

Pannon Egyetem, Mérnöki Kar

Tudományos Diákköri Konferencia '25

Válogatás a Mérnöki Kar hallgatói által a 2025. év tavaszi
Tudományos Diákköri Konferenciákon bemutatott pályamunkákból

A kiadványt összeállította
Dr. Ható Zoltán és Dr. Valiskó Mónika



NTP-HHTDK-24-0016

„Polinszky Tehetséggondozó Program a Pannon Egyetem Mérnöki Karán”



KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



Nemzeti Tehetség
Program

Pannon Egyetemi Kiadó 2025

Pannon Egyetem, Mérnöki Kar

Tudományos Diákköri Konferencia '25

Válogatás a Mérnöki Kar hallgatói által a 2025. év tavaszi
Tudományos Diákköri Konferenciákon bemutatott pályamunkákból

A kiadványt összeállította
Dr. Ható Zoltán és Dr. Valiskó Mónika

NTP-HHTDK-24-0016

„Polinszky Tehetséggondozó Program a Pannon Egyetem Mérnöki Karán”



KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



Nemzeti Tehetség
Program

Pannon Egyetem, Mérnöki Kar
Tudományos Diákköri Konferencia '25

Válogatás a Mérnöki Kar hallgatói által a 2025. év tavaszi
Tudományos Diákköri Konferenciákon bemutatott pályamunkákból

Szerkesztette
Dr. Ható Zoltán és Dr. Valiskó Mónika

Kiadja a Pannon Egyetemi Kiadó
8200 Veszprém, Egyetem u. 10.

© Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2025

ISBN 978-963-396-303-6



Anyanyelvi lektor: Hankó Barbara
Borítóterv és kiadványszerkesztés: Vipler Nikolett
A kiadásért felelős a Pannon Egyetem rektora



Pannon Egyetem
University of Pannonia



Pannon Egyetem
Mérnöki Kar

Tartalomjegyzék

A konferencia szervezői	4
Bejczy Rebeka – Fenntartható felületaktív anyagok szintézise használt sütőolajokból	5
Absztrakt	6
1. Bevezetés	7
2. Szakirodalmi rész	7
3. Kísérleti rész	20
4. Összefoglalás	42
5. Jövőbeli tervek	42
Irodalomjegyzék	44
Szabados Hunor – Mérőberendezés tervezése mágneses anyagok B-H görbéjének meghatározására	49
Absztrakt	50
1. Bevezetés	51
2. Mágneses anyagok csoportjai	51
3. B-H, M-H görbék és paramétereik	53
4. Mérési módszerek	54
5. Célkitűzés	56
6. Vizsgált anyagok	56
7. DC mérőrendszer mágneses anyagok vizsgálatára	59
8. AC mérőrendszer ferromágneses anyagok vizsgálatára	67
9. Összefoglalás	78
Irodalomjegyzék	79
Vincze Dániel – Aeroszol minták ²¹⁰Po és ²¹⁰Pb koncentrációjának meghatározása	81
Absztrakt	82
1. Bevezetés	83
2. Irodalmi áttekintés	84
3. Kísérleti rész	92
4. Eredmények, következtetések	100
5. Összefoglalás	104
Irodalomjegyzék	105

A konferencia szervezői

**Pannon Egyetem
Mérnöki Kar
KTDT elnök:**

Dr. Valiskó Mónika
egyetemi docens

Komplex Molekuláris Rendszerek
Kutatócsoport

**Pannon Egyetem
Mérnöki Kar
KTDT titkár:**

Dr. Ható Zoltán
tudományos főmunkatárs

Komplex Molekuláris Rendszerek
Kutatócsoport

Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia
2025

**Fenntartható felületaktív anyagok szintézise
használt sütőolajokból**

Készítette: Bejczy Rebeka,
vegyésmérnök mesterképzés
Mérnöki Kar, Bio-, Környezet- és Vegyésmérnöki Kutató-Fejlesztő Központ
Témavezető: Dr. Nagy Roland, tudományos főmunkatárs



Fenntartható felületaktív anyagok szintézise használt sütőolajokból

*Készítette: Bejczy Rebeka,
vegyésmérnöki mesterképzés
Mérnöki Kar, Bio-, Környezet- és Vegyésmérnöki Kutató-Fejlesztő Központ,
MOL Ásványolaj- és Széntechnológiai Intézet Tanszék*

Témavezető: Dr. Nagy Roland, tudományos főmunkatárs

Absztrakt

A használt sütőolajok kezelése és újrahasznosítása, a fenntarthatóság és a környezetvédelem szempontjából egyre nagyobb figyelmet kapott az elmúlt években. A sütőolajok a felhasználás során jelentős fizikai és kémiai változásokon - például oxidáció, hidrolízis és polimerizáció - mennek keresztül, melyek befolyásolják minőségüket és újrahasznosíthatóságukat. Az említett folyamatok megértése kulcsfontosságú a megfelelő újrahasznosítási módszerek kiválasztásához.

A dolgozat átfogó szakirodalmi áttekintést nyújt a használt sütőolajok mennyiségéről, jellemzőiről és összetételéről, valamint kiemeli a tisztítási és minőségjavítási technológiák jelentőségét. Összefoglalja a használt sütőolajok újrafelhasználásának lehetőségeit, különös tekintettel a potenciális adalékcélú ipari felhasználási területekre. Ez magában foglalja a használt sütőolajok összetételének és jellemzőinek elemzését, valamint azokat a technológiai megoldásokat, amelyek lehetővé teszik a használt sütőolajok gazdaságos és környezetbarát feldolgozását és újrahasznosítását.

A kísérleti munka célja, egy használt sütőolaj-alapú, környezetbarát felületaktív anyag kifejlesztése volt, melynek előállítási paramétereinek optimalizálása lehetőséget biztosít egyedi hatóanyag-tartalmú termék előállítására. A szintetizált tenzidek fizikai-kémiai tulajdonságainak elemzése és azok összefüggéseinek feltárása a szintézis paramétereivel, valamint a hatásvizsgálati eredmények hozzájárulhatnak az ipari termelés fejlesztéséhez és a fenntartható kémiai technológiák támogatásához.

Kulcsszavak: használt sütőolaj, újrahasznosítás, felületaktív anyagok, adalékfejlesztés

1. Bevezetés

Napjainkban a fenntartható fejlődés és a környezetvédelem egyre fontosabb szerepet játszik az ipari technológiák fejlesztésében. Kiemelt figyelmet kap a hulladékkezelés és az ipari melléktermékek hasznosítása, különösen a használt sütőolajok esetében, melyek nem megfelelő ártalmatlanítás esetén komoly környezeti terhelést okozhatnak. Ugyanakkor, a hulladékok tisztítása és feldolgozása lehetőséget kínál új, értékes termékek előállítására, ami hozzájárulhat a környezeti hatások csökkentéséhez, miközben gazdaságilag is előnyös lehet az ipari felhasználás szempontjából.

A használt sütőolajok újrahasznosításának egyik ígéretes területe a felületaktív anyagok, azaz a tenzidek előállítása. A tenzidek széles körben alkalmazhatók az ipar különböző területein, beleértve a mosó- és tisztítószerkeket, az emulgeálószerkeket, valamint a kozmetikai és élelmiszeripari termékeket. A hulladékból előállított tenzidek biológiailag lebomló, környezetbarát alternatívát nyújthatnak a hagyományos, fosszilis alapú tenzidekkel szemben.

Jelen kutatás célja a használt sütőolajokból előállított felületaktív anyagok fejlesztése és vizsgálata. A munka során részletesen elemeztem a használt sütőolajok fizikai és kémiai tulajdonságait, valamint azokat a változásokat, amelyek a felhasználás során bekövetkeznek. Emellett ismertetem a tisztítási és minőségjavító technológiák, melyek elengedhetetlenek a megfelelő alapanyag biztosításához a további feldolgozás során. A kísérleti munka alkalmával, különböző észteramin típusú tenzidek szintézisét és vizsgálatát végeztem el. Az előállított termékek víztartalmának, savszámának, viszkozitásának és oldhatósági tulajdonságainak meghatározásával betekintést nyertem ipari alkalmazhatóságukba.

A vizsgálatok során nyert adatok alapján, következtetéseket vontam le a szintézisparaméterek és a végtermék tulajdonságai közötti összefüggésekkel kapcsolatban, amelyek segítséget nyújthatnak a gyártási folyamatok optimalizálásában.

A dolgozat célja tehát, hogy átfogó képet nyújtson a használt sütőolajokból történő tenzidek előállításának lehetőségeiről, bemutatva mind az elméleti háttérrel, mind pedig a gyakorlati kísérletek eredményeit. Az ipari alkalmazhatóság szempontjából olyan kiemelten fontos tényezők, mint az oldhatóság és az emulzióstabilitás, hozzájárulhatnak a fenntarthatóbb kémiai technológiák fejlesztéséhez, és elősegíthetik a környezetbarát alternatívák szélesebb körű alkalmazását.

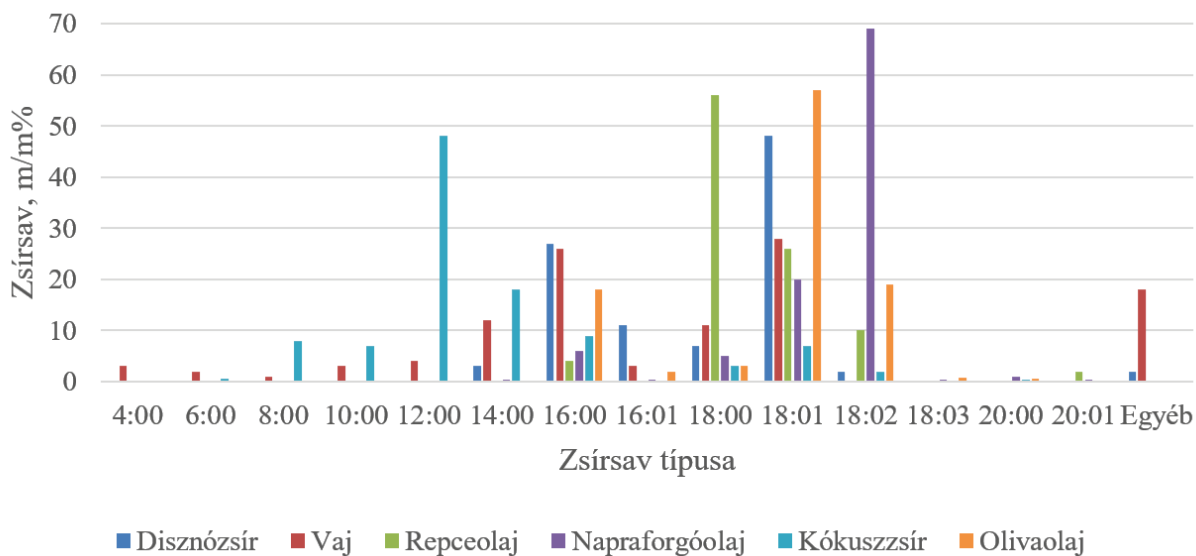
2. Szakirodalmi rész

2.1. Szakirodalmi bevezetés

A szakirodalmi kutatás célja, hogy átfogó képet adjon a használt sütőolajok újrahasznosítási lehetőségeiről, különös tekintettel azok ipari célú felhasználásáról. A munka során bemutatásra kerülnek a használt sütőolajok mennyiségére, összetételére és jellemzőire vonatkozó legfontosabb ismeretek, valamint azok a korszerű technológiai megoldások, amelyek lehetővé teszik ezen anyagok gazdaságos és környezetbarát feldolgozását.

2.2. Sütőolajok általános bemutatása

A sütőolaj egy gyűjtőnév, olyan növényi vagy állati eredetű zsírokat és olajokat jelent, melyeket hőkezeléssel járó főzési eljárásokhoz használnak. Kémiai szempontból, ezek főként zsírsavak trigliceridjeiből állnak [1]. Az [1. ábra](#) a legszélesebb körben használt növényolajok és állati eredetű zsírok tipikus zsírsav összetételét mutatja be.



1. ábra: Sütéshez alkalmazott növényolajok és zsírok átlagos zsírsav összetétele [1,2]

A sütőolajok kisebb mennyiségben tartalmazhatnak szabad zsírsavakat, részleges triglicerideket, karotinoidokat, tokoferolokat, toko-trienolokat, szterolokat, foszfátidokat, szénhidrogéneket és nyomelemeket.

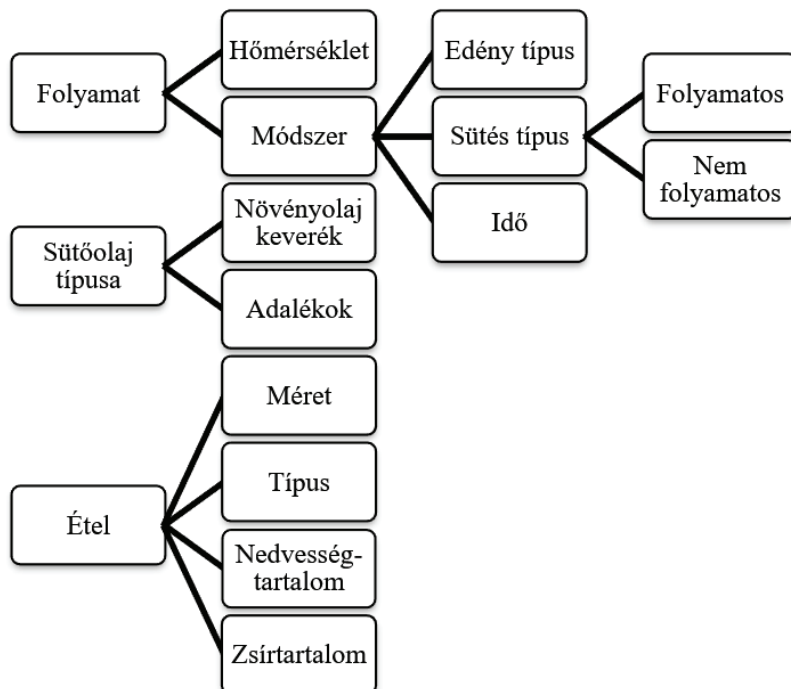
A sütőolajok használata régióként eltér, melyet egészségügyi, gasztronómiai és gazdasági tényezők befolyásolnak. Az olíva-, napraforgó- és repceolaj világszerte népszerű, sokoldalúságuk és kedvező táplálkozási hatásuk miatt [2]. Az Egyesült Államokban az olívaolaj iránti kereslet növekszik, és a repce- és növényi olajok továbbra is meghatározók. Dél-Ázsiában a mustár-, a kókuszolaj és a ghí dominál; Észak- és Kelet-Indiában a mustár-, Dél-Indiában inkább a kókuszolajat használják, azonban a ghí az indiai konyha alapvető eleme [3,4].

A sütőolajok előállítása leggyakrabban növényi alapanyagok sajtolásával és/vagy azok n-hexános oldószeres kivonásával történik [5].

Összetett kémiai természetüknek köszönhetően, a különböző eredetű és különböző helyen gyűjtött, használt sütőolajok (HSO-k) vegyi összetétele jelentősen eltérhet, ezért fontos tulajdonságaik ismerete és a megfelelő előkezelési folyamatok kiválasztása, melyeket a hulladék sütőolajok sajátos jellemzőihez igazítanak [6].

2.3. A használt sütőolaj fizikai-kémiai tulajdonságai, tulajdonságok változása a sütés során

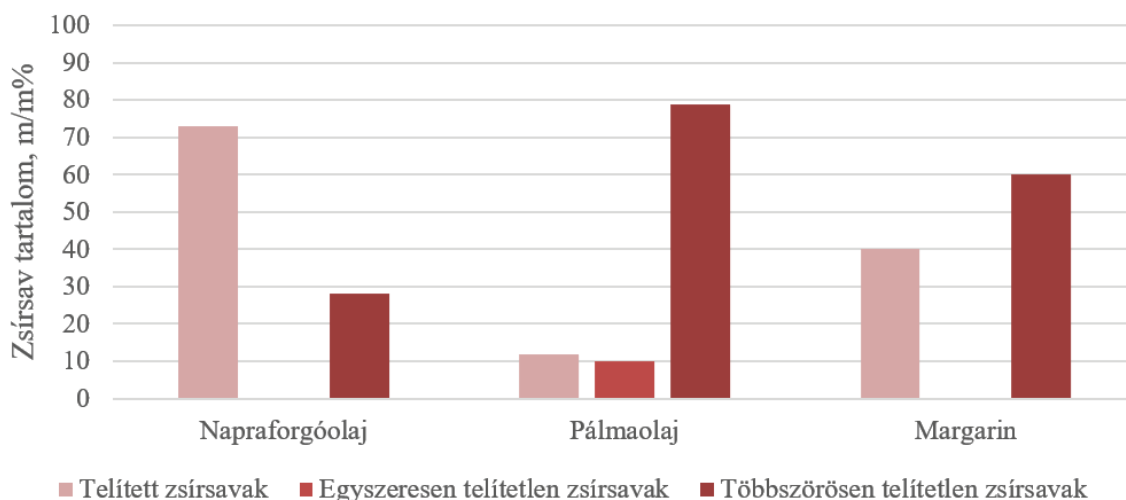
A sütőolajok használatuk során jelentős kémiai és fizikai átalakulásokon mennek keresztül. A használt sütőolajok összetételét és tulajdonságait befolyásoló főbb tényezőket a [2. ábra](#) mutatja.



2. ábra: Használt sütőolajok összetételét befolyásoló főbb tényezők [7,8]

A sütési folyamat során a zsírsavösszetétel jelentősen módosul. Banani et al. [9] kimutatta, hogy a napraforgóolaj telítetlen zsírsav tartalma csökken a használat során, míg a telített zsírsavak aránya nő. Hellier et al. [10] kísérletei alapján, a pálmaolaj telített zsírsavtartalma is növekszik a használat során, míg a többszörösen telítetlen zsírsavak mennyisége csökken.

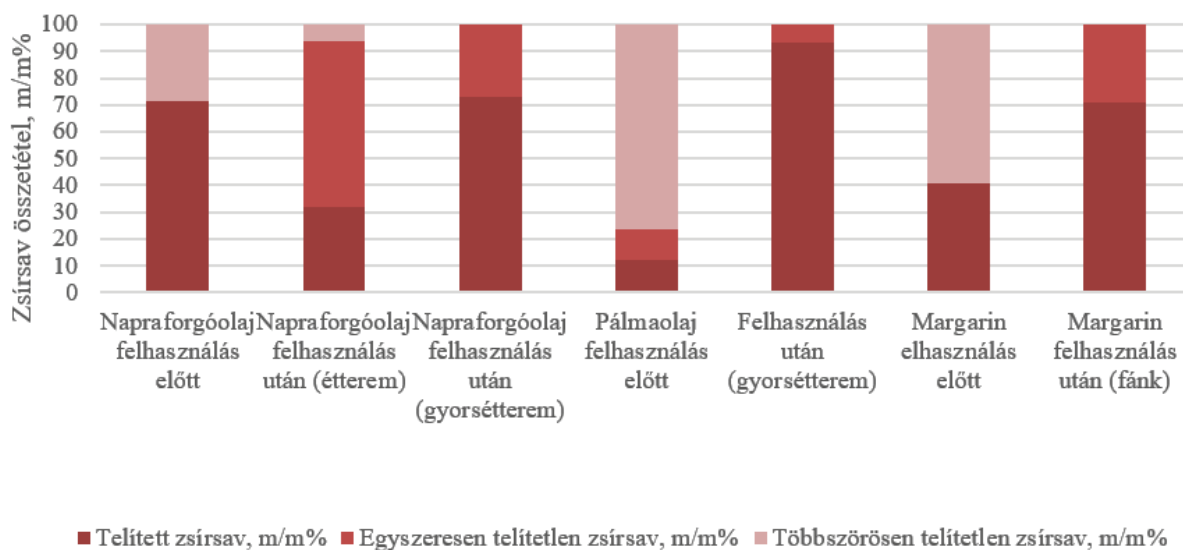
Néhány friss sütőolaj zsírsav összetétele a [3. ábrán](#) látható.



3. ábra: Néhány finomított sütőolaj zsírsav tartalma

A sütőolajok tulajdonságainak változását Awogbemi és munkatársai [1] vizsgálták különböző olyan sütőolaj mintákon, amelyek 14 napos felhasználáson estek át. A használat során csökkent a pH, nőtt a dermedéspont és a viszkozitás, míg a sűrűség a használati idő és hőhatás függvényében változott. Ezek a változások az oxidáció, polimerizáció és szennyeződések következményei voltak [1].

A sütési hőmérséklet és az idő növekedésével, a HSO-k kémiai lebomlása fokozódik, aminek során toxikus vegyületek, például benzol és 1,4-dioxán keletkezhet [11]. A sütési folyamat közben, a sütőolaj nitrogén- és kéntartalmú vegyületekkel is szennyeződhet, ami az olaj érzékszervi tulajdonságainak romlásához vezet. Ezek eltávolítása kulcsfontosságú az ipari felhasználás szempontjából [12]. Az oxidációs folyamatok során kialakuló szabad zsírsavak és peroxidok negatívan befolyásolják a HSO-k minőségét és színét is [13]. A 4. ábra a különféle ételek sütéséhez felhasznált sütőolajok zsírsavösszetételét mutatja felhasználás előtt és eltérő célú felhasználás után.



4. ábra: Használt sütőolajok minőségjavítási és újrafelhasználási módszerei [14]

A használt sütőolajok tartalmazhatnak potenciálisan mérgező lebomlási termékeket, például alkéneket, aldehideket és ketonokat, melyek a magas hőmérsékleten történő többszöri felhasználás során keletkezhetnek [15]. A víztartalom és a tárolási körülmények tovább fokozhatják a zsírsavak lebomlását, valamint a fémek által katalizált oxidációt [11].

A HSO-k jellemzői erősen eltérhetnek az eredeti sütőolajokétól, ami a sütési szokások, az olaj típusa és az alkalmazott technológiai paraméterek függvénye. Néhány különböző forrásból származó HSO legfontosabb tulajdonságait az 1. táblázat szemlélteti. Az eltérések jól mutatják a használt sütőolajok heterogenitását, mely befolyásolja az újrafelhasználást vagy a további feldolgozás lehetőségeit [16].

1. táblázat: Különböző gyűjtőhelyről származó HSO minták fizikai-kémiai tulajdonságai [14]

Tulajdonságok	Használt éttermi napraforgóolaj	Használt gyorséttermi napraforgóolaj	Használt gyorséttermi pálmaolaj	Használt margarin
Savszám, mgKOH/g	3,6	1,32	2,36	4,33
Elszapp.szám mgKOH/g	207	188	268	-
Peroxidszám, meqO ₂ /kg	23,1	-	-	7,3
Jódszám, g I ₂ /100g	83	141	13,2	-
Density, kg/m ³	910	924	920	919
Kinematikai viszkozitás 40 °C-on, mm ² /s	4,2	36,4	30,5	49,2
Víztartalom, m/m%	1,9	0,42	-	0,19
Na tartalom, m/m%	6,9		-	-
Kéntartalom, m/m%	-	0,09	-	-
Lobbanáspont, °C	-	212	269	-

A HSO-k kémiai és fizikai jellemzői jelentős változékonyságot mutatnak a sütési folyamat során bekövetkező átalakulások miatt, ami kihívást jelent az ipari újrafelhasználás és a megfelelő feldolgozási technológiák kidolgozása szempontjából.

2.4. Használt sütőolaj globális mennyisége és környezeti vonatkozásai

A használt sütőolaj az élelmiszeripar különböző területeiről származó, az élelmiszerek sütése után visszamaradó, környezetre veszélyes hulladék. Mivel a bő olajban sütés világszerte elterjedt főzési eljárás, a HSO földrajzilag széles körben jelen van, és jelentős mennyiségben keletkezik.

Az elmúlt évtizedekben a HSO iránti érdeklődés fokozódott, mivel a hosszú szénláncú zsírsavakban gazdag összetétele miatt számos iparág számára értékes nyersanyagbázist kínálhat [1]. Előnyei közé tartozik az alacsony beszerzési költsége, ami jellemzően 2–3-szor kevesebb a finomított sütőolajokénál. A megfelelő minőségjavítás után, a finomított olajhoz képest akár 45%-os költségmegtakarítás is elérhető egy termék előállításakor [16–18].

Becslések szerint világszerte, évente mintegy 42 millió tonna HSO keletkezik, melynek jelentős része nem megfelelően kerül ártalmatlanításra [19]. Azonban, a pontos globális mennyiség meghatározása nehézségekbe ütközik a különböző étkezési szokások és hulladékkezelési rendszerek sokfélesége miatt.

Az egyes országokra vonatkozó adatok jól szemléltetik a keletkezés mértékét, Japánban például az éves sütőolaj-felhasználás körülbelül 2,5 millió tonna, amiből mintegy 500 000 tonna HSO képződik [20]. Etiópiában, az Arba Minch városában végzett vizsgálatok szerint, egy étkezde évente átlagosan 430 litert termel [21], ami más városi környezetekre is jellemző lehet. Az Európai Unióban évente

hőzavetőlegesen 1,5 millió tonna HSO keletkezik, melynek jelentős része biodízel előállításánál kerül felhasználásra. Az Egyesült Államokban a vendéglátóipar, évente körülbelül 3,8 millió tonnát termel, ami jól mutatja a hulladék keletkezésének ipari léptékét [22].

Néhány európai országban hulladékként összegyűjtött, használt sütőolaj éves mennyiségét a [2. táblázat](#)ban foglaltam össze.

2. táblázat: Összegyűjtött hulladék használt sütőolaj [23,24]

Ország	Összegyűjtött használt sütőolaj, m ³ /év
Lengyelország	67 000
Olaszország	60 000
Portugália	28 000
Spanyolország	270 000
Németország	250 000
Magyarország	5500
Norvégia	1000

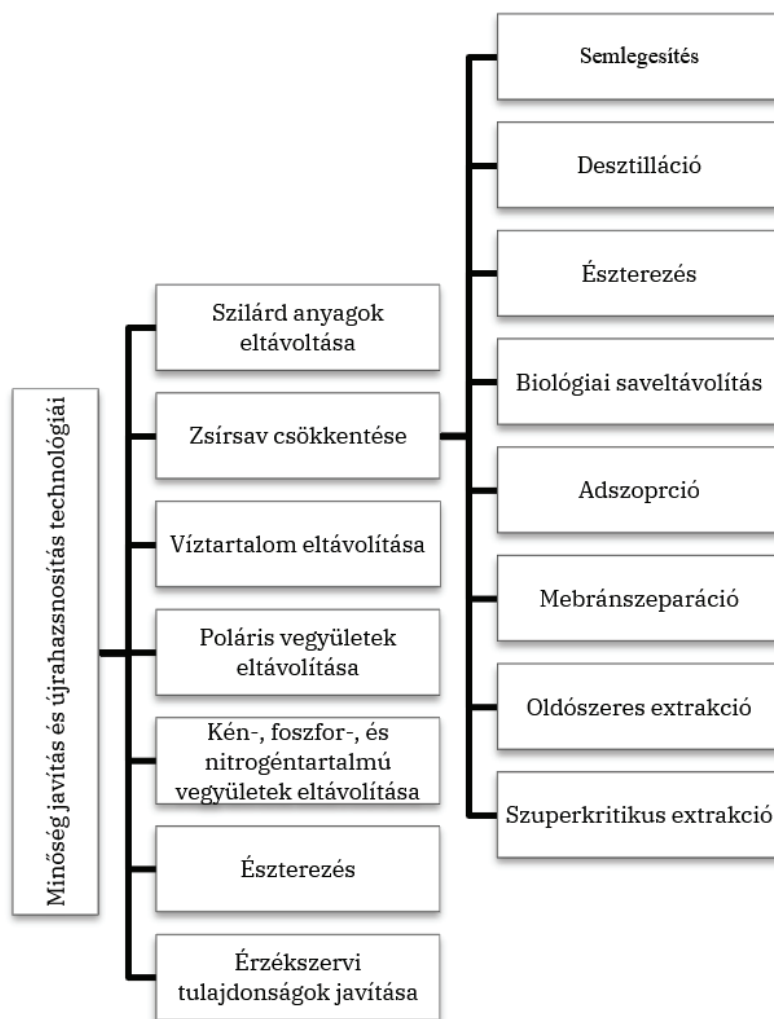
Nem megfelelő kezelés esetén a HSO súlyos környezeti károkat okozhat, például víz- és talajszennyezést [22]. Bár számos ország – köztük az EU tagállamai – bevezetett gyűjtésre és újrahasznosításra irányuló rendszereket, azok hatékonyságát gyakran logisztikai problémák és alacsony lakossági részvétel korlátozza [25–27]. A bioüzemanyagként, főként biodízelnél történő hasznosítás csökkenti a nyersanyagigényt és támogatja a körforgásos gazdaságot [28]. A helyes ártalmatlanítás elősegítése érdekében, tájékoztató kampányok és gyűjtőpontok létesítése, valamint hatékonyabb szabályozás és begyűjtési infrastruktúra kialakítása szükséges [29].

2.5. Használt sütőolaj újrahasznosítási lehetőségei

A HSO újrahasznosítása környezetvédelmi és gazdasági előnyöket kínál, hozzájárulva a fenntartható, körforgásos gazdasághoz. A következő fejezetben a használt sütőolajok minőségjavítási és újrahasznosítási módszerei kerülnek bemutatásra.

2.5.1. Minőségjavítási technológiák

A használt sütőolajok újrahasznosítása és oleokémiai ipari felhasználása előtt, különböző előkezelési eljárásokra ([5. ábra](#)) van szükség a szennyeződések eltávolítása, a kémiai stabilitás javítása és a termék minőségének biztosítása érdekében.



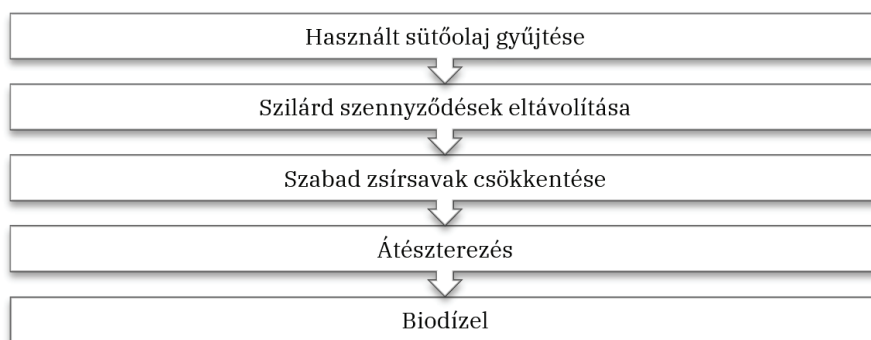
5. ábra: Használt sütőolajok előkezelési technológiái [19]

Az előkezelési módszer megválasztása a hulladékolaj eredetétől, összetételétől és a kívánt végterméktől függ. Például a biodízelgyártásnál különösen fontos a szabad zsírsav- és nedvességtartalom csökkentése, mivel ezek rontják az átészterezési reakció hatékonyságát és mellékreakciókat okozhatnak. Más célú felhasználás, például észterezés, kevésbé érzékeny egyes szennyezőkre, de a stabil feldolgozás érdekében ott is szükség van tisztításra, leggyakrabban a szilárd szennyeződés eltávolítására [19]. A HSO gyakran jelentős mennyiségű (10–20 m/m%) szilárd szennyeződést tartalmaz, melyek eltávolítása szűréssel, dekantálással és melegítéssel történik [30, 31]. A szabad zsírsavak mennyisége lúgos kezeléssel, vákuumdesztillációval, észterezéssel vagy membránszűréssel csökkenthető, a legutóbbi különösen hatékony, de költséges eljárás [32–34]. A víz eltávolítása adszorbensekkel, vákuumdesztillációval vagy membránszeparációval történik, a mikrobiális romlás és emulzióképződés elkerülése érdekében [35, 36]. A poláris szennyezők és bomlástermékek csökkentésére vákuumdesztilláció, adszorpció és membrántechnológiák alkalmazhatók, míg a kén-, foszfor- és nitrogéntartalom oxidációval, extrakcióval vagy savas kezeléssel csökkenthető [37–39]. A szín és a szag javítására szintelenítő anyagok (pl. bentonit, aktív szén) használhatók és gőzdesztilláció alkalmazható [40].

2.5.2. Biodízel előállítása

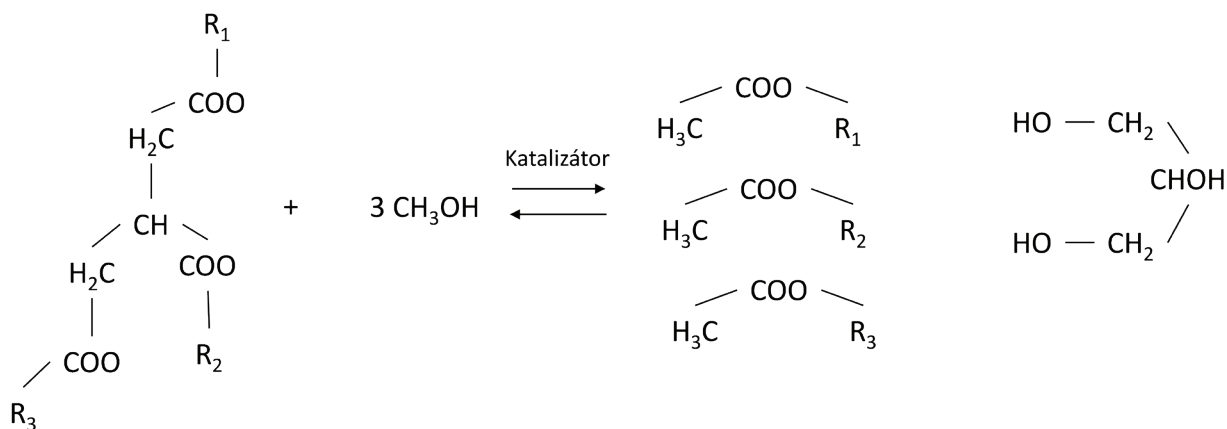
A használt sütőolaj (HSO) biodízelné váló újrahasznosítása egyszerre nyújt megoldást a hulladékkezelési és energiaelőállítási kihívásokra, ezzel csökkentve a környezeti szennyezést és a fosszilis üzemanyagoktól való függőséget. A kutatások igazolják, hogy a HSO biodízellé történő átalakítása jelentősen mérsékli a szén-dioxid-kibocsátást a hagyományos elhelyezési módokhoz képest [41].

A HSO biodízellé történő átalakításának műszaki megvalósíthatósága már jól megalapozott. A 6. ábra szemlélteti a használt sütőolajból történő biodízel-előállítás menetének főbb lépéseit.



6. ábra: Használt sütőolajból történő biodízel előállításának menete

A biodízel előállításának egyik legelterjedtebb módszere az átészterezés (7. ábra). A folyamat során a HSO-t alkohollal, jellemzően metanollal reagáltatják katalizátor jelenlétében. Az így nyert biodízel versenyképes alternatívát jelenthet a finomított növényi olajokkal szemben, mivel gazdaságosabb és csökkenti az élelmiszer-alapanyagok iránti keresletet [42].



7. ábra: Biodízel előállításának reakcióegyenlete használt sütőolajból átészterezéssel [42]

A HSO-ból előállított biodízel teljesítményjellemzői kedvezők, a hagyományos dízelhez hasonló motorhatékonyság mellett alacsonyabb kipufogógáz-kibocsátást eredményez [43,44]. Ezen túlmenően, a HSO más alkalmazási területeken is felhasználható, például szappanok, mosószerek és biopolimerek előállítására [45].

2.5.3. Felületaktív anyagok és ipari adalékok előállítása

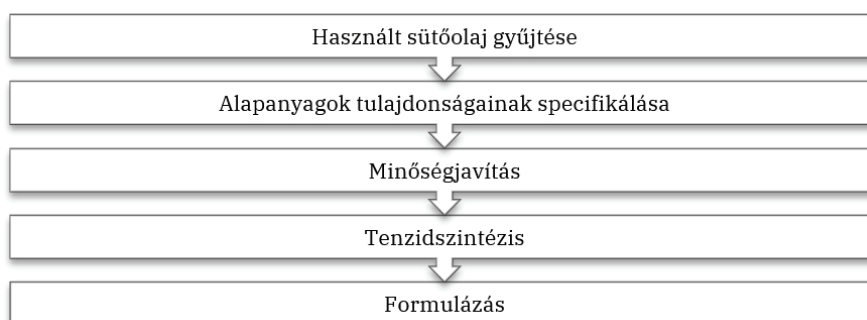
A felületaktív anyagok (tenzidek) kulcsfontosságú szerepet játszanak számos iparágban, mivel képesek csökkenteni a felületi feszültséget, emulgeálni, diszpergálni és tisztítani. Ezek a tulajdonságok nélkülözhetetlenné teszik őket a tisztítószergyártás, kozmetikai ipar, az élelmiszer-, a textil-, valamint a gyógyszer- és vegyipar számára. Az olajiparban is egyre jobban megjelennek, különösen a harmadlagos kőolajkitermelésben és a kenőanyagok gyártásában.

A tenzidek általában szerves vegyületek, melyek amfipatikus felépítésűek, tehát egy hidrofil (fej) és egy hidrofób (lánc) részből állnak. A hidrofil rész polaritása szerint, négy csoportba lehet őket sorolni:

- nemionos: a hidrofób csoporthoz nem disszociáló hidrofil rész kapcsolódik,
- anionos (anionaktív): a hidrofób csoporthoz negatív töltésű fejcsoport kötődik,
- kationos (kationaktív): a hidrofób csoporthoz pozitív töltésű fejcsoport kötődik,
- amfoter: a molekula hidrofil része ikerionos természetű.

A tenzidszintézis során, a sütőolajban található zsírsavak különféle kémiai reakciók révén alakíthatók át eltérő típusú értékes felületaktív anyagokká.

Bár a szakirodalomban a használt sütőolajból előállított tenzidek témája még viszonylag kevésbé kifejtett, egyre nagyobb figyelem irányul erre a technológiai megoldásra. A használt sütőolajból történő felületaktív anyag előállításának általános menetét a [8. ábra](#) szemlélteti.

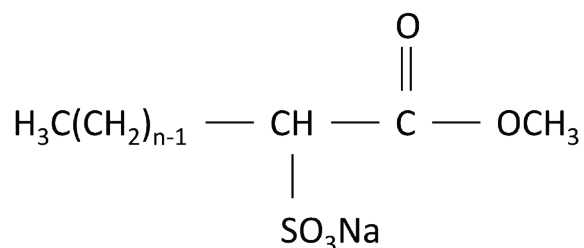


8. ábra: Felületaktív anyagok előállításának általános menete használt sütőolajból

A következő fejezetben a zsírsavakból előállítható adalékok és tenzidek kerülnek bemutatásra.

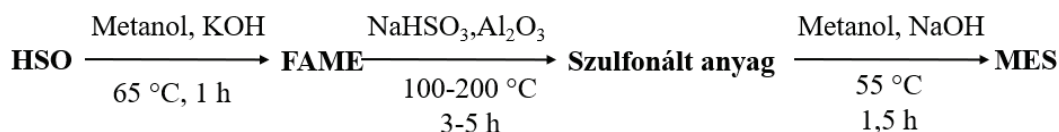
2.5.3.1. Metil-észter-szulfonátok (MES-ek)

A metil-észter-szulfonátok (MES) a legszélesebb körben alkalmazott biobázisú ionos felületaktív anyagok közé tartoznak, főként por- és folyékony mosószerekben fordulnak elő ([9. ábra](#)).



9. ábra: Metil-észter-szulfonátok

Permadani és kollégái [46], valamint Yusuff és kollégái [47] laboratóriumi körülmények között állítottak elő metil-észter-szulfonátot használt sűtőolajból. Az előállítás egyszerűsített lépéseit és paramétereit a 10. ábra szemlélteti.

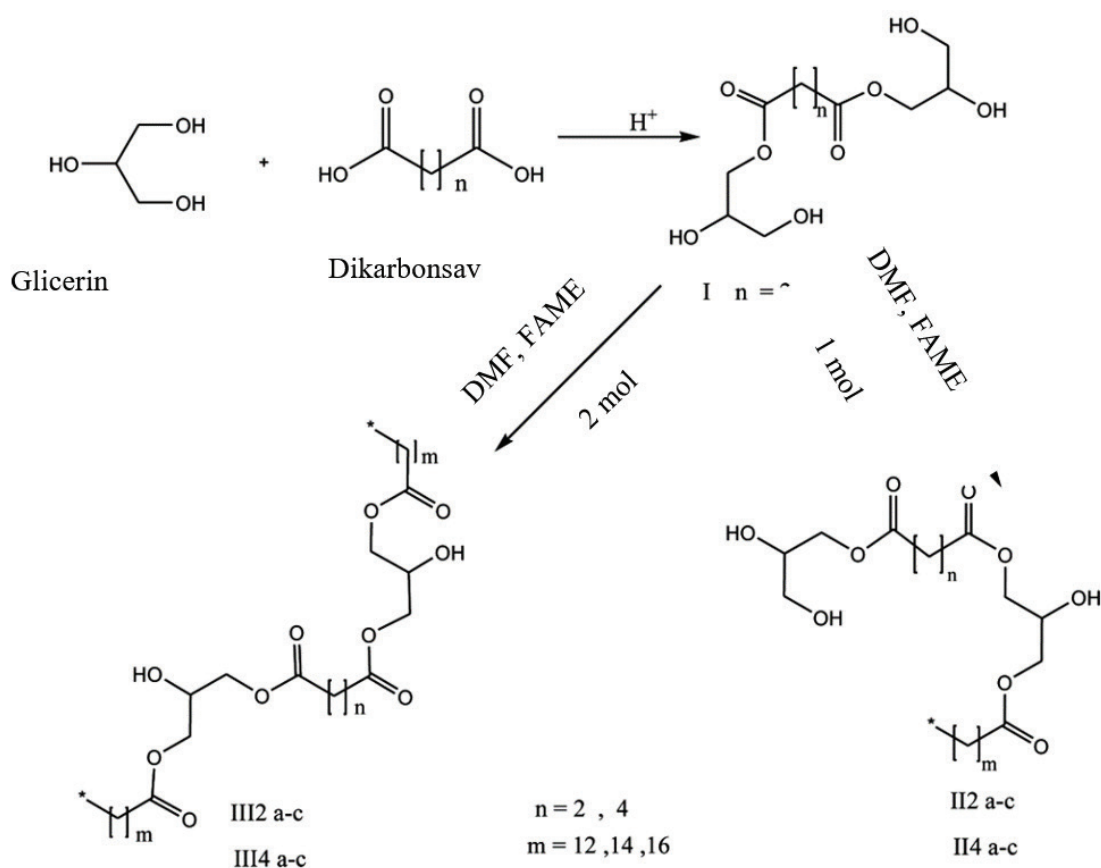


10. ábra: MES előállításának lépesei használt sűtőolajból [47]

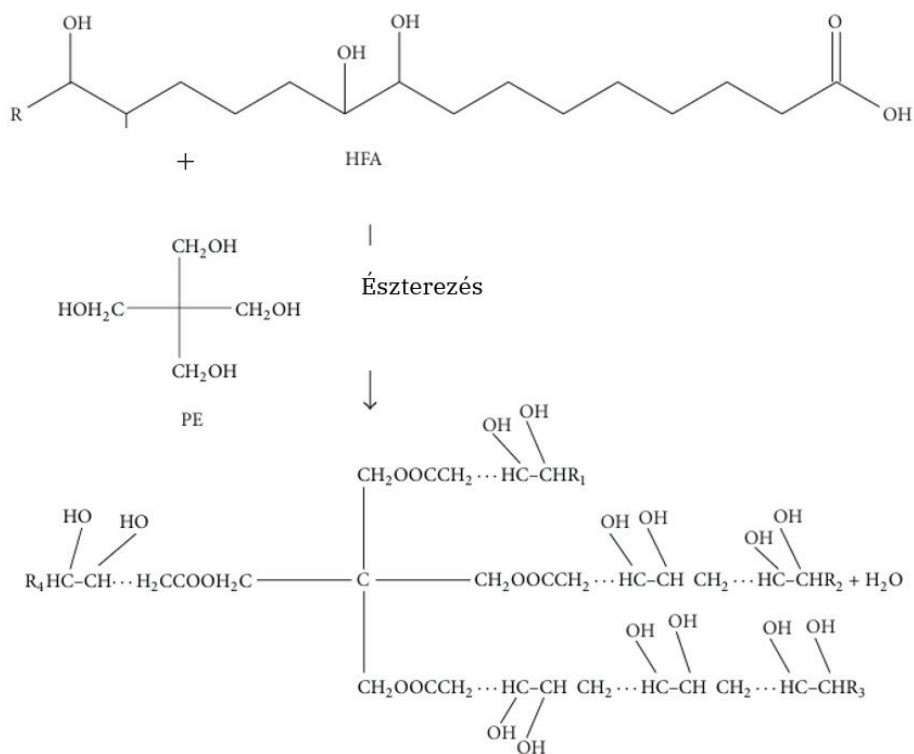
Elsősorban a lineáris alkil-benzol-szulfonát helyettesítésére alkalmazzák mosószerekben, hiszen kiváló tisztítóhatással, magas vízkeménységtűrő képességgel és kiváló biológiai lebonthatósággal rendelkeznek.

2.5.3.2. Glicerín észterek

A monogliceridek széles körben használt, biológiailag lebomló és biokompatibilis felületaktív anyagok, melyeket élelmiszerekben, kozmetikumokban, gyógyszerekben alkalmaznak. A monoglicerideket jellemzően glicerín és szabad zsírsavak észterezésével állítják elő, magas hőmérsékleti körülmények között (220–250 °C), homogén vagy heterogén katalizátor jelenlétében [48,49]. A monogliceridek előállíthatók környezetbarátabb módon is lipázok segítségével. Ezt az eljárást több kutatás is alátámasztotta [50].



11. ábra: Zsírsav észterek előállítása dikarbonsavakból [51]

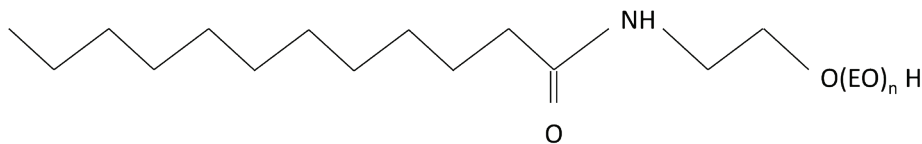


13. ábra: Poliól észter előállításának reakciója [56]

A 13. ábrán bemutatott reakció során a poliól-észtereket, zsírsav és pentaeritritol észterestítési reakciójával állítják elő, miközben melléktermékként víz keletkezik [56].

2.5.3.5. Zsírsav etoxilátok és zsírsav észter származékok

A zsírsav-etoxilátokat számos különböző területen alkalmazzák, többek között kozmetikumokban, gyógyszeripari készítményekben, mosó- és mosogatószerekben, padló- és falápolókban, fém- és szőnyegtisztítókban, motorhajtóanyag-adalékanyagként, kőolajkitermelési segédanyagként (kémiai elárasztásos technológiák során), valamint papírtörlőkben, ahol visszanedvesítő anyagként szolgálnak (14. ábra). A monoglicerid és diglicerid etoxilátokat főként kozmetikumokban használják emulgeálószerként és sűrítőanyagként. A ricinusolaj-etoxilátok (vagy hidrogénezett homológjaik) emulgeálószerként szolgálnak a gyógyszeriparban [56].



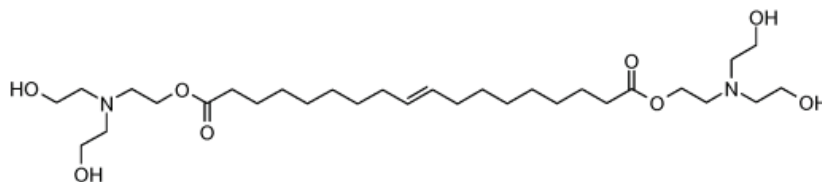
14. ábra: Zsírsav-etoxilátok általános szerkezete ($n=EO$ száma (1-100))

A zsírsav-etoxilátok könnyen előállíthatók katalitikus reakcióval. Ennek során zsírsav-metil-észterek (FAME) reagálnak etilén-oxiddal, így monometil-éter (OCH_3) végcsoporttal rendelkező zsírsav-etoxilát képződik [58].

Az etoxilátok (zsírsav-, monoglicerid- és alkohol-etoxilátok) esetében a legfőbb problémát a biztonságosság és a bőrbarát tulajdonságok jelentik, mivel nyomokban 1,4-dioxán lehet jelen bennük. Ezért ezek eltávolítása, például desztillációval, kiemelten fontos [59].

2.5.3.6. Észteraminok

Az észteramin típusú felületaktív anyagok a nemionos tenzidek egy speciális csoportját alkotják, melyek di- vagy trietanolamin és zsírsavak, vagy növényi olajok átészterezésével állíthatók elő. Az észteraminok egyik tipikus képviselője a 15. ábrán látható.



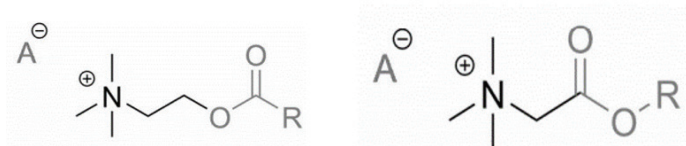
15. ábra: C18 alapú észteramin

Az észteramin típusú tenzidek, emulgeáló- és tisztítóhatásuk miatt, széles körben alkalmazhatók. HLB-értékük szabályozhatósága lehetővé teszi hatékonyságuk optimalizálását, amit a zsírsavlánc hossza és az amin összetevők aránya is befolyásol. Biológiai lebonthatóságuk és alacsony toxicitásuk révén ígéretes alternatívát kínálnak fenntartható tisztítószerekben [60-65].

2.5.3.7. Kvaterner ammónium vegyületek

Az észterkvátok (esterquats) kvaterner ammónium kationos fejjel funkcionizált természetes zsírsavak, biológiailag erősen lebontható kationos tenzidek. Ezek a vegyületek kiváló tisztító- és emulgeáló tulajdonságokkal rendelkeznek, emiatt széles körben használják őket különböző iparágakban, textilöblítőkben, hajkondicionálókban, festékekben és bőrpuhítókban [66, 67].

Kémiai szerkezetük alapján két fő típusuk különböztethető meg: a kolin-típusú és a betain-típusú észterkvátok (16. ábra), melyeket az észterkötés kémiai elrendezése határoz meg [68,69].



16. ábra: Kolin (bal) és betain (jobb) típusú észterkvátok szerkezeti képlete (ahol A: anion, R:alkil csoport) [70]

Az előállítás során az észteraminokat trietanol-amin, dietanolamin vagy más hidroxil-aminok átészterezésével állítják elő, majd a terméket kvaternizálják, így biztosítva a kívánt felületaktív tulajdonságokat [71-74].

2.6. Szakirodalmi összefoglalás

A szakirodalmi kutatás célja, a használt sütőolajok kezelésének és újrahasznosításának bemutatása volt, különös tekintettel azok fizikai-kémiai tulajdonságaira és a feldolgozást befolyásoló szennyeződésekre. Ismertetésre kerültek a tisztítási és minőségjavító technológiák, valamint a globális mennyiségek és környezeti hatások. Kiemelt figyelmet kapott a felületaktív anyagok előállítása, mint környezetbarát és gazdaságos újrahasznosítási irány. A kutatás rámutatott arra, hogy a használt olajok fenntartható hasznosításához elengedhetetlen a megfelelő előkezelés és a technológiai fejlesztés.

3. Kísérleti rész

3.1. Kísérleti rész bevezetés

A kísérleti munka célja a sütóolajok oxidációs tulajdonságainak feltárása és ipari adalékokká történő alakítása volt. A műveletek során megvizsgáltam a különböző helyről származó sütóolajok fizikai-kémiai tulajdonságait, majd ezekből a friss, mesterségesen öregített és hulladék sütóolajokból felületaktív anyagokat állítottam elő. Az így kapott termékeknek megvizsgáltam a tulajdonságait, és összefüggéseket kerestem az alapanyagok és a termékek jellemzői között.

3.2. Felhasznált alapanyagok

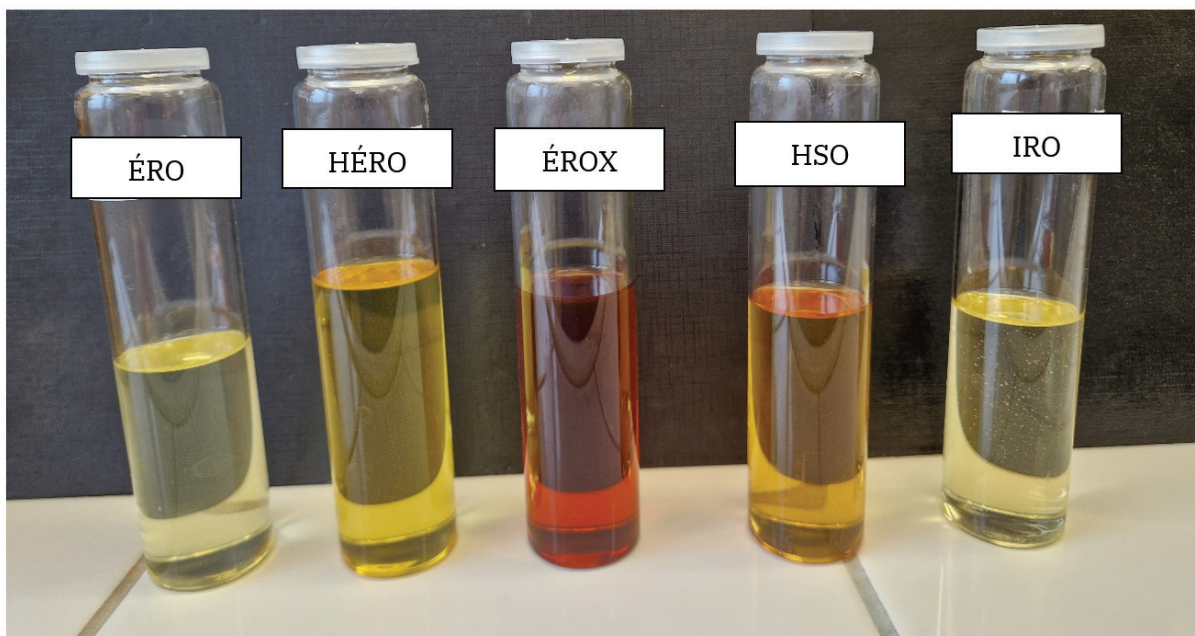
A szintézisekhez különböző eredetű sütóolajokat használtam fel, melyeknek a kísérlet elején ismert adatait az [3. táblázat](#)ban foglaltam össze.

3. táblázat: Szintézishez felhasznált alapanyagok adatai

Alapanyag jele	ÉRO	HÉRO	ÉROX	HSO	IRO
Leírás	Élelmiszeripari minőségű repceolaj	Használt élelmiszeripari minőségű repceolaj (szűrt)	Mesterséges öregítéssel előállított oxidált étkezési repceolaj (ÉRO-ból)	Használt élelmiszeripari minőségű sütóolaj keverék (szűrt)	Ipari minőségű repceolaj
Gyártó/ Származási hely	Bunge Zrt.	Bunge Zrt.	Bunge Zrt.	Bunge Zrt.	Rossi Biofuel Zrt.
Növényolaj típusa	Repceolaj	Repceolaj	Repceolaj	Napraforgóolaj és repceolaj keveréke	Repceolaj

Ahogy a táblázatban látható, 2-2 használatlan és különböző használat utáni sütóolaj állt rendelkezésre. Az HÉRO jelű használt repceolaj fánk sütésére lett felhasználva 3 órán keresztül, 180 °C hőmérsékleten. A HSO használt sütóolaj magyarországi élelmiszeriparban használt sütóolaj átlag keveréke, melyet nuggetsek és sültburgonya sütésére használtak. Az alkalmazott sütóolajokból felhasználás előtt szűréssel távolítottam el a szilárd szennyeződések.

A kísérletekhez felhasznált különböző minőségű olajok külleme a [17. ábrán](#) látható.



17. ábra: Felhasznált olajok külleme

A használt sütőolajokat szűréssel előkezeltem az esetleges ételmaradékok leválasztásának céljából.

3.3. Alkalmazott módszerek

Megvizsgáltam az alapanyagok és a szintetizált tenzidek fizikai-kémiai tulajdonságait. A minősítéshez alkalmazott módszerek ebben a fejezetben kerülnek bemutatásra.

3.3.1. Mesterséges öregítés, oxidációs stabilitás

Az ÉRO étkezési repceolajat mesterséges öregítéssel (oxidációval) kezeltem azért, hogy modellezem a különböző felhasználási módok során lezajló sütési folyamatokat és az ezekkel járó kémiai változásokat.

Az oxidálás paramétereit a [4. táblázat](#)ban foglaltam össze.

4. táblázat: Oxidálás paramétereit

Minta jele	ÉROX
Leírás	Mesterséges öregítéssel kezelt élelmiszeripari minőségű repceolaj
Hőmérséklet, °C	170
Idő, h	16
Levegő, dm ³ /h	20

Az oxidálással egy felhasználási módtól (étel típusától) független alapanyagot állítottam elő, melyet felhasználtam a szintézishez.

3.3.2. Szabványosított módszerek

Az alapanyagok és a termékek minősítésére alkalmazott szabványosított és egyszerű műszeres módszereket az 5. táblázatban gyűjtöttem össze.

5. táblázat: Alkalmazott szabványos és egyszerű műszeres módszerek

Alkalmazott módszer	Szabvány, műszer
Víztartalom meghatározása	MSZ 11745
Savszám meghatározása (25 °C-on)	ASTM D974-21
Jód szám meghatározása (25 °C-on)	ASTM D1159- 07
Elszappanosítási szám meghatározása (25 °C-on)	ISO 3657:2013
Dinamikai viszkozitás meghatározása (40 °C-on)	ASTM D445-24
Kinematikai viszkozitás meghatározása (40 °C-on)	ASTM D 445-04e2
Sűrűség meghatározása (40 °C-on)	ASTM D5002-19
Szín meghatározása (25 °C-on)	ASTM D1500-24
pH érték meghatározása (25 °C-on)	Mettler Toledo SevenCompact műszer
Vezetőképesség meghatározása (25 °C-on)	Mettler Toledo SevenCompact
Turbiditás meghatározása (25 °C-on)	WTW Turb 430IR

3.3.3. Zavarosság vizsgálata

Az olajok zavarosságát spektrofotométeres méréssel határoztam meg AvaSpec-DUAL Starline spektrofotométerrel, transzmittancia meghatározás alapján, 420 nm hullámhosszon. A 0%-os maximális zavarosságot, míg a 100%-os transzmittancia tiszta, átlátszó anyagot jelzett.

3.3.4. Oldhatóság vizsgálata

A tenzidek vízben- és olajban való oldhatóságát az AvaSpec 2048 Standard optikai szálás spektrofotométerrel határoztam meg, amihez AvaLight-DHc Compact halogén fényforrást használtam.

A vizsgálathoz a tenzidekből 1 m/m%-os oldatot készítettem, desztillált víz és MOL WOM 15 jelű kozmetikai olaj felhasználásával. Az oldhatóságot a transzmittancia értéke jellemezte, ahol a 0% teljesen zavaros, míg a 100% transzparens, tökéletesen oldódó oldatot jelentett.

3.3.5. Vízsám érték meghatározása

A víztartalmat a módosított Greenwald-módszerrel állapítottam meg. A vizsgálathoz 1 gramm mintát oldottam fel 30 ml ciklohexán és acetone (5:95 arányú) keverékében, majd fokozatosan vizet adagoltam hozzá egészen addig, amíg az oldat tartósan zavarossá vált, és a további vízadagolás már nem eredményezett jelentős változást a zavarosságban.

3.3.6. HLB érték meghatározása

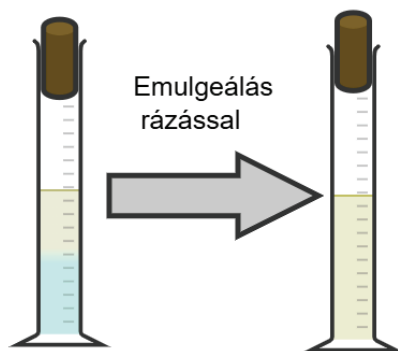
Az HLB (hidrofil-lipofil egyensúly) érték a vízszám alapján definiálható, egy lineáris regresszióval felírt egyenlet (1) segítségével, Kothencz és munkatársai továbbfejlesztett módszere alapján:

$$HLB = \frac{Vízszám}{0,6524} - 0.6339 \quad (1)$$

A HLB megmutatja egy felületaktív anyag hidrofil és lipofil tulajdonságainak arányát. Az érték segít meghatározni, hogy a tenzid inkább vízben vagy olajban oldódik-e jobban, és milyen emulziók stabilizálására alkalmas.

3.3.7. Emulgeáló hatás vizsgálata

Az emulgeáló hatás vizsgálata, az úgynevezett „bottle” teszt alapján történt. A kísérleteket zárható, osztott mérőhengerekben végeztem, melyek 1 m/m% tenzidkoncentrációjú kozmetikai olajat (MOL WOM 15) és desztillált vizet tartalmaztak 25:75, 50:50 és 75:25 arányban. A hengereket kézzel emulgeáltam az emulzió kialakítása érdekében (18. ábra).



18. ábra: Kézi emulgeálás sematikus folyamata

A mintákat 25 °C-on tároltam, majd 1/2 és 1 óra elteltével megfigyeltem a fázisszétválást.

3.4. Alapanyagok vizsgálata

Megvizsgáltam a szintézishez felhasznált alapanyagok fizikai-kémiai tulajdonságait. A mérési eredményeket a [6. táblázat](#)ban foglaltam össze.

6. táblázat: Szintézishez felhasznált alapanyagok fizikai-kémiai tulajdonságai

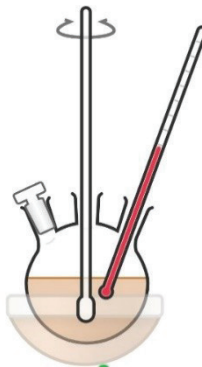
Alapanyag jele	IRO	ÉRO	HÉRO	HSO	ÉROX
Savszám (mgKOH/g)	1,08	0,27	0,27	0,99	2,43
Jód szám (mg I ₂ /100g)	55,58	62,11	123,31	146,77	86,08
Elszappanosítási szám (mgKOH/g)	125,21	126,14	125,74	127,54	123,17
pH	4,33	4,88	6,64	5,94	5,19
Zavarosság (%)	87,8	77,73	69	58,03	41,9
Dinamikai viszkozitás 40 °C-on (mPas)	33,6	42,1	35,2	34,3	148,2
Kinematikai viszkozitás 40 °C-on (mm ² /s)	43,7	46,2	38,8	37,7	156
Sűrűség (kg/dm ³)	0,768	0,913	0,909	0,906	0,933
Víztartalom (%)	nyomokban	nyomokban	0,1	nyomokban	nyomokban
ASTM szín	0,5	0,5	1,5	2	4,5

Az alapanyagok minősítése után, mindegyik alapanyagból új tenzideket szintetizáltam.

3.5. Szintézisek

Különböző minőségű repce- és sütőolajok felhasználásával, nemionos észteramin típusú tenzideket szintetizáltam.

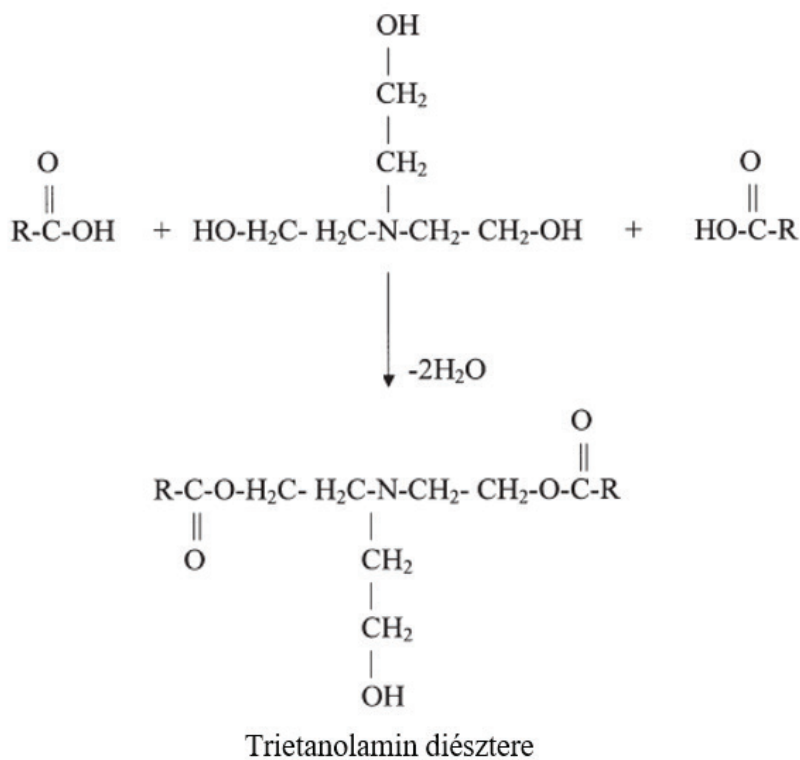
A tenzidek előállításához egy 250 ml térfogatú gömblombikot használtam, a hőmérsékletet fűtőkosár biztosította. A berendezés sematikus vázlatát a [19. ábrán](#) látható.



19. ábra: A reakcióedény sematikus vázlatát

A melléktermékek leválasztására vákuumot alkalmaztam. Az olajok hőmérséklet általi degradációjának elkerüléséhez a reakciók N₂ atmoszférában zajlottak.

Az első lépésben az olajokban található zsírsavakból trietanol aminnal (TEA) reagáltatva, KOH katalizátor jelenlétében, észterezéssel nemionos észteramin típusú felületaktív anyagot állítottam elő, melynek egyszerűsített reakcióegyenlete a [20. ábrán](#) látható.



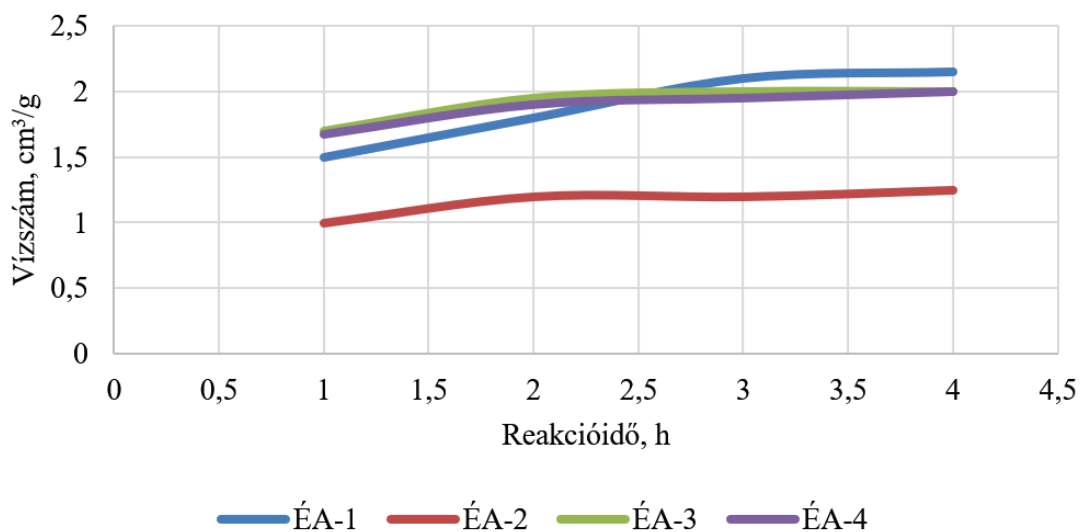
20. ábra: Észteramin előállításának reakcióegyenlete zsírsavból TEA-nal [75]

A reakcióhoz felhasznált alapanyagokat és a szintézis paramétereit a 7. táblázatban foglaltam össze. A szintézis paramétereinek kiválasztása szakirodalom [75-77] és előzetes kísérletek alapján történt.

7. táblázat: Észteraminok előállításának paramétereit

Tenzid jele	ÉA-1	ÉA-2	ÉA-3	ÉA-4
Olaj típusa	IRO	ÉROX	HÉRO	HSO
Olaj: TEA molarány	2:1	2:1	2:1	2:1
Idő, h	4	4	4	4
Hőmérséklet, °C	160	160	160	160

A szintézis során óránként mintát vettem azért, hogy megvizsgáljam a reakció előrehaladását, melyet vízsám meghatározással ellenőriztem (21. ábra).



21. ábra: Észteraminok előállításakor óránként vett minták vízsáma

A 21. ábrán jól látható, hogy a szintetizált észteramin minták víztartalma idővel növekedett, majd egy bizonyos értéknél stabilizálódott, és ezt követően már nem változott tovább. A végminták alacsony savsámaából következtetni lehetett arra, hogy az előállított tenzidek lipofil, azaz olajoldható jellegűek.

3.6. Tenzidek tulajdonságainak vizsgálata

Megvizsgáltam a szintetizált tenzidek főbb fizikai-kémiai tulajdonságait. A vizsgált tulajdonságokat mindkét típusú tenzid esetében összehasonlítottam egy-egy kiválasztott referenciával. A referenciaadatok adatait a 8. táblázatban foglaltam össze.

8. táblázat: Referenciaként vizsgált tenzidek adatai

Tenzid jele	ÉA-REF
Jellemző	Észteramin referencia
Fő hatóanyag	Növényi olaj zsírsav metil-észter és dietil-amin reakcióterméke
Gyártó	MOL-LUB Kft.

A pontos összehasonlítás érdekében, a referenciaadatok tulajdonságait is megvizsgáltam. A vizsgálat során nem a gyártó által megadott adatokat használtam fel.

3.6.1. Viszkozitás, sűrűség és pH érték meghatározása

Az előállított adalékok viszkozitás, sűrűség és pH adatait a 9. táblázatban foglaltam össze.

9. táblázat: Referencia és szintetizált tenzidek viszkozitás, sűrűség és pH adatai

Tenzid jele	Adalék típusa	Dinamikai viszkozitás (40 °C-on), mPas	Kinematikai viszkozitás (40 °C-on), mm ² /s	Sűrűség, kg/dm ³	pH érték
ÉA-REF	Észteramin referencia	214,6	219,6	0,9800	8,27
ÉA-1	Észteramin	41,8	45,5	0,9241	7,87
ÉA-2	Észteramin	197,4	207,3	0,9572	9,08
ÉA-3	Észteramin	41,3	44,9	0,9200	11,35
ÉA-4	Észteramin	45,6	49,8	0,9212	10,56

Az észteramin minták széles viszkozitási és sűrűségi tartományt mutatnak. Az ÉA-2 jelű minta viszkozitása és sűrűsége közel áll a referenciához, míg az ÉA-1, ÉA-3 és ÉA-4 jelű minták jelentősen alacsonyabb viszkozitást mutatnak, valamint kisebb sűrűséggel rendelkeznek.

Az újonnan szintetizált tenzidek alacsony viszkozitása könnyebb kezelhetőséget és jó szivattyúzhatóságot jelenthet az ipari előállítás, tárolás és felhasználás során.

3.6.2. Savszám és elszappanosítási szám meghatározása

Meghatároztam a szintetizált tenzidek savszámát és az elszappanosítási szám értékét, melyet a 10. táblázatban foglaltam össze.

10. táblázat: Referencia és szintetizált tenzidek savszám és elszappanosítási szám értéke

Tenzid jele	Adalék típusa	Savszám, mgKOH/g	Elszapp.szám, mgKOH/g
ÉA-REF	Észteramin referencia	2,46	103,91
ÉA-1	Észteramin	1,61	126,57
ÉA-2	Észteramin	1,38	127,23
ÉA-3	Észteramin	1,45	127,00
ÉA-4	Észteramin	1,56	125,44

A referencia tenzid savszáma magasabb, mint a szintetizált tenzidek savszáma. A szintetizált tenzidek közül, a legmagasabb elszappanosítási számértéket az ÉA-2 tenzid esetében határoztam meg.

3.6.3. Vízszám és HLB érték meghatározása

A vízszám és az ebből számított HLB érték gyors és egyszerű módszert biztosít a tenzidek oldhatóságának előzetes meghatározására. A vízszám és a HLB érték meghatározása alapján következtetni lehet a tenzidek hidrophil-lipofil egyensúlyára, vagyis arra, hogy az adott felületaktív anyag elsősorban vízben vagy olajban oldódik-e. Ez a tulajdonság meghatározó szerepet játszik a felhasználási terület és az alkalmazási mód megválasztásában. A vizsgált minták vízszám és HLB értéke a 11. táblázatban látható.

11. táblázat: Referencia és szintetizált tenzidek vízszáma és HLB értéke

Tenzid jele	Adalék típusa	Vízszám érték, cm ³ /g	HLB érték
ÉA-REF	Észteramin referencia	9,75	10,2
ÉA-1	Észteramin	2,15	2,6
ÉA-2	Észteramin	1,2	1,2
ÉA-3	Észteramin	2,0	2,4
ÉA-4	Észteramin	2,0	2,4

A minták esetében a referenciaminta mutatja a legmagasabb vízszámot és HLB értéket, ami jelentős hidrophil tulajdonságokra utal. A többi észteraminminta jelentősen alacsonyabb vízszámot és HLB értéket mutat, jelezve azok erősen lipofil jellegét.

Az adatok alapján megállapítható, hogy a referenciaként választott tenzidek hidrophilebbek az újonnan előállított formulációhoz képest, míg az észteraminok többsége erősen lipofil. A lipofil tenzidek elsődlegesen kenőanyagokban, fémmegmunkáló folyadékokban, üzemyanyag-adalékokban és olajbázisú bevonatokban használhatók, ahol a súrlódás csökkentése, a felületvédelem és a stabilitás biztosítása a fő cél. Emellett kulcsfontosságúak lehetnek emulziók és mikroemulziók stabilizálásában [79-81].

3.6.4. Vízben és olajban való oldhatóság vizsgálata

Az amfipatikus szerkezet miatt egyetlen tenzid sem tekinthető kizárólag vízben vagy olajban oldódónak, oldhatóságuk egyensúlya a két fázis között változik. Az oldhatóság pontosabb számszerűsítése érdekében meghatároztam az 1 m/m%-os vizes és olajos tenzidoldatok transzmittanciáját, mely objektív információt nyújtott az adott tenzid preferált fázisáról.

12. táblázat: Tenzidek vízben és olajban való oldhatóságának vizsgálata

Tenzid jele	Adalék típusa	Vízben való oldhatóság, %	Olajban való oldhatóság, %
ÉA-REF	Észteramin referencia	100	Nem oldódik, szilárd csapadék
ÉA-1	Észteramin	0*	66,12
ÉA-2	Észteramin	0*	6,09
ÉA-3	Észteramin	0*	61,43
ÉA-4	Észteramin	0*	56,15

*Opálos oldat, olajos kiválás a tetején

A [12. táblázat](#)ban bemutatott adatok alapján, az előállított tenzidek 1 m/m%-os vizes oldatban nem oldódtak teljes mértékben, azonban egy részük opálos diszperziót alkotott desztillált vízben. Ezzel szemben, az olajos oldatokban jó oldódás volt megfigyelhető, az oldatok vizuálisan transzparens megjelenést mutattak. Kivételt képez az ÉA-2 jelű tenzid, mely olajban oldódott, de opálos küllem jellemezte.

3.6.5. Vezetőképesség és turbiditás meghatározása

A turbiditás és a vezetőképességi érték mérése lehetőséget ad a tenzidek oldhatósági korlátjának és kritikus micellaképződési koncentrációjának (CMC) meghatározására.

Az előző fejezetben látható volt, hogy az újonnan előállított tenzidek 1 m/m%-os koncentrációban vízben nem oldódtak, így alacsonyabb koncentrációtartományban vizsgáltam meg a turbiditást és a vezetőképességet.

A szintetizált tenzidek vizes oldatának turbiditását a 13. táblázatban, vezetőképességét a 14. táblázatban foglaltam össze.

13. táblázat: Szintetizált tenzidek vizes oldatának turbiditása

Tenzid jele	Adalék típusa	Koncentráció, g/l							
		0,0001	0,0005	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	0,5
		Turbiditás, NTU							
ÉA-REF	Észteramin referencia	1,83	2,08	2,6	5,17	8,24	9,7	10,2	10,3
ÉA-1	Észteramin	1,84	2,18	3,16	3,4	8,64	10,1	26,7	44,7
ÉA-2	Észteramin	2	2,07	2,59	4,58	10,3	15,2	25,8	199
ÉA-3	Észteramin	3,02	11,1	12,3	15,2	15,42	16,6	19,5	69,8
ÉA-4	Észteramin	1,93	1,64	3,62	3,82	5,29	9,13	11,2	96,1

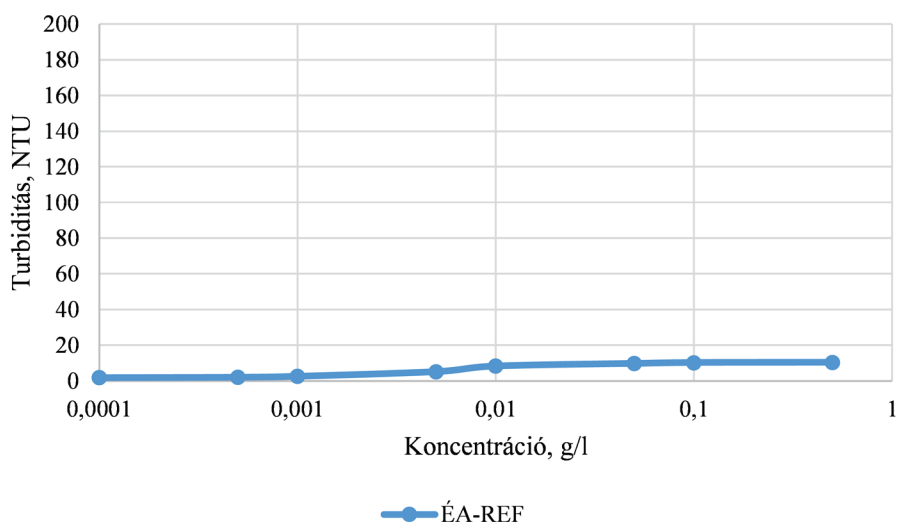
14. táblázat: Szintetizált tenzidek vizes oldatának vezetőképessége

Tenzid jele	Adalék típusa	Koncentráció, g/l							
		0,0001	0,0005	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	0,5
		Vezetőképesség, $\mu\text{S}/\text{cm}$							
ÉA-REF	Észteramin referencia	2,38	3,41	3,81	4,48	4,85	5,82	6,23	7,38
ÉA-1	Észteramin	2,4	3,5	4,2	5,4	7,4	7,5	7,9	8,1
ÉA-2	Észteramin	4,44	5,24	5,79	6,59	7,39	8,79	9,82	10,25
ÉA-3	Észteramin	3,68	4,6	5,4	6,81	7,45	8,75	8,85	9,12
ÉA-4	Észteramin	2,42	2,94	3,25	3,7	3,91	4,09	4,14	4,14

A szintetizált tenzidek vizes oldatának turbiditása és vezetőképessége a koncentrációval együtt nőtt.

3.6.6. Vízben való oldhatósági határ és CMC meghatározása

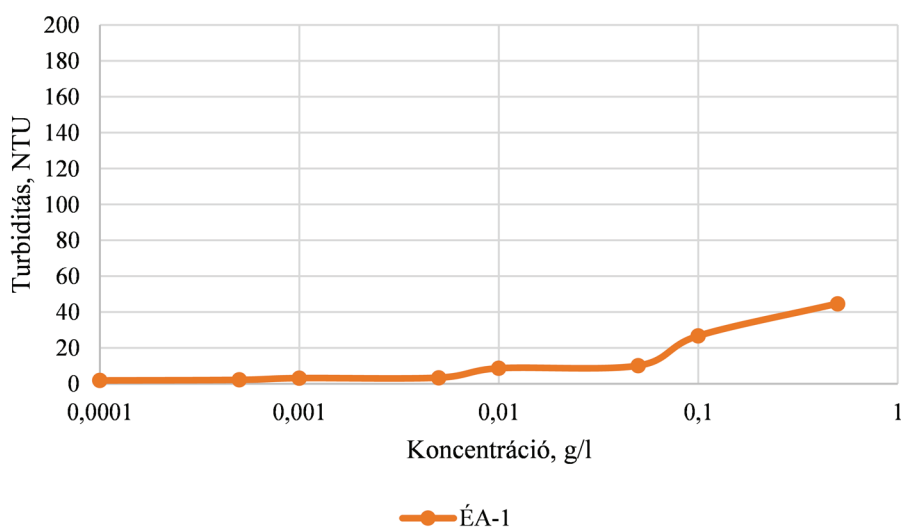
A tenzidek vízoldhatóságát és kritikus micellaképződési koncentrációját (CMC) molekulaszervezetük, különösen a hidrófil-lipofil arány erősen befolyásolja. A hosszú szénláncú, lipofil tenzidek gyenge vízoldhatóságúak, így már alacsony koncentrációnál micellákat képeznek [82]. A turbiditás és a vezetőképesség mérésével nyomon követhető az oldhatósági határ és a CMC. A zavarosság növekedése a nem oldódó részecskék megjelenését, míg a vezetőképességi görbe meredekségének csökkenése a micellaképződés kezdetét jelzi [83,84]. A referencia tenzid turbiditásának koncentrációtól való függését a 22. ábra mutatja be.



22. ábra: Referencia tenzid turbiditás-koncentráció függése

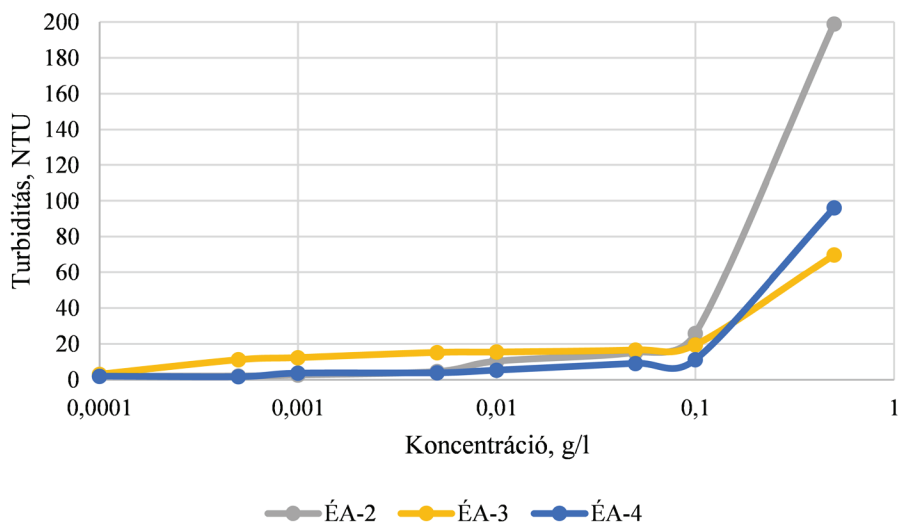
A 22. ábrán látható, hogy a referencia tenzid oldhatósági határa nem a vizsgált koncentráció-tartományon belül van, mivel nincsen szignifikáns meredekség növekedés a turbiditás-koncentráció összefüggésben.

Az ÉA-1 jelű szintetizált tenzid turbiditásának függését a koncentrációtól a 23. ábra mutatja be.



23. ábra: ÉA-1 jelű tenzid turbiditás-koncentráció függése

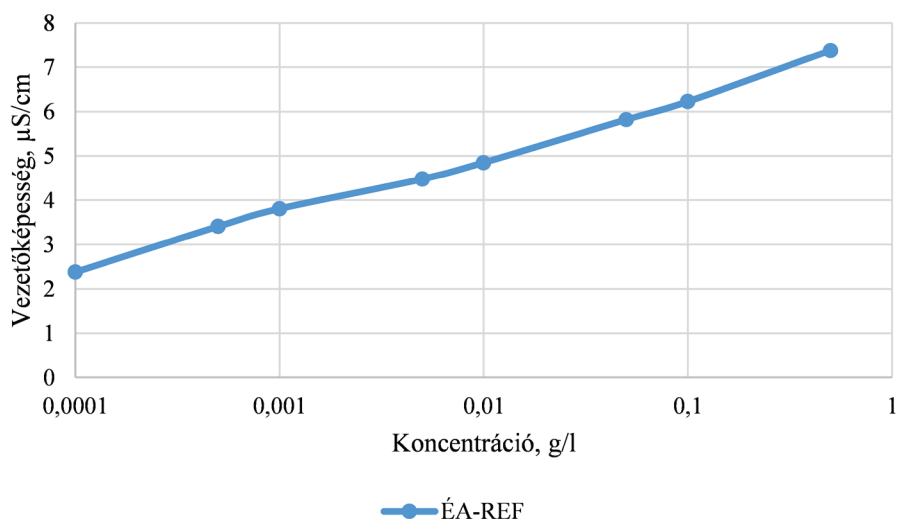
Látható, hogy az ÉA-1 jelű tenzid turbiditása 0,05 g/l koncentráció értéknél elkezd nagyobb mértékben nőni, így az oldhatósági határát 0,05 g/l-nek határoztam meg.



24. ábra: Tenzidek turbiditás-koncentráció függése

A 24. ábrán látható, hogy az ÉA-2 jelű tenzid esetében a meredekség 0,1 g/l koncentrációnál ugrott meg látványosan, így itt jelöltem ki az oldhatósági határt. Hasonló jelenség volt megfigyelhető az ÉA-3 és ÉA-4 mintáknál is, melyeknél szintén 0,1 g/l koncentrációnál következett be a turbiditási értékek jelentősebb növekedése. A tenzidek CMC értékét a vezetőképesség-koncentráció összefüggés alapján határoztam meg. A CMC értéknek azt a pontot vettem, ahol ennek az összefüggésnek a meredeksége elkezd csökkenni.

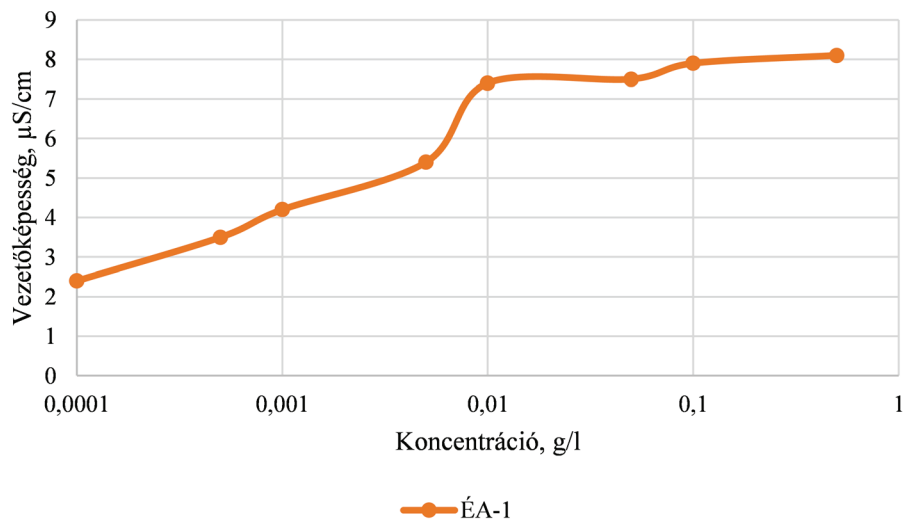
Az ÉA-REF jelű referencia tenzid vezetőképesség-koncentráció összefüggése a 25. ábrán látható.



25. ábra: ÉA-REF jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció függése

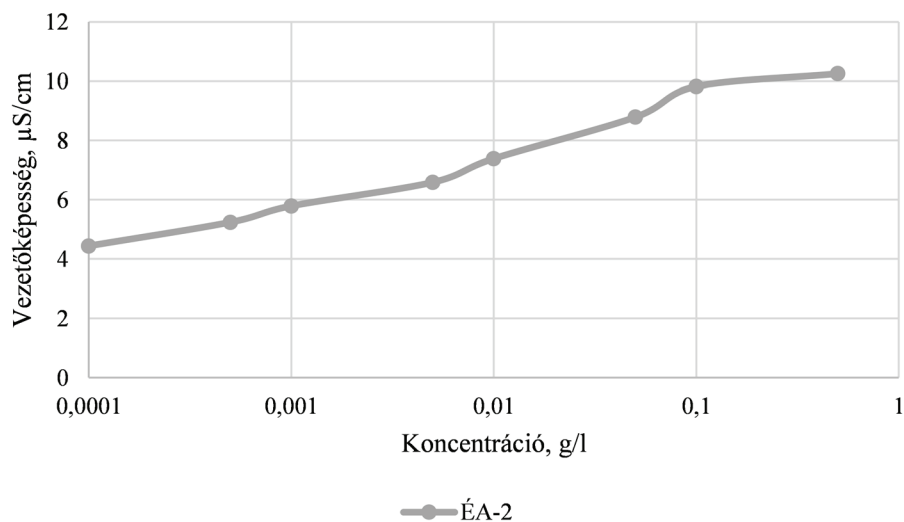
A 25. ábrán látható, hogy az ÉA-REF jelű tenzid CMC értéke nem a vizsgált koncentráció-tartományon belül van.

Az ÉA-1 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció összefüggése a 26. ábrán látható.



26. ábra: ÉA-1 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció függése

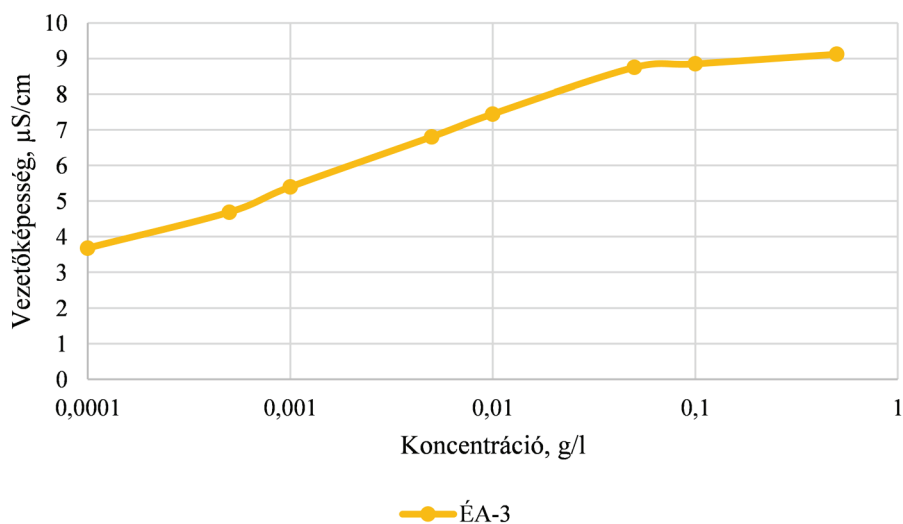
A 26. ábrán látható, hogy az ÉA-1 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció összefüggésének meredeksége 0,01 g/l koncentrációnál csökken, így a CMC értékét 0,01 g/l-nek határoztam meg. Az ÉA-2 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció összefüggése a 27. ábrán látható.



27. ábra: ÉA-2 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció függése

A 27. ábrán megfigyelhető, hogy az ÉA-2 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció görbéje 0,1 g/l koncentrációnál mutat töréspontot, ami a meredekség csökkenésében nyilvánul meg. Ennek alapján a CMC értékét 0,01 g/l értékben határoztam meg.

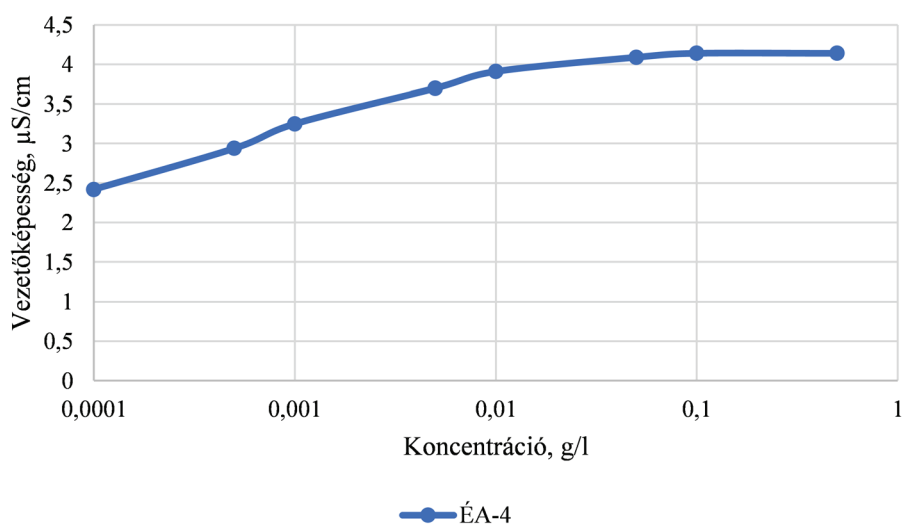
Az ÉA-3 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció összefüggése a 28. ábrán látható.



28. ábra: ÉA-3 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció függése

Az ÉA-3 tenzid esetén, a 28. ábra szerint a vezetőképesség emelkedésének üteme 0,05 g/l-nél lelassul, ami micellaképződésre utal, így ezt az értéket tekintetem a CMC-nek.

Az ÉA-4 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció összefüggése a 29. ábrán látható.



29. ábra: ÉA-4 jelű tenzid vezetőképesség-koncentráció függése

A vezetőképességi görbe vizsgálata alapján az ÉA-4 tenzidnél 0,01 g/l koncentrációnál fordulópont figyelhető meg, ami a micellák kialakulására utal. Ezt a pontot az ÉA-4 jelű tenzid kritikus micellaképződési koncentráció értékeként határoztam meg.

Az ábrákról leolvasott vízben való oldhatósági határokat és CMC-értékeket a [15. táblázat](#)ban foglaltam össze, melyet a [34. ábra](#) segítségével hasonlítok össze.

15. táblázat: Tenzidek oldhatósági határai és CMC-je

Tenzid jele	Adalék típusa	Vízben való oldhatósági határ, g/l	CMC érték, g/l
ÉA-REF	Észteramin referencia	-	-
ÉA-1	Észteramin	0,05	0,01
ÉA-2	Észteramin	0,1	0,1
ÉA-3	Észteramin	0,1	0,05
ÉA-4	Észteramin	0,1	0,1

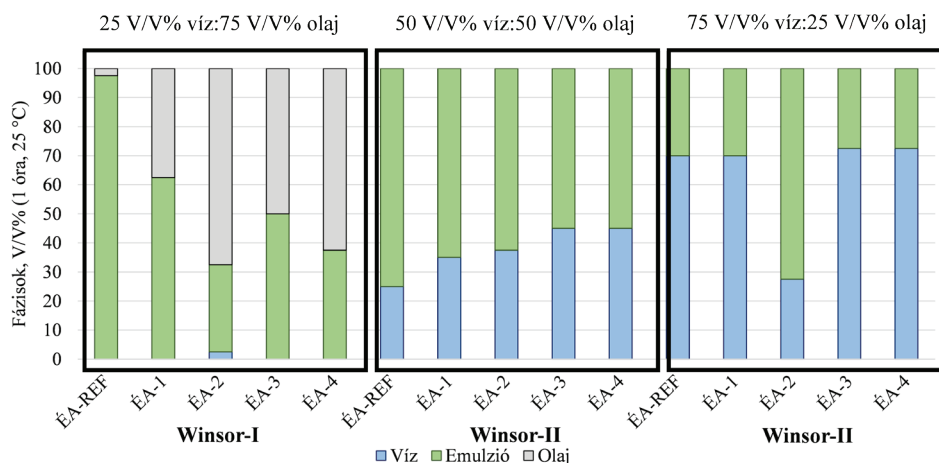
Ahogy a táblázatban is látható, a referenciaként vizsgált hidrofil tenzid vízben való oldhatósági határa és CMC értékei a mérési tartományon kívül esnek, így ezt a mérési adatokból nem határoztam meg.

A legtöbb minta esetében az oldhatósági határ magasabb, mint a CMC, ami azt mutatja, hogy ezek a tenzidek oldódnak az oldószerben a micellaképződés után is. Különösen az ÉA-3 és az ÉA-4 minták esetében figyelhető meg jelentős különbség az oldhatósági határ és a CMC között, ami azt jelzi, hogy ezek a tenzidek nagyobb koncentrációban is stabilan oldódnak. Ezzel szemben az ÉA-2 jelű minta esetében az oldhatósági határ és a CMC közel azonos, ami arra utal, hogy ezeknél a tenzideknél az oldódás közvetlenül a micellaképződéshez vezet és a rendszer gyorsan telítődik.

3.6.7. Hatásvizsgálatok

A hatásvizsgálatot az emulgeáló hatás meghatározásával végeztem el, ami az egyik legegyszerűbb és leggyakrabban alkalmazott módszer a tenzidek teljesítményének értékelésére. Ezen vizsgálatok célja, hogy meghatározzák, milyen mértékben képes egy adott tenzid stabil emulziót képezni meghatározott körülmények között. Az így nyert információk kulcsfontosságúak a megfelelő tenzid kiválasztásához és alkalmazásához különböző emulziós rendszerekben. A vizsgálatokhoz különböző olaj-víz arányú emulziós rendszereket készítettem MOL WOM 15 jelű kozmetikai olajjal és desztillált vízzel, majd megvizsgáltam, hogy az emulzió összetétele befolyásolja-e a tenzidek emulgeáló hatását. Az előzetesen meghatározott HLB alapján, a lipofil tenzideket az olajos fázisban, a hidrofil tenzideket a vizes fázisban oldottam fel 1 m/m% adagolási koncentrációban.

A tenzidek 1 óra utáni fázisszeparációját a [30. ábra](#) mutatja be.



30. ábra: Referencia és szintetizált tenzidek fázisszeparációja

A vizsgálatok alapján a 25 V/V% víz:75 V/V% olaj arányú rendszerekben elsősorban Winsor-I típusú (olaj+emulzió) emulziók képződtek. Az újonnan szintetizált tenzidek mindegyikénél megmaradt az emulziós fázis a fázisszétválasztás után is, 30–62,5 V/V% közötti mennyiségben. A legnagyobb emulgeáló hatást az ÉA-1 jelű tenzid esetében tapasztaltam.

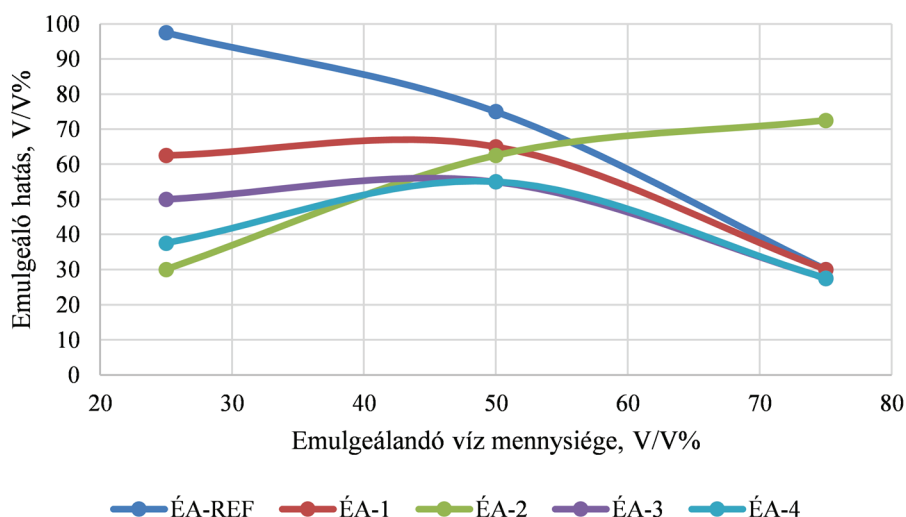
Az 50 V/V% víz:50 V/V% olaj arányú rendszerekben Winsor-II típusú (víz+emulzió) emulziók kialakulása volt jellemző. Az új tenzidek alkalmazása minden esetben emulziós fázist eredményezett, 55–62,5 V/V% tartományban. Ebben az esetben is az ÉA-1 jelű tenzid mutatta a legerősebb emulgeáló képességet.

A 75 V/V% víz:25 V/V% olaj arányú rendszerekben szintén Winsor-II típusú emulziók alakultak ki, minden esetben mérhető emulgeáló hatással (27,5–72,5 V/V%). A legnagyobb emulzióképződést ebben az esetben az ÉA-2 jelű tenzid alkalmazásával értem el. Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy a víz-olaj arány jelentősen befolyásolja az emulzió stabilitását és az egyes fázisok mennyiségét. A különböző alapanyagokból előállított tenzidek, eltérő stabilizáló hatást mutatnak az egyes víz-olaj arányok mellett. A legmagasabb emulgeáló hatást az ÉA-1 és ÉA-2 jelű tenzid esetében mértem. Megjegyzendő, hogy a szintetizált tenzidek a mérési körülmények között minden esetben hoztak létre emulziós fázist, amiből a tenzidek kiemelkedő emulgeáló hatására lehet következtetni.

3.6.8. Tenzidek emulgeáló hatásának függése a víztartalomtól

A tenzidek emulgeáló képessége meghatározó tényező az ipari alkalmazások során, különösen az olaj-víz rendszerek stabilizálásában. Az emulziók kialakulása és stabilitása számos tényezőtől függ, de a rendszer víztartalma különösen fontos szerepet játszik. A víz mennyisége befolyásolja a micellák képződését, a fázisoszlást és a tenzidmolekulák viselkedését az olaj-víz határfelületen. Ebben a vizsgálatban a szintetizált tenzidek emulgeáló hatását elemeztem különböző víztartalom mellett.

A [31. ábra](#) az egyes tenzidek emulgeáló hatását ábrázolja az emulgeálandó víz mennyiségének függvényében.



31. ábra: Tenzidek emulgeáló hatása az emulgeálódó víz mennyiségének függvényében

A 31. ábrán látható, hogy az ÉA-REF, ÉA-1, ÉA-3 és ÉA-4 jelű tenzidek esetében az emulgeáló hatás és a víz mennyisége közötti összefüggés nem lineáris, hanem egyértelmű maximumot mutat. Ez azt jelzi, hogy egy adott víztartalom mellett alakul ki az optimális emulzióstabilitás. A kezdeti vízhozzáadás elősegíti a micellák és az emulziós cseppek kialakulását, azonban egy bizonyos koncentráció felett a túlzott víztartalom felhígíthatja a rendszert és csökkentheti a tenzidek koncentrációját az olaj-víz határfelületen, ami a stabilitás romlásához vezethet.

Érdekes, hogy az ÉA-2 jelű tenzid esetében ez a tendencia nem volt megfigyelhető, ott a víztartalom növekedésével folyamatosan nőtt az emulgeálhatóság. Ez arra utalhat, hogy ez a tenzid, szerkezetéből adódóan más aggregációs vagy szolubilizációs tulajdonságokkal rendelkezik, és jobban képes alkalmazkodni a magasabb víztartalmú rendszerekhez. Lehetséges, hogy a molekulaszervezetében található hidrophil csoportok hatékonyabb víz-interakciót tesznek lehetővé, ezáltal a stabilitás is fokozatosan nő.

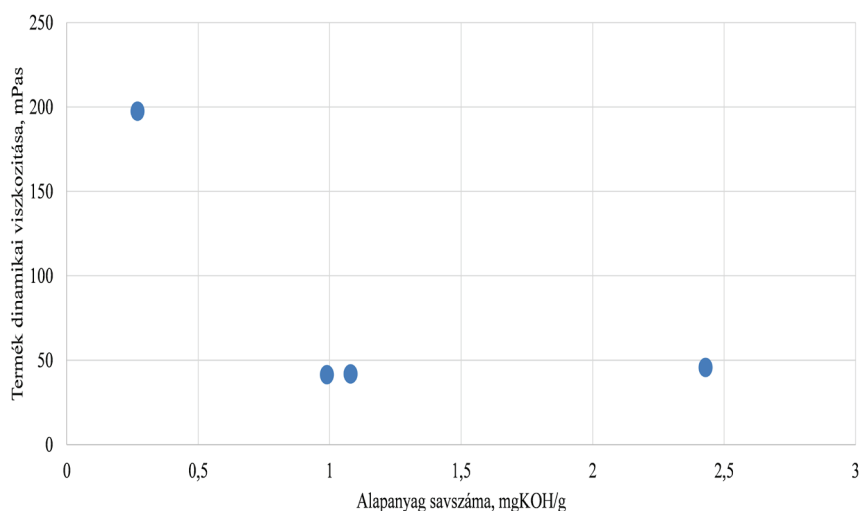
Megállapítottam, hogy a szintetizált tenzidek eltérő emulzióstabilizáló tulajdonságokkal rendelkeznek, és hatékonyságuk jelentős mértékben függ a víztartalomtól. Az emulzió stabilitásának optimalizálása érdekében, fontos figyelembe venni a vízkoncentráció szerepét, ami közvetlenül befolyásolja a különböző tenzidek alkalmazhatóságát ipari környezetben. Ezek az eredmények segítséget nyújthatnak a megfelelő tenzid kiválasztásában különböző víztartalmú rendszerekhez, ezzel javítva a végtermék minőségét és stabilitását.

3.7. Az alapanyagok hatása a szintetizált tenzidek tulajdonságaira

Megvizsgáltam a felhasznált alapanyagok fizikai és kémiai tulajdonságainak hatását a szintetizált tenzidek fizikai-kémiai jellemzőire, különös tekintettel az alapanyagok és a végtermék közötti összefüggések feltárására. Elemzésem során megvizsgáltam, hogy a kiindulási anyagok paraméterei miként befolyásolják a termékek tulajdonságait, például a hidrophil-lipofil egyensúlyt és a kritikus micellaképződési koncentrációt. Ezeknek az összefüggéseknek a részletes elemzése lehetővé teszi a szintézis folyamatának célzott optimalizálását.

3.7.1. Alapanyag savszámának hatása a termék viszkozitására

Tanulmányoztam a kapcsolatot a különböző alapanyagok savszáma és az azokból szintetizált tenzidek dinamikai viszkozitása között, melyet a 32. ábra segítségével mutatok be.



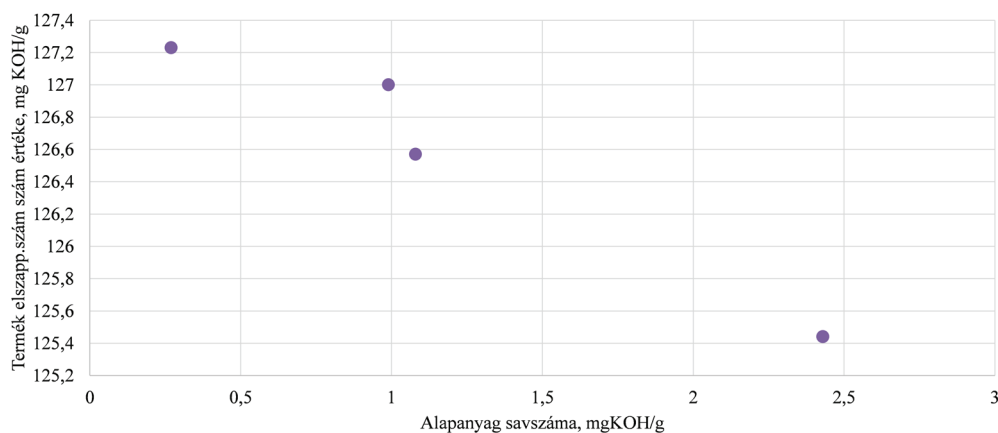
32. ábra: Észteraminok viszkozitásának függése az alapanyag olaj savszámától

A vizsgálataim kimutatták, hogy az alapanyag sütőolaj savszámának növekedésével az észteraminok viszkozitása csökken, azonban 1 mgKOH/g feletti savszám esetén nem változik. Az észterezési reakciók során keletkező termékek viszkozitása alacsonyabb a nagyobb molekulájú trigliceridekéhez képest. Azonban, 1 mgKOH/g érték feletti savszám esetében a további zsírsavak jelenléte már nem befolyásolja jelentősen a dinamikai viszkozitást. Ennek oka az lehet, hogy ezen a ponton az alapanyagban már annyi szabad zsírsav van, hogy az észterezési reakciók szinte teljesen lezajlottak, és a további zsírsavak már nem képesek számottevően csökkenteni a viszkozitást.

Megállapítottam tehát, hogy az alapanyagként alkalmazott sütőolaj savszámának növekedésével, csökken a szintetizált tenzidek dinamikai viszkozitása. Azonban, 1 mgKOH/g érték feletti savszámú alapanyag olaj esetében nem változik a keletkező termék viszkozitása.

3.7.2. Alapanyag savszámának és a termék elszappanosítási szám értékének kapcsolata

Az alapanyagok savszáma és a szintetizált tenzidek elszappanosítási értéke között is találtam összefüggést, melyet a 33. ábrán szemléltetek.



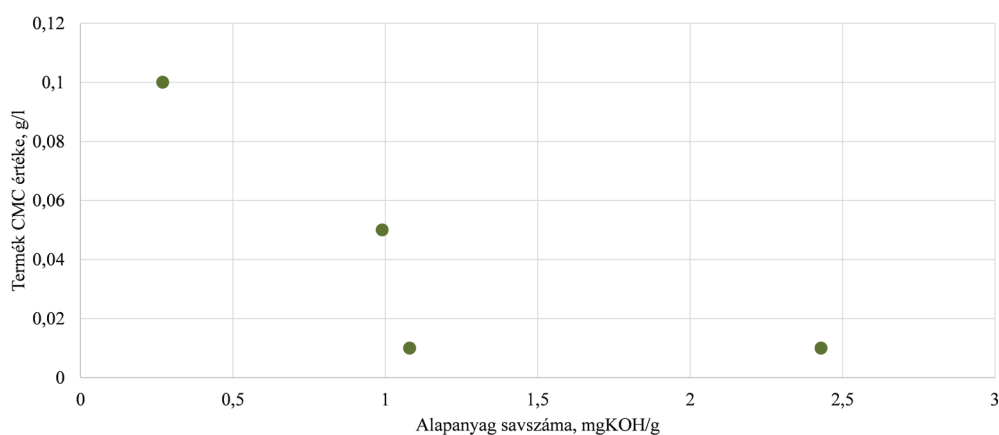
33. ábra: Észteraminok elszappanosítási szám értékének kapcsolata az alapanyag olaj savszámával

A 33. ábra alapján megfigyelhető, hogy a kiindulási olaj savszámának növekedésével csökken a szintetizált termék elszappanosítási száma. Ennek oka, hogy a magasabb savszámú olajok több szabad zsírsavat tartalmaznak, melyek nem feltétlenül képeznek elszappanosítható észterkötések a szintézis során.

Az eredményekből megállapítottam, hogy a magas elszappanosíthatósági értékű tenzidet alacsony savszámú sütőolajból lehet előállítani.

3.7.3. Alapanyag savszámának és a termék kritikus micellaképződési koncentrációjának kapcsolata

Összefüggést találtam az alapanyagok savszáma és a szintetizált tenzidek CMC értéke között is, ami a 34. ábrán látható.

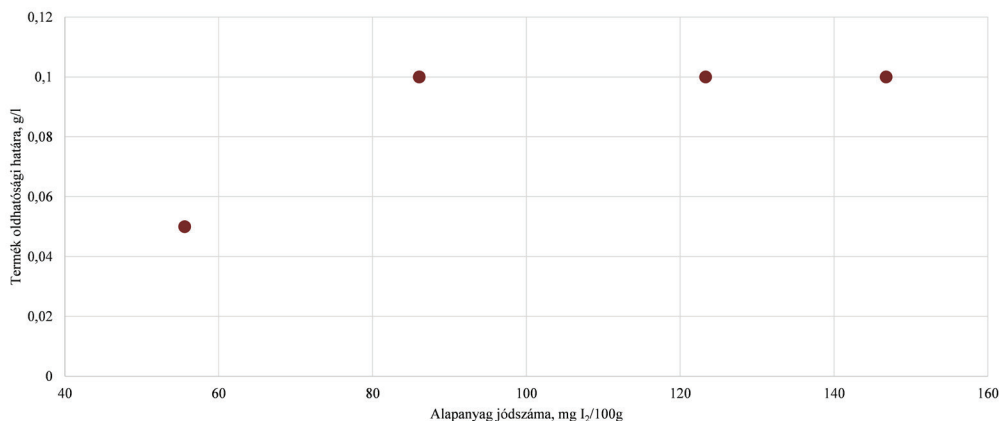


34. ábra: Észteraminok CMC értékének kapcsolata az alapanyag olaj savszámával

A vizsgálatok alapján az alacsonyabb savszámú alapolajból előállított észteraminok kisebb CMC-értéket mutattak (34. ábra), ami arra utal, hogy ezek a vegyületek már alacsonyabb koncentrációban képesek micellákba rendeződni. Ennek oka valószínűleg a rendezettebb szerkezet, kevesebb melléktermék, valamint kedvezőbb amfipatikus tulajdonság. Ez előnyös lehet emulgeáló és detergens alkalmazásokban, mivel kisebb tenzidkoncentráció mellett is hatékony felületi aktivitás érhető el. Ugyanakkor 1 mgKOH/g savszám felett a CMC már nem csökken tovább, ami szerkezeti vagy fizikai korlátokra utalhat.

3.7.4. Alapanyag jódszámának és a termék oldhatóságának kapcsolata

Az olajok telítetlenségét jellemző jódszám, és a szintetizált észteraminok oldhatósági határa közötti összefüggés a 35. ábrán látható.

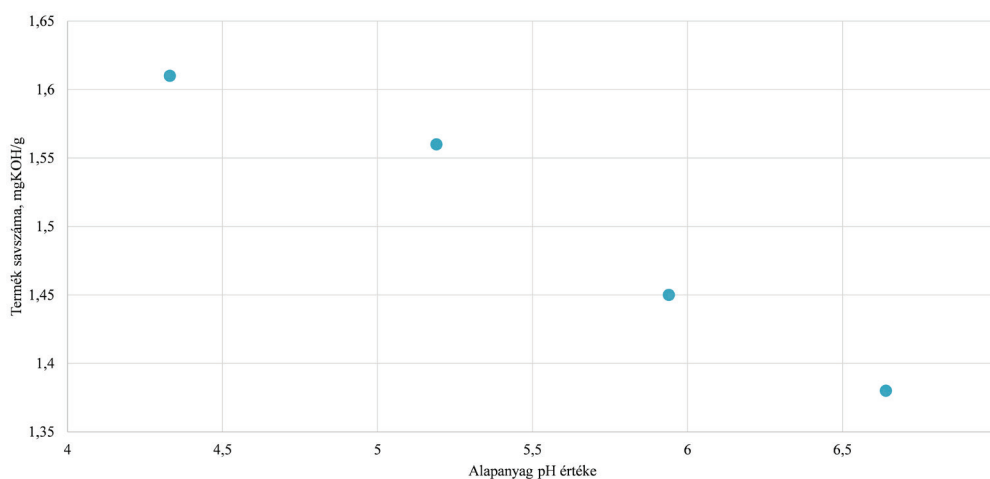


35. ábra: Észteraminok vízoldhatósági határértékének kapcsolata az alapanyag jód számával

A [35. ábrán](#) látható, hogy az alapolaj jódszámának növekedésével – vagyis a telítettség fokozódásával – a szintetizált észteraminok oldhatósági határa is nőtt, ami jobb vízoldhatóságra utal. Ennek oka lehet, hogy a telítetlen láncok nagyobb hajlékonyságot és rendezetlenséget biztosítanak, így a tenzidmolekulák könnyebben illeszkednek a víz szerkezetébe. A növekedés azonban nem lineáris: 80 mg I₂/100g felett az oldhatóság már nem javul tovább, ami arra utalhat, hogy egy bizonyos telítetlenségi szint után a szerkezeti előnyök nem fokozódnak, vagy akár kedvezőtlen aggregációs hatások is felléphetnek.

3.7.5. Alapanyag pH értékének és a termék savszám értékének kapcsolata

Az alapanyag pH-értékének csökkenésével az észteraminok savszáma is csökken (36. ábra).



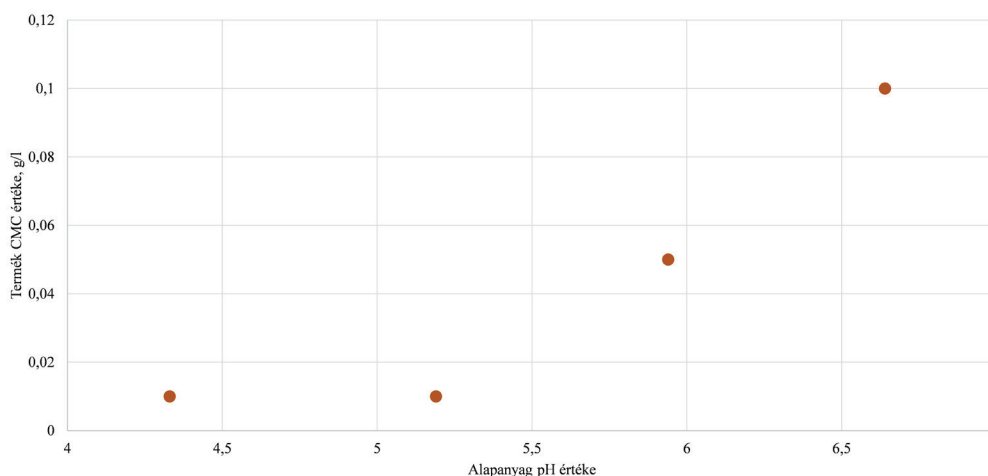
36. ábra: Észteraminok savszámának kapcsolata az alapanyag pH értékével

A 36. ábrán látható, hogy az alapanyag pH-értékének csökkenésével a szintetizált észteraminok savszáma is csökken. Ez azt jelenti, hogy savasabb közegben az átészterezési reakció másként megy végbe, vagy a keletkező termék szerkezete és stabilitása is eltérő lehet. A savszám a termékben jelenlévő szabad savas funkciós csoportok mennyiségére utal, tehát ha ez csökken, az azt jelezheti, hogy kevesebb szabad zsírsav vagy savas melléktermék maradt a reakció után. A savas közeg befolyásolhatja az átészterezési reakció egyensúlyát, reakciósebességét, illetve az amin komponens protonálódásán keresztül a reakciókészséget is. Emellett a termék stabilitása is módosulhat, hiszen savas környezetben egyes észterkötések hajlamosabbak lehetnek a hidrolízisre, így kevesebb stabil, elszappanosítható kötés maradhat vissza a végtermékben.

Megállapítottam, hogy a pH csökkenése hatással van a reakció mechanizmusára, és a termék kémiai összetételére egyaránt, ez pedig a savszám csökkenésében is megnyilvánul.

3.7.6. Alapanyag pH értékének és a termék kritikus micellaképződési koncentrációjának kapcsolata

A szintetizált tenzidek CMC értékére hatással van az alapanyag pH értéke, amit a 37. ábrán ábrázoltam.



37. ábra: Észteraminok savszámának kapcsolata az alapanyag pH értékével

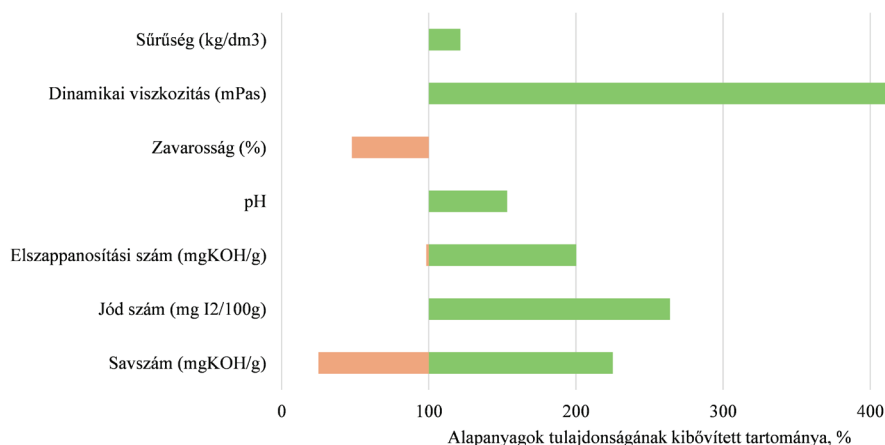
A 37. ábrán látható eredmények alapján megállapítható, hogy az alapanyag pH-értékének növekedése az észteraminok CMC-értékének növekedéséhez vezetett. Ez azt jelenti, hogy lúgosabb közegből kiindulva, a keletkező tenzidekből nagyobb koncentrációra van szükség a micellák kialakulásához.

Ennek egyik lehetséges oka, hogy magasabb pH-értéken az észteresítési reakció során a reakciókörnyezetben megnövekedhet a szabad aminformák vagy melléktermékek aránya, ami befolyásolhatja a végtermék amfifil jellegét. Emellett lúgos közegben az aminok részben deprotonált formában lehetnek jelen, ami módosíthatja az észteraminok polaritását és aggregációs viselkedését. A molekulák kevésbé hajlamosak micellát képezni, ha a poláris és apoláris részek egyensúlya megbomlik, ezért nagyobb koncentráció szükséges a micellaképződéshez. Ez a változás tehát, valószínűleg a molekulaszervezet finom eltéréseivel, illetve a tenzid polaritásának módosulásával hozható összefüggésbe.

3.8. Kísérleti munka összefoglalása

A kutatás során, különböző minőségű repce- és sütóolajok fizikai-kémiai tulajdonságait határoztam meg, majd ezek felhasználásával nemionos észteramin típusú tenzideket szintetizáltam.

A vizsgálat folyamán, ipari viszonyokhoz képest szélesebb alapanyag-tartományt alkalmaztam. Míg az iparban jellemzően szűk paramétertartományú alapanyagokat (pl. IRO) használnak, addig kutatásomban HÉRO és ÉROX típusú olajokat is alkalmaztam, melyek viszkozitás, jódszám és más jellemzők tekintetében jelentősen eltérnek. A 38. ábra szemlélteti az alapanyagok tulajdonságainak spektrumát, ami lehetővé tette a szintézis feltételeinek és alkalmazhatóságának részletesebb feltérképezését, valamint a technológia alapanyagtoleranciájának vizsgálatát.



38. ábra Vizsgált alapanyagok tulajdonságának spektruma

A 15. táblázatban összefoglaltam az előállított termékek jellemző fizikai és kémiai tulajdonságainak tartományát.

16. táblázat: Szintetizált termékek fizikai-kémiai tulajdonságának tartományai

Tulajdonság	Tartomány
Dinamikai viszkozitás (40 °C-on), mPas	41,3–197,4
Sűrűség (40 °C-on), kg/m ³	0,92–0,9572
pH érték	7,87–11,35
Savszám, mgKOH/g	1,38–1,61
Elszappanosítási szám, mgKOH/g	125,44–127,23
HLB érték	1,2–2,6
Olajban való oldhatóság, %	6,09–66,12
Oldhatósági határ, g/l	0,05–0,1
CMC, g/l	0,01–0,1
Emulziós stabilitás (75% olaj : 25% víz)	30–62,5
Emulziós stabilitás (50% olaj : 50% víz)	55–65
Emulziós stabilitás (25% olaj : 75% víz)	27,5–72,5

Az adatok alapján látható, hogy a kísérleti munka során szintetizált termékek paramétereit széles tartományban mozognak, ami azt mutathatja, hogy az előállítás során alkalmazandó változatos alapanyag-összetétel lehetővé teszi a termékek tulajdonságainak célzott beállítását.

A termékek tulajdonságai és az alapanyag jellemzői között több összefüggést is feltártam: az alapanyag savszáma hatással volt a tenzid viszkozitására, elszappanosítási számára és CMC-jére. Emellett kimutattam, hogy az olajok jódszáma befolyásolta a szintetizált észteraminok vízdoldhatóságát. A magasabb jódszámú, azaz telítetlenebb zsírsavláncokat tartalmazó tenzidek nagyobb vízdoldhatóságot mutattak, mivel a rugalmasabb molekulaszervezetük jobban illeszkedik a vízfázisba – bár ez a hatás 80 mg I₂/100g felett már nem fokozódott tovább.

Összességében a szintetizált lipofil tenzidek ígéretesek lehetnek kenőanyagokban, fémmegmunkáló folyadékokban, üzemanyag-adalékokban és olajbázisú bevonatokban való alkalmazásra. Emellett potenciálisan stabilizálhatnak víz-az-olajban típusú emulziókat

kozmetikai, élelmiszeripari és növényvédő készítményekben. Az eredmények megalapozzák a technológia ipari méretekre való optimalizálását és az alkalmazási lehetőségek további feltárását.

4. Összefoglalás

A szakirodalmi kutatás célja az volt, hogy átfogó képet adjak a használt sütőolajok kezelésének és újrahasznosításának lehetőségeiről. Ismertettem a különböző forrásból származó olajok fizikai és kémiai tulajdonságait, valamint a felhasználás során bekövetkező változásokat, melyek jelentősen befolyásolják az újrahasznosíthatóságot. A kutatás kitért, a globálisan keletkező mennyiségekre és azok környezeti hatásaira, hangsúlyozva a tisztítási és minőségjavító technológiák jelentőségét, valamint a fenntartható ipari megoldások szükségességét.

A szennyeződések eltávolítására irányuló módszerek – például víztartalom csökkentése, poláris vegyületek eltávolítása, szabad zsírsavak csökkentése – mellett, a biodízel-előállítás is kiemelt szerepet kapott, mint környezetbarát energiaforrás-termelési lehetőség. További potenciált jelent a használt olajokból előállított felületaktív anyagok alkalmazása, melyek mosó- és tisztítószerekben, emulgeálószerekben, valamint kozmetikai és élelmiszeripari termékekben hasznosíthatók. A zsírsav alapú tenzidek biológiailag lebomlók, és gazdasági előnyt is képviselnek.

A szintetizált észteramin típusú tenzidek vizsgálata során, a vízszám időbeli stabilizálódása a reakció sikerességét mutatta. Az alacsony HLB érték lipofil jellegre és jó olajoldhatóságra utalt. Az oldhatósági vizsgálatok szerint, a termékek vízben korlátozottan, olajban jól oldódtak. Az emulziós vizsgálatok eredményei alapján, a tenzidek emulgeáló hatása 27,5–72,5% között mozgott. A víztartalom kulcsszerepet játszott az emulzióstabilitásban.

Számos összefüggést sikerült feltárni az alapanyagok és a végtermékek tulajdonságai között: például az alapanyag savszámának hatását a termék viszkozitására, valamint az elszappanosítási szám és a CMC közötti kapcsolatot. Az alapanyag jódszáma befolyásolta a termék vízoldhatóságát.

A szintetizált lipofil tenzidek alkalmazása ígéretes lehet kenőanyagokban, fémmegmunkáló folyadékokban, üzemanyag-adalékokban, továbbá emulziók stabilizátoraként különböző iparágakban, például kozmetikai termékek vagy növényvédőszer gyártásánál. Az eredmények alapot adnak az ipari alkalmazás és további kutatások megvalósításához.

5. Jövőbeli tervek

A jövőbeli kutatási terveim között kiemelt szerepet kap, az alkalmazott friss és használt sütőolajok összetételének, és a szintetizált termékek tulajdonságaira gyakorolt hatásának részletes feltárása. Ezen túlmenően, további szintéziseket tervezek, melyek során új típusú felületaktív anyagok előállítására fókuszálok. A cél olyan innovatív tenzidek fejlesztése, amelyek még hatékonyabb emulgeáló és stabilizáló tulajdonságokkal rendelkeznek, ezáltal szélesebb körű alkalmazási lehetőséget biztosítanak különféle iparágak számára.

Fontos célkitűzésem továbbá, a szintetizált termékek biológiai lebonthatóságának vizsgálata. Ennek során meghatározom, hogy az újonnan előállított felületaktív anyagok, milyen mértékben és mennyi idő alatt bomlanak le természetes környezetben. A biológiai lebonthatóság elemzése kulcsfontosságú annak érdekében, hogy fenntartható és környezetbarát alternatívákat kínáljunk a szintetikus tenzidekkel szemben.

Emellett a termékek célzott ipari felhasználásának vizsgálatára is nagy hangsúlyt kívánok fektetni. Különös figyelmet fordítok arra, hogy a szintetizált tenzidek, milyen teljesítményt nyújtanak kenőanyagokban és kozmetikai termékekben, például emulgeálószerként vagy stabilizátorként.

Végezetül, a termékek hatóanyagtartalmának pontos meghatározására egy új vizsgálati módszer fejlesztését tervezem. Ez lehetővé teszi a hatóanyag-koncentráció megbízható mérését, ami nemcsak a minőségellenőrzést segíti elő, hanem hozzájárul az ipari alkalmazások optimalizálásához és a fenntartható gyártási folyamatok fejlesztéséhez is.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium 2024-2.1.1-EKÖP kódszámú Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Irodalomjegyzék

- [1] Awogbemi, O., Onuh, E. I., & Inambao, F. L. (2019). Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 14(3), 417-425
- [2] Wilson, N., Villani, A., & Mantzioris, E. (2022). Preferences for dietary oils and fats in cooking and food preparation methods: a cross-sectional analysis of Australian adults. *British Journal of Nutrition*, 130(5), 841-851. <https://doi.org/10.1017/s0007114522003798>
- [3] Siddiqui, M., Dwivedi, N., Siddiqui, M., Rana, S., Sharma, A., Dash, N., ... & Sinha, N. (2023). Nmr spectroscopy-based analysis of gallstones of cancerous and benign gallbladders from different geographical regions of the Indian subcontinent. *Plos One*, 18(6), e0286979. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286979>
- [4] Sharma, H., Zhang, X., & Dwivedi, C. (2010). The effect of ghee (clarified butter) on serum lipid levels and microsomal lipid peroxidation. *Ayu (An International Quarterly Journal of Research in Ayurveda)*, 31(2), 134. <https://doi.org/10.4103/0974-8520.72361>
- [5] Singhabhandhu, A., & Tezuka, T. (2010). The waste-to-energy framework for integrated multi-waste utilization: Waste cooking oil, waste lubricating oil, and waste plastics. *Energy*, 35(6), 2544-2551.
- [6] Ziaififar, A. M., Achir, N., Courtois, F., Trezzani, I., & Trystram, G. (2008). Review of mechanisms, conditions, and factors involved in the oil uptake phenomenon during the deep-fat frying process. *International journal of food science & technology*, 43(8), 1410-1423.
- [7] Panadare, D. C. (2015). Applications of waste cooking oil other than biodiesel: a review. *Iranian Journal of Chemical Engineering (IJChE)*, 12(3), 55-76
- [8] Riera, J. B., & Codony, R. (2000). Recycled cooking oils: Assessment of risks for public health.
- [9] Banani, R., Youssef, S., Bezzarga, M., & Abderrabba, M. (2015). Waste frying oil with high levels of free fatty acids as one of the prominent sources of biodiesel production. *J. Mater. Environ. Sci*, 6(4), 1178-1185.
- [10] Hellier, P., Ladommatos, N., & Yusaf, T. (2015). The influence of straight vegetable oil fatty acid composition on compression ignition combustion and emissions. *Fuel*, 143, 131-143.
- [11] Maddikeri, G. L., Pandit, A. B., & Gogate, P. R. (2012). Intensification approaches for biodiesel synthesis from waste cooking oil: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(45), 14610-14628
- [12] Choe, E., & Min, D. B. (2007). Chemistry of deep-fat frying oils. *Journal of food science*, 72(5), R77-R86
- [13] Yaakob, Z., Mohammad, M., Alherbawi, M., Alam, Z., & Sopian, K. (2013). Overview of the production of biodiesel from waste cooking oil. *Renewable and sustainable energy reviews*, 18, 184-193.
- [14] Cárdenas, J., Orjuela, A., Sánchez, D. L., Narváez, P. C., Katryniok, B., & Clark, J. (2021). Pre-treatment of used cooking oils for the production of green chemicals: A review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125129.
- [15] Kulkarni, M. G., & Dalai, A. K. (2006). Waste cooking oil an economical source for biodiesel: a review. *Industrial & engineering chemistry research*, 45(9), 2901-2913.
- [16] Marmesat, S., Rodrigues, E., Velasco, J., & Dobarganes, C. (2007). Quality of used frying fats and oils: comparison of rapid tests based on chemical and physical oil properties. *International journal of food science & technology*, 42(5), 601-608.

- [17] MV Ruiz-Mendes, S Marmesat, A Liotta, MC. Dobarganes Analysis of used frying fats for the production of biodiesel *Grasas y Aceites*, 59 (1) (2008), pp. 45-50
- [18] de Araújo, C. D. M., de Andrade, C. C., e Silva, E. D. S., & Dupas, F. A. (2013). Biodiesel production from used cooking oil: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 27, 445-452.
- [19] Mendecka, B., Lombardi, L., & Koziol, J. (2020). Probabilistic multi-criteria analysis for evaluation of biodiesel production technologies from used cooking oil. *Renewable Energy*, 147, 2542-2553.
- [20] Murakami, Y., Senda, A., Ino, T., & Muramoto, Y. (2023). Dielectric-Breakdown Properties of Ester Oil Prepared from Thermally Degraded Rice Oil. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 18(10), 1569-1575.
- [21] Ababu, H. W., JoshuaRameshLalvani, J. S. I., & Duraisamy, R. (2021). Recycling of Used Vegetable Oils from Cafeteria's of Arba Minch City for Bio-Fuel Production.
- [22] Lopes, M., Miranda, S. M., & Belo, I. (2020). Microbial valorization of waste cooking oils for valuable compounds production—a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(24), 2583-2616.
- [23] E. Martinez-Guerra and V. G. Gude, „Transesterification of waste vegetable oil under pulse sonication using ethanol, methanol and ethanol–methanol mixtures,” *Waste Management*, vol. 34, no. 12, pp. 2611–2620, 2014/12/01/2014
- [24] Hamze H, Akia M, Yazdani F. Optimization of biodiesel production from the waste cooking oil using response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection* 2015;94:1–10
- [25] Hillairet, F., Allemandou, V., & Golab, K. (2016). Analysis of the current development of household UCO collection systems in the EU. *GREENEA: Coivert, France*.
- [26] Tsoutsos, T. D., Tournaki, S., Paraíba, O., & Kaminaris, S. D. (2016). The Used Cooking Oil-to-biodiesel chain in Europe assessment of best practices and environmental performance. *Renewable and sustainable energy reviews*, 54, 74-83
- [27] European Commission. (2018). *Renewable Energy—Recast to 2030 (RED II)*. Renewable Energy—Recast to 2030 (RED II).
- [28] Orjuela, A., & Clark, J. (2020). Green chemicals from used cooking oils: Trends, challenges, and opportunities. *Current opinion in green and sustainable chemistry*, 26, 100369
- [29] Gomes, B., Soares, C., Torres, J. M., Karmali, K., Karmali, S., Moreira, R. S., & Sobral, P. (2024). An Efficient Edge Computing-Enabled Network for Used Cooking Oil Collection. *Sensors*, 24(7), 2236.
- [30] Gupta, M. (2017). *Practical guide to vegetable oil processing*. Elsevier.
- [31] Sunfloweroil, M. (2020). Used Cooking Oil (UCO). línea]. Available: <https://macjerrysunfloweroiltd.webnode.com/products/avocado-oil-rbd/>. [Último acceso: 28 Julio 2020
- [32] Dijkstra, A. J. (2016). *Vegetable oils: composition and analysis*
- [33] Oladele, I. T., & Gana, M. A. (2010). *Procurement & Supply Management*.
- [34] Vaisali, C., Charanyaa, S., Belur, P. D., & Regupathi, I. (2015). Refining of edible oils: a critical appraisal of current and potential technologies. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(1), 13-23.
- [35] Rincón, L. (2018). Reutilization of used cooking oils in the production of epoxidized oils. Master's Dissertation. National University of Colombia, 162
- [36] Sutrisna, P. D., Candrawan, J., & Tangguh, W. W. (2019, June). Microfiltration of oily waste water: a study of flux decline and feed types. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 543, No. 1, p. 012079). IOP Publishing

- [37] Mannu, A., Ferro, M., Dugoni, G. C., Panzeri, W., Petretto, G. L., Urgeghe, P., & Mele, A. (2019a). Improving the recycling technology of waste cooking oils: Chemical fingerprint as tool for non-biodiesel application. *Waste Management*, 96, 1-8.
- [38] Mannu, A., Ferro, M., Dugoni, G. C., Panzeri, W., Petretto, G. L., Urgeghe, P., & Mele, A. (2019b). Recycling of Waste Cooking Oils: variation of the chemical composition during water treatment.
- [39] Carmona, H. D. P., De La Torre Alfaro, O., Alayón, A. B., Vázquez, M. R., & Hernández, J. M. (2019). Co-processing of straight run gas oil with used cooking oil and animal fats. *Fuel*, 254, 115583.
- [40] Palanisamy, K. I. M. S. N., Idlan, M. K., & Saifudin, N. (2013, June). Preliminary evaluation of the effectiveness of moisture removal and energy usage in pretreatment module of waste cooking oil for biodiesel production. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 16, No. 1, p. 012053). IOP Publishing
- [41] Hartini, S., Puspitasari, D., Aisy, N. R., & Widharto, Y. (2020). Eco-efficiency level of production process of waste cooking oil to be biodiesel with life cycle assessment. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 202, p. 10004). EDP Sciences.
- [42] Kanjiya, S. S., Dadhaniya, D. S., Vegada, B. J., Makadia, A. J., & Patel, R. L. (2019). Biodiesel Production from Waste Cooking Oils by Transesterification Process Using Alkaline Catalysts.
- [43] Ramlan, N. A., Abdullah, A. A., Hamzah, M. H., Jaharudin, N. F., & Mamat, R. I. Z. A. L. M. A. N. (2015). Evaluation of diesel engine performance and exhaust emission characteristics using waste cooking oil. *Applied Mechanics and Materials*, 773, 425-429.
- [44] Semin, B. C., Listyanto, H. A., & Bakar, R. A. (2020). Analysis of the Performance of Diesel Engine Fueled using B50-B100 Biodiesel Based on Simulation. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 5(3).
- [45] Abbaszadeh, A., Ghobadian, B., Najafi, G., & Yusaf, T. (2014). An experimental investigation of the effective parameters on wet washing of biodiesel purification. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 9(1), 1525-1537.
- [46] Permadani, R. L., Ibadurrohman, M., & Slamet. (2018, January). Utilization of waste cooking oil as raw material for synthesis of Methyl Ester Sulfonates (MES) surfactant. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 105, p. 012036). IOP Publishing
- [47] Yusuff, A. S., Porwal, J., Bhonsle, A. K., Rawat, N., & Atray, N. (2021). Valorization of used cooking oil as a source of anionic surfactant fatty acid methyl ester sulfonate: process optimization and characterization studies. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-12
- [48] Hou, C. T., & Shaw, J. F. (2009). *Biocatalysis and agricultural biotechnology*. CRC Press.
- [49] Hayes, D. G. (2012). Bioprocessing Approaches to Synthesize Bio-based Surfactants and Detergents. *Food and Industrial Bioproducts and Bioprocessing*, 243-266.
- [50] Habe, H., Shimada, Y., Yakushi, T., Hattori, H., Ano, Y., Fukuoka, T., ... & Sakaki, K. (2009). Microbial production of glyceric acid, an organic acid that can be mass produced from glycerol. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(24), 7760-7766.
- [51] Kandeel, E. M. (2012). Synthesis and performance of glycerol ester-based nonionic surfactants. *Journal of dispersion science and technology*, 33(7), 949-954.
- [52] Abdel Hameed, R. S. (2016). Recycling of the Waste Cooking Oils as Non-ionic Surfactants. *Mater. Sci.: Indian J*, 15(1), 1-12
- [53] Feuge, R. O., Zeringue Jr, H. J., Weiss, T. J., & Brown, M. (1970). Preparation of sucrose esters by interesterification. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 47(2), 56-60.
- [54] Silveira, M., & Jonas, R. (2002). The biotechnological production of sorbitol. *Applied microbiology and biotechnology*, 59, 400-408.

- [55] Foley, P., Beach, E. S., & Zimmerman, J. B. (2012). Derivation and synthesis of renewable surfactants. *Chemical Society Reviews*, 41(4), 1499-1518
- [56] Liu, C., Liu, J., Ma, L., & Rong, L. (2014). Preparation of Novel High-Temperature Polyol Esters from Vegetable Oils. *Journal of Chemistry*, 2014(1), 802732
- [57] Texter, J. (Ed.). (2001). *Reactions and synthesis in surfactant systems* (Vol. 100). New York: Marcel Dekker.
- [58] Hama, I., Okamoto, T., & Nakamura, H. (1995). Preparation and properties of ethoxylated fatty methyl ester nonionics. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 72(7), 781-784.
- [59] Hasenhuettl, G. L. (2019). Synthesis and commercial preparation of food emulsifiers. *Food emulsifiers and their applications*, 11-39.
- [60] Aziz, H., Abas, N., Ping, B., & Idris, Z. (2019). Transesterification of palm-based methyl palmitate into esteramine catalyzed by calcium oxide catalyst. *Journal of Surfactants and Detergents*, 23(2), 251-262. <https://doi.org/10.1002/jsde.12373>
- [61] Eke, W., Kyei, S., Achugasim, O., Ajienka, J., & Akaranta, O. (2021). Pour point depression and flow improvement of waxy crude oil using polyethylene glycol esters of cashew nut shell liquid. *Applied Petrochemical Research*, 11(2), 199-208. <https://doi.org/10.1007/s13203-021-00271-1>
- [62] Jiang, Y., Geng, T., & Li, Q. (2011). Synthesis of stearic acid triethanolamine ester over al-sba-15. *Journal of Porous Materials*, 19(3), 369-374. <https://doi.org/10.1007/s10934-011-9483-8>
- [63] Lang, X., Xu, Z., Li, Q., Yuan, L., Thumu, U., & Zhao, H. (2022). Modulating the reactivity of polymer with pendant ester groups by methylation reaction for preparing functional polymers. *Polymer Chemistry*, 13(41), 5905-5911. <https://doi.org/10.1039/d2py00978a>
- [64] Pandey, P., Mehta, M., Shukla, S., Wadhwa, R., Singhvi, G., Chellappan, D., ... & [65] Dureja, H. (2020). Emerging nanotechnology in chronic respiratory diseases., 449-468. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41858-8_20
- [66] Overkempe, C., Annerling, A., Van Ginkel, C. G., Thomas, P. C., Boltersdorf, D., & Speelman, J. (2003). Esterquats. In *Novel surfactants* (pp. 365-402). CRC Press
- [67] Mishra, S. (2007). Ester quats: the novel class of cationic fabric softeners. *Journal of oleo science*, 56(6), 269-276.
- [68] Tehrani-Bagha, A.R.; Oskarsson, H.; van Ginkel, C.G.; Holmberg, K. Cationic Ester-Containing Gemini Surfactants: Chemical Hydrolysis and Biodegradation. *J. Colloid Interface Sci.* 2007, 312, 444–452.
- [69] Para, G.; Łuczyński, J.; Palus, J.; Jarek, E.; Wilk, K.A.; Warszyński, P. Hydrolysis Driven Surface Activity of Esterquat Surfactants. *J. Colloid Interface Sci.* 2016, 465, 174–182
- [70] Wysocki, M., Stachowiak, W., Smolibowski, M., Olejniczak, A., Niemczak, M., & Shamshina, J. L. (2024). Rethinking the esterquats: synthesis, stability, ecotoxicity and applications of esterquats incorporating analogs of betaine or choline as the cation in their structure. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11), 5761.
- [71] S.W., P., N.A., S., K.N., I., Khamaruddin, P., & N., M. (2019). Removal of oil and heavy metals from oily sludge using esterquat surfactant via surfactant-enhanced oil recovery (seor). *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(4), 6912-6917. <https://doi.org/10.35940/ijrte.d5176.118419>
- [72] Stachowiak, W., Olejniczak, A., Rzemieniecki, T., Smolibowski, M., Wysokowski, M., Jesionowski, T., ... & Niemczak, M. (2024). Mono- and dicationic quaternary ammonium salts from glycine betaine: are they less ecotoxic than currently applied commercial cationic surfactants?. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(50), 18187-18199. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c07208>

- [73] Dewi, M., Maulana, S., Maulana, S., Sesira, M., Alamsyah, M., & Sandi, S. (2023). The effect of variations in methanol concentration on the esterification process against quality of biodiesel from used cooking oil. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1187(1), 012040. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1187/1/012040>
- [74] Mahmudah, R. and Shofiah, N. (2023). From waste to wealth: a novel approach for empowering society through recycling used cooking oil into soap. *Journal of Community Service and Empowerment*, 4(2), 343-350. <https://doi.org/10.22219/jcse.v4i2.25816>
- [75] Wysocki, M., Stachowiak, W., Smolibowski, M., Olejniczak, A., Niemczak, M., & Shamshina, J. L. (2024). Rethinking the esterquats: synthesis, stability, ecotoxicity and applications of esterquats incorporating analogs of betaine or choline as the cation in their structure. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(11), 5761.
- [76] Masoumi, H. R. F., Kassim, A., Basri, M., Abdullah, D. K., & Haron, M. J. (2011). Multivariate optimization in the biosynthesis of a triethanolamine (TEA)-based esterquat cationic surfactant using an artificial neural network. *Molecules*, 16(7), 5538-5549.
- [77] Aziz, H. A., Aroua, M. K., Yusoff, R., Abas, N. A., Idris, Z., & Hassan, H. A. (2016). Production of palm-based esteramine through heterogeneous catalysis. *Journal of Surfactants and Detergents*, 19, 11-18.
- [78] <https://www.fishersci.com/store/msds?partNumber=AC436130010&countryCode=US&language=e> (Megtekintve: 2025.04.01)
- [79] Rosen, M. J., & Kunjappu, J. T. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena* (4th ed.). Wiley.
- [80] Myers, D. (2006). *Surfactant Science and Technology* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- [81] Schramm, L. L. (2000). *Surfactants: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry*. Cambridge University Press.
- [82] Patzkó, Á. (1998). *A kolloidika alapjai*.
- [83] Bratovcic, A., Nazdrajic, S., Odobasic, A., & Sestan, I. (2018). The influence of type of surfactant on physicochemical properties of liquid soap. *Int. J. Mat. Chem*, 8, 31-37.
- [84] Azam, M. R., Tan, I. M., Ismail, L., Mushtaq, M., Nadeem, M., & Sagir, M. (2013). Static adsorption of anionic surfactant onto crushed Berea sandstone. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 3, 195-201.

Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia
2025

**Mérőberendezés tervezése mágneses anyagok
B-H görbéjének meghatározására**

Készítette: Szabados Hunor
Mechatronikai mérnök BSc.
Mérnöki Kar, Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ,
Mechatronikai és Méréstechnikai Kutatócsoport
Témavezető: Guba Sándor



Mérőberendezés tervezése mágneses anyagok B-H görbéjének meghatározására

*Készítette: Szabados Hunor,
mechatronikai mérnöki alapképzés
Mérnöki Kar, Műszaki Tudományok Kutató-Fejlesztő Központ,
Mechatronikai és Méréstechnikai Kutatócsoport*

Témavezető: Guba Sándor

Absztrakt

TDK dolgozatom célja olyan mérőeszközök készítése, amelyek alkalmasak ferrofluidumok, ferritek és egyéb mágneses anyagok B-H görbéjének felvételére. A mágneszettségi görbéből olyan fontos tulajdonságok derülnek ki, mint a remanens mágnesesség, koercitív erő és telítési mágneszettség. Ezen tulajdonságok fontos szerepet játszanak a különböző anyagok felhasználhatóságának vizsgálatakor. A mért anyagok közül a ferrofluidumoknak fontos felhasználási lehetőségei vannak a mágneses tömitések, valamint az orvostudomány területén, míg a ferriteket induktív elemként, különböző áramkörökben hasznosítják (például transzformátorként). A B-H görbe felvételére DC és AC mérőrendszert is készítettem. A DC mágneses teret egy elektromágnessel állítottam elő, a mágneses indukciót és a térerősséget két szenzor segítségével egy adatgyűjtő kártyán mértem, amit a LabVIEW szoftverrel irányítottam. Az AC mérés esetében a változó mágneses teret egy tekercscsel állítottam elő, melyet egy erősítőn keresztül az adatgyűjtő kártya vezérelt. A mágneses térerősség és mágneses indukció mérésére szolgáló szenzorok jelét a LabVIEW szoftverben dolgoztam fel, így kaptam meg a mágneszettségi görbét. Feladataim közé tartozott a mérések, valamint egyes alkotóelemek megtervezése, összekapcsolása, a szenzorok kalibrációja, az adatgyűjtés, valamint a gyűjtött adatok kiértékelése.

Kulcsszavak: mágnesesség, B-H görbe, hiszterézis, ferrofluidum, ferrit

1. Bevezetés

Mechatronikai mérnök hallgatóként mindig is vonzott a mérés, irányítás. Tanulmányaim során számos alkalommal találkoztam az elektromos-mágneses terek témakörével. Tanáraink hangsúlyozták a TDK fontosságát, ezért nagyon örültem, amikor megtudtam, hogy karunkon kutatás folyik ezen a területen. A téma még érdekesebb lett, miután olvastam a mágneses anyagok olyan felhasználási területeiről, mint például az orvostudomány.

A dolgozat témája a különböző mágneses anyagok (ferritek és ferrokolloidok) mágneses tulajdonságainak vizsgálata. Ezek az anyagok egyre nagyobb szerepet töltenek be a mindennapi életünkben, így fontos megismerni tulajdonságaikat [1], [2], [3], [4]. Alkalmazási lehetőségeik a mágneses tömítésektől kezdve, az elektronikai alkatrészekeken keresztül az orvosbiológiai felhasználásig és még annál tovább is terjednek.

Munkám során, különböző mágneses anyagok mágneses indukció (B) - mágneses térerősség (H) görbáját szeretném felvenni egy általam épített, erre alkalmas mérőberendezéssel. A B - H görbék felvételére több módszer is létezik. Az általam választott első mérési elrendezés az IEC 60404-5:2015 szabványban meghatározott módszert vette alapul annyi különbséggel, hogy kereső tekercs helyett Hall-szenzort alkalmaztam, mellyel az anyagok DC mágneses tulajdonságai vizsgálhatók. A második a váltóáramú tekercs-módszer, ezzel az anyagok AC mágnesezettségi görbéit lehet felvenni. Az IEC 60404-5:2015 szabványban egy elektromágnes mágneses terét, valamint a minta mágneses indukcióját kell mérni, így kirajzolhatóvá válnak a B és H értékek. Mivel a ferrokolloidok esetében a telítési mágnesezettség kicsi, a mágneses teret egy elektromágnes biztosította, melyet egy adatgyűjtő kártyával vezérelt tápegység hajtott meg. Ezzel párhuzamosan az adatgyűjtő kártyával a Hall-szenzor feszültséget is mértem.

A váltóáramú tekercs-módszer esetén, a megfelelő mágneses teret egy erősítőre kapcsolt saját készítésű tekercs biztosítja. A mágneses indukciót Hall-szenzorral mértem. A mérések szoftveres feladatait az adatgyűjtő kártyával kommunikáló számítógép végzi. A mérőeszköz virtuális részei a LabVIEW környezetben készültek és futnak.

2. Mágneses anyagok csoportjai

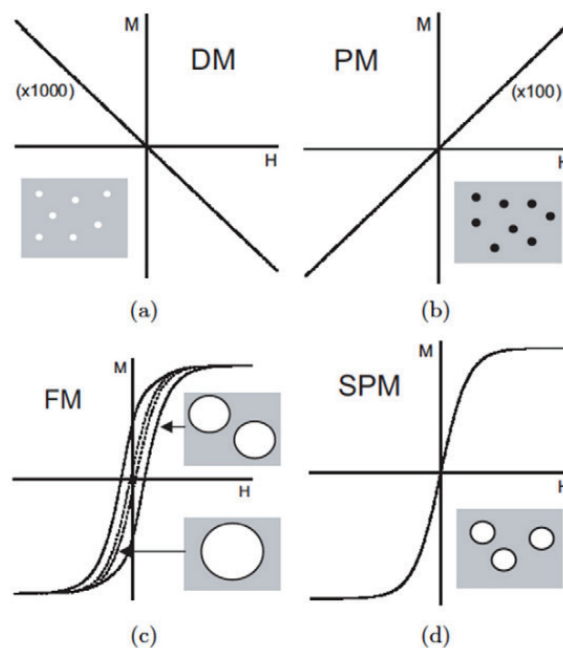
Általános igazság, hogy különböző anyagok mágneses térbe helyezve, megváltoztatják egyes sajátosságaikat. A mágneses tulajdonságok a mágnesezettséggel, szuszceptibilitással és relatív permeabilitással jellemezhetők. Egy anyag mágnesezettségét (M), az egységnyi térfogatban lévő dipólusmomentumok száma határozza meg. A mágnesezettség a térerősség (H) függvénye (1. ábra); a kettő között egyszerű esetben lineáris a kapcsolat. Ilyenkor felírhatjuk: $M = \chi H$, ahol χ a térfogati mágneses szuszceptibilitás. Ennek segítségével felírható a mágneses indukció, vagy más néven mágneses fluxussűrűség (B): $B = \mu_0(1 + \chi)H$, ahol μ_0 a vákuum permeabilitása, az $(1 + \chi) = \mu_r$, ami a relatív permeabilitás. Mágneses jellemzőik alapján, az anyagok három nagy csoportra oszthatók.

A diamágneses anyagokban az atomoknak nincs mágneses momentuma addig, amíg nincs külső mágneses tér. Abban az esetben, ha H külső mágneses teret alkalmazunk, az elektronok a tér irányával ellentétes irányban hozzák létre a mágnesezettséget. Ilyen anyag például a higany, az arany és a foszfor.

A paramágneses anyagoknál a mágnesességet, a jelenlevő spinek részleges elrendeződése okozza a külső tér hatására. Ilyen anyag többek között az alumínium, a króm és a molibdén.

A ferromágneses anyagokban a spinek bizonyos tartományokon belül egymással párhuzamosan helyezkednek el. Ezeket a tartományokat mágneses doméneknek nevezzük. A doméneknek eredő mágnesezettségük van, külső mágneses tér jelenléte nélkül is, méretük a 0,1 μm -tól akár a 0,1 mm-es tartományig terjedhet. A ferromágneses anyagok közé tartozik a vas, a nikkel és a kobalt [5].

A dolgozat témájának szempontjából megemlítendő még a szuperparamágnesesség; a mágnesesség egy olyan típusa, amely ferro-, vagy ferrimágneses nanorészecskék szuszpenzióiban fordul elő. A nanorészecskék mérete a tized nanométertől, néhány nanométerig terjedhet. Ebben a mérettartományban már a részecskék monodomén szerkezetűek, így egyetlen mágneses momentumnak tekinthetők, amely az atomi mágneses momentumokból adódik össze, ezért nagyságrendekkel nagyobb annál. Megfelelően kis méretű nanorészecskék esetén, az eredő mágnesezettség a hőmozgás hatására megszűnik a külső mágneses tér kikapcsolása után [6].



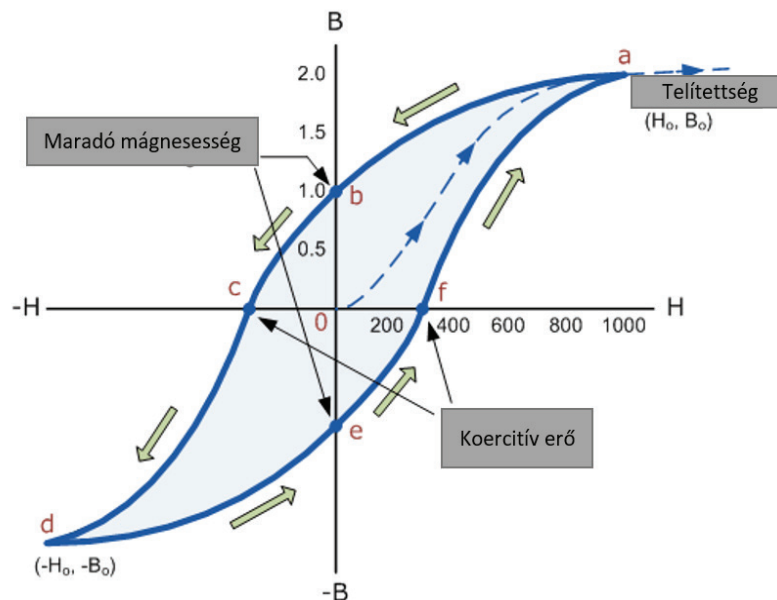
1. ábra: Diamágneses (DM), paramágneses (PM), ferromágneses (FM) és szuperparamágneses (SPM) anyagok M-H görbéjének összehasonlítása [6]

2.1. Ferrofluidumok

A dolgozat szempontjából fontosak a mágneses kolloidok, vagy másnéven ferrofluidumok: valamilyen folyadékhozóba diszpergált, jellemzően 10 nm nagyságú, monodomén mágneses részecskék. Az összetapadás elkerülése érdekében a részecskéket be kell burkolni. A ferrofluidumok optikailag izotrópok, de indukált kettőtörést mutatnak külső mágneses tér jelenlétében [1], [10]. A ferrofluidumok hordozóközegei sokfélék lehetnek, például szénhidrogének, víz, glicerin, szilikonolajok és akár fluorszénhidrogének is. A sokfajta mágneses folyadék sokféle alkalmazáshoz vezet, mivel ezek tulajdonságai állíthatók a koncentráció, a méretek, illetve mágneses részecskék segítségével. Az újszerű szivattyúktól kezdve a gyorsulásmérőig, giroszkópokig, mágneses tömítésekig egyre szélesebb körben alkalmazzák [4].

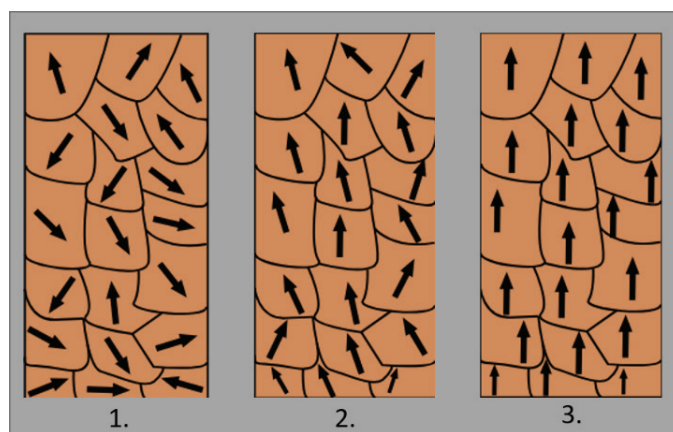
3. B-H, M-H görbék és paramétereik

Amikor a mágneses indukciót (B) vizsgáljuk a mágneses térerősség (H) függvényében, akkor megkapjuk a hiszterézis görbét (2. ábra), melyről leolvashatjuk a mágneses anyagok néhány olyan fontos tulajdonságát, mint a remanens mágnesesség, telítettségi mágnesesség vagy a koercitív erő. A 2. ábrán szaggatott vonal mutatja, hogy a térerősséget növelve az indukció eléri a mágneses telítettséget. Ezután a térerősség csökkentésével a mágneses indukció is csökken, de csak kis mértékben, ekkor elérünk a remanens vagy maradó indukcióhoz. Ezután megfordítjuk a mágneses tér irányát majd növelni kezdjük, ennek hatására a mágneses indukció tovább csökken. A nulla indukcióhoz tartozó mágneses térerősséget koercitív erőnek nevezzük. A mágneses tér további erősítése mellett, elérünk az indukció negatív telítettségéhez. Ettől kezdve csökkentjük a mágneses teret egészen nulla térerősséig, ahol ismét megfordítjuk az irányát és tovább növeljük a polarizációs csúcserőig. Így épül fel a hiszterézisgörbe [8].



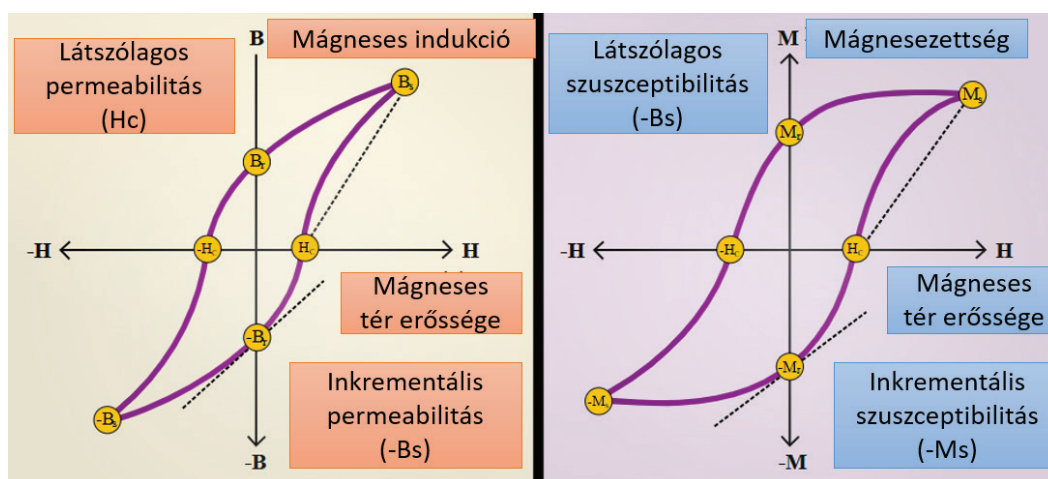
2. ábra: B-H hiszterézisgörbe [8]

A telítés eléréséig a domének fokozatosan a mágneses térerősségvonalak irányába fordulnak. A 2. ábrán az f ponttól az a pontig nő a térerősség és az indukció is. A 3. ábra a domének mágnesezettségének, a térerősség növekedésével történő irányba fordulását mutatja. Látható, hogy az első képen még rendezetlenül állnak, azonban a térerősség növekedésével a domének többsége nagyjából egy irányba fordul, ahogy ezt a második kép mutatja. A harmadik képen az látszik, hogy az összes domén egy irányba rendeződött, így az anyag elérte a telítési mágnesezettséget.



3. ábra: Domének fordulása a térerősség növekedésével [9]

A hiszterézisgörbét gyakran adják meg mágnesezettséggel is. Mivel $M = \chi_m H$ és $B = \mu H$, a kétfajta ábrázolás nagyon hasonlít egymáshoz (4. ábra).



4. ábra: B - H és M - H hiszterézisgörbék összehasonlítása [9]

3.1. Kemény és lágy mágneses anyagok

A kemény mágneses anyagok jellemzője a nagy koercitív erő, ami azt jelenti, hogy viszonylag sokáig képesek megtartani mágneseességüket, sok energia kell a fel-, vagy lemágnesezésükhöz. Ezekből az anyagokból készítik a permanens mágneseket [10].

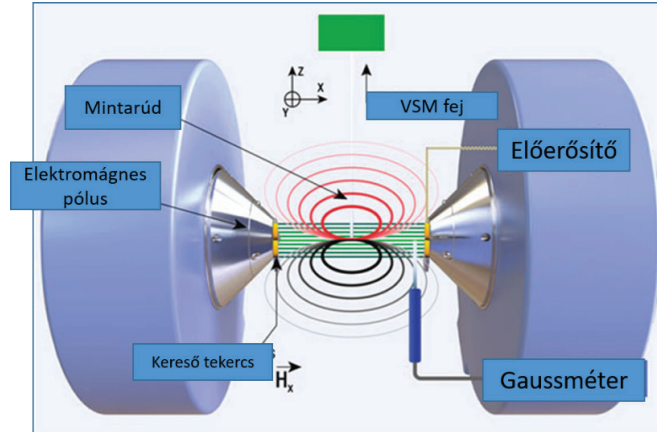
Azokat az anyagokat, melyeket kevés energiabefektetéssel lehet fel- vagy lemágnesezni, lágy mágneses anyagoknak nevezzük. Ezeknek az anyagoknak jellegzetes tulajdonsága a nagy permeabilitás, így ezeket transzformátorokban, generátorokban, motorokban használják a mágneses fluxus növelése céljából [10].

4. Mérési módszerek

A mágneses térerősség mértékét és irányát magnetométerrel határozhatjuk meg. A leggyakrabban használt technika az anyagok tulajdonságainak meghatározására a VSM (Vibrating Sample Magnetometry). Alapelve, hogy a mágneses anyag a homogén mágneses térben rezeg, ezzel áramot indukál egy megfelelően elhelyezett keresőtekerccsben

(5. ábra). Segítségével vizsgálhatóvá válnak erősen mágneses és gyengén mágneses anyagok többféle formában, továbbá mérhetőek vele a szilárd, a folyékony és a porállagú anyagok, az egykristályok, valamint vékony filmrétegek.

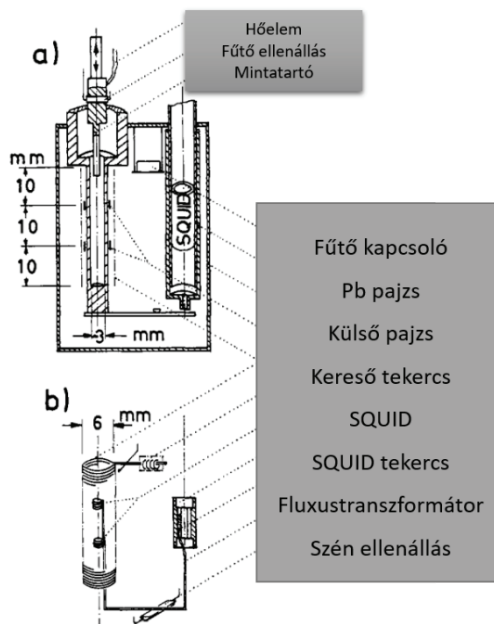
Az indukált elektromos áram nagysága arányos lesz az anyag mágnesezettségével. A mágneses teret elektromágnes hozza létre.



5. ábra: Sematikus ábra a VSM módszerről [12]

Egy másik módszer a SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) magnetométer, amely a 6. ábrán látható. A SQUID a szupravezetésen és a Josephson-effektuson alapszik. Ezzel az eljárással a nagyon kicsi térerősségek is nagy pontossággal érzékelhetők. Nem közvetlenül érzékelik a mágneses teret, hanem a szupravezető hurokban keltett áramot mérik. Mivel a mérőeszköz bizonyos részei kriogén hőmérsékletű környezetet igényelnek, a hűtőrendszert használhatjuk arra is, hogy a minta hőmérsékletét beállítsuk. A mágneses mezőt a szupravezető mágnes hozza létre, miközben a mintát lassan mozgatjuk a keresőtekercseken keresztül. A mechanikus rezgések elkerülése érdekében hidraulikus rendszert alkalmaznak.

A minta mágneses nyomatéka fluxusváltozást indukál a keresőtekercsekben, melyek egymással ellentétesen vannak tekercselve azért, hogy kiküszöböljék a külső mágneses változásokat [12].



6. ábra: SQUID magnetométer [13]

Egy anyag B-H görbéjének felvétele történhet úgynevezett „Step by step” módszer segítségével is. Az egyenáram segítségével meghajtott elektromágnes mágneses tere visszamérhető, valamint a mágnespólusok közé behelyezett minta mágneses indukciója is mérhető. A mérés pontonként halad, miközben minden pontban térerősség- és indukciómérés is történik. A DC mérési módszerem ezen az elven alapszik.

A hiszterézis görbe mérhető úgy is, hogy egy szolenoid tekercs segítségével előállított váltakozó mágneses térbe helyezik a mintát. A minta mágneses indukcióját és a térerősségét megmérve előállítható a B-H görbe. A szolenoid tekercs mágneses tere a következő képlet alapján számítható ki:

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{NI}{l}. \quad (1)$$

Mivel a tekercs menetszáma (N) és a tekercs hossza (l) a mérés közben nem változik, a térerősség az áramerősségtől (I) függ. Az áramerősséget mérve a térerősség kiszámítható. A mágneses indukció a minta végéhez szorosan elhelyezett Hall-szenzorral mérhető. Ezen az elven alapszik a második típusú (AC) mérésem.

Az alkalmazott Hall-szenzor működési elve, hogy egy félvezetőn keresztülráamló töltésekre a Lorentz-erő miatt hatással van a mágneses tér, így a félvezető lapka két széle között feszültségkülönbség keletkezik. Ezt a jelenséget Hall-feszültségnek nevezzük, nagysága arányos a térerősség nagyságával.

5. Célkitűzés

A dolgozat elkészítése során célul tűztem ki kétféle mérőeszköz megépítését. Egyet a ferromágneses anyagok mágneses tulajdonságainak meghatározására, és egy másikat a ferrofluidumok tulajdonságainak vizsgálatára. Feladataim közé tartozik majd, a mérőeszköz egyes elemeinek megtervezése, az eszköz összeépítése, szoftver készítése, mérés és annak kiértékelése. A kereskedelmi forgalomban kapható, hasonló felépítésű műszerek általában drágák, ezért a saját fejlesztésű műszer megépítésével a kutatócsoportnak lehetősége nyílik az egyszerűbb mérések gyors elvégzésére, ezzel is segítve a kutatást.

6. Vizsgált anyagok

6.1. Ferritek és ferromágneses fémek felhasználása

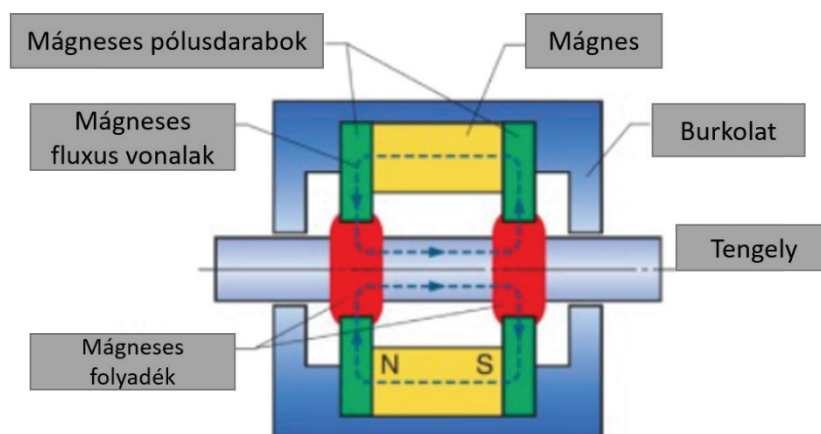
A ferritek kiemelkedő mágneses tulajdonságokkal rendelkeznek, ami lehetővé teszi széleskörű elterjedésüket, az egyszerű mágnestől kezdve a különböző áramköri elemeken keresztül, a telefon és radar nagyfrekvenciás működéséig. Ezen alkalmazások, a ferritek egy-egy olyan előnyös tulajdonságán alapulnak, mint például: nagy elektromos ellenállás, jelentős telítési mágnesezettség, jó kémiai stabilitás. A ferritek háromfajta kristályrendszerét többféle módszerrel is elő lehet állítani, és a korlátlan számú szilárd összetétel miatt az előnyös tulajdonságokat az alkalmazáshoz lehet igazítani. A ferritek számos területen versenyeznek a fémekkel, mind tulajdonságaik, mind gazdasági okok miatt. A ferriteket elő lehet állítani nanorészecskéként is, ami új, izgalmas alkalmazási lehetőségekkel kecsegtet nemcsak az elektronika, de a biológia területén is.

A ferritek felhasználása elsősorban induktív elemként történik különböző elektromos áramkörökben, például feszültség vezérelt oszcillátorokban, alacsony zajszintű erősítőkből és szűrőkben. A modern eszközök energiaellátásában is nagy szerepet játszanak. A régi típusú televíziókészülékekben, számítógépekben, valamint közepes méretű műszerekben, főként a kapcsoló üzemi tápegységekben helyezkednek el, ahol ferrit transzformátormagként működnek. Az elektronikus berendezések számának növekedése, például a számítógépek nagysebességű digitális interfészei miatt, megnőtt annak az esélye, hogy az elektronikus eszközök elektromágnesesen interferálnak egymással. A probléma megoldására különböző szűrőket alkalmaznak, melyek ferritkomponenseket tartalmaznak [2].

6.2. Ferrofluidumok felhasználása

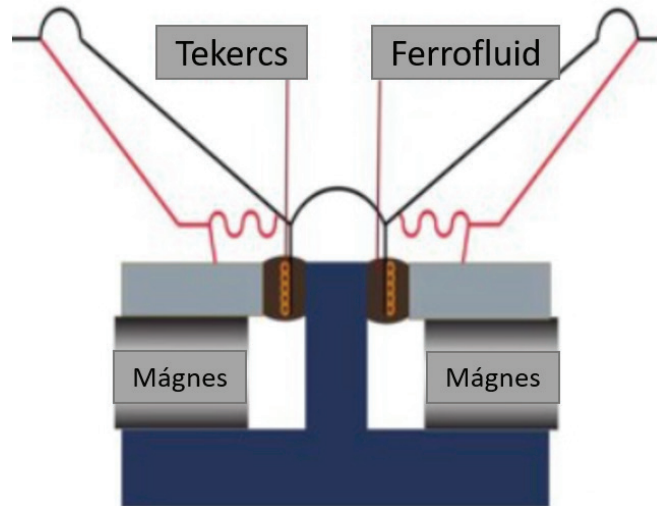
A ferrofluidumokkal kapcsolatos kutatások több tudományágban is zajlanak párhuzamosan, tulajdonságaikkal a kémia, a fizika, a biológia és a mérnöki tudományágak egyaránt foglalkoznak a saját szempontjaik szerint. A ferrofluidumok alkalmazása így sokféle lehet.

Gépelem alkalmazások közé tartozik a mágneses tömítés (7. ábra), ahol a ferrofluidum érintkezésmentessége miatt, sokkal kisebb a súrlódás a mechanikusan érintkező tömítésekhez képest.



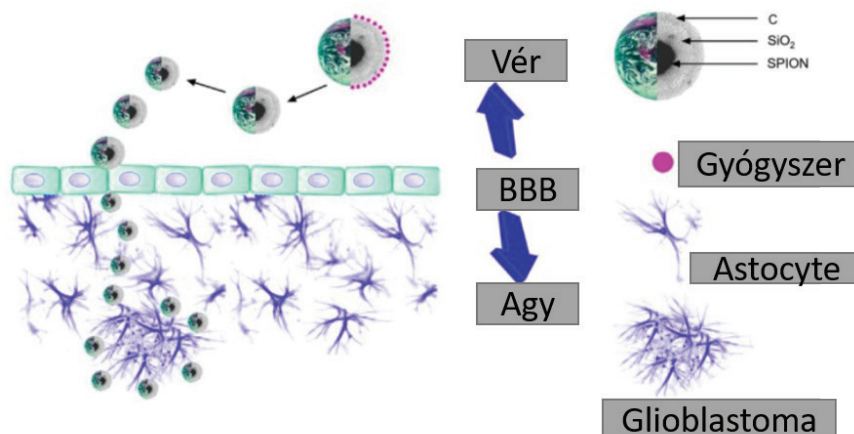
7. ábra: Mágneses tömítés [3]

Szintén gépelemi alkalmazás az inerciális és viszkózus lengéscsillapító (8. ábra). A ferrofluidumokat gyakran alkalmazzák léptetőmotorok lengéscsillapítására is. Ha a motor a saját frekvenciáján működik, vibrációt, akusztikus zajt kelthet. Ennek megszüntetésére van egy elrendezés, ahol a motor házának belsejében egy tehetetlenségi tömeg a ferrofluidumon lebeg, így nem kell csapágyat használni, valamint a viszkozitása miatt csillapítja a rezgéseket is.



8. ábra: Inerciális viszkózus lengéscsillapító [3]

A ferrofluidumokat az orvosbiológiában is alkalmazzák, például helyspecifikus gyógyszerátvitelre (9. ábra), hipertermia előidézésére. Kis méreteinek köszönhetően a ferrofluidum eljuthat olyan helyekre is a testben, ahova más anyag nem. A ferrofluidum tumorba juttatva, külső váltakozó mágneses tér hatására, lokális hőmérsékletnövekedést idéz elő, amit a tumorsejtek kevésbé tolerálnak az egészséges sejtekhez képest.



9. ábra: Helyspecifikus gyógyszerátvitel [3]

A mágnesrezonancia-képtétel (MRI) szintén egy orvosbiológiai alkalmazás, ahol az MRI nagy segítség a különböző betegségek diagnosztizálásakor. Korábban a kontrasztanyagok a mangán és a gadolínium voltak, de a közelmúltban felfedezték, hogy a szuperparamágneses vas-oxid nanorészecskék jelentősen befolyásolják az MRI kontrasztot. A ferrofluidumok előnyös tulajdonsága, hogy a kontraszt erősödése miatt, már korábban észrevehető bizonyos betegségek [3].

6.3. Vizsgált anyagok tulajdonságai

A mérőberendezésekkel négyféle anyagot vizsgáltam. Az egyik anyag az EMG700 típusú ferrofluidum, mely a Ferrotec EMG családjába tartozó vízalapú ferrokolloid, amit kísérletezéshez, valamint ferrokolloidok alkalmazásának fejlesztéséhez gyártanak. Előnye a jó keveredési képesség a vízbázisú rendszerekkel, hátránya a gyors párolgás. A vízhez kevert magnetit részecskék átmérője 10 nm. Az EMG700 gyártó által megadott további tulajdonságai az 1. táblázatban láthatók.

1. táblázat: EMG700 ferrofluidum tulajdonságai [14]

Tulajdonság	Érték
Telítési mágnesezettség	35,5 mT
Viszkozitás	10 mPa·s
Sűrűség	$1,29 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
Kezdeti mágneses szuszceptibilitás	12,57
Mágneses részecske koncentráció	5,8 %
pH	~7
Felületaktív anyag jellege	Anionos

A másik vizsgált anyag egy ferrit-rúd volt, melynek adatai a 2. táblázatban találhatóak.

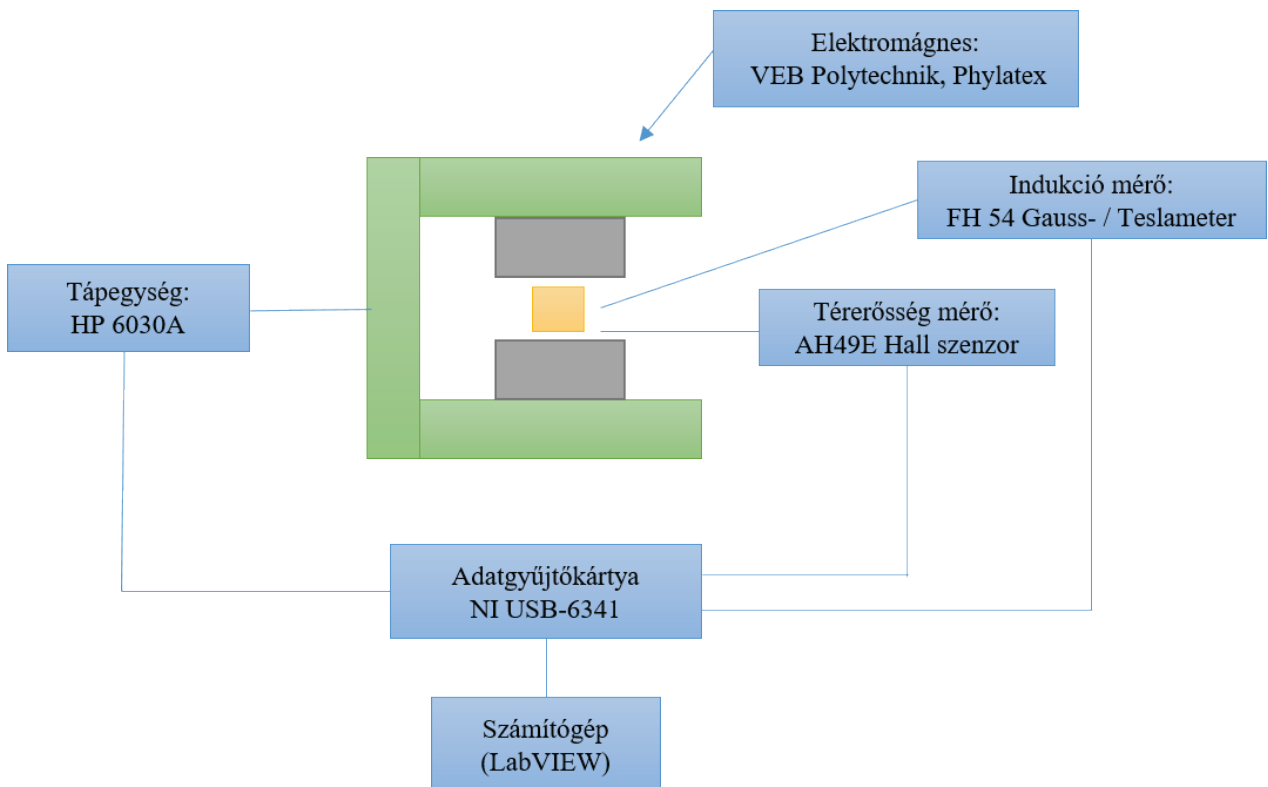
2. táblázat: Ferrit-rúd tulajdonságai [15]

Tulajdonság	Érték
Anyag fajta	A2G
Kezdeti permeabilitás	$300 \pm 20\%$
Telítési mágnesesség	222816,9 A/m
Remanens mágnesesség	127324 A/m
Koercív erő	41,38 A/m
Curie hőmérséklet	160 °C
Ellenállás	$1 \cdot 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$
Működési frekvencia	(0,1 – 3) MHz

A harmadik anyag, egy ismeretlen összetételű és ismeretlen mágneses tulajdonságokkal rendelkező ferrit-rúd. A negyedik pedig, egy szintén ismeretlen összetétellel és mágneses tulajdonságokkal rendelkező vasrúd volt. A továbbiakban az ismert ferrit-rúdra F1, az ismeretlen ferrit-rúdra F2, míg a vasrúdra V1 néven hivatkozok.

7. DC mérőrendszer mágneses anyagok vizsgálatára

A ferrokolloidok méréséhez szükségem volt tápegységre. Erre a célra a HP 6030A-t választottam, mely az elektromágnes tekercseinek meghajtásáért felelt. A mágneses teret egy vasmagos elektromágnessel állítottam elő, melyet a VEB Polytechnik, Phylatex gyártott. A mágneses teret AH49E Hall-szenzorral mértem vissza, míg a mágneses indukciót a Magnet-Physik FH 54 Gauss- / Tesla-meter-rel mértem. Az AH49E Hall szenzor mérési tartománya $\pm 1000 \text{ Gs}$ [16], ami nagyjából $\pm 0,1 \text{ T}$ -nak felel meg. A szenzorok jelének feldolgozását, valamint a tápegység irányítását egy NI USB-6341 adatgyűjtő kártyával oldottam meg, ami egy számítógéphez volt csatlakoztatva (10. ábra).



10. ábra: DC mérőrendszer ferrokolloidok vizsgálatára

7.1. DC mérés eszközei

A mágneses tér létrehozására egy elektromágnest (11. ábra) alkalmaztam, melyet a VEB Polytechnik, Phylatex gyártott. A mágnes vízhűtéses, pólusai állítható távolságúak. Az elektromágnes egy olyan tekercs, ami a rajta áthaladó áram hatására mágneses teret állít elő. Amint az áram megszűnik, a tekercs elveszíti a mágneses tulajdonságait.



11. ábra: VEB Polytechnik elektromágnes



12. ábra: HP 6030A tápegység [17]

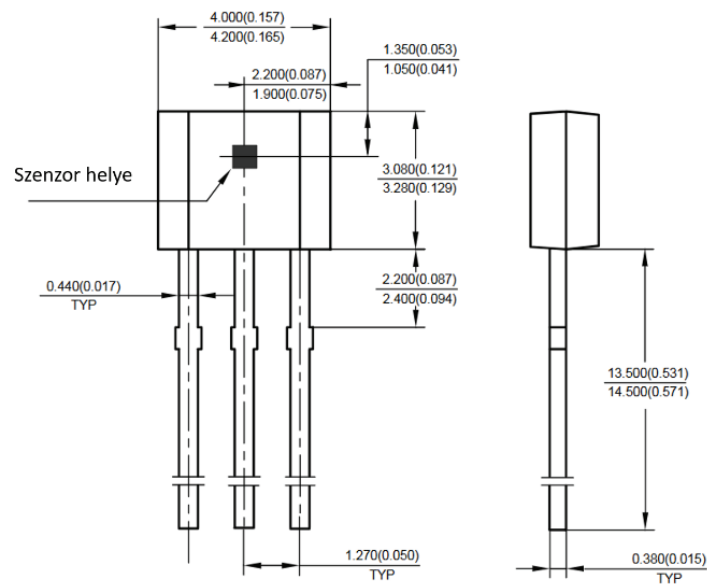
Az alkalmazott HP 6030A tápegység (12. ábra) analóg módon is vezérelhető, ezért pontosabbá, gyorsabbá tette a mérést. A mágneses indukciót az FH 54 Gauss - / Teslameter-rel mértem (13. ábra), melyhez a transzverzális mérőfejet használtam.



13. ábra: Magnet-Physik FH 54 Gauss- / Teslameter [19]

A műszer használható a térerősség és a mágneses indukció mérésre is. Képes statikus (DC), valamint váltakozó (AC) terek mérésére. Sok olyan beépített funkcióval rendelkezik, mint például a manuális, vagy automatikus mérési tartomány állítása, maximum és minimum értékek eltárolása és a csúcserték rögzítése, ami segít a nagyon rövid impulzusok észlelésében. A műszer egyik nagy előnye, hogy analóg kimenete van, így az adatgyűjtés automatizálható egy adatgyűjtő kártya segítségével.

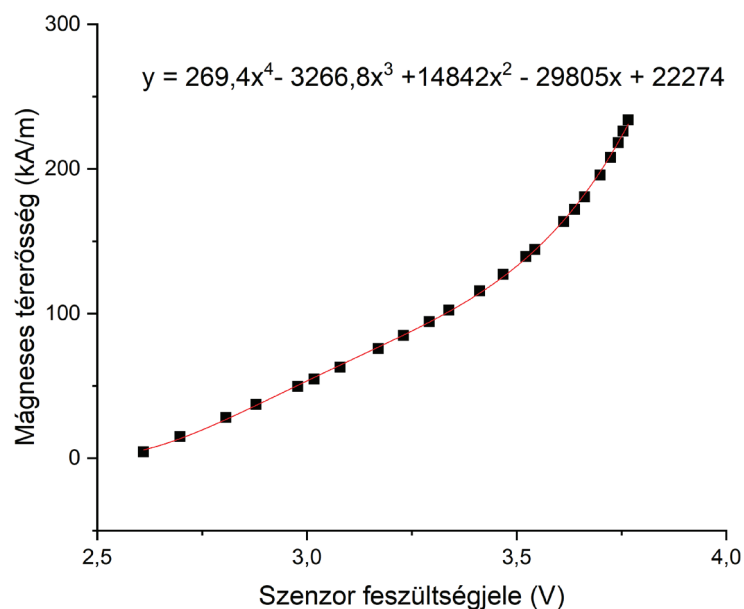
A mérések során hasznosnak bizonyult az AH49E Hall-szenzor is (14. ábra), melyet a mágneses térerősség mérésére használtam. Kis mérete, stabil és pontos kimeneti feszültsége is fontos volt a mérőrendszer felépítésekor. Mivel a szenzor bipoláris, a pozitív és negatív irányú térerősséget is érzékelni tudja.



14. ábra: AH49E Hall szenzor [16]

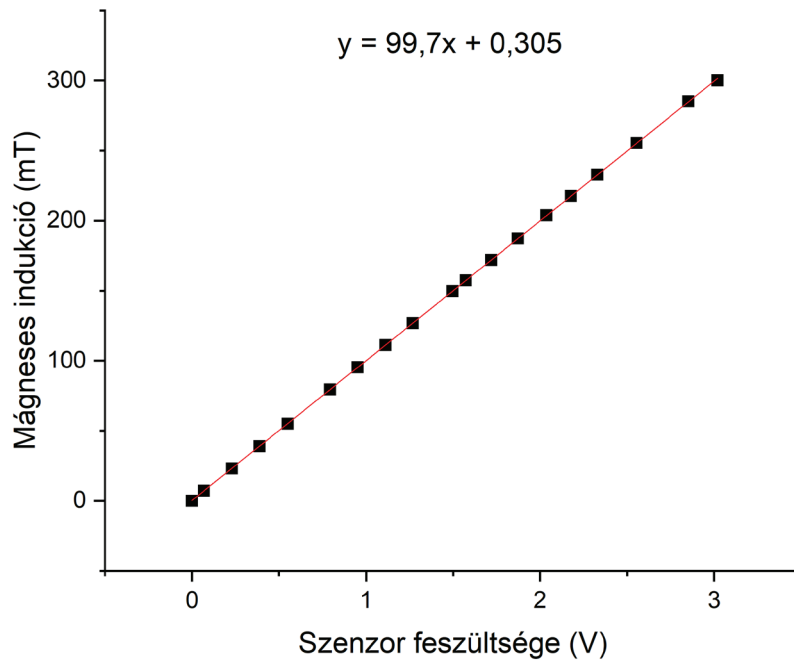
7.2. DC mérőrendszer kalibrálása

A mérőrendszer kalibrálásának két része közül az első, a Hall-szenzor kalibrálása volt. Ehhez szükségem volt a tápegységre, melynek értékeit manuálisan állítottam, miközben az adatgyűjtő kártya segítségével mértem a Hall-szenzor feszültségjelét. A feszültségeket lejegyeztem, majd a 15. ábrát készítettem a kapott adatokból. Ezen megjelenik az illetett negyedfokú polinom képlete is, melyet aztán a kalibráláshoz használtam. Az iparban elsősorban lineáris karakterisztikákat használnak, de szükségem volt a teljes méréstartományra.



15. ábra: Hall-szenzor kalibrálógörbe

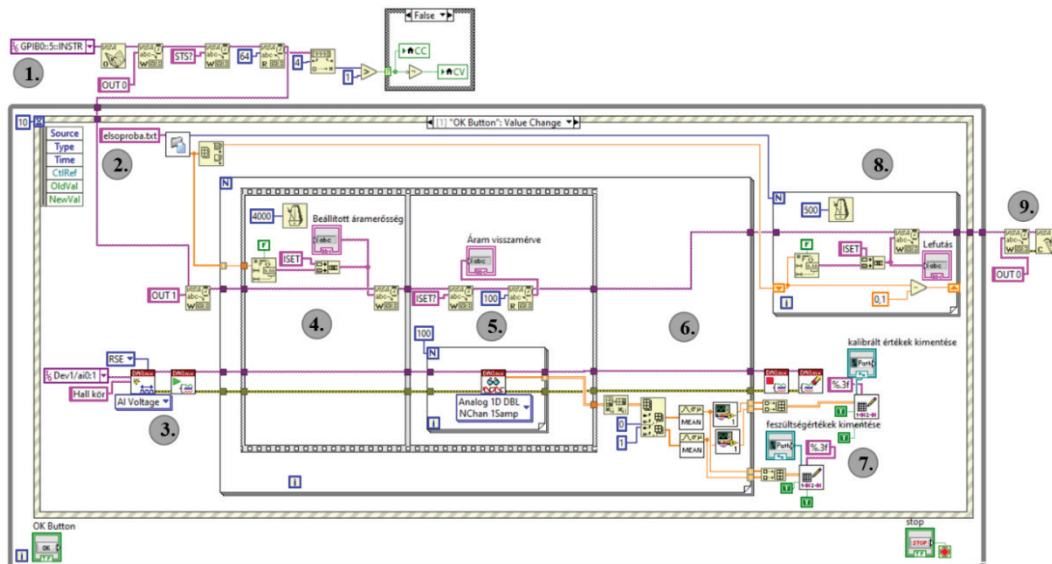
Ezután az FH 54-et kalibráltam be, melyet indukciómérésre alkalmaztam. A tápegységet ismét manuálisan állítottam, miközben néztem az FH 54 képernyőjén az értékeket, valamint feljegyeztem az analóg kimenetén megjelenő feszültségértékeket. A kapott táblázatból a 16. ábrát készítettem. A grafikonon az értékekre egy egyenest illesztettem, annak az egyenletét használtam fel a szenzor feszültségjeleinek fluxussűrűség-mennyiségre váltásakor.



16. ábra: FH 54 kalibrálógörbe

7.3. DC mérőrendszer LabVIEW környezete

A mérésben nagy szerepet játszott a LabVIEW program, mely az adatgyűjtő kártyán keresztül irányította a mérést. A program blokkdiagramja a 17. ábrán látható.



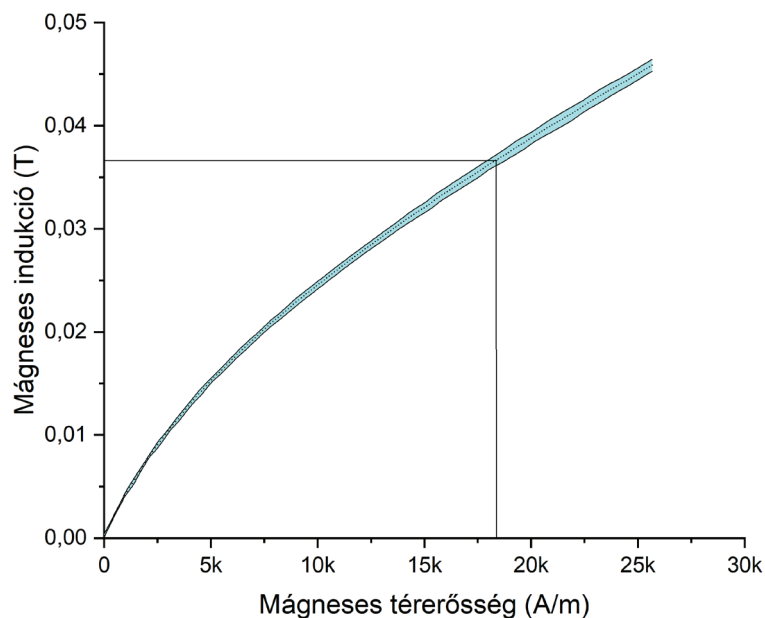
17. ábra: LabVIEW mérőprogram

A program az egyes számmal jelzett részén a tápegységgel hozta létre a kapcsolatot GPIB parancsok segítségével. A kettes számmal jelölt területen a program beolvassa egy .txt kiterjesztésű fájlt, melynek tartalma az általam beállítani kívánt áramerősségek listája. A harmadik részénél az adatgyűjtő kártyát konfiguráltam. Beállítottam egy feszültségmérő rutint, mely a Hall-szenzor feszültségértékeit olvassa majd, valamint egy másikat az FH 54-es analóg kimenetére. A négyes számú részben a fájlból beolvasott áramerősségeket állítja be a tápegység négy másodpercenként. Az ötös számmal jelölt területen a beállított áramerősségek visszamérése, valamint az adatgyűjtő kártya két

feszültségmérő köre mér száz párhuzamos adatot. A hatos résznél a mért feszültségeket átlagolja, majd az átváltást is elvégzi. A hetedik résznél a szenzorok elmentett feszültségértékeit, valamint a kalibráció segítségével kiszámolt adatokat egy .txt kiterjesztésű fájlba menti. Ezután, a nyolcadik résznél a tápegységet egy ciklus segítségével lassan visszaállítja nullára, ami azért fontos, mert a gyorsan csökkenő fluxus feszültséget indukál, ami tönkretelheti a tápegységet. A kilencedik részegységben a program lezárja a tápegységgel és az adatgyűjtő kártyával történő kommunikációt.

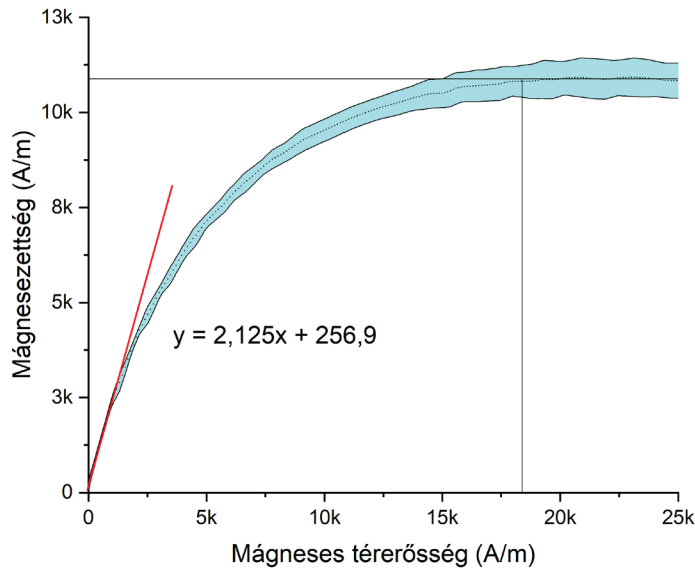
7.4. Eredmények és értékelésük

A mérés előtt fontos lépés volt a mágnes remanens terének nullázása, amit ellentétes irányú tér rövid idejű fenntartásával oldottam meg. A mérőprogram által mentett fájl adataiból készített görbéket átlagoltam. Mivel a mért mágneses térerősségek közötti lépésköz nem konstans, ezért lineáris interpolációt kellett alkalmaznom. Erre azért volt szükség, mert a Hall-szenzor jelének mérésekor a feszültségmérés zajterhelt volt. Ezt a hatást már a LabVIEW programom során, a mért értékek átlagolásával csökkentettem, de így is szükséges volt az adatok ilyen formájú tisztítása. A mérés relatív hibája 2,1% alatt volt.



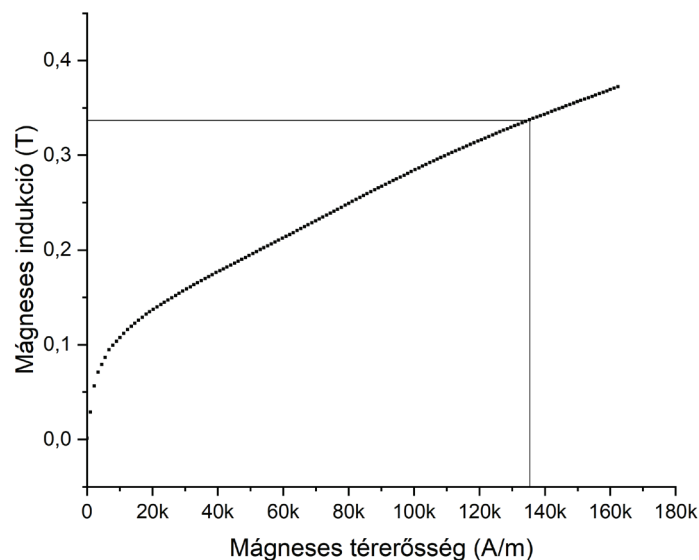
18. ábra: EMG700 B-H görbéje. Kék színnel a hibasávot jelöltem

Az adatokból mágnesezettséget is számoltam, aminek az eredményét a [19. ábrán](#) szemléltetem. Az ábráról leolvastam a telítési mágnesezettséget, mely 10883,5 A/m, 18386 A/m mágneses térerősségnél kezd el szaturálni. A [18. ábra](#) B-H görbéjén jelöltem az ehhez a térerősséghez tartozó mágneses indukció értékét, mely 36,59 mT. Az EMG700 ferrofluidum irodalmi értéke 35,5 mT. Az eltérés 3%. A pontatlanság oka lehet a szenzor hibája, a kalibráció pontatlansága, valamint a ferrofluidum párolgása miatt megnövekedett részecsk koncentráció.



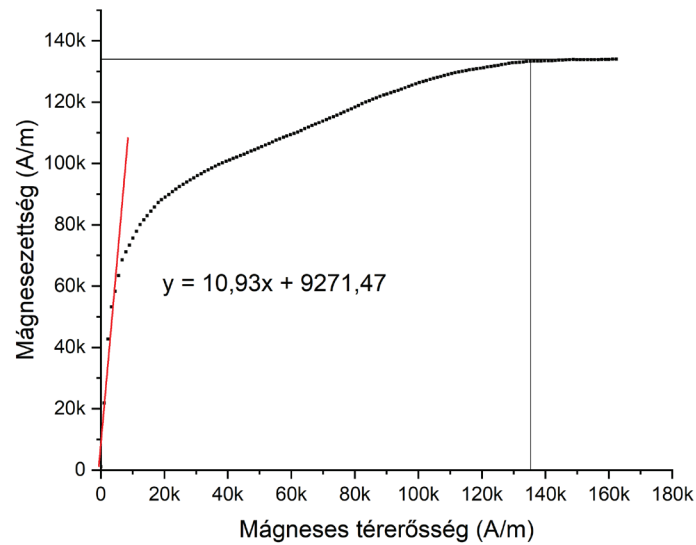
19. ábra: EMG700 M-H görbéje

A 19. ábrán lévő grafikonon az első pontokra egyenest illeszttem. Az egyenes egyenletének meredeksége megadja a kezdeti szuszceptibilitást, aminek az értéke a mérés alapján 2,1. Más elven működő mérőrendszerrel mérve, az érték 2,3 [18]. A különbség fő oka, hogy a kezdeti tartományban nem mértem eleget, így a nem lineáris adatsor két olyan pontjára állítottam az egyenest, amelyek túl távol estek egymástól. Az állított egyenes meredeksége ezért alacsonyabb lett a valódinál. A második probléma az elektromágnes mágneses terének nullázása volt, amit az adott eszközökkel nem lehetett pontosan beállítani. Tehát, a mérőrendszer ezen a téren fejlesztésre szorul. A fejlesztés egyik fele egyszerűbb, szoftveresen orvosolható a beállított áramerősségek lépésközének csökkentésével a mérés kezdeti fázisában. A második probléma bonyolultabb, mivel a tápegység polaritását kézzel kell átkötni az ellentétes felmágnesezéshez. Erre egy polaritásváltó építése, valamint egy ahhoz tartozó LabVIEW nullázó program jó megoldás lehetne. Második mérésként az F2 ferritrudat helyeztem a mérőeszközbe, melyet háromszor mértem le. Az adatokból meghatározott görbéket átlagolva a 20. ábrát kaptam.



20. ábra: Ismeretlen ferritrud B-H görbéje

A görbén nincs jelölve a hibasáv, mert kisebb, mint a szimbólumok nagysága. Az adatok egymáshoz képesti hibájának nagysága 0,31%. Az adatokból mágnesezettséget is számoltam, az M-H görbe a 21. ábrán látható.

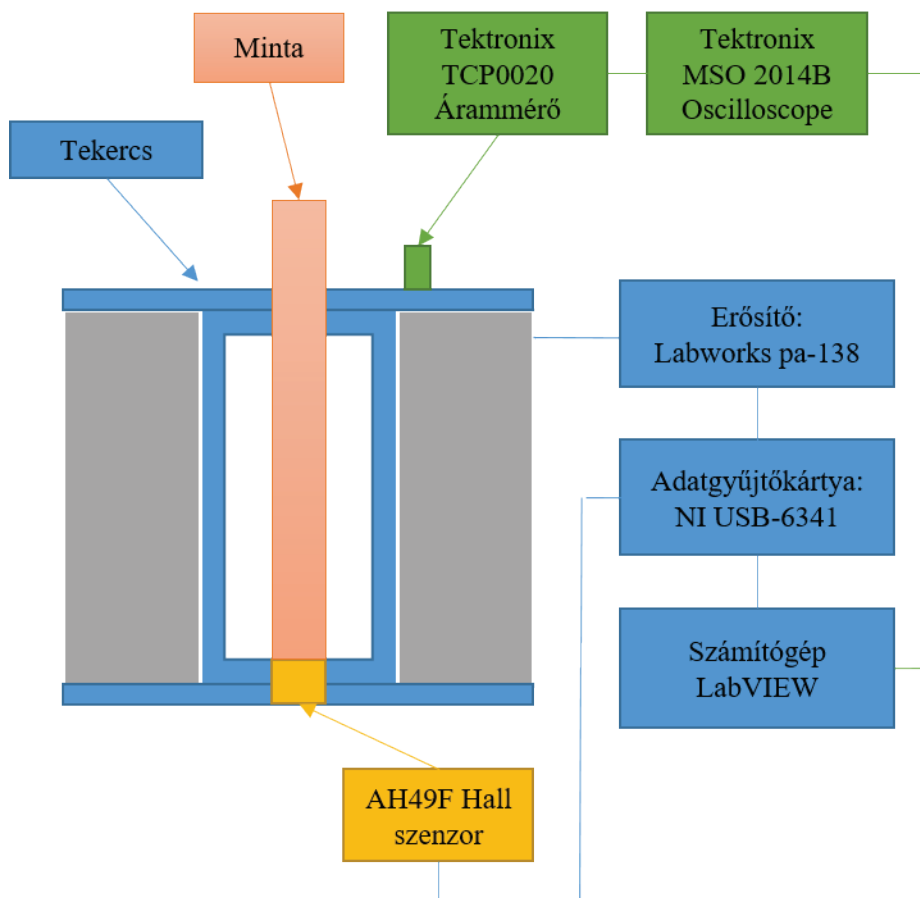


21. ábra: F2 ferritűd M-H görbéje

A 21. ábrán kirajzolt M-H görbén vonalakkal jelöltem a telítési mágnesezettséget, ami 133,9 kA/m, valamint a telítési mágnesezettséghez tartozó mágneses térerősséget, melynek értéke 135,4 kA/m. A [20. ábrán](#) jelöltem az ehhez a mágneses térerősséghez tartozó mágneses indukciót, ami 337 mT. A mérés adatainak elejére egyenest illesztettem. Az egyenes egyenletének meredeksége megadja a kezdeti mágneses szuszceptibilitást, ami 10,93. Ezen eredmények alapján kijelenthető, hogy a készülék alkalmas ferrofluidumok és ferritek B-H, illetve M-H görbéjének felvételére.

8. AC mérőrendszer ferromágneses anyagok vizsgálatára

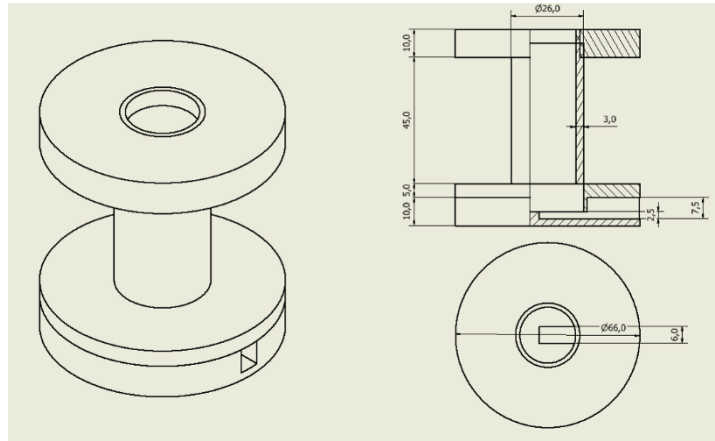
A ferromágneses anyagok méréséhez szükségem volt egy tekercsre, mely a váltakozó mágneses teret állította elő. A tekercs táplálásához egy Labworks pa-138 erősítőt használtam, melynek analóg bemenetére egy NI USB-6341 adatgyűjtő kártya szolgáltatja a szükséges szinuszjelet. Mivel az erősítő erősítési tényezője ismeretlen, a jel amplitúdóját vissza kellett mérni, amihez egy Tektronix MSO 2014B oszcilloszkópot alkalmaztam, mely USB kábellel csatlakozott a számítógéphez. Az adatgyűjtő kártya egyik analóg bemenetére egy AH49F Hall-szenzort kötöttem, ennek segítségével a mágneses indukciót mértem. Az adatgyűjtő kártyát a számítógéphez csatlakoztattam, melyen a LabVIEW szoftver biztosította a virtuális kezelőfelületet. Az összeállítás sematikus vázlatát a 22. ábrán látható.



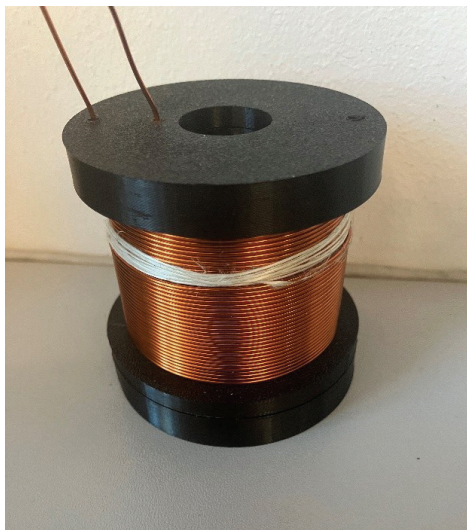
22. ábra: AC mérőrendszer ferromágneses anyagok vizsgálatára

8.1. AC mérés eszközei

Az AC mérőeszköz felépítéséhez szükségem volt egy tekercsre a váltakozó mágneses tér létrehozásához. A tekercs csévetestének tervrajza a [23. ábrán](#), míg a megvalósított eszköz a [24. ábrán](#) látható. A tervezéskor figyelembe vettem a mérés egyedi szükségleteit is. A csévetest alá jelezhető szenzortálcát illesztettem. A tekercs 600 menetnyi, 1 mm vastagságú rézhuzalból készült, így körülbelül 7,5 A átfolyó árammal terhelhető. Ezen adatok alapján a tekercssel elérhető maximális térerősség 100 kA/m.



23. ábra: Tekercs csévetestének tervrajza



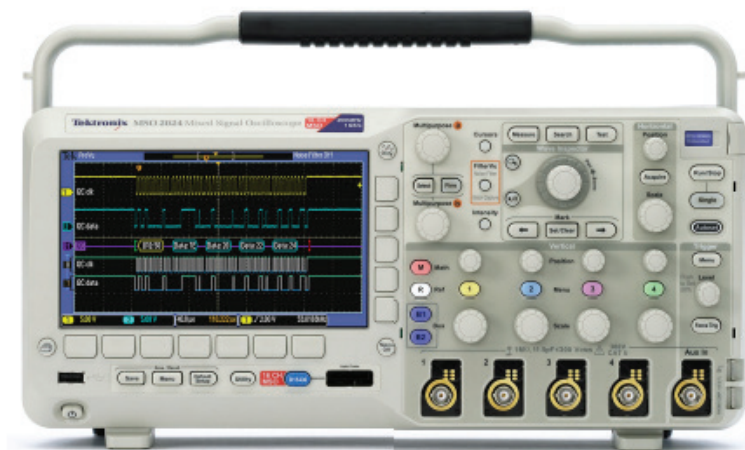
24. ábra: Tekercs az AC mérőelvhez

Az adatgyűjtő kártya analóg kimenetén lévő váltakozó feszültséjelet egy Labworks pa-138 léghűtéses erősítővel erősítettem (25. ábra) azért, hogy a mágneses tér nagyobb legyen.



25. ábra: Labworks pa-138 erősítő [20]

A tekercs vezetékén keresztülfolyó áramot mérni kellett a térerősség pontos meghatározásához. Erre a célra egy Telektronix MSO 2014B oszcilloszkópot használtam (26. ábra), melyhez egy Telektronix TCP0020 árammérőt csatlakoztattam (27. ábra). Az oszcilloszkóp közvetlenül áramerősség értéket jelenített meg a kijelzőn.



26. ábra: Telektronix MSO 2014B oszcilloszkóp [21]

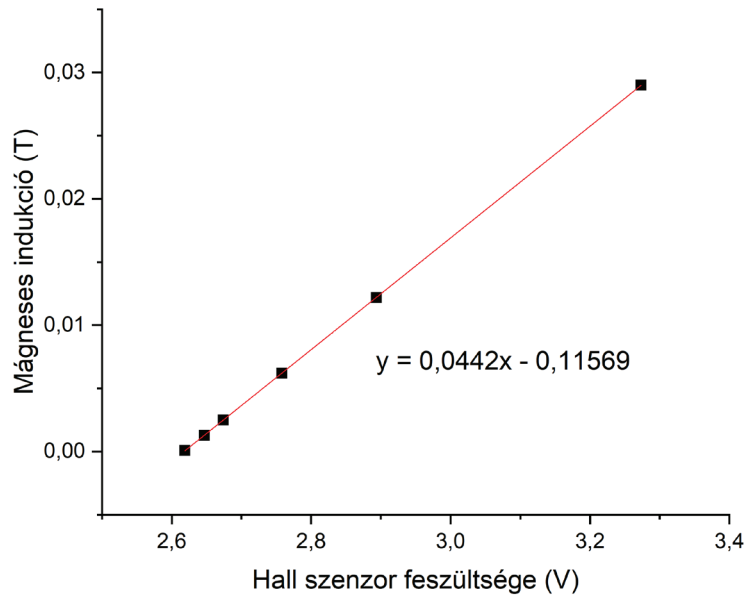


27. ábra: Telektronix TCP0020 árammérő [22]

A mágneses indukciót egy AH49F Hall-szenzorral mértem, melynek méréstartomány ± 80 mT. Ezen szenzorok előnye az alacsony fogyasztás, és zajszint, de magas pontosság.

8.2. AC mérőrendszer kalibrálása

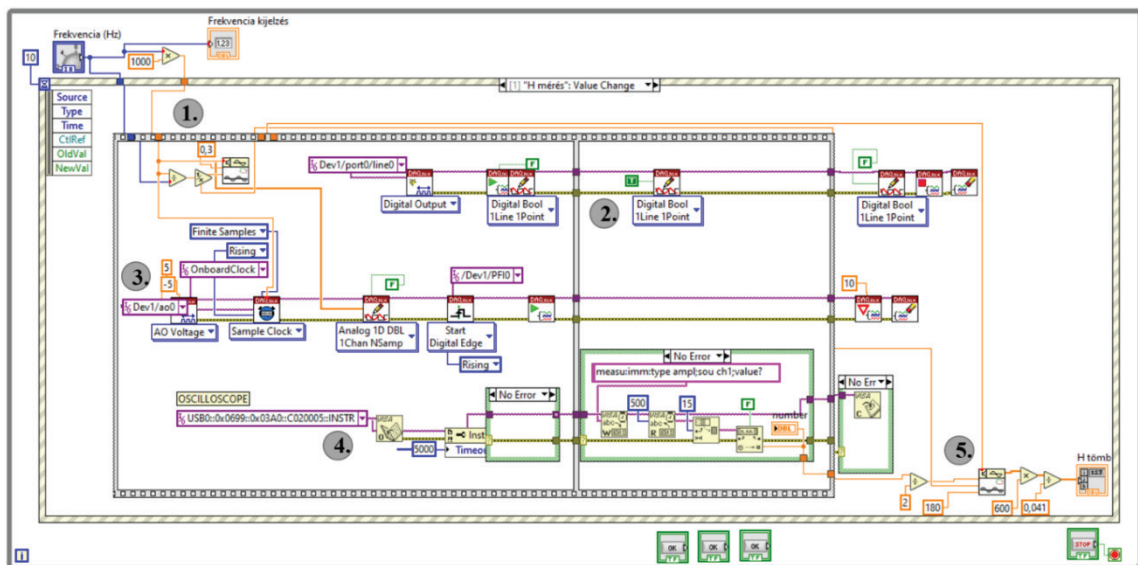
A mérőrendszer kalibrálásában segítségemre volt az FH 54. Miközben állítottam az erősítőt, leolvastam az FH 54 által kiírt értéket, valamint feljegyeztem a szenzor feszültségét is. A kalibrálóadatokról a 28. ábrán látható grafikont készítettem. A pontokra illesztett egyenesek egyenletének segítségével, a LabVIEW programom a nyers szenzoradatokat térerősség és mágneses indukció mértékegységekre tudta váltani.



28. ábra Hall-szenzor kalibrálása mágneses indukció mérésére

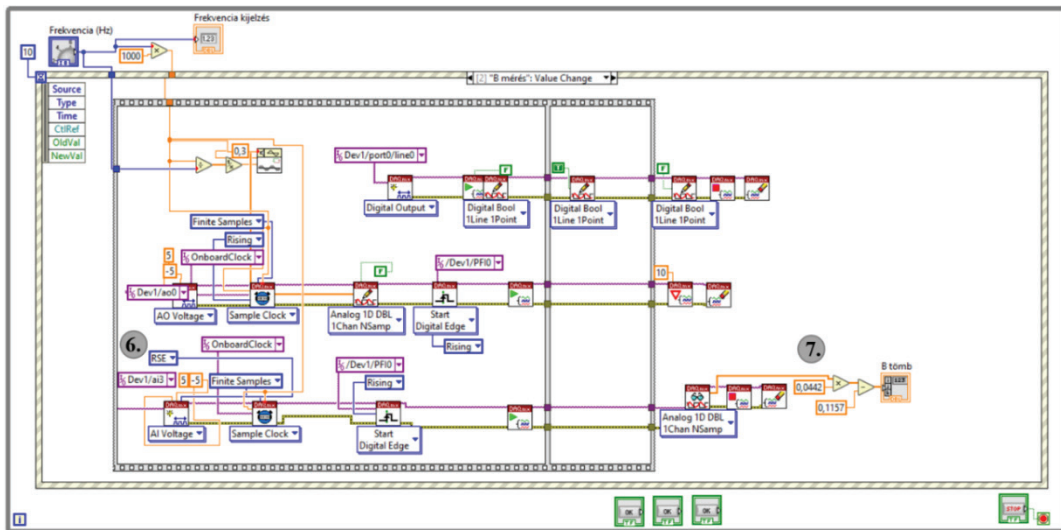
8.3. AC mérőrendszer LabVIEW környezetébe

A mérés időzítéseit, feladatait a LabVIEW program vezérelte az adatgyűjtő kártya segítségével. A program blokkdiagramja a 29. ábrán látható.



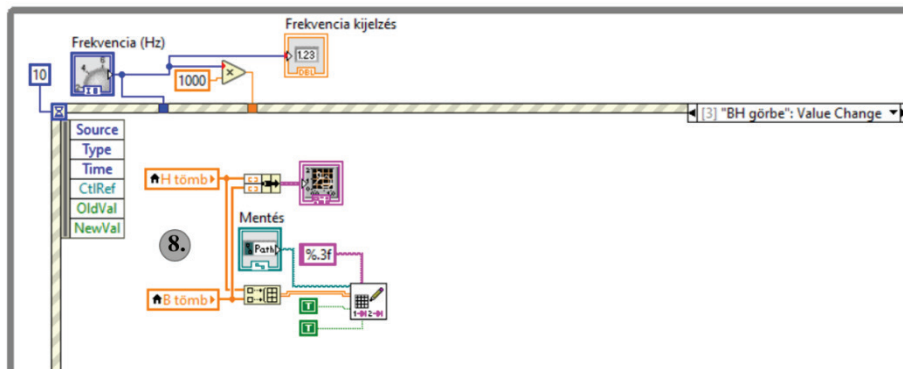
29. ábra: AC mérőrendszer LabVIEW program mágneses térerősségmérés

A program az egyes számmal jelölt részén a frekvencia beállításához szükséges számolásokat végzi el, majd legenerálja a megfelelő mennyiségű pontból, ciklusból álló szinuszelet. A kettes részen egy digitális trigger jelet állít elő, ami a harmadik részt indítja el. Ebben a részben először beállítja az analóg kimenetet, majd a trigger megérkezését követően az analóg kimenetre küldi az egyes részben generált szinuszelet. Az analóg kimenetről a jel az erősítőbe kerül, melynek az erősítési tényezője ismeretlen. A négyes számmal jelzett programrészben, egy oszcilloszkóp segítségével leméri az erősített jel amplitúdóját. Ennek segítségével az ötödik résznél az új amplitúdóval, azonos minta- és ciklusszámmal, valamint frekvenciával generál egy másik szinuszelet. Ebből a jelből a tekercs adatainak segítségével megkapjuk a térerősségek tömbjét.



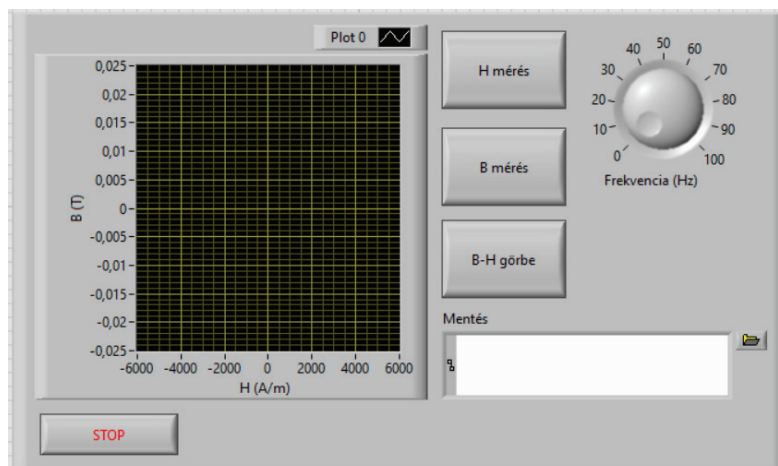
30. ábra: AC mérőelv LabVIEW program mágneses indukció mérés

Indukcióméréskor a program az első három pont megismétlésével indul, majd a hatodik résznél beállítja az analóg bemenetet, melyre a Hall-szenzor van kötve. A digitális triggerjel beérkezésekor mérni kezdi a mágnesesindukció-jelet. A hetedik részben ezt a jelet átszámolja, majd tömbbe helyezi (30. ábra).



31. ábra: AC mérőelv LabVIEW program adatok kimentése és görbe kirajzolása

A nyolcadik résznél a két tömböt összefűzi a program, kirajzolja a belőlük kapott görbét az előlapi grafikonon, majd kimentí az előre megadott címre (31. ábra).

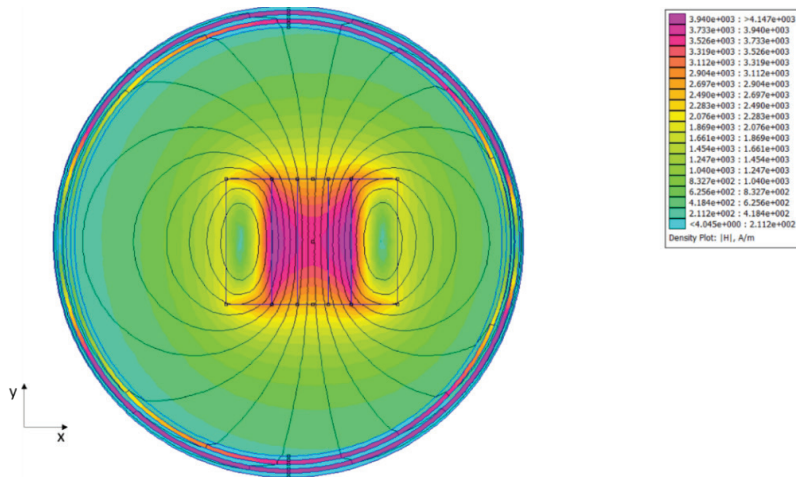


32. ábra: AC mérőprogram LabVIEW előlap

Az előlapon állítható a váltakozó áram frekvenciája. Az adatok kimentéséhez szükséges panel, valamint az üzemeltetéshez szükséges gombok is itt kaptak helyet. Az előlap fontos eleme az a grafikon is, melyen a program ábrázolja a mért adatokat (32. ábra).

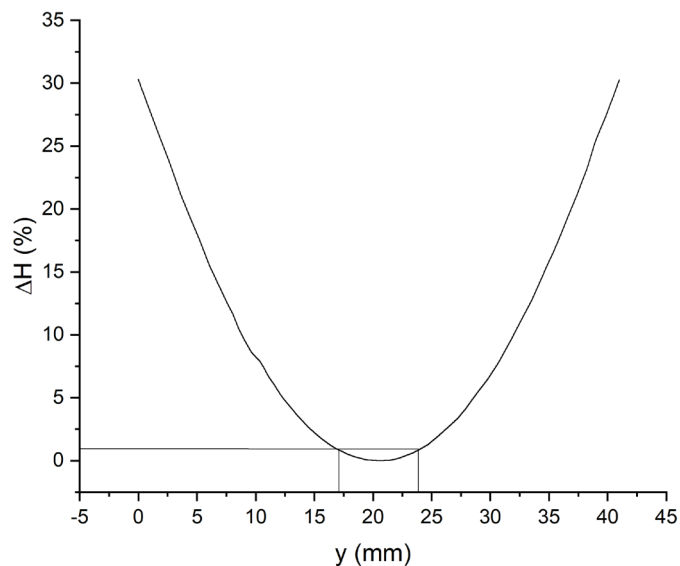
8.4. Eredmények és értékelésük

A mérés előtt egy mágneses szimulációkra specializált program (FEMM 4.2-es verzió) segítségével lemodelleztem a mérési összeállítást. A szimuláció első felében a tekercsbe nem tettem ferritrudat, és úgy ábrázoltam a mágneses térerősséget. A 33. ábrán látszik, hogy a térerősség nem homogén a tekercs belsejében.



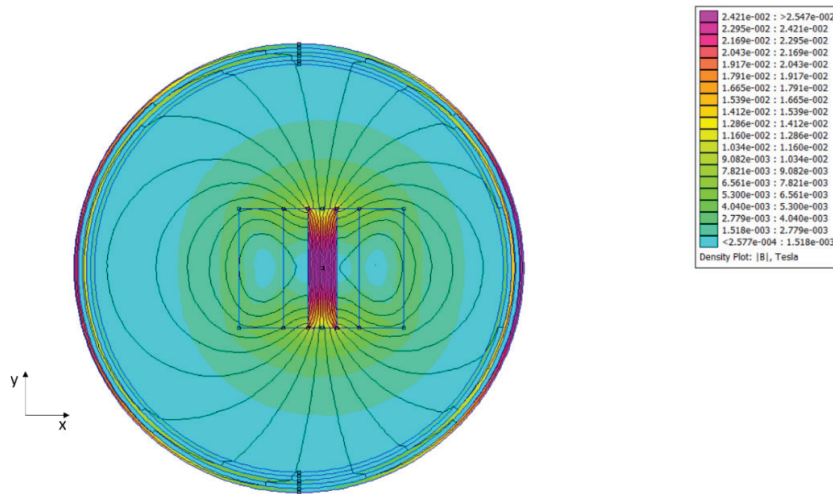
33. ábra: Mágneses térerősség szimulációja a tekercsben

A tekercs vertikális középvonalán, egy egyenes mentén mértem a térerősség változását. A térerősség változása a 34. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy a tekercs közepén van egy körülbelül 1 cm hosszúságú rész, ahol a térerősség, megfelelő közelítéssel, homogénnek tekinthető.



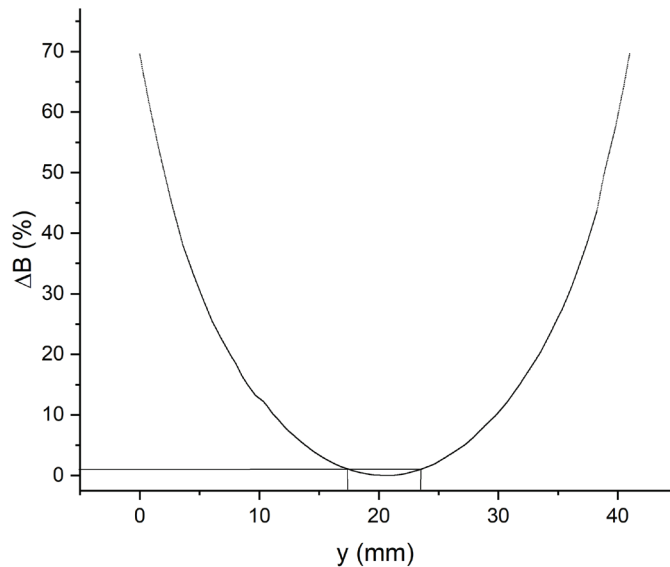
34. ábra: Mágneses térerősség maximumtól eltérése a tekercs vertikális középvonala mentén

A szimuláció értelmezése után arra a következtetésre jutottam, hogy a mágneses térerősséget a tekercs közepén érdemes mérni. Ehhez a [34. ábrán](#) be is jelöltem azt a tartományt, ahol az eltérés maximuma 1%. Ezután, a szimulációt úgy futtattam le, hogy benne volt a virtuális ferritrúd. Ekkor a mágneses indukciót ábrázoltattam.



35. ábra: Mágneses indukció szimulációja a mérés során

A szimuláció során, felvettem a ferrit vertikális középvonala mentén a mágneses indukciót, aminek az eredménye a 36. ábrán látható.



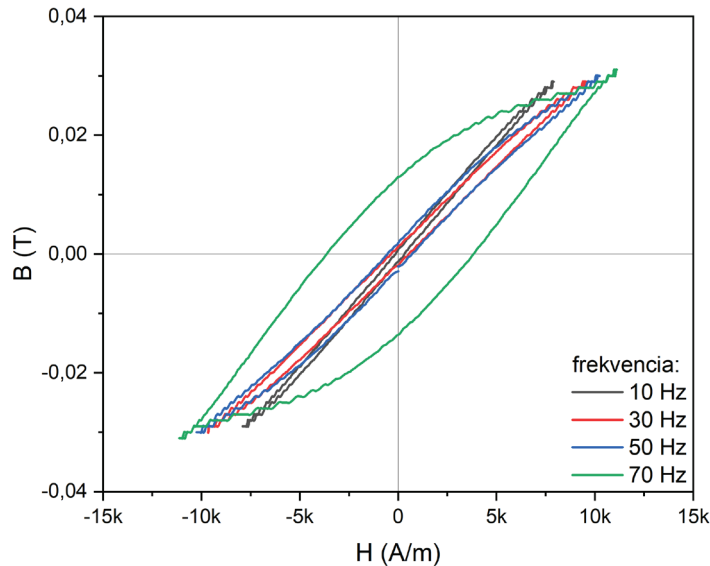
36. ábra: Mágneses indukció maximumtól eltérése a ferritrúd vertikális középvonala mentén

A szimuláció alapján kijelenthető, hogy a mágneses indukció mérése a ferritrúd közepén lenne ideális. A 36. ábrán jelöltem a maximum 1% eltéréshez tartozó intervallumot. Mivel ez a tartomány a ferritrúd közepén található, destruktív módszerek alkalmazása nélkül csak úgy lehetne ezt megoldani, ha két ugyanolyan minta közé helyeznénk a Hall-szenzort. Tehát, a mérés ezen a téren fejleszhető.

A vizsgálat során, három térerősségen mértem le három anyag tulajdonságait, négy különböző frekvencián. A mérési frekvenciák 10 Hz, 30 Hz, 50 Hz és 70 Hz voltak. Mivel az erősítő erősítési tényezője ismeretlen, valamint nem állítható pontosan, ezért az egyes térerősségeken az összes

mérést egyszerre kellett végrehajtani. A három különböző térre kis, közepes és nagy térerősségként fogok hivatkozni. A kis térerősség frekvenciától függően $\pm 5,7$ kA/m és $\pm 8,1$ kA/m, a közepes térerősség frekvenciától függően $\pm 7,5$ kA/m és $\pm 11,0$ kA/m, és a nagy térerősség frekvenciától függően $\pm 10,0$ kA/m és $\pm 13,0$ kA/m között van.

Elsőként az F2 ferrit mágneses tulajdonságainak frekvenciafüggését határoztam meg. Azonos térerősség mellett, több frekvencián is lemértem az F2 ferrittrudat.

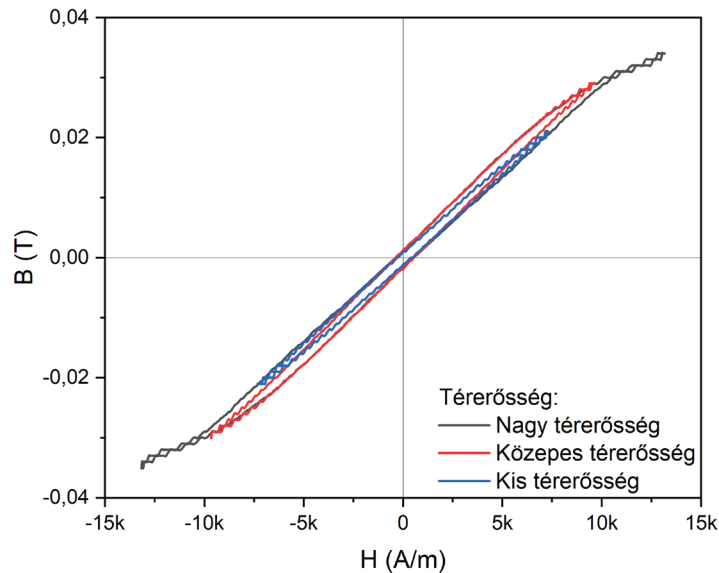


37. ábra: F2 ferrit mágneses tulajdonságai frekvenciák szerint közepes térerősség esetén

A 37. ábrán látható, hogy a frekvencia növekedésével a hiszterézisgörbe nyílik, és változik a telítési szakasz, tehát a nagyobb frekvenciákon máshogy kezd el viselkedni a tekercs, valamint a ferrit is. A hiszterézisgörbe tengelymetszeteit leolvastva láthatjuk, hogy a remanens mágnesesség és a koercitív erő abszolútértéke sem egyezik meg a tengelyek két oldalán. Megállapítható, hogy a mérés kétirányú offszet hibával terhelt, ami következhet mind a szenzor, mind az erősítő hibájából. A pontos érték meghatározásához, a két adat abszolútértékes számtani közepét fogom meghatározni.

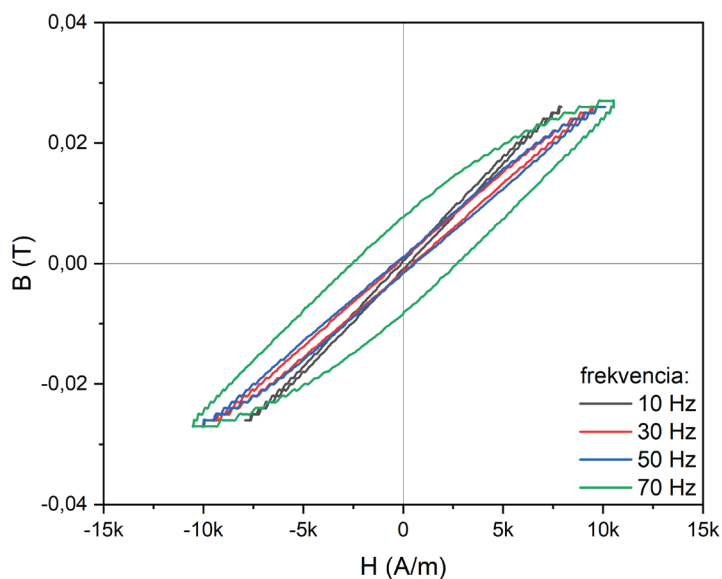
3. táblázat: F2 ferrit remanens mágnesessége valamint koercitív ereje a frekvenciák változtatásával

Frekvencia [Hz]	Remanens mágnesesség [mT]	Koercitív erő [A/m]
10	1,1	229,7
30	1,6	456,3
50	2,2	629,0
70	74,7	3742,7



38. ábra: F2 ferrit mágneses tulajdonságainak mágneses térerősségfüggése

Ezután vizsgálatot végeztem 30 Hz frekvencia mellett, több különböző térerősségen. A 38. ábrán látható, hogy a térerősség növekedésével változik a hiszterézisgörbe alakja. A feketével jelölt nagy térerősség mellett már a telítési mágnesezettség is látszik kezdetlegesen. Az F1 ferrittel is elvégeztem a frekvenciavizsgálatot, melynek során azonos térerősség mellett, négy különböző frekvencián mértem, majd az adatokat egy grafikonon ábrázoltam.



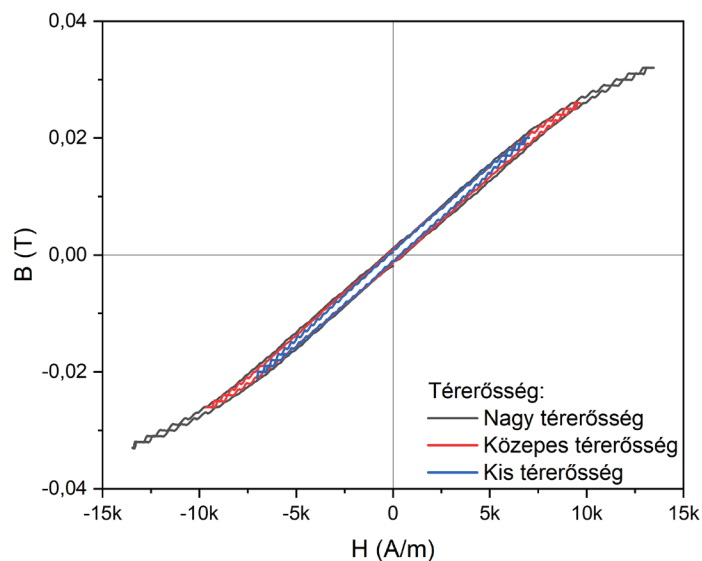
39. ábra: F1 ferrit mágneses tulajdonságainak frekvenciafüggése közepes térerősség mellett

Látható, hogy a 39. ábrán is érvényesek a korábban megállapított tulajdonságok, miszerint a frekvencia növekedésével a hiszterézisgörbe nyílik, valamint az óramutató járásának megfelelő irányban elfordul.

A grafikonról leolvasott adatokat a 4. táblázatban foglaltam össze.

4. táblázat: F1 ferrit remanens mágnesessége és koercitív ereje a frekvenciák szerint

Frekvencia [Hz]	Remanens mágnesesség [mT]	Koercitív erő [A/m]
10	0,7	186,7
30	1,1	392,0
50	1,3	492,8
70	8,0	2630,9

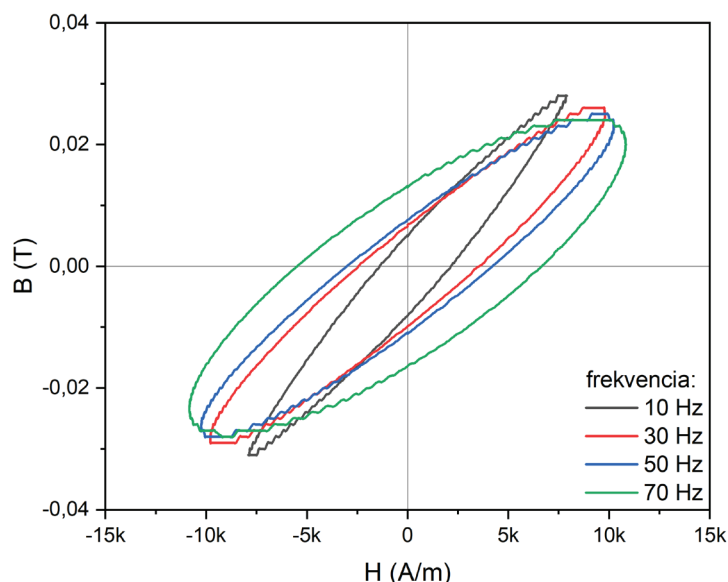


40. ábra: F1 ferrit mágneses tulajdonságainak mágneses térerősségfüggése 30 Hz-en

Ezt követően, 30 Hz frekvencia mellett, több különböző térerősségen végeztem megfigyelést. Az előző ferrithez hasonlóan, a 40. ábrán is megfigyelhető, hogy a térerősség növekedésével fokozatosan hosszabb lesz a hiszterézisgörbe és egyre jobban látható, hogy telítésbe fog átmenni a mágnesezettség.

A két ferritrúdról kijelenthető, hogy nagyon hasonlóan viselkednek mind a frekvencia, mind a térerősség változásának hatására. A 3. és 4. táblázat adatai alapján látható, hogy az F2 ferritrúd nagyobb remanens mágnesezettséggel és koercitív erővel rendelkezik. Ez alapján megállapítható, hogy az F2 ferritrúd mágneses szempontból keményebb, mint az F1 ferritrúd.

A V1 vasrúd mágneses tulajdonságait is megvizsgáltam négy különböző frekvencián, azonos térerősség mellett.

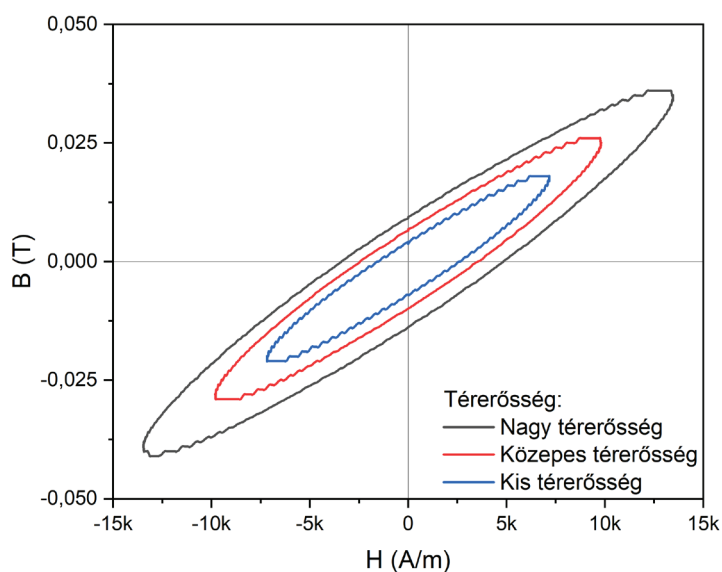


41. ábra: V1 vasrúd mágneses tulajdonságainak frekvenciafüggése

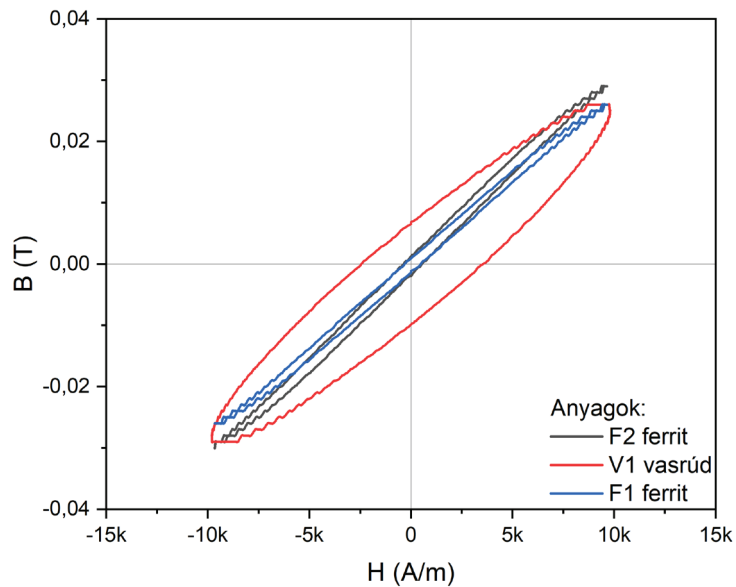
A 41. ábra alapján megállapítható, hogy a vasrúd hiszterézisgörbéje sokkal nyíltabb, mint az eddigi ferriteké, ezt az 5. táblázat adatai is megerősítik. A grafikonon azonban az is látható, hogy a növekvő frekvencia ebben az esetben is egyre nagyobb hiszterézist okoz, valamint annak forgató hatása is észrevehető.

5. táblázat: V1 vasrúd remanens mágnessége és koercitív ereje frekvenciák szerint

Frekvencia [Hz]	Remanens mágnesség [mT]	Koercitív erő [A/m]
10	6,6	1763,4
30	8,3	3015,7
50	9,3	3627,7
70	147	6077,1



42. ábra: V1 vasrúd mágneses tulajdonságainak mágneses térerősségfüggése 30 Hz-en



43. ábra: Anyagok összehasonlítása 30 Hz frekvencián közepes térerősség mellett

Végezetül összehasonlítottam a három anyagot, amihez mindegyik anyag 30 Hz frekvencián és közepes térerősségen mért adatait használtam. A 43. ábrán látható, hogy a vasrúd hiszterézisgörbéje nyíltabb, mint a ferriteké, ami azt mutatja, hogy nagyobb a remanens mágnesezettsége, valamint a koercitív ereje. Ezen tulajdonságai miatt hívjuk kemény mágneses anyagnak. A két ferrit remanens mágnesezettsége és koercitív ereje kisebb, ezért ezeket lágy mágneses anyagoknak nevezhetjük.

9. Összefoglalás

A vizsgálati eredményeimből kitűnik, hogy az általam épített kétfajta mérőberendezés alkalmas a mágneses anyagok B-H görbéjének felvételére. Ahogy a célkitűzésben is említettem, célom volt, hogy az egyik berendezés megfelelő legyen ferrofluidumok mágneses tulajdonságainak meghatározására. A DC mérésénél az EMG700-as ferrofluidum szaturációs térerősségéhez tartozó mágneses indukcióra 36,59 mT-t kaptam eredményül, ami 3%-os eltérést mutat az irodalmi értéktől, míg a kezdeti szuszceptibilitásra 2,1 lett az eredmény. Az F2 ferrit DC mérésekor a szaturációs mágneses térerősséghez tartozó mágneses indukció értéke 337 mT, míg a kezdeti szuszceptibilitásé 10,93. Az AC módszer esetében, az ismert mágneses tulajdonságokkal rendelkező ferritrúd eredményeit a 4. táblázatban foglaltam össze.

A DC meghatározásánál, a kezdeti szuszceptibilitás mérése fejleszthető, többek között a polaritásváltó beépítésével, aminek a segítségével az elektromágnes mágneses tere kikapcsolt állapotban nullára csökkenthető. Az AC mérését az elrendezés módosításával lehetne pontosítani úgy, hogy a szimulációk alapján a mágneses indukció meghatározását két azonos minta közé helyezett szenzorral végezzük el.

Irodalomjegyzék

- [1] SCHERER, C., FIGUEIREDO NETO, A. M., 2005. Ferrofluids: properties and applications. Brazilian Journal of Physics. Vol. 35, o. 718–727. DOI 10.1590/S0103-97332005000400018.
- [2] VALENZUELA, Raúl, 2012. Novel Applications of Ferrites. Physics Research International. Vol. 2012, o. 1–9. DOI 10.1155/2012/591839.
- [3] KOLE, Madhusree, KHANDEKAR, Sameer, 2021. Engineering applications of ferrofluids: A review. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Vol. 537, o. 168222. DOI 10.1016/j.jmmm.2021.168222.
- [4] KAISER, R., MISKOLCZY, G., 1970. Some applications of ferrofluid magnetic colloids. IEEE Transactions on Magnetics. Vol. 6, sz. 3, o. 694–698. DOI 10.1109/TMAG.1970.1066834.
- [5] BOZORTH, R. M., 1947. Magnetism. Reviews of Modern Physics. Vol. 19, sz. 1, o. 29–86. DOI 10.1103/RevModPhys.19.29.
- [6] BENZ, Manuel, 2023. Superparamagnetism, N. Oxford English Dictionary. DOI 10.1093/oed/6333794639.
- [7] PLOUFFE, Brian D, MURTHY, Shashi K, LEWIS, Laura H, 2015. Fundamentals and application of magnetic particles in cell isolation and enrichment: a review. Reports on Progress in Physics. Vol. 78, sz. 1, o. 016601. DOI 10.1088/0034-4885/78/1/016601.
- [8] <https://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html>
[2025. április 23.]
- [9] OHL, Brandon. B-H vs M-H Hysteresis Loops: Magnetic Induction vs Magnetization (Similarities, Differences, and Points on the Graph). Materials Science & Engineering Student [online]. Elérés forrás : <https://mstudent.com/b-h-vs-m-h-hysteresis-loops-magnetic-induction-vs-magnetization-similarities-differences-and-points-on-the-graph/> [2025. április 23.].
- [10] CULLITY, B. D., GRAHAM, Chad D., 2009. Introduction to magnetic materials. Second edition. Piscataway : IEEE Press. ISBN 9780471477419.
- [11] WEBSTER, John G. (szerk.), 2000. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. 1. Wiley. ISBN 9780471346081.
- [12] FRANCO, Victorino, 2021. Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization. Cham : Springer International Publishing AG. ISBN 9783030704421.
- [13] K GRAMM, L LUNDGREN, O BECKMAN, 1976. SQUID Magnetometer for Magnetization Measurements. Physica Scripta. Vol. 13, sz. 2, o. 93–95. DOI 10.1088/0031-8949/13/2/004.
- [14] <https://ferrofluid.ferrotec.com/products/ferrofluid-emg/water/emg-700-sp/>
[2025. április 23.]

[15] <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/001565952DS01/adatlap-1565952-ferritrud-tru-components.pdf>

[2025. április 23.]

[16] <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/608101/DIODES/AH49E.html>

[2025. április 23.]

[17] <https://www.keysight.com/us/en/support/6030A/system-autoranging-dc-power-supply-200v-17a.html>

[2025. április 23.]

[18] MÁTÉ, Ferenc, 2024, DC mágneses szuszceptométer fejlesztése mágneses folyadékok vizsgálatára, TDK Dolgozat, Pannon Egyetem

[19] <https://www.magnet-physik.de/wp-content/uploads/2023/03/18658302-FH-54-e-3088.pdf>

[2025. április 23.]

[20] https://www.labworks-inc.com/all_products/amps/pa_138_Details.htm

[2025. április 23.]

[21] <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/TEKTRONIX-MSO2014-Datasheet.pdf>

[2025. április 23.]

[22] <https://docs.rs-online.com/6779/0900766b812d1841.pdf>

[2025. április 23.]

Pannon Egyetem
Intézményi Tudományos Diákköri Konferencia
2025

**Aeroszol minták ^{210}Po és ^{210}Pb
koncentrációjának meghatározása**

Készítette: Vincze Dániel
Vegyészmérnök mesterszak
Mérnöki Kar, Radiokémiai és Radioökológiai Intézeti Tanszék
Témavezető: dr. Tóth-Bodrogi Edit



Aeroszol minták ^{210}Po és ^{210}Pb koncentrációjának meghatározása

*Készítette: Vincze Dániel,
vegyésszépmérnöki mesterképzés
Mérnöki Kar, Bio-, Környezet- és Vegyészépmérnöki Kutató Fejlesztő Központ,
Radiokémiai és Radioökológiai Intézeti Tanszék*

Témavezető: Dr. Tóth-Bodrogi Edit

Absztrakt

Az embert folyamatosan éri sugárzás. Ennek legnagyobb része természetes háttérsugárzásból ered, forrása lehet földkéregi (terresztriális) eredetű, vagy világűrűből származó kozmikus sugárzás. A környezeti sugárzás területenként eltérő lehet, mértékét több tényező is befolyásolja, például a tengerszint feletti magasság vagy a talajösszetétel.

A háttérsugárzást antropogén hatások növelhetik. Megemelkedett szintje az emberi szervezetre egészségügyi kockázatot jelenthet, így a környezeti elemek monitorozása az emberi egészség védelmében is fontos feladat. A ^{238}U izotópból kiinduló bomlási sor a földkéregben található bomlási sorok egyike.

Az ^{238}U leányelemei közé tartozik a ^{210}Pb béta-bomló radionuklid és a ^{210}Po izotóp, mely alfa-sugárzó. Alfa- és béta-sugárzó izotópok révén külső sugárterhelést nem jelentenek, azonban a szervezetbe bekerülve növelhetik a káros hatások kialakulásának valószínűségét.

Munkám során, reszuszpendált aeroszol minták ^{210}Po és ^{210}Pb aktivitás-koncentrációját vizsgáltam. Célom, hogy rávilágítsak arra, miként befolyásolják ezt különböző tényezők, például közlekedés, építkezés, esőzés. A mintákat kombinált savas feltárással készítettem elő a méréshez. Az oldatokból a ^{210}Po aktivitás-koncentrációját, spontán depozíciót követően, félvezető (PIPS) detektoros alfa-spektrometriai módszerrel mértem, majd a radionuklidok közötti szekuláris egyensúly beálltát követően, a ^{210}Pb aktivitás-koncentrációját határoztam meg.

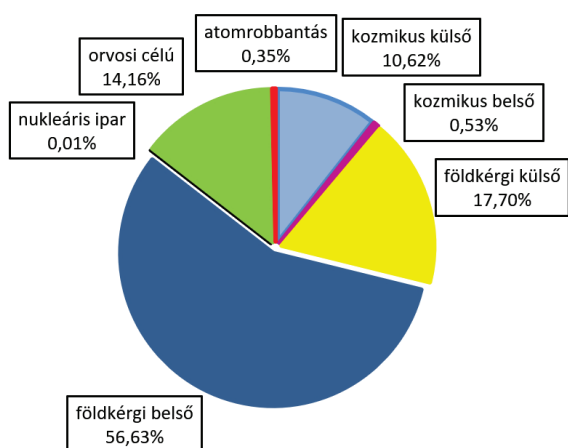
Kulcsszavak: ^{210}Pb , ^{210}Po , aeroszol minta, alfa-spektrometria, szekuláris egyensúly

1. Bevezetés

A természetes háttérsugárzásból származó, embert érő sugárterhelés éves világátlagosan 2,4 mSv [1], forrása a földkéreg és a világűr.

A földkéregi (terresztriális) sugárzás nagy részét a radioizotópok közül az ^{238}U , a ^{232}Th bomlási sorok elemei, valamint a hosszú felezési idejű - például a ^{40}K - izotópok teszik ki. Az űrből származó kozmikus eredetű sugárzások a Napból és a Galaxisból erednek, és a légkör elnyelőképesége miatt intenzitásuk függ a tengerszint feletti magasságtól, valamint a szélességi körtől. A radioaktív anyagok körülvesznek minket, külső sugárterhelést okoznak, továbbá a szervezetünkbe kerülve már belső sugárterhelést jelentenek.

A mesterséges sugárterhelés abból ered, hogy egyre szélesebb körben használunk ionizáló sugárzást kibocsátó forrást és berendezést elsősorban orvosi, ipari, energetikai és kutatási célból. Ide tartozik még a nukleáris fegyverkezésből származó sugárterhelés is. Így a mesterséges eredetű sugárzásnak való kitettség, melynek átlagos éves értéke 0,4 mSv, és területenként jelentősen eltérhet, akár a 3-4 mSv-t is elérheti [2]. Ennek legnagyobb része az orvosi célú alkalmazásokból eredő sugárzáskitettség. Az 1. ábrán, az embert érő sugárterhelés forrásai láthatók.



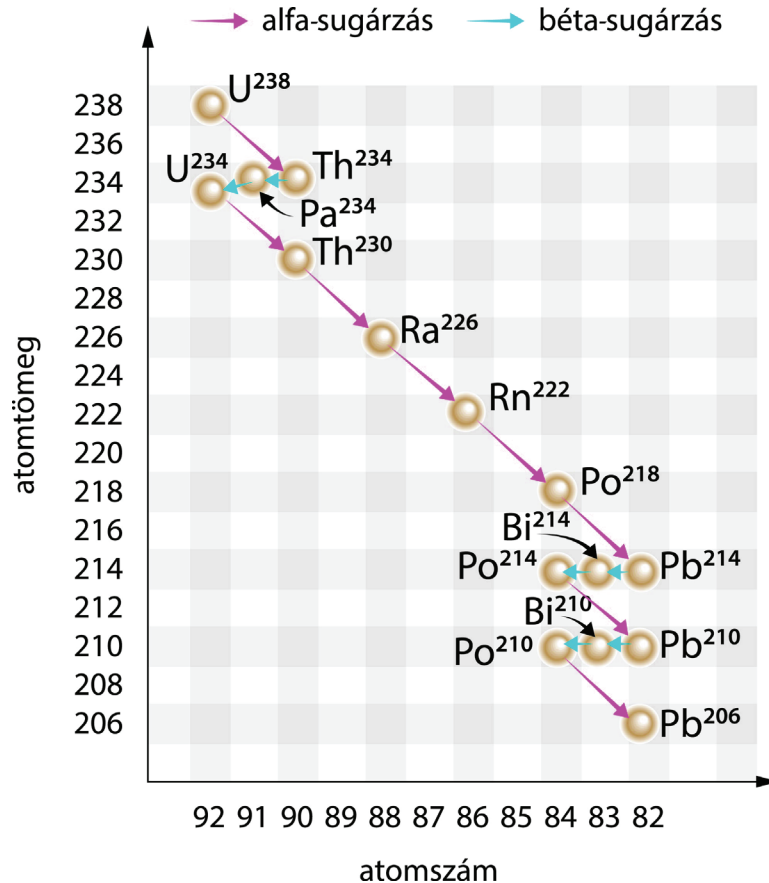
Természetes	2,4 mSv/év
kozmosz külső	0,3 mSv
kozmosz belső	0,015 mSv
földkérgi külső	0,5 mSv
földkérgi belső	1,6 mSv
Mesterséges	0,4 mSv/év
nukleáris ipar	0,0002 mSv
orvosi célú	0,4 mSv
atomrobbantás	0,01 mSv

1. ábra: A Föld népességének főbb sugárterhelési forrásai és átlagértékei [1]

Ez alapján az embert érő sugárterhelés értéke függ a minket körülvevő sugárzás mértékétől. A különböző környezeti elemek monitorozása fontos feladat különösen azokon a területeken, ahol egy-egy izotóp feldúsul a radioaktív egyensúlyok megbomlásának, vagy egyéb befolyásoló tényezőknek (például az emberi tevékenység) hatására, illetve olyan ipari tevékenység zajlik, ami a háttérsugárzás értékén felül jelentkezik. A fennálló sugárzási helyzetek felderítése a Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézeti Tanszékén kiemelt kutatási terület, melyhez csatlakoztam én is. Munkám során, reszuszpendált aeroszol minták ^{210}Pb és ^{210}Po aktivitáskonzentrációját határoztam meg alfa-spektrometriai eljárással, célom a különböző befolyásoló tényezők hatásának vizsgálata volt.

2. Irodalmi áttekintés

A földkéregi radioaktív izotópok közül, az urán leggyakrabban előforduló izotópja az ^{238}U , mely elszórta megtalálható a földkéregben és nagyon hosszú felezési idővel rendelkezik (4,51 milliárd év). Az ^{238}U izotóp bomlási sorába (2. ábra) tartozik a ^{210}Pb és a leányeleme a ^{210}Po . A bomlási sor végén egy stabil izotóp a ^{206}Pb keletkezik. A ^{210}Pb hosszú felezési idejű (22,3 év) izotóp, míg a leányeleme a ^{210}Po viszonylag rövid idő alatt elbomlik (138,4 nap) [3].



2. ábra: ^{238}U bomlási sora [4]

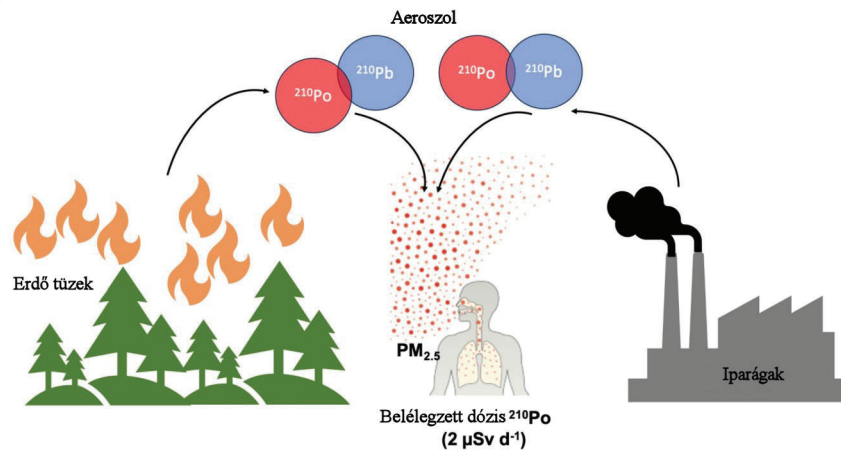
Az általam vizsgált radionuklidok jelenléte a légkörben a talajból kidiffundáló ^{222}Rn bomlásából származik. Az aktivitás-koncentráció tartománya talajszinti levegőben, ^{210}Po esetén 0,03-0,3 Bq/m³ és ^{210}Pb esetén 0,2-1,5 Bq/m³. Az ^{222}Rn nemesgáz (felezési ideje 3,82 nap) rövid életű leányelemekre bomlik, melyek az ^{222}Rn (3,82 d) > ^{218}Po (3,10 min) > ^{214}Pb (26,8 min) > ^{214}Bi (19,9 min) > ^{214}Po (164,3 s).

Ezek a bomlástermékek a levegőben lévő részecskékhez tapadnak, és száraz, valamint nedves lerakódásként jelentkeznek a földfelszínen. A leányelemek radioaktív egyensúlyban vannak az ^{222}Rn -nel; a ^{218}Po körülbelül 5 m-rel, míg a ^{214}Pb , a ^{214}Bi és a ^{214}Po körülbelül 50 m-rel a felszín felett. A ^{214}Po után keletkező bomlástermékek hosszú élettartamú radionuklidok (például: ^{210}Pb (22,3 év) > ^{210}Bi (5,01 nap) > ^{210}Po (138,4 nap) > ^{206}Pb (stabil)).

Ezeknek a hosszú élettartamú radionuklidoknak az aktivitás-koncentrációja a magasság növekedésével emelkedik, és becslések szerint a sztratoszférában eléri ^{210}Pb esetén az 1,1 Bq/m³-t és ^{210}Po esetében az 1,9 Bq/m³-t [5].

A légköri radon radioaktív bomlása a ^{210}Po és ^{210}Pb egyik forrása, de a kutatások további

forrásokat azonosítottak, például a vulkáni kibocsátásokat, az ipari létesítményeket, az erdőtüzeket, a szénégetést és a nukleáris fegyverteszteket. Ezek jelentős mennyiségű ^{210}Po -t, néha ^{210}Pb -t bocsáthatnak ki a légkörbe. Közismert tény, hogy a fosszilis tüzelőanyag- és szénalapú erőművek, a sótalánító üzemek és az olajfinomítók jelentősen hozzájárulnak a ^{210}Po és ^{210}Pb koncentrációhoz. A ^{210}Po és a ^{210}Pb is belélegezhető, ha rátapadnak a levegőben lévő ultrafinom részecskékre (PM) (3. ábra). Az ilyen típusú radionuklidoknak való kitettség a belső sugárdózis emelkedését eredményezheti [6].



3. ábra: A ^{210}Po és ^{210}Pb források és a valószínű belélegzési dózisa [6]

2.1. A radon tulajdonságai és jellemzői

A bomlási sorok egyik jelentős eleme a radon. Ez az egyedüli gáz halmazállapotú elem, egy mobilis nemesgáz, így könnyen áthatol a szilárd halmazállapotú közegek repedésein és kijut a levegőbe. A periódusos rendszer VIII. főcsoportjában lévő 86-os rendszámú elem, így szerkezetéből adódóan nem képes kémiai kötést kialakítani más elemekkel. Hőmérséklettől függően, vízben és szerves oldószerekben jól oldódik. Stabil izotópjá nincs, de a természetben három izotópjá fordul elő: az ^{238}U bomlási sorában az ^{222}Rn (radon), melynek felezési ideje 3,824 nap, az ^{235}U bomlási sorában az ^{219}Rn (aktinon), felezési ideje 3,9 s, és a ^{232}Th bomlási sorában az ^{220}Rn (toron) 55,6 s felezési idővel. A radon a közvetlen anyaeleméből, a rádium izotópból, alfa-sugárzással bomlik, amíg el nem éri a stabil ólomizotópokat. Környezetünkben a radon fő forrása a talaj, az építőanyagok, a házba bevezetett víz, a külső levegő, valamint a földgáz is lehet.

Az embert érő külső alfa-sugárzásnak nincs igazán károsító hatása, mivel kicsi hatótávolságú. A radonnak és a rövid felezési idejű alfa-bomló leányelemeinek (polónium, ólom, bizmut) elsősorban akkor jelentkezik egészségkárosító hatása, ha a szervezetbe jutva a sejteket közvetlenül támadják [7, 3].

2.2. Az ólom tulajdonságai és jellemzői

Az ólom a periódusos rendszer 82-es rendszámú eleme, a 14-es periódusban és a 6-os csoportban helyezkedik el. Elemi állapotában ezüstös szürke színű, jól megmunkálható, nyújtható, forrasztható és korrózióálló nehézfém. Az ólomnak 49 izotópjá ismert, melyek közül csak 4 stabil, a ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , és a ^{208}Pb .

A ^{210}Pb egy természetes radioaktív izotóp, mely az ^{238}U bomlási sorának bomlásterméke, így megtalálható a természetes környezetünkben. A ^{210}Pb izotóp felezési ideje 22,3 év. Az ^{222}Rn inert gáz egy része, mely az ^{226}Ra bomlásterméke (felezési ideje 1602 év) a talajban, a légkörbe kerül, ahol rövid élettartamú radionuklidok sorozatán keresztül bomlik le ^{210}Pb -re. A légkörben lévő ^{210}Pb atomok könnyen kötődnek a levegőben lévő részecskékhez, melyek nedves és száraz ülepedéssel gyorsan eltávolíthatók a szárazföldről és a vizekből. A talajban és üledékekben felhalmozódó ^{210}Pb -t, hordozó nélküli ^{210}Pb -nek nevezik, hogy megkülönböztethető legyen az ^{226}Ra kiindulási radionuklid in situ bomlásából származó hordozós ^{210}Pb -től [8].

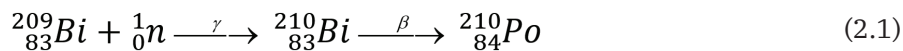
Az ólom és vegyületei is mérgező anyagok, a szervezetbe jutva gátolják a létfontosságú fémek (vas, cink, kalcium) felszívódását, sejtméregként viselkednek, idegrendszeri elváltozást és agyi károsodást okozhatnak. A szervezetből nem ürülnek ki, felhalmozódnak. A ^{210}Pb izotóp ionizáló sugárzása sejtkárosodást okoz [8, 3].

A ^{210}Pb radioaktív izotópot az uránérc kormeghatározására használják [3].

2.3. A polónium tulajdonságai és jellemzői

A polónium a 84-es rendszámú kémiai elem, a periódusos rendszer 16-os periódusában és 6-os csoportjában helyezkedik el. Viszonylag alacsony olvadáspontú (254°C) és forráspontú (962°C), fémes jellegű, ritka és nagyon erősen radioaktív elem. Kémiai tulajdonságai hasonlítanak a tellúréra és a bizmutéra, uránércekben fordul elő. A polóniumnak 43 izotópja ismert 194-218 atomi tömeg egység között, mindegyik radioaktív. A természetben leggyakrabban a ^{210}Po fordul elő, mely az ^{238}U bomlási sor utolsó radioaktív eleme. Bomlásakor alfa-részecskét bocsát ki és ^{206}Pb -á bomlik. A kibocsátott alfa-részecskék nagy energiájúak, de rövid hatótávolságúak. A bomlási sorban található még két másik polónium izotóp, a ^{218}Po és a ^{214}Po , melyek felezési ideje nagyon rövid 3,05 perc és $1,62 \cdot 10^{-4}$ s, ezért ezeket nem lehet elkülöníteni az uránércetől. A ^{210}Po izotóp felezési ideje 138,4 nap, fajlagos aktivitása nagy, 1 mg annyi alfa-részecskét bocsát ki, mint 13 t ^{238}U izotóp, 1 g mennyiség 140W teljesítményt ad le. Néhány curie (Ci) aktivitású ^{210}Po kékes színű ragyogást bocsát ki a levegőmolekulák gerjesztése miatt. A ^{210}Po alfa-részecskét ad le, a bomlást kísérheti gamma-sugárzás is, ez azonban csak minden százazredik esetben következik be, ezért meghatározása gamma-spektrometriai vizsgálattal nem lehetséges [9].

A polónium nagyon ritka, érceiből nehezen előállítható elem. Azonban a kutatók (1934-ben) felfedezték, hogy mesterséges úton előállítható a ^{210}Po izotóp, a bizmut természetes izotópjának neutronnal történő bombázásával.



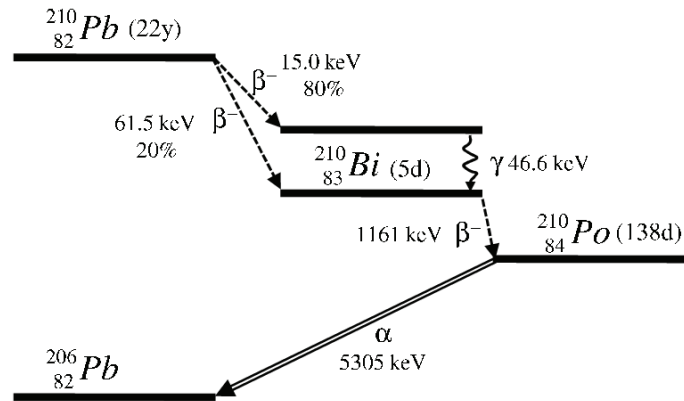
Ezzel az eljárással csak évi 100 g ^{210}Po -ot állítanak elő [9].

A ^{210}Po izotópot neutronforrásként berilliummal keverve, valamint műholdak energiaforrásaként és a holdjárók belső hőforrásaként használják fel. A tisztán alfa-sugárzó izotópok nagy előnye, hogy nem igényelnek speciális védőberendezést, mivel a hatótávolságuk minimális [9]. Természetes úton a szervezetbe jutott polóniumnak, ami csekély mennyiségű, gyakorlatilag nincs egészségkárosító hatása, mivel 50-90%-a az emésztőrendszeren keresztül kiürül, a maradék rész a vérrel eloszlik a szervezetben és fokozatosan távozik a vizelettel és a széklettel. A ^{210}Po szervezeten belüli biológiai felezési ideje 50 nap. A polónium csak abban az

esetben jelent veszélyt, ha nagyobb mennyiség kerül a szervezetbe táplálékkal, vízzel, vagy nyílt seben keresztül [10, 3].

2.4. ^{210}Pb és ^{210}Po radioizotópok sugárzási energiái

A ^{210}Pb bomlása (4. ábra) során, a béta-sugárzási energia 15-61,5 keV, a ^{210}Po alfa-sugárzási energia 5 305 keV.

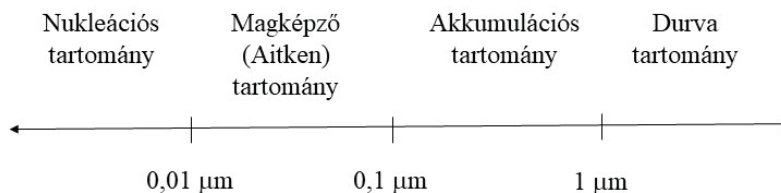


4. ábra: ^{210}Pb bomlási sora [11]

2.5. Légtörri aeroszol

Légtörünk elsősorban gázokból áll. Körülbelül 78%-a nitrogén (N_2) és 21%-a oxigén (O_2), a fennmaradó részét egyéb gázok teszik ki. Ezeken kívül, nagyon apró folyadékcseppek és szilárd részecskék is találhatóak benne, melyeket részecskeanyagként (PM) ismerünk, és fontos szerepet játszanak az emberi egészség és az éghajlat alakulásában, de olyan kicsik, hogy ha a körülöttünk lévő levegőt nézzük, általában nem láthatók. Ezek a nagyon apró folyadékcseppek és szilárd részecskék könnyűek, így hosszú ideig lebeghetnek a levegőben anélkül, hogy a földre hullanának. Aeroszoknak nevezzük, amikor a részecskéket egy gázban szuszpendálják. Így a légtörünkben lévő részecskéket (PM) aeroszoknak is nevezhetjük, mivel azok a levegőben lévő gázokban szuszpendálódnak [12].

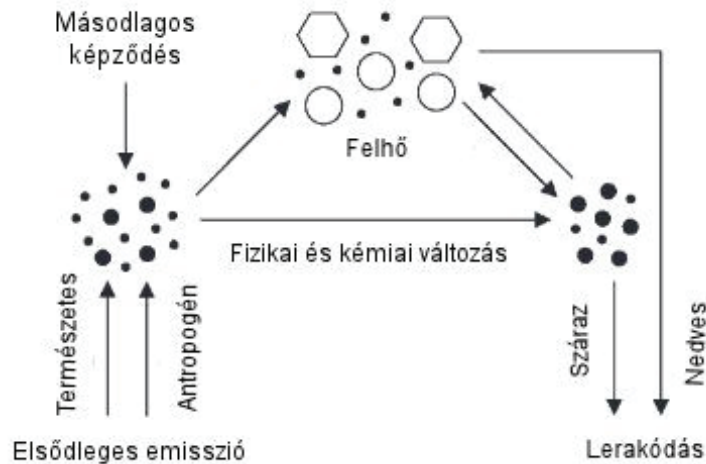
A légtörben lévő aeroszol részecskék alakja nagyon változó, méreteiket általában átmérőjük jellemzi, amely a néhány nanométertől körülbelül 100 μm -ig terjed, ahogy az az 5. ábrán is látható [13].



5. ábra: Az aeroszol részecskék mérettartományai [13]

Egy másik csoportosítás szerint az aeroszol részecskék kétfélék lehetnek. A finom részecskék (PM_{2,5}) azok, melyeknek az átmérője kisebb, mint 2,5 µm, míg a durva részecskék (PM₁₀) 2,5 és 10 µm közötti átmérővel rendelkeznek [12].

Az aeroszol részecskéket koncentrációjukkal, méreteloszlásukkal, szerkezetükkel és kémiai összetételükkel jellemezhetjük, melyek mind időben, mind térben igen változók. Az aeroszol részecskék levegőbe kerülésüket követően, különféle fizikai és kémiai folyamatokon mennek keresztül, melyek során méretük, összetételük és szerkezetük megváltozhat. Ezt követően, száraz vagy nedves ülepedési folyamatok révén lerakódnak a légkörből a felületekre, ez látható a 6. ábrán.



6. ábra: Az aeroszolok légköri körforgása [14]

2.5.1. Aeroszol részecskék forrásai

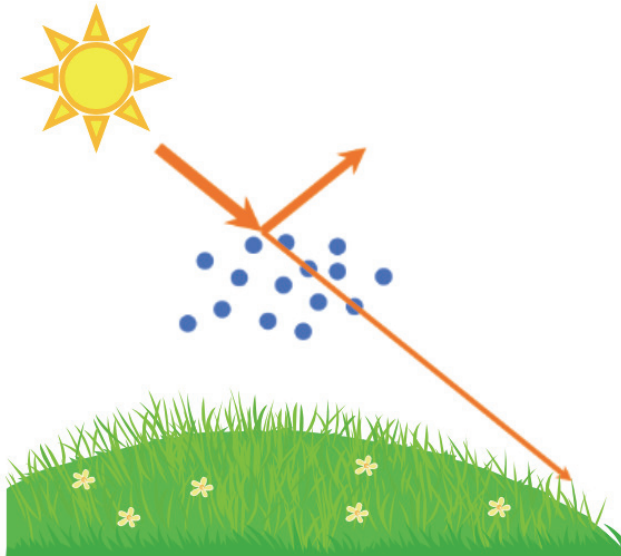
Az aeroszol részecskék sokféle forrásból származnak. Némelyik természetes előfordulású, és vannak olyanok, amelyek emberi tevékenységből származnak. A részecskék egyik természetes forrása a sivatagi ásványi por. Amikor a levegőt felmelegítjük csökken a sűrűsége, emiatt felemelkedik a légkörbe. Ez a folyamat konvekció, és szelet hoz létre. A szél a felszínről a részecskéket felviszi magasan a légkörbe, ahol azok nagy távolságokra, akár kontinensek között is elszállhatnak. A részecskék másik természetes forrása az óceánból származó tengeri permet. Az óceán vize sót és más szerves vegyületeket tartalmaz, melyeket az óceánban élő algák, baktériumok és más életformák bocsátanak ki. Amikor a hullámok megtörnek, ezek a sókat és szerves anyagokat tartalmazó tengervízcseppek bekerülnek a légkörbe. A bennük lévő víz elpárologhat, ezzel szilárd tengeri sóból és szerves vegyületekből álló részecskét hagyva maga után. Mivel a Föld felszínének körülbelül 2/3-át óceánok borítják, a tengerből származó aeroszolok jelentős aeroszolforrást jelentenek környezetünkben.

Az aeroszol részecskék emberi forrásai közé tartozik a tüzek füstje, a járművek kipufogógáza és a gyárak általi szennyezés. Az aeroszol részecskék ezen természetes és emberi forrásain kívül vannak másodlagos forrásai is, melyek a légkörünkben zajló kémiai reakciókból származnak. A gázok (például az ózon) reakcióba léphetnek a levegőben lévő szerves gázokkal, és szilárd termékeket képezhetnek, melyek aeroszol részecskéket alkotnak [12].

2.5.2. Aeroszol részecskék jelentősége

Ezek az aeroszol részecskék fontosak bolygónk számára, mivel befolyásolhatják az emberi egészséget és a Föld klímáját.

Bolygónk éghajlatát számos tényező befolyásolja (7. ábra), például a napfény, a légkörben lévő gázok és az aeroszol részecskék. Az aeroszol részecskéknek bonyolult szerepük van éghajlatunk alakulásában, közvetlen és közvetett hatásuk is van. A közvetlen hatások maguk az aeroszol részecskék, a közvetett hatásokat pedig azon képességük határozza meg, amivel elősegítik a felhők kialakulását [12].



7. ábra: Közvetlen hatások [12]

A közvetlen aeroszolhatás azon alapul, hogy a részecskék képesek-e elnyelni a napfényt vagy visszaszórni azt a világűrbe. A napsugarak a Földre jutnak, felmelegítik a bolygót és ezzel szabályozzák klímáját. Azonban a Nap fénysugaraival közül nem mindegyik éri el a Föld felszínét. Ennek az az oka, hogy az aeroszol részecskék (és az általuk képzett felhők) a napsugárzás körülbelül 25%-át szórják vissza a világűrbe. Mivel a napsugárzásból kevesebb jut a talajra, ez hűsítő hatást eredményez [12].

A közvetett aeroszolhatások azzal kapcsolatosak, hogy az aeroszolok miként hatnak a felhőkre. A felhőcseppek kialakulásához légkörünknek két fő összetevőre van szüksége: a vízgőzre és az aeroszol részecskékre. Amikor a légkörünkben lévő vízgőz lehűl, folyékony fázisban csapódhat le, és felhőcseppeket képezhet, de a kondenzációhoz felületre van szüksége. Ezt az aeroszol részecskék biztosítják úgy, hogy a vízgőz rájuk csapódva felhőcseppeket képezhessen. Emiatt az aeroszol részecskék felhőkondenzációs magként (CCN) működnek, ami azt jelenti, hogy „kiindulási pontot” adnak a felhők kialakulásához [12].

A reszuszpendált aeroszol részecskék azok, amelyek a reszuszpenzió során a légkörből egyszer már kiüledtek és a légmozgások a talajról újra visszajuttattak a légkörbe. Több kutatás is foglalkozik ezek egészségre gyakorolt hatásával, mivel a részecskék különböző mérgező, egészségre ártalmas anyagot tartalmazhatnak attól függően, hogy milyen területről származnak.

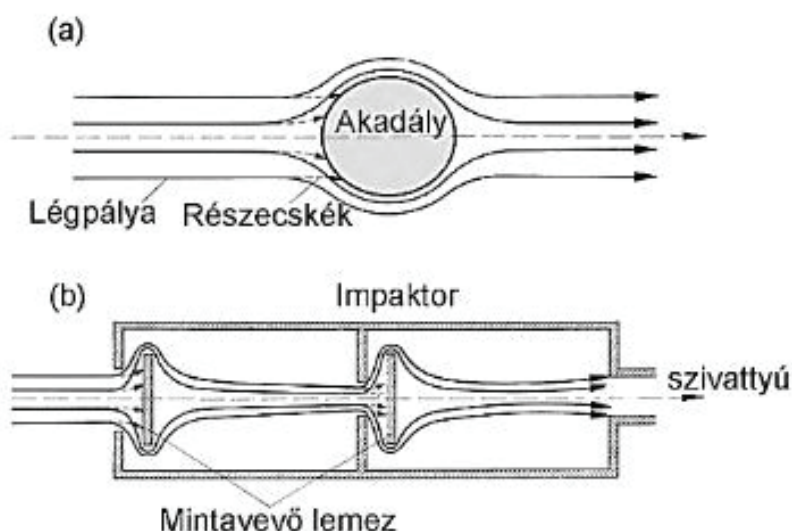
A PM₁₀ átmérőjű részecskék légszennyezők, mivel a 10 μm -nél kisebb méretű anyagok a légzőrendszer szűrőin nem akadnak fenn, így a tüdőbe jutnak. Attól függően, hogy milyen forrásból származnak, tartalmazhatnak elemi szenet, szerves vegyületeket, fémeket, nehézfémeket

is, nyomelemeket, nitrátokat, szulfátokat, egyéb sókat, szilikátokat és más talajeredetű anyagokat, élő eredetű részecskéket, spórákat, polleneket is. Magyarországi határértéke napi $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [15]. Az aeroszol részecskék összetételüktől függően, számos emberekre jellemző egészségügyi problémát okozhatnak. Ezek a részecskék több ember egészségét befolyásolják világszerte, mint bármely más szennyező anyag. A WHO becslései szerint, a részecskeszennyezés évente hozzávetőleg 7 millió korai halálestet eredményez, így az egyik vezető halálozási ok világszerte [12].

2.5.3. Aeroszol mintavételi lehetőségei

A levegőmintából az aeroszol részecskék eltávolításra kerülnek, ami megvalósítható szűréssel vagy impaktálással.

Az impaktorok olyan mintavevők, amelyek működése a tehetetlenségen alapul. Az áramló aeroszolokba akadályt helyeznek. A könnyebb levegőmolekulák képesek az irányváltoztatásra és megkerülik az akadályt, míg az aeroszol részecskék beleütköznek. Minél nehezebb az aeroszol részecske, annál kevésbé képes a levegő irányváltoztatását követni. Az akadály méretének csökkentésével és a légáramlás sebességének növelésével, az akadályba egyre kisebb részecskék ütköznek, nő a felfogási hatékonyság (8. ábra). Az áramlási sebességet egy szivattyú segítségével gyorsítják fel [16].



8. ábra: Impaktor működési elvének sematikus ábrája [17]

Ha a mintavevő csőbe több rés-akadály pár kerül sorba kötve, ahol a rések mérete a szívás irányába csökken, akkor többfokozatú, ún. kaszkád impaktort kapunk, amely a részecskéket nagyságuk szerint osztályozza. Ha az aeroszol-mintavétel kémiai minősítés céljából kerül elvégzésre, akkor a mintavevő lemezeknek, amelyek az akadályt képezik, kémiaileg tisztának kell lenniük. Sok esetben, a felületüket olyan anyagokkal kezelik – például olaj, vazelin, vákuumzsír –, amelyek elősegítik az aeroszol részecskék megtapadását és gátolják visszajutásukat a levegőbe [16].

Az aeroszol részecskéket tartalmazó levegőminta szál- vagy membránszűrőn keresztül kerül átszívásra. A szálasszűrők üveg-, kvarc- vagy cellulózsálak együtteséből állnak, ahol a nagyobb aeroszol részecskék tehetetlenségük miatt ütköznek a szálakba (impaktorokként működnek), míg a kisebbek diffúzióval érik el azokat.

A membránszűrők meghatározott nagyságú pórusokkal rendelkező polimerek, ahol a nagyobb

tehetetlenségű részecskék a pórusok körül a szűrő felszínére, míg a kisebbek diffúzióval azok falára rakódnak. A membránszűrők anyaga korábban cellulóz-nitrát vagy cellulóz-acetát volt, napjainkban a perfluorozott polimerek (pl. poli-tetrafluor-etilén, PTFE, TeflonTM) terjedtek el kémiai tisztaságuk miatt. A felfogási hatékonyság minimuma tapasztalható mindkét szűrő esetében, adott részecskeátmérőnél.

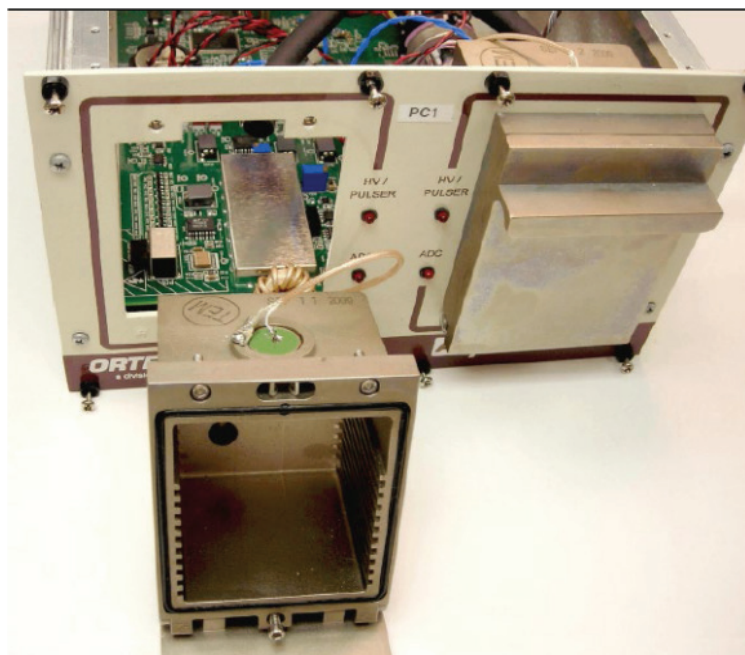
A megfelelően kis pórusú abszolút szűrők gyakorlatilag az összes részecskét kifogják a levegőből [16]. Mintavételezés során, a szűrők szűrőtartókban helyezkednek el, melyek szivattyúhoz, majd áramlásmérőhöz kapcsolódnak.

Fontos a szűrőkből származó szennyezések kontrollja. Különösen a szerves anyagú szűrők tartalmazhatnak egyes nyomelemekből nagyobb mennyiséget. Ezek a későbbi roncsolásos mintaelőkészítés során bejuthatnak a mintaoldatba és pozitív hibát okozhatnak. Az üvegszálás szűrőknél ilyen elemek lehetnek, például a B, Na, Al, K, Ca, Ti, Zn és a Ba [16].

A reszuszpendált aeroszol részecskék esetében, a mintát közvetlenül az útburkolatról gyűjtik az üledék felsőprésével és/vagy szitálással, illetve laboratóriumi reszuszpendálással és a PM10-es frakció extrakciójával. Ezeket az eljárásokat és mintakezeléseket befolyásolja a finom részecskék elvesztése, ami alapvetően az összes lerakódott anyag összegyűjtésének nehézségét jelenti, továbbá a részecskék elektrosztatikus tapadása a kefe szőrszálaihoz és a szitához. A mintavételi eljárás során fellépő veszteségek csökkentése érdekében, kifejlesztettek egy terepi reszuszpendáló kamrát. Ez alkalmas volt a PM10 részecskék útburkolatról, egy ciklonleválasztóba történő összegyűjtésére [18].

2.6. Alfa-spektrometriai mérési módszer

Az alfa-spektrometriai mérések során egy félvezető detektorral felszerelt mérőműszer, a PIPS (Passivated Implanted Planar Silicon) az elterjedt, ahol az ionizáció a szilárd, félvezető anyagban jön létre. Az alfa-részecskék elnyelődése miatt, a detektort a mintához közel kell elhelyezni. A félvezető detektorok működése a sávmérettel magyarázható. A félvezető anyagok esetében, az atomokhoz kötött vegyértékelektronok betöltött vegyértéksávja és a szabad elektronok vezetési sávja között energetikailag nem megengedett, ún. tiltott sáv van. Ezen a sávon nagy tisztaságú félvezető esetén elektronok nem tartózkodhatnak. Ha a félvezető anyagok kristályszerkezetébe 3 vagy 5 vegyértékelektronnal rendelkező, ún. szennyező anyag kerül, akkor a p-típusú félvezetők elektronhiányosak, vagy n-típusú esetén elektrontöbblettel rendelkeznek. Ha egy n és p-típusú félvezető anyagot szoros érintkezésbe hozunk, akkor az érintkezési felületükön semlegessé válik a töltéskülönbség, ún. kiürítési tartomány alakul ki. Itt megegyezik a pozitív és negatív töltések száma, ami a detektor érzékeny térfogata. Ha az alfa-részecske ebbe az érzékeny térfogatba érkezik, szabad töltéshordozók alakulnak ki, így a réteg vezetővé válik, és ez áramimpulzusként érzékelhető. Az áramimpulzus-jel a feldolgozáshoz erősítő rendszerre kerül. A folyamat során a felerősített jel jelsorozatként lép ki, majd egy sokcsatornás analízátor feldolgozza az adatokat. Ezt követően, a detektorhoz kapcsolt számítógépen kiértékelésre kerül a kapott alfa-spektrum [19]. Egy ilyen detektor látható a 9. ábrán.



9. ábra: Integrált Alpha Duo spektrométer [20]

Ez a rendszer alkalmas mennyiségi meghatározásra, az időegység alatt regisztrált részecskék számából az adott izotóp aktivitására (az alfa-spektrum csúcsainak nagysága arányos a részecske energiájával), valamint minőségi meghatározásra is, mivel a különböző radionuklidok az alfa-részecskéiket különféle jellegű energián adják le. Így a spektrum csúcsának energiaszintje alapján következtetni lehet a kibocsátó izotópra [19, 3].

3. Kísérleti rész

3.1. Mintavételezés

Kutatómunkám során, a reszuszpendált aeroszol mintavételezést a Levegőkémia Kutatócsoport Bio-nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet végezte el. A mintaelőkészítést a 10. ábrán látható berendezéssel valósították meg.



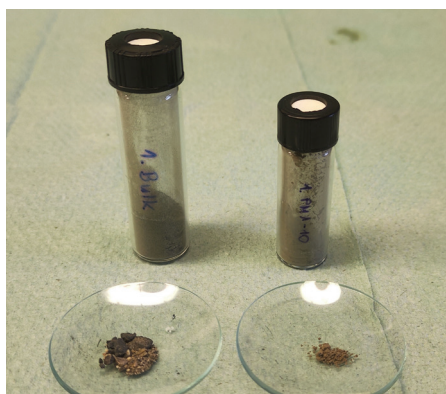
10. ábra: Reszuszpendált aeroszolak laboratóriumi mintaelőkészítése

A méréseket 2023 júniusa és 2025 februárja között végeztük el. Az első kísérleti körünkben, az 1. táblázat szerinti veszprémi mintákat vizsgáltuk, melyek esetében a helyszínek kiválasztásának fő szempontja az volt, hogy mérhető mennyiségben van-e jelen a $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ izotóp a környezetünkben. Amennyiben igen, befolyásolja-e az emberi tevékenység ezen izotópok aktivitás-koncentrációjának mértékét.

1. táblázat: Mintavételi pontok az első méréshez (területi minták)

Minták	Mintanév	Cím	Mintatípus (fő forrása)	Bulk (g)	PM1-10 (g)
1.	Építkezés és bontás	Veszprém, Pannon Egyetem, C épület	építkezés	5,38	1,021
2.	Építkezés közeli utca	Veszprém, Fűredi utca	építkezés	5,17	1,014
3.	Park melletti parkoló	Veszprém, Simonyi Iskola mellett, parkoló	talaj	5,44	0,265
4.	Közlekedés - Házgyári út	Veszprém, Házgyári út	közlekedés	5,48	0,729
5.	Közlekedés - Buszpályaudvar	Veszprém, Buszpályaudvar	közlekedés	5,11	0,613

Minden mintavételi ponthoz tartozik egy ömlesztett reszuszpendált („Bulk”) minta, valamint egy PM1-10 jelzésű frakció, mely 1-10 μm átmérőjű részecskéket tartalmaz (11. ábra). A minták jelölését úgy végeztem a mérések során, hogy azok sorszama után felírtam a típusát, például 1. Bulk és 1.PM1-10.



11. ábra: 1-es aeroszol minták

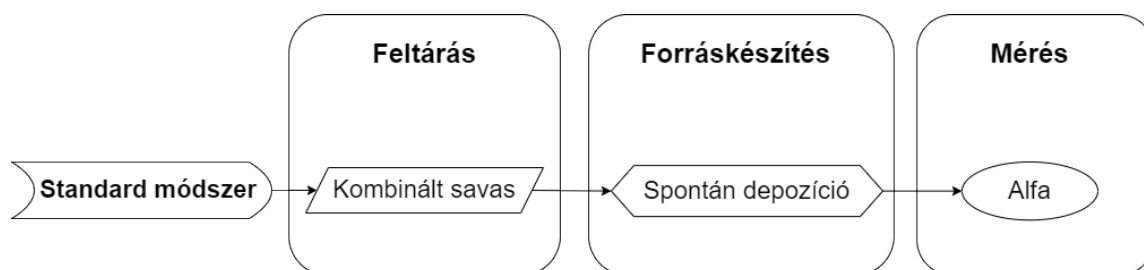
A második mérési sorozatra 2024 nyarán került sor Veszprémben, az Egyetem utcában. A mintavételezéseket az időjárási előrejelzéshez ütemeztük. Mintát vettünk közvetlenül az eső előtti napon, illetve az esőt követő napokon a 2. táblázat szerinti időpontokban.

2. táblázat: Mintavételi pontok különböző időjárási viszonyok mellett (időjárási minták)

Minta sorszáma	Dátum	Esemény	Bulk (g)	PM1-10 (mg)
1	2024.05.21	Eső előtt	5,31	0,459
2	2024.05.22	Eső utáni 1. nap	5,33	0,141
3	2024.05.23	Eső utáni 2. nap	5,09	0,405
4	2024.05.27	Eső utáni 6. nap	5,22	0,344
5	2024.05.31	Eső utáni 10. nap	5,16	0,689
6	2024.06.07	Eső előtt	5,45	0,330
7	2024.06.12	Eső utáni 5. nap	5,03	0,599
8	2024.06.13	Eső utáni 6. nap	5,33	0,648
9	2024.06.14	Eső utáni 7. nap	5,43	0,646
10	2024.06.18	Eső utáni 11. nap	5,16	0,612

3.2. Mérési módszer

A reszuszpendált aeroszol minták ^{210}Po aktivitás-koncentrációját, félvezető (PIPS) detektoros alfa-spektrometriai módszerrel, a ^{210}Pb aktivitás-koncentrációját közvetetten a leányelemén, a ^{210}Po izotóp meghatározásán keresztül vizsgáltam meg. Ehhez szükség volt a két izotóp közötti egyensúly beállítására, mely ezen két izotóp esetében minimum 1 év. A közvetett ^{210}Pb meghatározási módszer fő hátránya, hogy a ^{210}Pb - ^{210}Po szekuláris egyensúly eléréséhez, a ^{210}Po spontán depozícióját követően a maradék oldatot lezárva kell tárolni és kb. 1 évig meg kell őrizni [22-23]. Ezt követően a ^{210}Po spontán depozíciós leválasztással készült forrás alfa-spektrometriás mérésének kiértékelése után megbecsülhető a ^{210}Pb aktivitás-koncentrációja. A szekuláris egyensúly beállításának ideje így elég hosszú. Ennek ellenére a módszernek számos előnye van, melyek közül kiemelkedik az, hogy viszonylag rövid radiokémiai idő és kevés manipuláció szükséges hozzá. A nagyon alacsony háttérszámlálás és a magas számlálási hatékonyság miatt, az észlelési határok alacsonyak, ezzel biztosítva a megfelelő pontosságot. Ez a radiometriás technika akkor megfelelő, ha az eredményekre nincs gyorsan szükség, azonban nagyfokú pontosság szükséges a rendkívül alacsony aktivitás kimutatásához [21]. A mérés a 12. ábrán látható vázlat alapján történt. Első lépésként a minták feltárását végeztem el. Az így kapott oldatokból elkészítettem az alfa-forrást, amit a már korábban ismertetett PIPS detektorral mértem.



12. ábra: A módszer fő lépései

3.2.1. Alfa-spektrometriai mintaelőkészítés

A szilárd aeroszol mintákból kb. 1 g-ot mértem ki analitikai mérleggel a vizsgálatokhoz. A kimért mennyiséghez, automata pipettával, azonos mennyiségű tracet (nyomjelzőt, ^{209}Po) adtam. A ^{210}Po aktivitásának meghatározásához szükséges a nyomjelző, mivel azonos kémiai tulajdonsággal rendelkezik, mint a detektálandó izotóp, így a különböző feltárási és elválasztási folyamatokban is azonos hatásfokkal vesz részt, ezáltal a folyamatok hatásfoka nyomon követhető lesz [3].

Az első területi mintákhoz felhasznált ^{209}Po nyomjelző adatai (2M HCl oldatban):

- gyártás dátuma: 2005.12.21.
- aktivitás-koncentrációja a törzsoldat gyártásakor: 43,83098 mBq/g
- felezési ideje: 103 év

A második időjárási mintákhoz felhasznált ^{209}Po nyomjelző adatai (2M HCl oldatban):

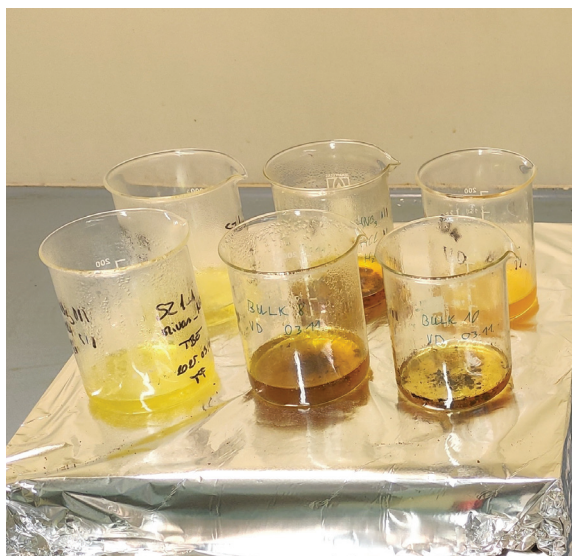
- gyártás dátuma: 2023.08.21.
- aktivitás-koncentrációja a törzsoldat gyártásakor: 64,449 mBq/g
- felezési ideje: 103 év

3.2.1.1. Kombinált savas feltárás

A feltárás célja, a szerves anyagok elroncsolása és a szilárd aeroszolok oldatba vitele.

A kombinált savas feltárás során, a mintában lévő szerves anyagot elroncsoltam 25 ml 65%-os HNO_3 -mal, majd az oldat nagy részét bepároltam úgy, hogy kb. 5ml oldat maradjon. Ezt a lépést háromszor megismételtem. Következő lépésként, 25 ml 37%-os HCl-lel végeztem el a bepárlást háromszor megismételve úgy, hogy a bepárlások előtt 2-3 csepp 30%-os H_2O_2 -t adtam a mintához azért, hogy biztosan megszabadítsam az esetlegesen az oldatban maradt szerves anyagtól. A feltárás zárólépéseként, a bepárlás ultratiszta ionmentes víz hozzáadásával történt, amit az előző lépésekhez hasonlóan háromszor végeztem el. Ez a lépés a minta savasságának csökkentése érdekében történt. A feltárás során, kb. 80 °C-on tartottam az oldatokat, melyet a főzőlapon beállítottam és folyamatosan ellenőriztem. A művelet befejezését követően, a feltárt minták további feldolgozásra kerültek [22, 3].

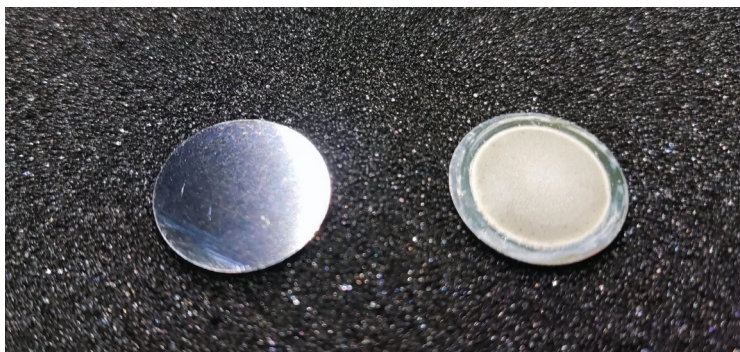
A 13. ábrán a feltárás pillanatképe látható.



13. ábra: Feltárás

3.2.1.2. Forráskészítés ^{210}Po meghatározásához

A forrást spontán depozícióval készítettem úgy, hogy a savas feltárásokkal előkészített mintákból a vizsgálatokhoz vékony mintát készítettem. Az alfa-spektrometriai mérésnél a forrás előállítása a legkritikusabb rész. Nagyon fontos, hogy vékony és egyenletes vastagságú forrás készüljön azért, hogy az alfa-sugárzás önabszorpciója minél kisebb legyen. A ^{210}Po réteg leválasztása ezüst, nikkelt vagy magas nikkeltartalmú saválló acéllemezre történik, ennek alapja az, hogy a gyenge sósavas oldatból a Po(IV) ionok a többi ion mellől, redoxireakció során leválnak a pozitívabb elektródpotenciálú fémekre. A 14. ábrán egy depozíció előtti (balra) és egy depozíció utáni lemez látható.



14. ábra: Alfa-forrás

A forrás elkészítéséhez, a vízfürdő termosztátját $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra állítottam be, mivel $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ felett a ^{210}Po elillan. A magas nikkeltartalmú saválló acéllemez felületét, a védőfólia eltávolítása után alkohollal megtisztítottam, mivel annak fényesnek és homogénnek kell lennie. Ezt követően a lemezt befogtam a spontán depozíciós cellába, és bemértem 50 ml -t a vizsgálandó oldatból. Ehhez hozzáadtam egy spatulányi aszkorbinsavat azért, hogy az esetlegesen jelen lévő Fe(III) iont redukálja, mivel az megakadályozhatja a Po(IV) kiválását. A depozíciós cellát a $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os vízfürdőbe helyeztem, és 3 óra n át keverőbabával kevertettem, miközben a fogyó vizet pótoltam. A leválasztás után a cellát kiürítettem és ionmentes vízzel átöblítettem. A saválló lemezt kiszedtem és azt is leöblítettem ionmentes vízzel, majd szobahőmérsékleten megszárítottam. A spontán depozíció eszközei a 15. ábrán kerültek feltüntetésre.



15. ábra: Spontán depozíció

A fentieket követően, a mérés elvégzéséhez az alfa-forrást az Ortec Alpha Duo készülék egyik kamrájába helyeztem (16. ábra).



16. ábra: Alfa-forrás behelyezése a mérőeszközbe

A spontán depozíció után visszamaradt oldatot eltettem, légmentesen lezártam, hogy a szekuláris egyensúly beálltával ezekből a mintákból közvetett alfa-spektrometriai módszerrel és a ^{210}Po meghatározásával kiszámíthassam a ^{210}Pb aktivitás-koncentrációját.

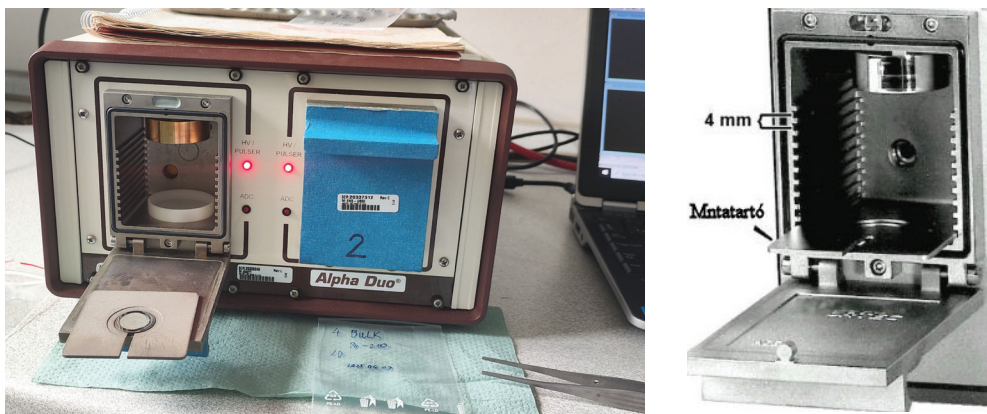
3.3. Alkalmazott mérések és mérőműszer

Az elkészült forrásokat a megfelelő, a laboratóriumban rendelkezésre álló eszközökkel mértem. Az így kapott spektrumokból minőségi és mennyiségi meghatározásokat végeztem.

A különböző, vizsgálandó sugárzás energiái azért fontosak a mérés során, mert a mérőműszereket úgy kell beállítani, hogy ezen tartományba beleessen a vizsgálni kívánt sugárzás energiája. Az intervallum nem lehet túl nagy, mert akkor alacsony lesz a felbontási szint [3].

3.3.1. Félvezető (PIPS) detektros alfa-spektrometria

A mérés során használt félvezető PIPS típusú kétkamrás detektor (17. ábra) típusa Ortec Alpha Duo. Ennek energiafelbontása $<20\text{ keV}$ [20], ha az érzékelő és a forrás közötti távolság megegyezik az érzékelő átmérőjével.

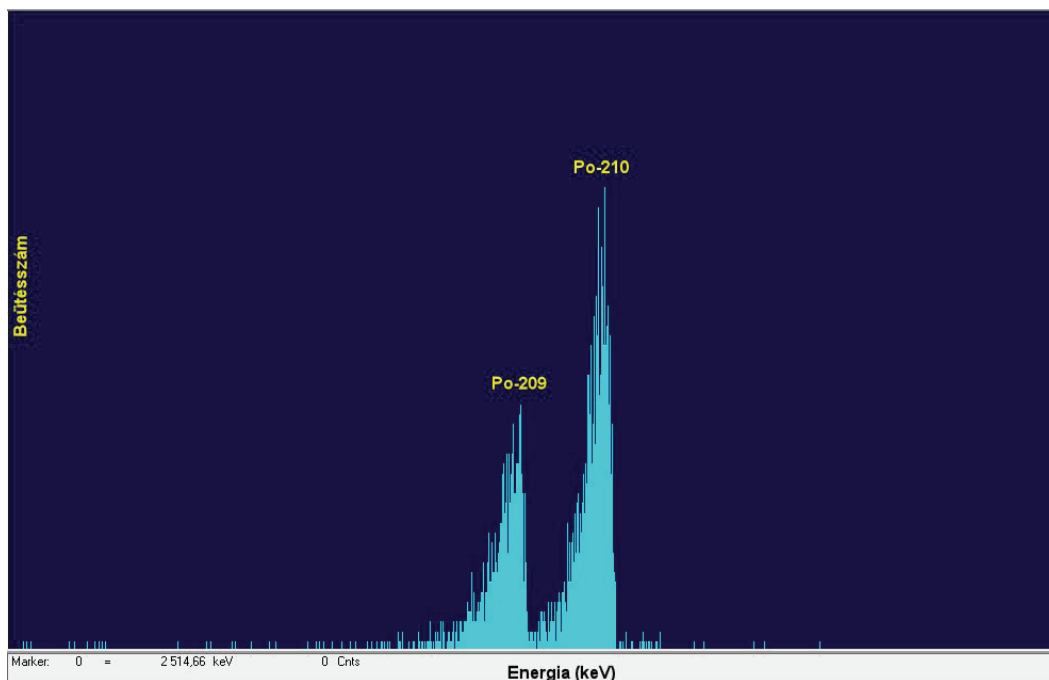


17. ábra: Kétkamrás Ortec Alpha Duo spektrométer és egy minta kamra [20]

Az asztali kompakt alfa-spektrométer két alfa spektroszkópai csatornával rendelkezik. Minden egysége számítógépes vákuummérőt, változó detektor előfeszítőt (kapcsolható pozitív vagy negatív), előerősítőt, változó amplitúdójú teszimpulzus generátort és szivárgási áramfigyelőt tartalmaz. A két spektrométer mindegyike saját digitális eltolási és konverziós erősítéssel felszerelt a maximális rugalmasság érdekében, mindegyik detektor egymástól függetlenül működik 0 és 10 MeV közötti energiatartományban. Az Alpha Duo független MCA-kkal (Multi Chanel Analyser) rendelkezik a feldolgozási idő optimalizálása érdekében. Az Alpha Duo-val szállított mintatálcák, 19 és 25 mm-es minták vizsgálatát teszik lehetővé, az érzékelő és a minta közötti távolság 1-41 mm-ig állítható 4 mm-es lépésekkel. Az érzékelő és a kamra alja közötti maximum távolság 44 mm. A detektor maximális mérete 1200 mm² [20, 3].

A vizsgálat során, az acélkorong felületére vékonyan felvitt radionuklid bomlásából származó alfa-részecskéket fogjuk detektálni vákuumban. Az alfa-sugárzás detektálásával az a probléma, hogy kicsi a hatótávolsága, vagyis gyenge az átható képessége, ezért ha vastag a leválasztott réteg, nagy lesz az önabszorpció, ami csökkenti a mérés hatékonyságát. A mononukleáris réteg leválasztása spontán depozícióval történik [23, 3].

Vizsgálatom során, a spontán depozíciót követően, a korongon levált rétegtől függően 100 000-200 000 s mérési időt állítottam be (minél szebb a leválasztás, annál rövidebb mérési idő is megfelelő eredményt hozhat). A kiértékelés során, a spektrumon manuálisan kellett kijelölnöm az egyes izotópokhoz tartozó csúcsokat, ami a tracernél, azaz a ²⁰⁹Po-nél 4877 keV, míg a ²¹⁰Po-nél 5300 keV, a csúcs alatti terület a beütésszámmal egyenlő. A kiértékelésnél figyelembe kellett venni, hogy a mérés során az adott forrás melyik kamrában volt elhelyezve, mivel a két kamra esetén más-más háttérértéket mértem. A 18. ábrán egy tipikus spektrum látható, melyen jól kivehető az „alfa-csúcsok” kisebb energiatartományban való kiszélesedése, aminek fő oka az alfa-részecske önabszorpciója.



18. ábra: Aeroszol minta (PM1-10 minta) ²¹⁰Po spektruma

Az alfa spektrum kiértékeléséhez az alábbi összefüggéseket alkalmaztam [19]:

$$A_{210Po} = \frac{A_t \cdot N}{N_t} \quad (3.1)$$

Az A_{210Po} : a vizsgált ^{210}Po aktivitása (Bq), N : a vizsgált ^{210}Po csúcsának megfelelő terület (beütés), A_t : a nyomjelző ^{209}Po kezdeti aktivitása (Bq), N_t : a ^{209}Po nyomjelző csúcs alatti területe (beütés). A beütésszámokat az adott energiához tartozó háttérértékkal korrigáltam.

Az aktivitás és a minta tömege alapján meghatározható a ^{210}Po aktivitás-koncentrációja (Bq/kg):

$$C_A = \frac{A_{210Po}}{m_{210Po}} \quad (3.2)$$

az A_{210Po} : a vizsgált ^{210}Po aktivitása (Bq), m_{210Po} : a vizsgált minta tömege (kg).

A másodpercenkénti beütésszám alkalmazásához, a képletben el kellett osztanom a mérési idővel a detektorról leolvasott ^{209}Po és a ^{210}Po beütésszámokat.

A háttér beütésszámának meghatározásához, a két alfa kamrában üres mintatartóval és 200 000 s-os mérési idővel elvégeztem a háttérmérést.

Meghatároztam a detektor hatásfokát (η) kalibráció segítségével, ahol a detektor hatásfoka 24,3%-os volt.

Ezt követően a kimutatási határt (KH) Bq/g-ban, az alábbi képlet segítségével számoltam ki:

$$KH = \frac{2,71 + 4,65 \cdot \sqrt{I_h}}{\eta_d \cdot t \cdot M} \quad (3.3)$$

az I_h : háttér a vizsgálandó energiatartományban (impulzus), η_d : a detektor hatásfoka (%), t : a mérési idő (s), M : a felhasznált minta mennyisége (g).

A számításokat minden esetben Excel programmal végeztem. A mintából a mérés során kb. 1 g-ot mértem be. A területi minták esetében az első kamra átlagos KH értéke 0,98 mBq/g, míg a másodiké 0,56 mBq/g volt. Az időjárás mintáknál az első kamra átlagos KH értéke 1,84 mBq/g, míg a másodiké 2,08 mBq/g volt.

A ^{210}Pb aktivitás-koncentrációjának becslését a szekuláris egyensúly alapján végeztem, mivel az egyensúly beálltát követően a mért ^{210}Po aktivitás-koncentrációjából, a ^{210}Pb aktivitás-koncentrációja származtatható.

4. Eredmények, következtetések

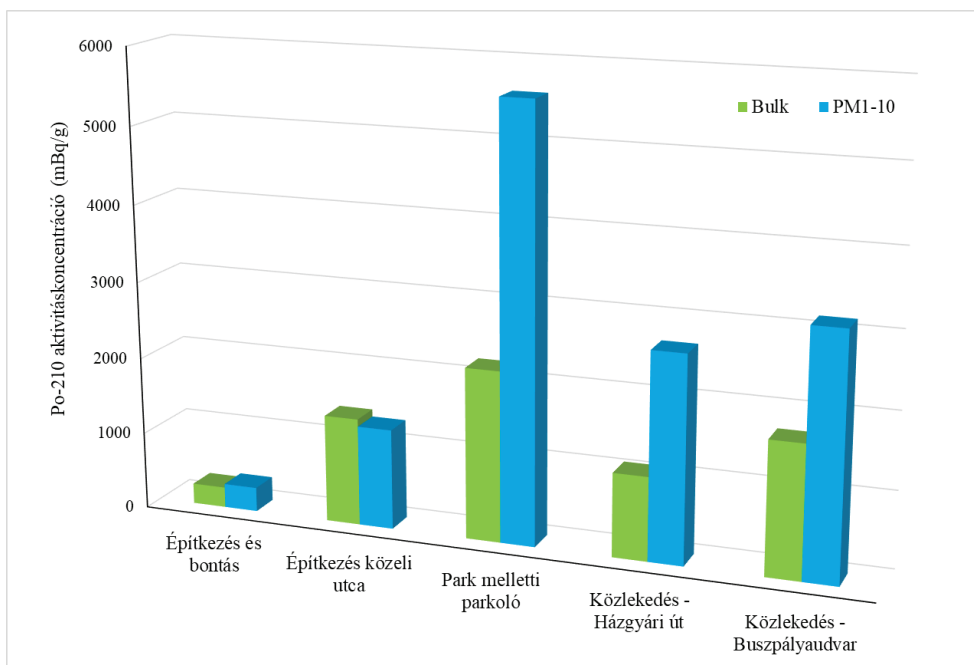
4.1. Aeroszol minták ^{210}Po aktivitás-koncentrációjának meghatározása alfa-spektrometriai módszerrel az első mérési sorozat esetén

A mérés során, a ^{210}Po és ^{210}Pb aktivitás-koncentrációjának a közlekedés és az építőipari tevékenység általi befolyásoltságát vizsgáltam. Ezt a mérést már 2023 nyarán elkezdtem. A 3. táblázatban feltüntettem a mintamennyiségeket.

3. táblázat: Bemért minta és tracer mennyisége

Minta száma	Helyszín	Mért minta (g)	Tracer (ml)
1.Bulk	Építkezés és bontás	0,950	0,5
2.Bulk	Építkezés közeli utca	1,039	0,5
3.Bulk	Park melletti parkoló	0,918	0,5
4.Bulk	Közlekedés - Házgyári út	0,989	0,5
5.Bulk	Közlekedés - Buszpályaudvar	0,987	0,5
1.PM1-10	Építkezés és bontás	0,509	0,5
2.PM1-10	Építkezés közeli utca	0,502	0,5
3.PM1-10	Park melletti parkoló	0,130	0,5
4.PM1-10	Közlekedés - Házgyári út	0,362	0,5
5.PM1-10	Közlekedés - Buszpályaudvar	0,305	0,5

A 19. ábrán a reszuszpendált aeroszol minák ^{210}Po aktivitás-koncentrációi láthatók.



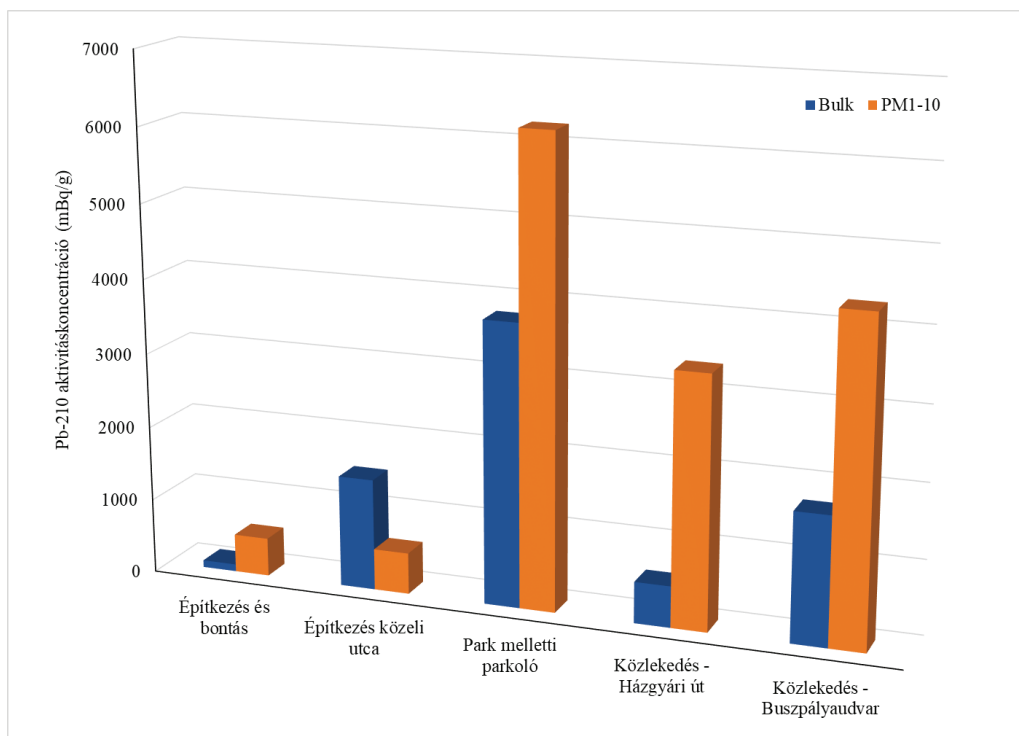
19. ábra: A reszuszpendált aeroszol minták forrásonkénti ^{210}Po aktivitás-koncentrációi

A ^{210}Po aktivitás-koncentrációja a Bulk-mintákban 264 és 2217 mBq/g között mozog, az átlagértéke 1240,9 mBq/g, míg a PM10 minták 312 és 5591 mBq/g közötti értékeket mutatnak. Ezek átlagértéke 2951,9 mBq/g. Az eredményekből látszik, hogy mind a Bulk, mind pedig a PM10 reszuszpendált aeroszol minták aktivitás-koncentrációi hasonlóan alakultak. A legkevesebb az 1-es mintában az építkezés és bontás területén volt, míg a legmagasabb értékek a 3. minta esetében, a park melletti parkolóból származó mintában kerültek kimutatásra. A három közlekedési minta (3-as, 4-es, 5-ös) nagyobb értéket mutat, mint az építkezési vagy építkezés közeli minták. A magasabb értékek a gépjárműforgalomból adódhatnak. A két utcai minta (4-es, 5-ös) vételezése nehezebb, mivel folyamatos forgalom van és a porok újra felkeverednek, majd a levegőbe juthatnak és nehezebben ülepednek. A park melletti parkolóban, (3-as minta) a lelassult forgalom miatt, könnyebben rakódnak le az aeroszol részecskék a talajra, valamint az autók indításakor a megnövekedett üzemanyaghasználat miatt az abból felszabaduló polónium is nagyobb mértékű lehet.

4.2. Aeroszol minták ^{210}Pb koncentrációjának becslése alfa-spektrometriai módszerrel az első mérésnél

Az eltett aeroszol mintákból 2024 nyarán már újra mérhettem a szekuláris egyensúly beálltát követően a ^{210}Po aktivitását, melyből megbecsültem a ^{210}Pb aktivitását, illetve kiszámoltam az aktivitás-koncentrációkat.

A 20. ábrán ezek az értékek kerültek feltüntetésre.



20. ábra: A reszuszpendált aeroszol minták minták forrásonkénti ^{210}Pb aktivitás-koncentrációi

A ^{210}Pb aktivitás-koncentrációja a Bulk-mintákban 89 és 3470 mBq/g között mozog, átlagértéke 1780 mBq/g, míg a PM10 minták 261 és 1315 mBq/g közötti értékeket mutatnak, 788,3 mBq/g átlagértékkel. Az eredményekből látszik, hogy a polóniumhoz hasonlóan a PM10-es frakció esetében is emelkedettebb volt közlekedési minták esetében az ólom aktivitás-koncentrációja a becslés alapján. A legmagasabb érték itt is a park melletti parkolóból származó (3-as) mintában volt. Mivel az ólom a polónium anyaeleme, így a méréseknél látszik, hogy hasonlóan viselkedik. Azonban, az ólom felezési ideje nagyságrendekkel nagyobb, így az egészségügyi kockázata is magasabb lehet. A szervezetből különböző módon idővel távozik (székletet, verejtéket, vizeletet, haj stb.), de kis mennyiségű ^{210}Pb felhalmozódik a csontokban, hosszú biológiai felezési idővel.

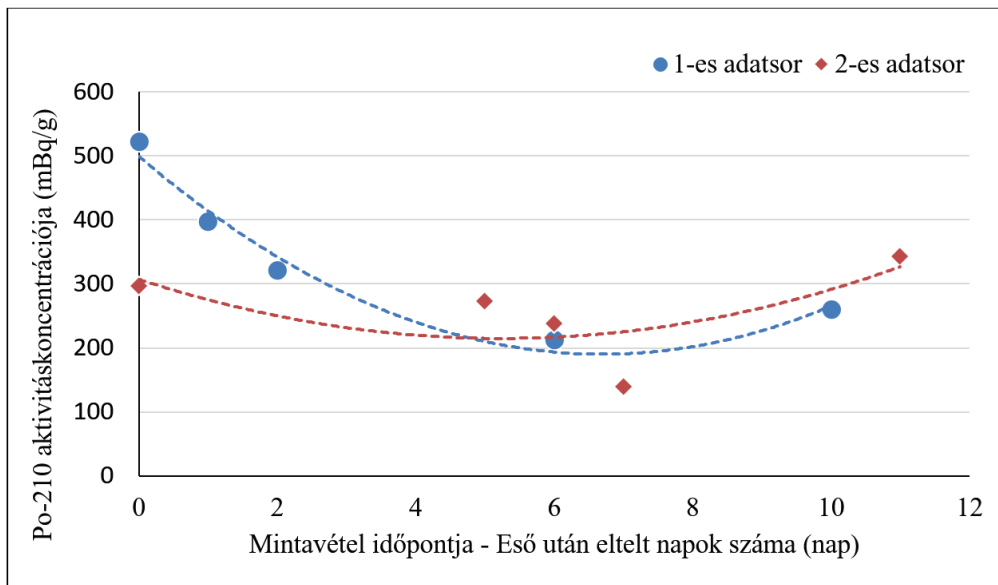
4.3. Aeroszol minták ^{210}Po aktivitás-koncentrációjának meghatározása alfa-spektrometriai módszerrel a második mérési sorozat esetében

A mérés során két időpontban történt mintavételezés, az időjárás előrejelzések szerint várható esőzések előtti napon, illetve az azt követő napokban. A mintákban ^{210}Po aktivitás-koncentrációt határoztam meg, mivel ezt a mérést már 2024 nyarán végeztem és az ólom meghatározásához az aeroszol mintákat újra mérni legkorábban csak 2025 júniusában tudom, az egyensúly beálltát követően. A bemért mintamennyiségek a 4. táblázatban kerültek feltüntetésre.

4. táblázat: Bemért minta és tracer mennyisége

Minta száma	Mintavétel időpontja (0.: eső előtt, eső utáni napok)	Bemért mennyiség (g)	Tracer (ml)
2_1	0	0,150	1
2_2	1	0,104	1
2_3	2	0,115	1
2_4	6	0,119	1
2_5	10	0,171	1
2_6	0	0,119	1
2_7	5	0,150	1
2_8	6	0,150	1
2_9	7	0,150	1
2_10	11	0,152	1
2_1_bulk	0	1,000	1
2_2_bulk	1	1,002	1
2_3_bulk	2	1,018	1
2_4_bulk	6	1,014	1
2_5_bulk	10	1,007	1
2_6_bulk	0	0,999	1
2_7_bulk	5	1,005	1
2_8_bulk	6	1,010	1
2_9_bulk	7	1,007	1
2_10_bulk	11	1,008	1

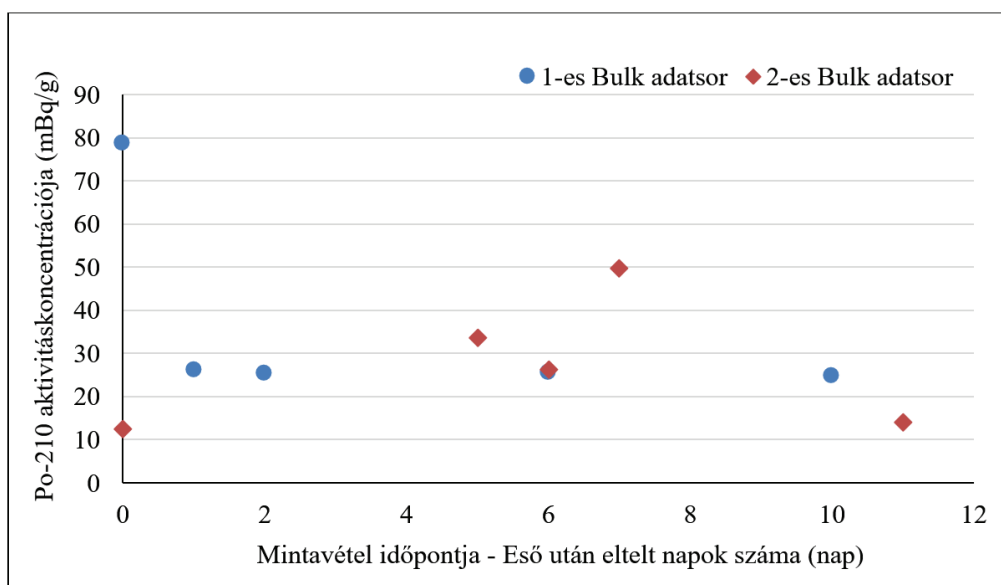
A 21. ábrán a PM-10 frakció ^{210}Po aktivitás-koncentrációja látható az eső előtti, illetve az esőt követő napokban.



21. ábra: PM10 frakció ^{210}Po aktivitás-koncentrációja

Az 1-es adatsor emelkedettebb polónium tartalomról indul, ennek oka valószínűleg a mintavételezést megelőző száraz és forgalmasabb időszak. A második mintavételi időpont a nyári szünet idejére esett, amikor a közlekedésből származó hatás minimális lehetett. Az esőt követően megfigyelhető a polónium koncentrációjának csökkenése, aminek oka a levegőben lévő aeroszol-tartalom csökkenése. Az eső hatására a levegőben lévő aeroszol részecskék könnyebben leülepednek. Mennyiségükhöz képest, valószínűleg kisebb a fajlagos polónium tartalmuk. Az esőt követően, bizonyos idő elteltével a nedvesség felszárad és az aeroszolak visszaoldódnak, reszuszpendálnak a levegőbe.

A 22. ábrán a „Bulk” frakció ^{210}Po aktivitás-koncentrációja látható az idő függvényében.



22. ábra: „Bulk” frakció ^{210}Po aktivitás-koncentrációja

A Bulk-minták szélesebb mérettartományúak, mint a PM10-es, így az ezeken megtapadt aeroszol részecskék kevésbé keverednek fel újra a levegőben, nehezebb a reszuszpenziójuk. Az 1-es Bulk-adatsor lefutása a PM10-es mintához hasonló. Ennek oka a már korábban említett fokozottabb közlekedési körülmény, és a megfigyelhető szaharai poros eső jelenléte. A levegőből feltehetőleg sokkal több olyan aeroszol válik ki az eső hatására, melyek később könnyebben visszaoldódnak, ezért az esőt követően a polónium tartalom a száradás miatt folyamatosan emelkedik. Ennek, a nagy valószínűséggel reszuszpendálódó szaharai pornak a hatása, még a mérési adatokra illesztett görbe alakját is nagyban befolyásolja, ez az adatsorok összehasonlításából látható.

A 2-es Bulk-adatsor esetén, a mintavételezés közben nem volt jelen szaharai poros levegőszennyezés és a közlekedés is kisebb mértékű volt. Így eredményként azt kaptuk, hogy az eső előtt és után nem figyelhető meg különösebb tendencia a polónium tartalom változására.

5. Összefoglalás

A munkám során a céloim, az aeroszol minták ^{210}Pb és ^{210}Po radioizotópok aktivitás-koncentrációjának meghatározása volt, melyet félvezető (PIPS) detektoros alfa-spektrometriai mérési módszer alkalmazásával végeztem. A kutatás során használt aeroszol minták reszuszpendált minták voltak, melyeket a Levegőkémia Kutatócsoport Bio-nanotechnológiai és Műszaki Kémiai Kutatóintézet biztosított.

Az első vizsgálat során a minták Veszprémből származtak, különböző forrásokból, például építési területről, park parkolójából, közlekedési csomópontokból. Az 5 db Bulk (ömlesztett) aeroszol mintán és ugyanazon forrásból származó 5 db PM10 aeroszol mintán, standard módszerrel polónium és ólom meghatározásokat végeztem azért, hogy vizsgáljam a területeken lévő aeroszol részecskékre gyakorolt antropogén hatást. Az eredményeim alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a járműforgalom nagymértékben növelheti a levegő reszuszpendált aeroszol részecskéinek ^{210}Po és ^{210}Pb aktivitás-koncentrációját.

A második mérés során a vizsgált mintáim szintén Veszprémből származtak. Ennek a vizsgálatnak a célja annak a kimutatása volt, hogy a szaharai poros eső, milyen hatással van a reszuszpendált aeroszol részecskék ^{210}Po tartalmára. Az eredményekből látható, hogy az esőzések követően lecsökken az aeroszolok polónium tartalma, de pár nap elteltével ismét felépül az eredeti szintre. A Bulk-minták esetén ilyen tendencia nem figyelhető meg. Maga a mérés 2024 nyarán került elvégzésre, ezért ezen mérési pontok esetében a ^{210}Pb aktivitás-koncentráció még nem volt meghatározható a mintákban. Pontosabb képet azután kaphatunk, hogy azok ólomkoncentrációját is megvizsgáltuk. Elvégzendő feladat még tehát, a második mérés polónium leválasztásából eltett minta ^{210}Pb tartalmának meghatározása közvetett alfa-spektrometriai módszerrel.

Eddigi eredményeim alapján megállapítottam, hogy a különböző antropogén és környezeti hatások befolyásolhatják a reszuszpendált aeroszolok ^{210}Po és ^{210}Pb aktivitás-koncentrációját. A későbbiekben szeretném ezeket a hatásokat részletesebben vizsgálni, és feltérképezni annak lehetőségét, hogy a ^{210}Po és ^{210}Pb izotópok arányából az aeroszolok legkörben való tartózkodási ideje becsülhető-e. A tartózkodási idő meghatározásával az embert érő sugárterhelés mértéke is becsülhetővé válik. Ehhez egy gyorsabb, folyadékszintillációs béta-spektrometriai eljárás alapuló ólommérési módszer kifejlesztését tervezem azért, hogy a minimum egy éves várakozási időt lerövidíthessem.

Irodalomjegyzék

- [1] MVM Paksi Atomerőmű, „Sugáregészségügyi ismeretek”.
- [2] Nemzeti Népegészségügyi Központ, „A radioaktivitásról dióhéjban,” Budapest.
- [3] Vincze Dániel, Dunántúli talajminták ^{210}Po és ^{210}Pb aktivitáskoncentrációjának meghatározása (TDK munka), 2024.
- [4] Természettudományos Tananyagok, „Radioaktivitás”.
- [5] Bertil R.R. Persson, Elis Holm, „Polonium-210 and lead-210 in the terrestrial environment: a historical review,” *Journal of Environmental Radioactivity*, 102. kötet, pp. 420-429, 2011.
- [6] Saif Uddin, Aysun U. Gorgun,.....Mohammad Al-Murad, „Climate change - mediated atmospheric ^{210}Po and ^{210}Pb distribution: How significant can it be for the inhalation dose to humans?,” *Journal of Environmental Exposure Assessment*, 05 12 2024.
- [7] Radiokémiai és Radioökológiai Laboratóriumi gyakorlat jegyzet, „Építőanyagok radiológiai minősítése (radonemanáció és -exhaláció, I-index meghatározása),” Pannon Egyetem Radiokémiai és Radioökológiai Intézeti Tanszék, Veszprém, 2020.
- [8] Handong Yang & Peter G. Appleby , „Use of lead-210 as a novel tracer for lead (Pb) sources in plants,” *Scientific Reports* 6, 22 02 2016.
- [9] Mester András, Radnóti Katalin, „A polónium története,” *Nukleon*, 1. szám, V. évf., 1. szám, V. évf., 104., 03 2012.
- [10] Bundesamt für Strahlenschutz, „BfS: Ionising radiation,” 28 06 2023. [Online]. Available: https://www.bfs.de/EN/topics/ion/effect/radioactive-materials/polonium/polonium_node.html. [Hozzáférés dátuma: 21 06 2024].
- [11] Massimo Alberto Franceschi, „Researchgate.net,” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/The-decay-chain-210-Pb-210-Bi-210-Po-206-Pb-Within-parentheses-the-half-lives-of_fig1_230904327. [Hozzáférés dátuma: 05 10 2024].
- [12] „CAICE: Introduction to Aerosols,” 2020. [Online]. Available: <https://caice.ucsd.edu/introduction-to-aerosols/#what-is-an-aerosol>. [Hozzáférés dátuma: 27 02 2025].
- [13] István Lagzi, Róbert Mészáros, Györgyi Gelybó, Ádám Leelőssy, "Atmospheric Chemistry", Eötvös Loránd University, 2013, pp. 93-96.
- [14] Ulrich Pöschl Dr., „WILEY Online Library: Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects,” 21 11 2005. [Online]. Available: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/anie.200501122>. [Hozzáférés dátuma: 27 02 2025].
- [15] Földművelésügyi Minisztérium, „kormany.hu: PM10 csökkentési program,” [Online]. Available: <https://pm10.kormany.hu/a-pm10>. [Hozzáférés dátuma: 11 04 2025].
- [16] Dr. Farkas János, Dr. Hahn István, Dr. Márialigeti Károly, Dr. Óvári Mihály, Dr. Romsics Csaba, Dr. Szabó Csaba, Dr. Szalai Zoltán, Dr. Szövényi Gergely, Dr. Tatár Enikő, Dr. Tóth Mária, Dr. Török Júlia Katalin, Környezeti mintavételezés, Szeged: Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar, 2012, pp. 97-98.
- [17] Jancsek-Turóczi Beatrix, „A reszuszpendált és belélegezhető városi aeroszol jellemzése,” Pannon Egyetem Mérnöki Kar Kémiai és Környezettudományi Doktori Iskola, Veszprém, 2014.
- [18] F. Amato, M. Pandolfi, M. Viana, X. Querol, A. Alastuey, T. Moreno, „Spatial and chemical patterns of PM 10 in road dust deposited in urban environment,” *Atmospheric Environment*, 43. kötet, pp. 1650-1659, 2009.

- [19] Radiokémiai és Radioökológiai Laboratóriumi gyakorlat jegyzet, „Félvezető detektoros alfa-spektrometria,” PE Radiokémiai és Radioökológiai Intézeti Tanszék, Veszprém, 2020.
- [20] „ORTEC: Alpha Duo, Alpha Mega and Alpha Ensemble Integrated Alpha Spectrometer Hardware Users Guide,” [Online]. Available: <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/manuals/a/alpha-duo-mega-ensemble-mnl.pdf>. [Hozzáférés dátuma: 30 09 2024].
- [21] E. Cuesta, A. Barba-Lobo, R.L. Lozano, E.G. San Miguel, F. Mosqueda, J.P. Bolívar, „A comparative study of alternative methods for 210Pb determination in environmental samples,” Radiation Physics and Chemistry, 191. kötet, 2022.
- [22] J. de la Torre Pérez a, M. Jurado Vargas a, A. Martín Sánchez a, M.P. Rubio Montero b, A.B. Ruano Sánchez, „ScienceDirect: Determination of alpha activity in solid samples by leaching or digestion,” 11 2013. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969804313001309>. [Hozzáférés dátuma: 25 06 2024].
- [23] N. Vajda, b, J. LaRosaa, R. Zeisler, P. Danesi and Gy. Kis-Benedek, „A Novel Technique for the Simultaneous Determination of 210Pb and 210Po Using a Crown Ether,” J. Environ. Radioactivity, 1997.
- [24] Dr. Somlai János, „Nukleáris mérési technológia környezetmérnököknek,” Pannon Egyetem – Környezetmérnöki Intézet, Veszprém, 2013.
- [25] Villa-Alfageme, M., Mas, J. L., Hurtado-Bermudez, S., Masqué, P., „Rapid determination of 210 Pb and 210 Po in water and application to marine samples,” Talanta 160, pp. 28-35, 2016.
- [26] Vajda Nóra, „Analitikai módszerek fejlesztése nehezen mérhető radioizotópok meghatározására” Budapest, 2014.
- [27] „UNSCEAR: Sources and effects of ionizing radiation,” 2000. [Online]. Available: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf. [Hozzáférés dátuma: 24 10 2024].
- [28] Anita Csordás, Máté Novák, Edit Tóth-Bodrogi, Péter György, Máté Fehérvári, Tibor Kovács, „Assessment of anthropogenic impacts on the radioecological status of the Bakony region, Hungary,” J. Radioanal. Nucl. Chem., 2023.

