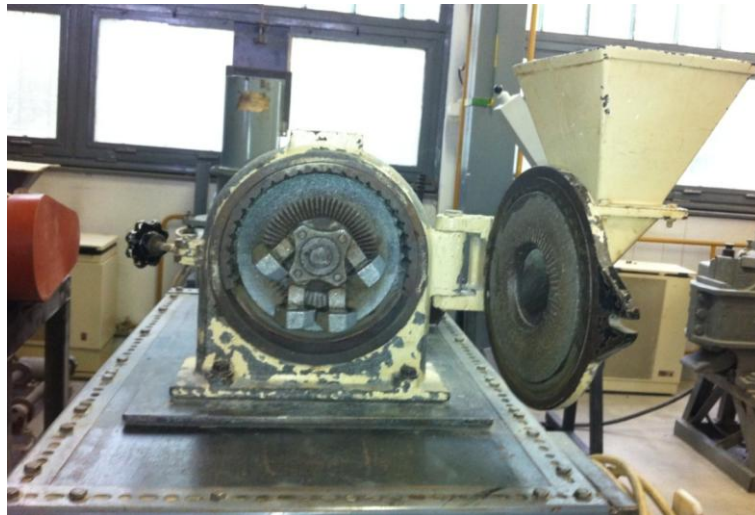
11. ábra: Fritsch Laborette 17.002

A berendezés paraméterei:

Hasznos méret:	300×330×280 mm
Teljesítmény:	200 W
Ultrahang frekvencia:	50 kHz

3.6. Kalapácsos törő

A kalapácsos törő egy központi rotorral működő berendezés, amelyen 4-8 db csuklósan rögzített kalapács van. A rotor nagy sebességű forgó mozgásának (centrifugális erő) hatására a kalapácsok kifeszülnek, így aprózódik az anyag. A kihordó szitabetét miatt az anyag csak akkor tudja elhagyni a berendezést, ha a megfelelő szemcseméret alá csökken. Fő igénybevétele az ütés. Az LCD panelek aprításához a tanszéki GKML 10-6 típusszámú kalapácsos törőt használtam (**12. ábra**).



12. ábra: A tanszéki GKML 10-6 kalapácsos törő

4. Kísérleti vizsgálatok

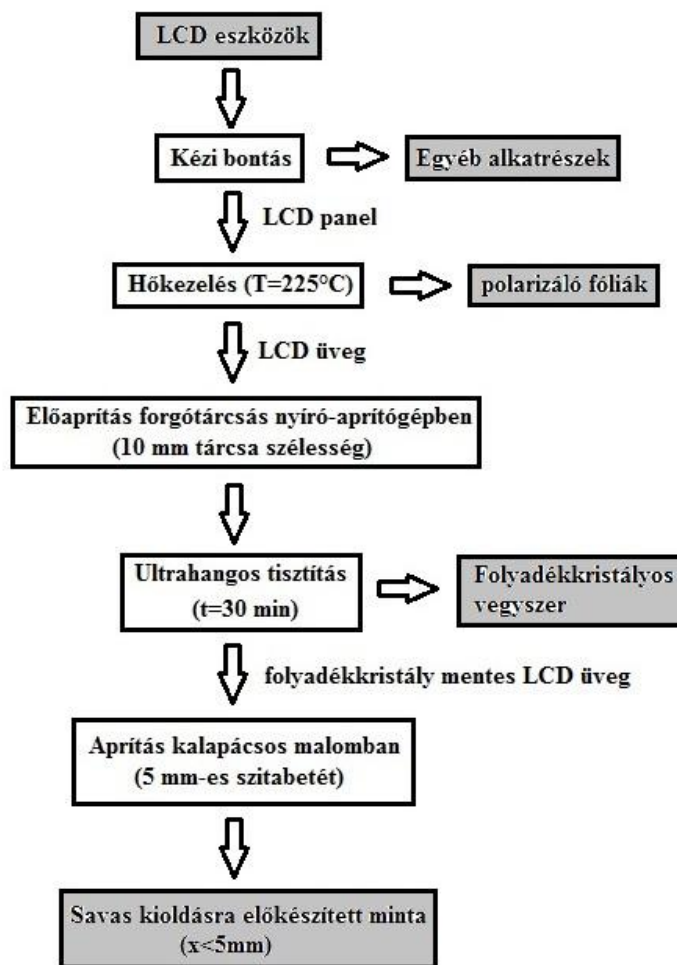
A megfelelő technológia kialakításához elengedhetetlen az egyes feldolgozási lépcsők optimális paramétereinek meghatározása. Ennek érdekében kísérleteket végeztem az első alkalommal beérkezett LCD mintákon.

4.1. Feldolgozási technológia

Célom egy olyan technológia kidolgozása és véghezvitele volt, amivel a folyadékkristályos kijelzők a további feldolgozás számára –indium kioldására- alkalmassá tehetők. Előzetes szakirodalom kutatások alapján a tervezett feldolgozási technológia egy aprítással történő feltárás volt, a következő lépcsőkben:

1. Polarizáló fóliák leválasztása
2. Előaprítás
3. Folyadékkristály eltávolítása
4. Aprítás

Az előzetes kísérletek alapján a végleges technológia a következőképpen alakult.



13. ábra: LCD kijelzők mechanikai előkészítésének technológiai törzsfája [saját szerkesztésű kép]

4.2. Mintavételezés, bontás

A feldolgozásra szánt LCD, illetve LED kijelzőket a budapesti Fe-Group Invest Zrt. szolgáltatatta. A mintákat két részben kaptuk meg, első alkalommal 2-2 db LCD TV és monitor, illetve egy laptop került szétbontásra.

A 2 darab manuálisan bontott TV egy JVC LT-32HG35E és egy DiBOSS LT-30HLP modell volt (14. és 15. ábra).



14. ábra: JVC TV bontás előtt



15. ábra: DiBOSS TV bontás után

A 2 bontásra került monitor pedig egy DELL L002086 és egy ACER AL1716 A(s) LCD monitor (16. és 17. ábra).



16. ábra: DELL monitor bontás után



17. ábra: ACER monitor bontás után

A laptop egy HP Compaq 6720s modell (18. ábra).



18. ábra: HP laptop bontás utá

2. táblázat: Az első bontás anyagmérlege

kijelző/eszköz típusa	kijelző/eszköz teljes tömege [kg]	LCD panel tömege [kg]	m/m %
JVC (LT-32HG35E)	10,1	1,14	11,29
DiBOSS (LT-30HLP)	13,6	1,06	7,79
DELL (L0002086)	5,5	0,46	8,36
ACER (AL1716 A(s))	3,9	0,38	9,74
HP (Compaq 6720S)	2,53	0,25	9,88

Második alkalommal 5 db LCD TV-t és 4 db LCD monitort bontottunk szét.

A szétbontott LCD televíziók a SAMSUNG LTJ400HV11-V, az LG 32LS3450-ZA, a JVC LT-032HA45E, a SONY Bravia KDL-32EX310 és a SAMSUNG UE40D5000PWXXC modelljei voltak (19.-23. ábrák).



19. ábra: SAMSUNG TV bontás után



20. ábra: LG TV bontás után



21. ábra: JVC TV bontás után



22. ábra: SONY TV bontás után



23. ábra: SAMSUNG TV bontás után

A bontásra került LCD monitorok között egy darab DELL 1901FP és kettő DELL 1905FP modell volt.



24. ábra: DELL 1901FP bontás után



25. ábra: DELL 1905FP bontás után

3. táblázat: A 2. bontás anyagmérlege

kijelző típusa	kijelző teljes tömege [kg]	LCD panel tömege [kg]	m/m % [%]
SAMSUNG (LTJ400HV11-V)	8,82	1,72	19,5
LG (32LS3450-ZA)	6,78	0,84	12,39
JVC (LT-032HA45E)	7,18	1,08	15,04
SONY (Bravia KDL-32EX310)	8,6	1,12	13,02
SAMSUNG (UE40D5000PWXX C)	10,54	1,74	16,51
DELL (1901FP)	4,78	0,46	9,62
DELL (1905FP)	4,72	0,5	10,59
DELL (1905FP)	4,72	0,5	10,59

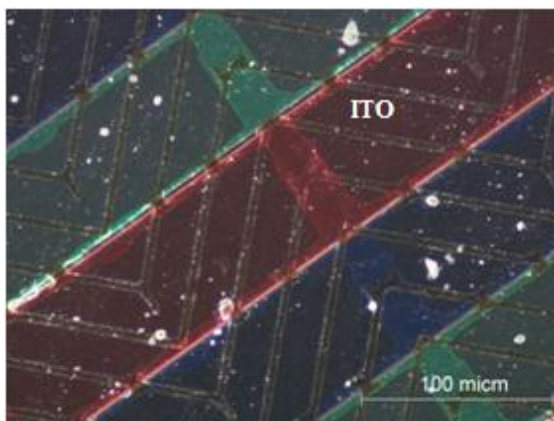
Megállapítható, hogy a bontott eszközök a háttérvilágítást leszámítva gyakorlatilag azonos alkatrészekből állnak (lásd 2.4. fejezet). A munkám szempontjából fontos LCD panel az eszközöknek átlagosan 11,87 %-át teszi ki.

4.3. Szerkezet, összetétel vizsgálata

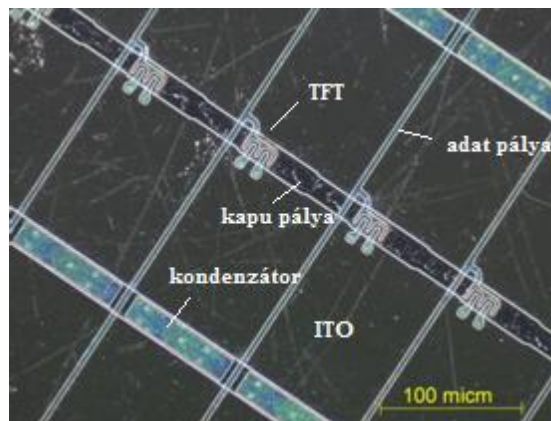
Ahhoz, hogy kísérleteimet megkezdhessem szükséges volt a feldolgozandó LCD panelek szerkezetének, illetve kémiai összetételének minél részletesebb ismerete, különös tekintettel az ITO-réteg elhelyezkedésére. Ezek vizsgálatához optikai mikroszkópot, illetve pásztázó elektronmikroszkópot (továbbiakban SEM - Scanning Electron Microscope) használtunk, melyek működési elvét a 3. fejezetben írtam le.

A vizsgálatokat a DiBoss gyártmányú televízió színszűrő illetve TFT üveg darabjain végeztük el, melyekről előzetesen hőkezeléssel leválasztottam a polarizáló fóliát, illetve vegyszerrel eltávolítottam a folyadékkristályt.

A szerkezet megfigyelése szempontjából az optikai mikroszkóp megfelelő volt, az egyes alkatrészek jól láthatók (**26. és 27. ábra**)

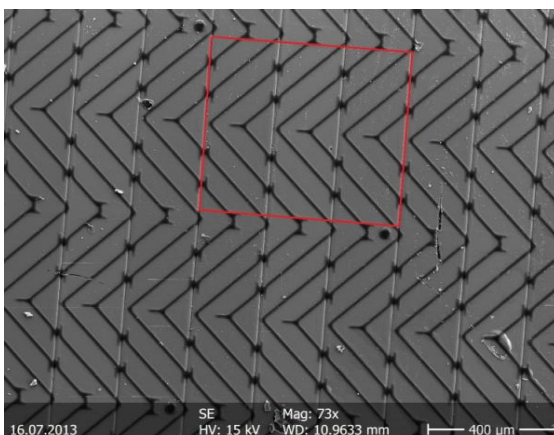


26. ábra: DiBOSS televízió CF üvegének optikai mikroszkópos felvétele

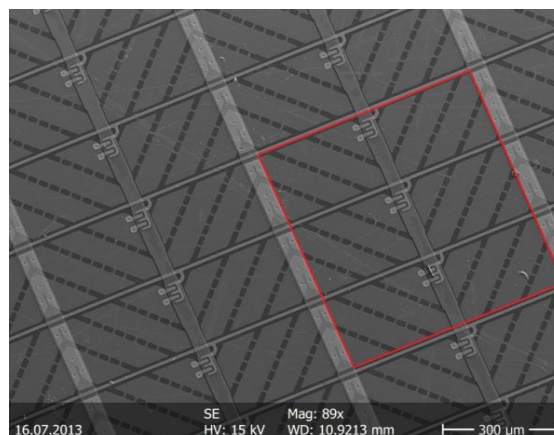


27. ábra: DiBOSS televízió TFT üvegének optikai mikroszkópos felvétele

Azonban az átlátszó ITO-réteg elhelyezkedésének vizsgálatához pásztázó elektron mikroszkópot kellett használni. Az ezzel készült felvételek a **28. és 29. ábrán** láthatók.

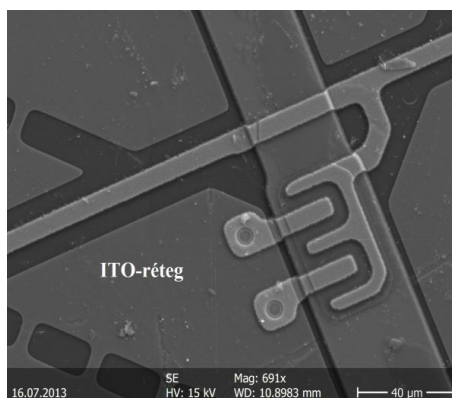


28. ábra: DiBoss televízió CF üvegének SEM felvétele



29. ábra: DiBoss televízió TFT üvegének SEM felvétele

Az ábrákon – akár az optikai mikroszkópos vizsgálat esetén – jól kivehetők a pixelek szín szegmensei, a piros keret egy pixelt jelöl. Egy-egy szegmenshez egy-egy tranzisztor tartozik. Az elektronmikroszkópos felvételen szépen elkülönül az ITO réteg az alap üvegtől, ellentétben az optikai mikroszkópos felvétellel.



30. ábra: a tranzisztoron levő ITO-réteg SEM felvétele

Az egyes alkatrészekben anyagösszetétel vizsgálatot végeztünk a berendezéssel. A vizsgálati tartomány mérete miatt a berendezés a vékony rétegek alatti anyagokba is belemér, ezért az anyagi összetétel nem pontos. A főbb eredmények az alábbi táblázatokban láthatók.

4. táblázat: CF üveg atom tömeg összetétele:

Elem neve	CF elektróda	Alap üveg
	%	
Mg	-	-
Al	-	-
Si	1,33	0,74
Cl	0,2	0,17
Cr	5,44	1,27
Cu	1,81	0,45
In	66,61	63,01
Sn	4,87	5,83
S	-	4,91

5. táblázat: TFT üveg atom tömeg összetétele:

Elem neve	Pixel elektróda	Alap üveg	Adat pálya	Kapu pálya	Kondenzátor
	%				
Mg	1,34	1,26	0,62	0,68	0,47
Al	4,23	5,33	16,10	11,58	16,86
Si	35,01	40,29	19,40	23,14	15,33
Cl	0,40	-	-	-	-
Ca	1,08	1,18	0,35	0,15	0,15
In	9,19	-	-		
Sn	1,48	-	-		
Sr				0,82	0,46
Mo	-	-	19,92	19,72	24,86
Nd					0,19

A CF üvegnél gyakorlatilag minden pontban kimutatható volt az indium igen jelentős mennyiségben. Az adatokból arra lehet következtetni, hogy a színszűrő üveg jelentősen nagyobb arányban tartalmaz indiumot, mint a TFT üvegé.

4.4. Kísérletek a polarizáló fóliák leválasztására

Az aprítás és a feltártság szempontjából elengedhetetlen a polarizáló fóliaréteg eltávolítása a CF (sötét színű) és TFT (világos) üvegekről. Szakirodalmi források alátámasztják, hogy a fóliák eltávolításához 230 – 240 °C hőmérséklet szükséges. Ennek ismeretében végeztük el a fóliák eltávolításának vizsgálatát. Mintául az Acer AL1716 típusú LCD monitor szolgált, a hőkezelést pedig egy CM 2013/117 típusú laboratóriumi univerzális kemencében végeztük (lásd 3. fejezet). A kézi szétszerelés után előre előkészített képernyőt üvegágóval kb. 70×120 mm-es egységekre bontottuk, majd a kemence hőmérsékletének 175, 200 és 225°C-os beállítása mellett három mérést végeztünk, melynek eredményeit a **6., 7. és 8. táblázat** tartalmazza.

6. táblázat: 175 °C-on történő fólialeválasztás eredményei

Hőmérséklet [°C]	Idő [s]	Észrevétel
178	310	a képernyő sarkán a fólia kezd leválni
174	453	a képernyő sarkán a fólia tovább válik, de mechanikai hatásra nem válik le teljesen
172	650	a képernyő sarkától a fólia nehezen, csak magas hőmérséklet mellett húzható le

7. táblázat: 200 °C-on történő fólialeválasztás eredményei

Hőmérséklet [°C]	Idő [s]	Észrevétel
200	250	a képernyő mindkét szélén kezd a fólia felválni, megbarnult, és gyenge füst észlelhető
190	330	a képernyő mindkét szélén a fólia tovább vált, a füst fennáll, a TFT és CF üveg szétválik
201	540	ahogy a fólia leválik, a TFT és CF üveg repedezik, könnyebben lehúzható

8. táblázat: 225 °C-on történő fólialeválasztás eredményei

Hőmérséklet [°C]	Idő [s]	Észrevétel
225	60	a képernyő szélén a felválás megkezdődött
227	300	a képernyő mindkét oldalán felvált a fólia, állandó hőntartáson mechanikai hatásra könnyen leválik

Az eredményekből megállapítást nyert, hogy a vizsgált tartományban (a szakirodalmi adatoknak megfelelően) 225 °C-os hőkezelés mellett a legjobb a szétválasztás.



31. ábra: Polarizáló fólia leválasztása hőkezelés után

A következő vizsgálatok során a két LCD TV minta – JVC és DiBOSS került feldolgozásra. A képernyőket megközelítőleg 300×70 mm-es vágtuk szét, majd az előzetes vizsgálati eredmények alapján 225 °C-on sor került a fóliák eltávolítására az egyes mintadarabok felületéről. A vizsgálat során azt tapasztaltuk, hogy ugyanazon hőmérséklet mellett a DiBOSS típusú képernyőkről könnyebben lehetett a fóliát eltávolítani, mint a másik típusnál. További fontos észrevétel, hogy a magas hőmérsékleten történő kezelés során a folyadékkristály jelentős része eltávozott.

A minta aprításhoz való előkészítése sikeresen megvalósult a következő mennyiségben:

9. táblázat: DiBOSS és JVC televízió hőkezelés utáni anyagmérlege

	polarizátor	CF üveg	TFT üveg	polarizátor
DiBOSS	59,99 g	522,82 g	419,97 g	57,21 g
	5,66 %	49,32 %	39,62 %	5,4 %
JVC	51,88 g	483,84 g	547,81 g	56,45 g
	4,55 %	42,44 %	48,05 %	4,96 %

Meghatároztuk a fajlagos összetételt, azaz az egységnyi felületre jutó alkotórészek tömegét és tömegarányát is.

10. táblázat: Az 1 cm² -re vett tömeg a DiBOSS és JVC képernyők esetében:

	Polarizátor	CF üveg	TFT üveg	Polarizátor
DiBOSS	28 mg	244 mg	196 mg	26,7 mg
	5,66%	49,32%	39,62%	5,4%
JVC	19,3 mg	180 mg	203,8 mg	21 mg
	4,55 %	42,44 %	48,05 %	4,95 %

E technológiai lépcső után a két márka CF és TFT üvegeit együtt kezeltem tovább. Ugyanezt tettem a második alkalommal beérkezett minták esetében is, ahol együtt kezeltem a televíziók (SAMSUNG: LTJ400HV11-V; LG: 32LS3450-ZA; JVC: LT-032HA45E; SONY: KDL-32EX310; SAMSUNG:UE40D5000PWXXC), és szintén együtt a monitorok (1 db DELL 1901FP és 2 db DELL 1905FP) és a laptop (HP Compaq 6720s) hasonló üvegeit. Ezeken kísérleteket nem végeztem, a DiBOSS és JVC kijelzők vizsgálata során megállapított optimális 225°C-os hőmérsékletet és 3 perces hőntartást vettük alapul, így kezeltem azokat. Az üvegekről eltávolított polarizáló fóliákat egy csoportba vettem.

A tömegáramok számításánál kialakítottam egy további csoportot az összenőtt terméknek. Ide azok a darabok kerültek, amikről nem sikerült teljes egészében eltávolítani a fóliát. Ennek okaival és a lehetséges megoldásokkal az 5. fejezetben foglalkozom.

Az egyes alkotók tömegarányait a következő táblázat tartalmazza.

11. táblázat: Televíziók és monitorok hőkezelés utáni anyagmérlege

	polarizátor	CF üveg	TFT üveg	melléktermék (polarizátor + üveg)
Televíziók	571,84 g	1729,62 g	1883,05 g	2199,69 g
	8,96 %	27,09 %	29,49 %	34,46 %
Monitorok	215,47 g	721,42 g	651,21 g	101,45 g
	12,75 %	42,70 %	38,54 %	6,01 %

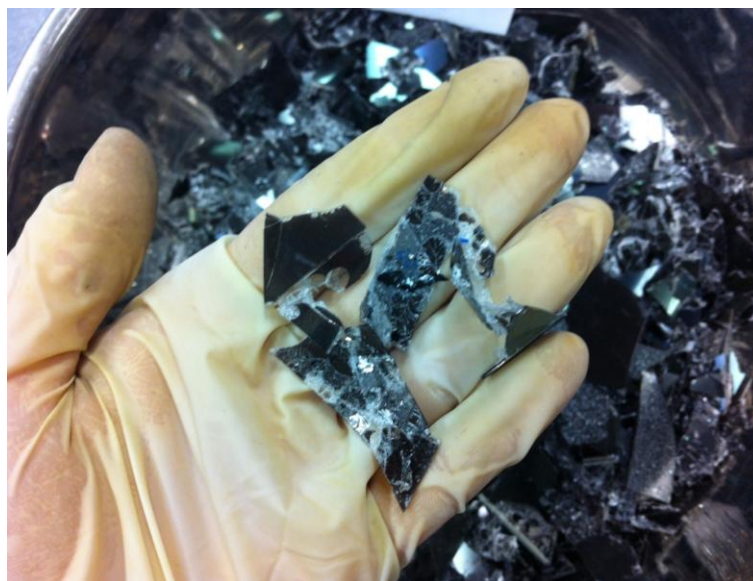
4.5. Előaprítás

Az első aprítást –a már fóliáktól mentes üvegeken- forgótárcsás nyíró aprító berendezéssel (lásd 3. fejezet) végeztem, 10 mm-es tárcsaszélességi beállításnál.



32. ábra: DiBOSS LCD panel CF üvegének törege forgótárcsás nyíróműben való aprítás után

A DELL monitorok <10 mm-re való aprításakor feltűnt, hogy a fólialeválasztás után maradt egy vékony ragasztóréteg az üvegeken, ez egyes helyeken összetartotta az aprítékot.



33. ábra: DELL monitorok aprítéka

4.6. A folyadékkristály eltávolítása

Az előaprítást követően a folyadékkristály (LC – liquid crystal) réteg eltávolítására tettem kísérleteket. Szakirodalmi forrásokból tudjuk, hogy egy LCD kijelzőben átlagosan $0,5 \text{ mg/cm}^2$ folyadékkristály található, tehát az általam eltávolított mennyiségnek is ezen érték körül kell lennie (lásd: 2.3. fejezet).

Kísérleteimhez az első alkalommal beérkezett ACER és DELL monitorokat használtam fel, melyekből üvegágóval 1 és 10 g közötti darabokat vágtam. Különböző folyadékokban, többféle paraméter mellett mostam, majd tömegváltozás mérésel vizsgáltam az eltávolított folyadékkristály mennyiségét, melyhez négy tizedesjegy pontosságú analitikai mérleget használtam. Ahhoz, hogy ezeket összehasonlíthassam, a tömegváltozás százalékos arányát határoztam meg, majd visszaszámoltam az egy cm^2 -re eső eltávolított LC tömegét, természetesen milligramm nagyságrendben.

Ahhoz, hogy vissza tudjam ezt számolni, ismernem kellett az LCD panelek fajlagos tömegét (g/cm^2). Ehhez lemértem 2-2 db kis CF és TFT üvegdarab pontos tömegét, majd ugyanezeket milliméterpapíron körberajzoltam, így megkaptam a pontos felületeket is. A kapott értékek hányadosait átlagoltam, ez alapján pedig arra az eredményre jutottam, hogy a CF és TFT üvegek egy cm^2 -re eső fajlagos tömege ugyanannyi, $0,198 \text{ g}$.

A számolás menete:

$$\frac{\text{eltávolított LC tömege [mg]}}{\text{minta tömege [g]} - \text{eltávolított LC tömege [g]}} \cdot 0,198 \frac{[\text{g}]}{[\text{cm}^2]} \cdot 2 = \text{eltávolított LC} \frac{[\text{mg}]}{[\text{cm}^2]}$$

, ahol a 2-es

szorzó a folyadékkristályt bezáró két üvegre (CF, TFT) utal.

Mosási paraméterek:

- áztatás desztillált vízben,
- áztatás különböző tisztítószeres jelenlétében,
- ultrahangos mosás desztillált vízben,
- ultrahangos mosás különböző tisztítószeres jelenlétében.

Vizsgáltam a felsorolt tisztítási módok hatékonyságát a mosási idő függvényében, 10; 20 és 30 perc mosás után, illetve a tisztítószeres 2; 4 és 8 százalékos koncentrációja mellett. Vegyszerként először az Organizone nevű lúgos tisztítószerrel használtam, majd semleges kémhatású mosogatószerrel is végeztem kísérleteket.

A Fritsch Laborette 17.002. (lásd 3. fejezet) ultrahangos mosóba töltött 3 liter tisztítószeres desztillált vizet (2%-os koncentrációnál ebből 60 ml vegyszer, 4% esetén 120 ml, 8%-nál pedig 240ml) 40°C-ra melegítettem, a 30 perces mosás leteltével pedig 45°C-ra melegedett a folyadék. Az egy anyaghalmazként kezelt panelek CF és TFT üvegeinek mindig új oldatot készítettem.

Az eredményeket a következő táblázatok tartalmazzák:

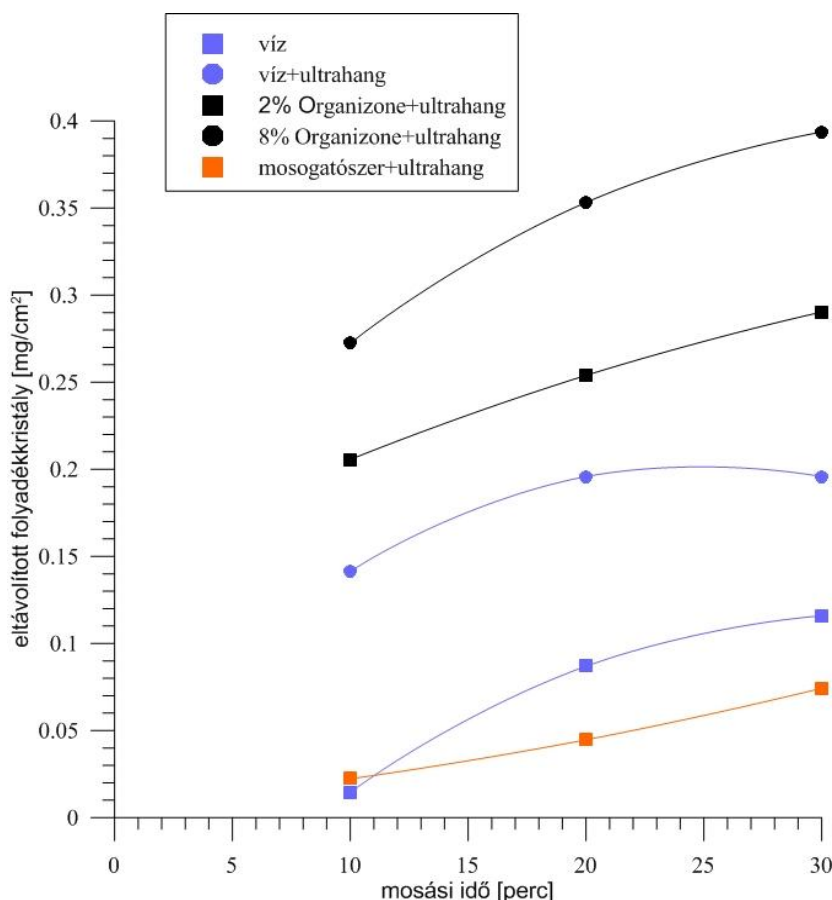
12. táblázat: Folyadékkristály eltávolítása ultrahang nélkül

Ultrahang nélküli kezelés				
	eltelt idő [perc]	mért tömeg [g]	tömegvesztés g [%]	eltávolított folyadékkristály mennyisége [mg/cm ²]
desztillált víz	0	2,7343		
	10	2,7342	0,0037	0,0145
	20	2,7337	0,0219	0,0869
	30	2,7335	0,0293	0,1159
Organizone 2%	0	2,036		
	10	2,0349	0,054	0,2141
	20	2,0343	0,0835	0,3309
	30	2,034	0,0982	0,3894
Organizone 4%	0	1,2126		
	10	1,2125	0,0082	0,0327
	20	1,211	0,1319	0,5232
	30	1,2108	0,1484	0,5887
Organizone 8%	0	6,5364		
	10	6,5359	0,0076	0,0303
	20	6,5352	0,0184	0,0727
	30	6,5343	0,0321	0,1273
mosogatószer 8% (CF üveg; 1. minta)	0	6,4984		
	10	6,498	0,0062	0,0244
	20	6,4973	0,0169	0,067
	30	6,4972	0,0185	0,0731
mosogatószer 8% (CF üveg; 2.minta)	0	8,194		
	10	8,1933	0,0085	0,0338
	20	8,1926	0,0171	0,0677
	30	8,1922	0,022	0,087
mosogatószer 8% (TFT üveg; 1. minta)	0	9,5205		
	10	9,5201	0,0042	0,0166
	20	9,5196	0,0095	0,0374
	30	9,5192	0,0137	0,0541
mosogatószer 8% (TFT üveg; 2. minta)	0	7,7358		
	10	7,7355	0,0039	0,0154
	20	7,7345	0,0168	0,0614
	30	7,7343	0,0194	0,0768

13. táblázat: Folyadékkristály eltávolítása ultrahanggal

Ultrahangos kezelés				
	eltelt idő [perc]	mért tömeg [g]	tömegvesztés g [%]	eltávolított folyadékkristály mennyisége [mg/cm ²]
desztillált víz	0	3,642		
	10	3,6407	0,0357	0,1414
	20	3,6402	0,0494	0,1958
	30	3,6402	0,0494	0,1958
Organizone 2%	0	3,2768		
	10	3,2751	0,0519	0,2056
	20	3,2747	0,0641	0,2539
	30	3,2744	0,0732	0,2903
Organizone 4%	0	4,8712		
	10	4,8693	0,039	0,1545
	20	4,8688	0,0493	0,1952
	30	4,8685	0,0554	0,2196
Organizone 8%	0	3,9273		
	10	3,9246	0,0687	0,2724
	20	3,9238	0,0891	0,3532
	30	3,9234	0,0993	0,3936
mosogatószer 8% (CF üveg; 1.minta)	0	9,2327		
	10	9,2322	0,0054	0,0214
	20	9,2317	0,0108	0,0429
	30	9,2314	0,0141	0,0558
mosogatószer 8% (CF üveg; 2. minta)	0	6,8336		
	10	6,8332	0,0059	0,0232
	20	6,8328	0,0117	0,0464
	30	6,832	0,0234	0,0927
mosogatószer 8% (TFT üveg; 1. minta)	0	8,6567		
	10	8,6562	0,0058	0,0229
	20	8,656	0,0081	0,032
	30	8,6555	0,0139	0,0549
mosogatószer 8% (TFT üveg; 2.minta)	0	7,397		
	10	7,3967	0,0041	0,0161
	20	7,3963	0,0095	0,0375
	30	7,3963	0,0095	0,0375

Az adatokat a könnyebb összehasonlíthatóság érdekében függvényen ábrázoltam.



34. ábra: A mosás hatékonyságának összehasonlítása különböző paraméterek mellett

Az adatok alapján egyértelműen kijelenthető, hogy az ultrahangos mosás sokkal jobb hatásfokkal hozta le a folyadékkristály réteget, mint az ultrahang nélküli áztatás. A desztillált víz esetében 30 perc tisztítás után az eltávolított folyadékkristály mennyisége ultrahang nélkül $0,1159 \text{ mg/cm}^2$, ultrahanggal pedig $0,1958 \text{ mg/cm}^2$ volt (**12. és 13. táblázat**). Ennek oka a mosás során az ultrahang hatására létrejövő kavitáció. Az ultrahang hatásán kívül egyértelmű volt még, hogy hosszabb mosási idő alatt több LC távolítható el, ez a **34. ábrán** egyértelműen látható.

A mosogatószer nem hozott látványos eredményeket, ultrahang alkalmazásával sem. Az eredmények alapján a feldolgozni kívánt panelek törezeit ultrahangos fürdőben, 8 %-os Organizone koncentráció mellett, 30 percig kezeltem. Ezt követően a folyadékkristálymentes anyagot infravörös lámpa alatt szárítottam.

4.7. Aprítás kalapácsos törőben

A kiszárított anyagokat kalapácsos törőben (lásd 3. fejezet) aprítottam 5 mm szemcseméret alá.



35. ábra: DELL monitorok és HP laptop CF és TFT üvegének aprítóka kalapácsos törő után

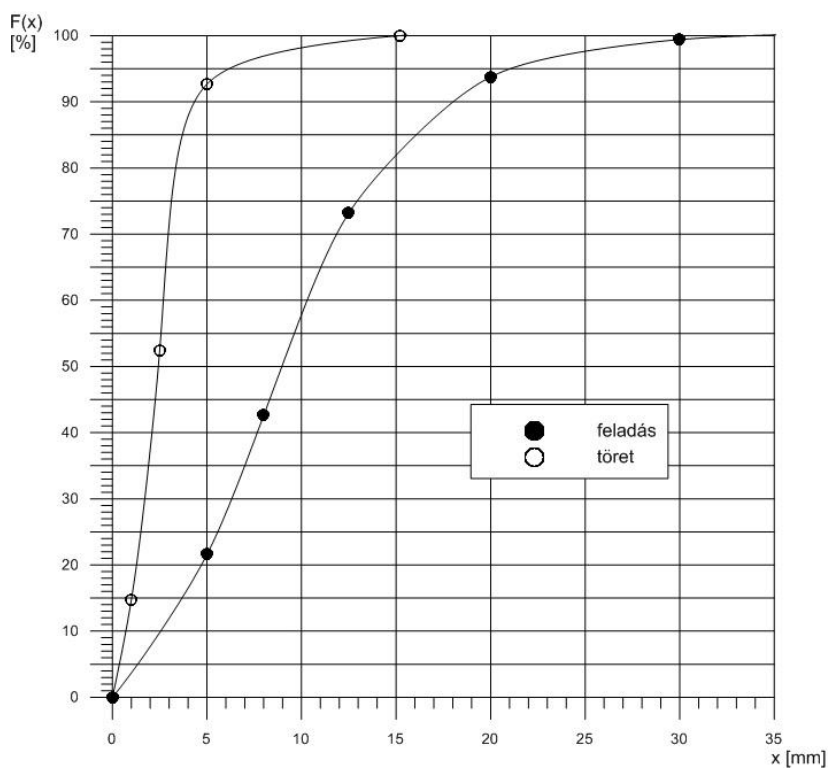
Az első körben aprított DiBoss és JVC LCD paneleknél a törés előtt és után szitaelemzést végeztem, így meghatároztam a szemcseméret-eloszlást és az aprítási fokokat.

14. táblázat: CF üveg szemcseméret-eloszlása törés előtt

Törés előtt			
x[mm]	m [g]	Δm [%]	F(x) [%]
>30	4,78	0,59	100
20-30	45,74	5,65	99,41
12,5-20	166,6	20,58	93,76
8-12,5	247,43	30,57	73,18
5-8	170,09	21,01	42,61
<5	174,83	21,6	21,6
Összesen	809,47	100	

15. táblázat: CF üveg szemcseméret-eloszlása törés után

Törés után			
x [mm]	m [g]	Δm [%]	F(x) [%]
>5	58,54	7,32	100
2,5-5	321,76	40	92,68
1-2,5	302,11	37,75	52,48
<1	117,89	14,73	14,73
Összesen	800	100	



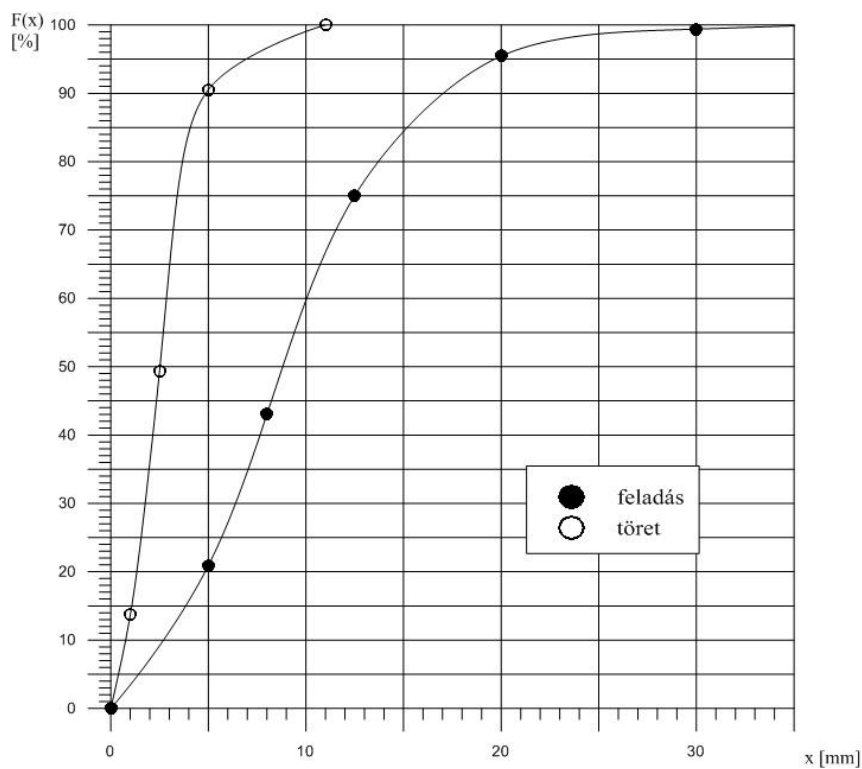
36. ábra: CF üveg feladásának és töretének szemcseméret-eloszlása

16. táblázat: TFT üveg szemcseméret-eloszlása törés előtt

Törés előtt			
x [mm]	m [g]	Δm [%]	F(x) [%]
>30	4,26	0,61	100
20-30	27,49	3,95	99,39
12,5-20	142,21	20,41	95,44
8-12,5	222,86	32	75,03
5-8	154	22,11	43,03
<5	145,72	20,92	20,92
Összesen	696,54	100	

17. táblázat: TFT üveg szemcseméret-eloszlása törés után

Törés után			
x [mm]	m [g]	Δm [%]	F(x) [%]
>5	65,71	9,46	100
2,5-5	285,95	41,15	90,54
1-2,5	248,31	35,73	49,39
<1	94,95	13,66	13,66
Összesen	694,92	100	



37. ábra: TFT üveg feladásának és töretének szemcseméret-eloszlása

18. táblázat: Gépi aprítási fokok

Aprítási fokok		
	CF üveg	TFT üveg
$r_{50}=X_{50}/X_{50}$	3,71	3,52
$r_{80}=X_{80}/X_{80}$	5,26	4,39
$r_{\max}=X_{\max}/X_{\max}$	2,87	4,21

4.8. Teljes anyagmérleg

A leírt technológiával, az egyes anyagalmazokból a következő mennyiségeket sikerült előkészítenünk a kioldásra:

19. táblázat: Összes előkészített LCD panel anyagmérlege

	JVC és DiBOSS televíziók	SAMSUNG, SONY, LG, JVC televíziók	DELL monitorok, HP laptop	Kémiai vizsgálatokra átadott mennyiségek
Panel	100 % (2200 g)	100% (6500 g)	100 % (1710 g)	
előkészített CF üveg [g]	36,35% (799,69 g)	26,08% (1695,05 g)	40,49 % (692,35 g)	3187,09 g
előkészített TFT üveg [g]	31,46% (692,13 g)	28,13% (1828,68 g)	37,58 % (642,64 g)	3163,45g
leválasztott fólia [g]	10,25% (225,53 g)	8,80 % (571,84 g)	12,60 % (215,47 g)	
melléktermé k [g]	21,94% (482,68 g)	33,84% (2199,69 g)	5,93 % (101,45 g)	
veszteség [g]		2,37% (154,05 g)	3,40 % (58,14 g)	



38. ábra: Az előkészített anyagok

4.9. A kémiai vizsgálat eredményei és azok értékelése

A dolgozatomban leírt technológiával előkészített anyagokból egy átlagosított minta a Magyar Tudományos Akadémia Természettudományi Kutatóközpontjának Anyag- és Környezetkémiai Intézete által kémiai elemzésre került, melynek fontosabb eredményeit a **20. táblázat** tartalmazza.

20. táblázat: Átlagos minta kémiai elemzésének főbb eredményei

Kémiai elem	Mennyisége [mg/kg]	
	TFT üveg	CF üveg
<i>Al</i>	10 300	13 000
<i>B</i>	4 490	5 420
<i>Ba</i>	1 960	2 490
<i>Ca</i>	8 470	8 140
<i>Ce</i>	32,6	1,5
<i>Cr</i>	138	187
<i>Cu</i>	133	46,0
<i>Fe</i>	1 730	1 950
<i>In</i>	82,2	228
<i>K</i>	40,2	24,3
<i>La</i>	55,5	6,53
<i>Mg</i>	1 150	1 040
<i>Mn</i>	28,7	15,5
<i>Mo</i>	28,7	2,2
<i>Na</i>	181	177
<i>Ni</i>	176	67,1
<i>P</i>	32	25
<i>Si</i>	1 830	3 840
<i>Sn</i>	164	145
<i>Sr</i>	3 070	4 400
<i>Ti</i>	18,9	13,7
<i>Y</i>	4,25	2,66
<i>Zn</i>	22,9	17,4
<i>Zr</i>	7,43	14,8

Ezek alapján kiszámítottam hány mg indiumot tartalmaz átlagosan egy kg LCD panel, illetve egy kg LCD modul. Ahhoz, hogy ezt meg tudjam tenni, először meg kellett nézmem, hogy az általam feldolgozott paneleknek átlagosan hány százalékát teszik ki az egyes

alkatrészek (**21.táblázat**) illetve, hogy a feldolgozott készülékek mekkora része átlagosan a panel.

21. táblázat: Az egyes alkotók átlagos mennyisége a panelekben

		panelre számolt átlagos tömeghányad [%]
CF üveg		30,62
TFT üveg		30,39
polarizátor		9,73
melléktermék, melyből	CF üveg	11,57
	TFT üveg	11,49
	polarizátor	3,68
veszteség		2,04

Miután ez megtörtént, első lépésben az egyes alkotókra kapott százalékos adatokkal súlyoztam a fajlagos indium mennyiségeket, így megkaptam a panelek átlagos, fajlagos indium tartalmát:

$$0,3062 \times 228 + 0,3039 \times 82,2 + 0,0973 \times 0 + 0,1157 \times 228 + 0,1149 \times 82,2 + 0,0368 \times 0 + 0,0204 \times 0 = 130,62 \text{ mg (indium)/kg (panel)}.$$

Ezt az értéket szoroztam az átlagos panel/modul tömeghányaddal, így a feldolgozott LCD kijelzők átlagos fajlagos indium tartalma is kiszámítható volt.

$$130,62 \frac{\text{mg (indium)}}{\text{kg (panel)}} \times \frac{9,79 \text{ kg (panel)}}{77,55 \text{ kg (kijelző)}} = 16,49 \frac{\text{mg (indium)}}{\text{kg (kijelző)}}$$

(Megjegyzés: a melléktermék esetén a teljes panellel azonos CF üveg, TFT üveg és fólia arányokat feltételeztem, a veszteségben -mivel értéke minimális- nem kalkuláltam indiumot.)

5. Összefoglalás, megállapítás

Összegzésként elmondható, hogy a dolgozatomban leírt, kidolgozott technológiával az elhasznált LCD kijelzők mechanikai előkészítése a kémiai feldolgozás számára megvalósítható.

A kísérletek során azonban talákoztam néhány olyan problémával, amelyek még megoldásra szorulnak. Ilyen a fóliák mechanikus leválasztása során az üvegek repedezése, törése. Ennek oka, hogy az LCD paneleket a hőkezelés előtt üvegágóval olyan méretűre kellett vágnunk, hogy azok elférjenek a rendelkezésünkre álló kemencében. A darabolás az üvegben mikro- illetve nagyobb repedéseket eredményezhet, a fólia lehúzása során az üvegre kifejtett erő hatására a repedésből törések lehetnek. A töredezés mértéke esetenként olyan nagy volt, hogy szinte lehetetlenné tette a fólialeválasztást, emiatt nagy mennyiségű melléktermék (összenőtt termék) keletkezett. Ennek elkerülése érdekében ajánlott egy olyan kemence használata, amelybe egy darabban behelyezhető a panel. Ha eleve repedezett vagy törött panellel kell dolgoznunk megfontolandó lehet a fóliákkal együtt történő aprítás, ami további kísérleteket igényel.

A másik dolog, ami odafigyelést igényel a panel gyors kihűlése a kemencéből való kivétel után. Ha ez megtörténik, a fólia nagyon nehezen választható le, ennek elkerülése érdekében javasolt magát a leválasztást is magasabb hőmérsékleten végezni. Megoldást jelenthet egy „fólia leválasztó berendezés” használata.

Az egyes kijelzők gyártmányától is függhet a fólia leválasztás sikeressége, talákoztunk ugyanis olyan eszközökkel, amik CF és TFT üveg felületén a fólia eltávolítása után marad egy vékony ragasztószerű réteg (DELL monitorok). Ezek általában nagyobb erő kifejtést is igényelnek az üveg feltárásához. A ragasztóréteg eltávolítására vegyszer alkalmazása javasolt.

A folyadékkristály leválasztás mértéke az irodalomban fellelhető $0,5 \text{ mg/cm}^2$ értéket jól megközelítette (30 perc ultrahangos tisztítás esetén, 8%-os Organizone koncentráció mellett $0,3936 \text{ mg/cm}^2$). A későbbiekben más vegyszer használatának vizsgálata is javasolt.

Az általam előkészített CF és TFT üvegekből (külön kezelve) összeállított egy-egy átlagos minta kémiai vizsgálatának eredményei szerint az indium fajlagos mennyisége a CF üveg esetén 228 mg/kg , TFT üveg esetén $82,2 \text{ mg/kg}$. Ez alátámasztja a SEM vizsgálatok eredményét, mi szerint a CF üveg a TFT-nél jóval több indiumot tartalmaz.

Könnyen kiszámítható, hogy a kidolgozott technológiával előkészített 3187,09 g CF üvegből 726,66 mg, a 3163,45g TFT üvegből pedig 260,04 mg indium nyerhető ki.

6. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani mindazoknak, akik bármilyen módon támogattak és segítettek dolgozatom elkészítésében.

Elsősorban köszönettel tartozom konzulenseimnek, Dr. Faitli József és Dr. Nagy Sándor tanár úrnak, a munkám és dolgozatom írása során adott szakmai tanácsokért, hasznos ötletekért.

Köszönöm továbbá Magyar Tamás doktorandusznak, aki segített az elindulásban, az eszközök szétszerelésében; Czél Péter hallgatónak, aki akkor még tanszéki dolgozóként a kezdeti kísérletekben segítette munkámat, illetve a tanszék technikai dolgozóinak, akikhez bármikor fordulhattam segítségért.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm a családomnak a rengeteg biztatást, amivel megkönnyítették a munkámat.

A kutató munka a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV -2012-0005 jelű projekt részeként, a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Fenntartható Természeti Erőforrás Gazdálkodás Kiválósági Központ tevékenységének részeként az Új Széchenyi Terv keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

7. Felhasznált irodalom

- [1] Barna Gy.né (2006): Folyadékkristályos képernyők újrahasznosítása új technológiákkal, BME jegyzet (http://www.omikk.bme.hu/collections/mgi_fulltext/hull/2006/09/0905.pdf)
- [2] Böni. H.; Widmer, R. (2011): Disposal of Flat Panel Display Monitors in Switzerland. (EMPA, St. Gallen, 2011 március.)
- [3] Buchert, M.; Manhart, A.; Bleher, D. és Pingel, D. (2012): Recycling critical raw materials from waste electronic equipment (Öko-Institut, North Rhine-Westphalia State Agency for Nature, Environment and Consumer Protection, Darmstadt, 2012.02.24)
- [4] Csőke B.: Előkészítéstechnika - Aprítás és osztályozás. Miskolci Egyetem, tanszéki jegyzet
- [5] Havancsák K., Dankházi Z.: Pásztázó Elektronmikroszkópia (<http://metal.elte.hu/oktatas/alkfizlab/meresleirasok/SEM3.pdf>)
- [6] Jeon, M.K.; Kang, M. (2008): Synthesis and characterization of indium-tin-oxide particles prepared using sol-gel and solvothermal methods and their conductivities after fixation on polyethyleneterephthalate films. Materials letters 62 (4-5), 676-682.]
- [7] LCD panelek mechanikai eljárásokkal történő feldolgozása a kritikus nyersanyagok elődúsítása tekintetében- negyedéves modulszintű szakmai beszámoló, TÁMOP– CriticEl, 2013
- [8] Lee, C.; Jeong, M.; Kilicaslan, M. F.; Lee, J. és Hong, H. (2013): Recovery of indium from used LCD panel by a time efficient and environmentally sound method assisted HEBM (Waste Management 33 (2013) pp. 730–734)
- [9] Li, J.; Gao, S.; Duan, H. és Liu, L.(2009): Recovery of valuable materials from waste liquid crystal display panel (Waste Management 29 (2009) pp. 2033–2039)]
- [10] McMullan, D.: Scanning Electron Microscopy (Foundation for Advances of Medicine and Science, 1993. augusztus)
- [11] Zhao, K.; Liu, Z.; Wang, Y. és Jiang, H. (2013): Study on Recycling Process for EOL Liquid Crystal Display Panel (Int. Jour. Of Precision Eng. And Manufacturing Vol. 14, No. 6, pp. 1043-1047)

Internetes források

- [12] CriticEL projekt honlapja
www.kritikuselemek.uni-miskolc.hu (2013.10.29)
- [13] Európai Bizottság honlapja
http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/tajani/hot-topics/raw-materials/index_hu.htm
(2013.10.29)
- [14] IAMGOLD Corporation (2012): Rare Earth Elements 101
http://www.iamgold.com/files/REE101_April_2012.pdf (2013.10.29)
- [15] Merck Group honlapja
http://magazine.merckgroup.com/en/Life_and_Style/LCD/liquid_crystal_displays2.html?magazineRateArticle=tcm:1113-40059-64 (2013.10.29)
- [16] Miskolci Egyetem Ásvány- és Kőzettani Tanszék honlapja
<http://www.asko.uni-miskolc.hu/~askmf/hpage/laborok.html> (2013.10.20)
- [17] SAMSUNG
www.samsung.com (2013.07.09)
- [18] <http://inventors.about.com/od/1startinventions/a/LCD.htm> (2013.07.09)
- [19] <http://www.hazi-mozi.hu/cikkshow.php?cid=2487> (2013.11.01)
- [20] <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/11.0%20Collection%20and%20handling%20of%20LCD%20screens.pdf> (2013.10.20.)
- [21] http://www.plasma.com/classroom/what_is_tft_lcd.htm (2013.10.20)