

OTDK DOLGOZAT

Fazekas Imre Vajk

2024.



SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITAS SCIENTIARUM SZEGEDIENSIS
MÉRNÖKI KAR

***SAJÁT TERVEZÉSŰ 3D NYOMTATOTT ÁRAMLÁS TERELŐK
TOVÁBBFEJLESZTÉSE***

OTDK DOLGOZAT

Fazekas Imre Vajk

Gépészmérnök BSc

hallgató

Témavezető:

Dr. habil. Kertész Szabolcs

egyetemi docens

SZEGED

2024.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	4
2. Irodalmi áttekintés	6
2.1 Szennyvizek és szennyvíztisztítás	6
2.1.1 Szennyvizek	6
2.1.2 Élelmiszeripari szennyvizek	7
2.1.3 Tejipari szennyvizek	8
2.1.4 Szennyvízkezelés	9
2.1.5 Membránszeparációs eljárások	10
2.1.6 Nyomáskülönbségen alapuló membránszeparációs eljárások	11
2.1.7 Membránok eltömődése	13
2.2 3D nyomtatás	15
2.2.1 3D nyomtatási technológiák.....	15
2.2.2 FDM 3D nyomtatás.....	17
2.2.3 Nyomtatási alapanyagok mechanika tulajdonságai:	19
3. Anyagok és módszerek.....	21
3.1 3D nyomtatók	21
3.1.1 Szálhúzásos 3D nyomtató	21
3.1.2 Gyantás 3D nyomtató.....	21
3.2 Felhasznált szoftverek.....	22
3.2.1 Rajzolás és 3D tervezés.....	22
3.2.2 Szeletelés, gcode készítés	23
3.3 Membránszűrő berendezés és használati paraméterei	24
3.4 Modellszennyvíz	25
3.5 Analitikai módszerek	26

3.5.1 Lebegőanyag tartalom mérése.....	26
3.5.2 Vezetőképesség, teljes oldott anyag tartalom és pH mérése.....	26
3.5.3 Szervesanyagok mennyiségének mérése, kémiai oxigénigény	26
3.5.4 Beltartalmi értékek mérése.....	27
3.6 3D nyomtatott áramlás terelők.....	28
4. Eredmények és kiértékelésük	31
4.1 Anyagválasztás mechanikai tulajdonságok alapján.....	31
4.2 Membránszűrések sebessége, fluxusok	33
4.2.1 Vibrációs méréseim eredményei	34
4.2.2 Áramlás terelőkkel végzett méréseim eredményei	35
4.2.3 Kombinált módszerekkel végzett méréseim eredményei.....	36
4.3 Membránszűrések gazdaságossága I. / Membránok ellenállásai	37
4.4 Membránszűrések minősége, visszatartási értékek, analitika.....	41
4.4.1 Szervesanyag tartalom változásai, Kémiai oxigénigény	41
4.4.2 Egyéb analitikai vizsgálatok (zavarosság, vezetőképesség)	42
4.4.3 Beltartalom mérések, Bentley 150	43
4.5 Membránszűrések gazdaságossága II. / Energiaigények változása	44
4.5.1 Vibrációs méréseim eredményei	44
4.5.2 Áramlás terelőkkel végzett méréseim eredményei	45
4.5.3 Kombinált módszerekkel végzett méréseim eredményei.....	46
5. Összefoglalás	48
6. Irodalomjegyzék	50

RÖVIDÍTÉS JEGYZÉK – HU (ENG)

ABS – Akrilnitril-butadién-sztirol (Acrylonitrile butadiene styrene)

BOI – Biokémiai oxigénigény

CAD – Számítógéppel támogatott tervezés (Computer aided design)

CIP – Egyben tisztítás (Clean in place)

DMBR – Dinamikus membrán bioreaktor (Dynamic membrane bioreactor)

ESMST – Európai Membrántudományi és Technológiai Társaság

FDM – Szálhúzásos modellezés (Fused Deposition Modelling)

GPM – Gallon per perc (Gallon Per Minute)

KOI – Kémia oxigénigény

MF – Mikroszűrés (Microfiltration)

MWCO – Vágási érték (Molecular weight cut-off)

NF – Nanoszűrés (Nanofiltration)

PES – Poliéterszulfon

PETG – Polietilén-tereftalát-glikol (Polyethylene terephthalate glycol)

PLA – Politejsav (Polylactic acid)

PTFE – Teflon

RO – Fordított ozmózis (Reverse osmosis)

SLA – Sztereolitográfia (Stereolithography)

SLS – Szelektív lézerszintézis (Selective Laser Sintering)

TDS – Összes oldott anyag (Total dissolved solids)

TMP – Transzmembrán nyomás (Transmembrane pressure)

TPU – Hőre lágyuló elasztomer (Thermoplastic polyurethane)

TSS – Összes lebegő anyag (Total suspended solids)

UF – Ultraszűrés (Ultrafiltration)

UV – Ultraibolya (Ultra violet)

VRR – Térfogatcsökkenési arány (Volume reduction ratio)

VSEP – Vibrációs nyírással megerősített feldolgozás (Vibratory shear enhanced processing)

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben a különböző iparágak sosem látott mértékben fejlődtek és terjeszkedtek világunkban. Ez amellet, hogy rengeteg pozitív változást és jelentős életminőségjavulást hozott a mindennapjainkba, új kihívásokkal és megoldásra váró problémákkal is szembesítette az emberi társadalmat. Az egyik legnagyobb ilyen kihívás, amivel szembe kell néznünk, az a jelentős mennyiségben keletkező szennyezett vizek és szennyvizek kezelésének problémája, például a városi és ipari szennyvizek megtisztítása. Továbbá ezek gyűjtése, megfelelő kezelése és ártalmatlanítása rendkívül komoly feladat, mely egyaránt fontos közegészségügyi, fenntarthatósági és erőforrás megőrzési szempontokból is (Bulan Nasution et al., 2022). Többek között azért választottam a szennyvízkezelést OTDK kutatási témámnak, mert rendkívül fontosnak tartom a földi erőforrásaink megfelelő felhasználását és szeretnék szerepet vállalni környezetünk megóvásában is.

Napjainkban a szennyvízkezelési technológiáknak egy igen fontos részét képezik a membránszűrési technikák. Ez a membrános eljárásokhoz tartozó, nyomás-különbségen alapuló membránszeparációs eljárásoknak is nevezett műveletek összessége. A membrános eljárások az egyik legelterjedtebb és leggyorsabban fejlődő eljárások több iparágon belül is. Legfőbb előnyei, hogy energiaigényük kicsi, méretnövelésük egyszerű, könnyen már meglévő technológiára illeszthető és vegyszermentes technológia (vagy csökkentett vegyszerigényű). Az alkalmazási műveletük folyamata során könnyen kombinálhatók más eljárásokkal, például egy bioreaktor sorba kötésével létrehozhatunk egy dinamikus membrán bioreaktort (*DMBR*) amely tovább növelheti a víztisztító rendszer hatékonyságát (Chimuca et al., 2022). A membrános rendszerek elve, hogy szűrésre félig áteresztő membránokat alkalmaz, amelyek lehetővé teszik a vízmolekulák áthaladását, miközben részben vagy egészben visszatartják a vízben található szilárd részecskéket (Mulyati et al., 2023). Kutatásom során nyomáskülönbségen alapuló eljárásokkal foglalkoztam, melyekhez a mikroszűrés (*MF*), ultraszűrés (*UF*), nanoszűrés (*NF*) és a fordított ozmózis (*RO*) is tartozik. A OTDK munkámban ezeken belül is az ultraszűrési típust vizsgáltam meg részletesen, melynek pórusmérete 1-10nm között mozog, használatához pedig átlagosan 2-10 bar nyomásra van szükségünk. Ultraszűrő membránok segítségével a szennyvízből kiszűrhetjük például a szuszpendált anyagokat, vírusokat és baktériumokat, azonban a cukrokat, egy és több vegyértékű ionokat nem.

A membránszűrésnek azonban még napjainkban is a legnagyobb hátulütője a működtetési műveleteik során óhatatlanul bekövetkező membrán eltömődés. A művelet előrehaladtával, már viszonylag rövid idő elteltével a membrán felületén maradt és a pórusokban lerakódott visszatartott részecskék gátolják a fluidum membránon történő átáramlását, ezzel jelentősen csökkentve az eljárás hatékonyságát (állandó nyomású rendszereknél a fluxus csökken, állandó fluxus esetén pedig a nyomásigény növekszik). Az eltömődés kiküszöbölésére számos módszert vizsgáltak és kutattak már, mint például visszaöblítést, amikor néhány másodpercig a permeátumot ellentétesen áramoltatják át a membránon, vagy különféle tisztítószerkeket, enzimes adalékokat, esetleg modul vibrációt, valamint áramlás terelő egységek modulba integrálását/illesztését. Méréseim során az utóbbi két módszert és kombinációjukat teszteltem és hasonlítottam össze.

A OTDK méréseimhez egy VSEP Series L típusú speciális, moduljának vibráltatására alkalmas membránszűrő berendezést, egy ultraszűrő membránt és a laboratóriumban frissen előállított tejipari modellszennyvizet használtam.

A OTDK munkám során arra a kérdésre kerestem a választ, hogy milyen az a spacer, vagyis áramlás terelő geometriai kialakítás, illetve alapanyag, amely számunkra a lehető legmegfelelőbb tulajdonságokkal rendelkezik. Ennek érdekében az első kísérlet sorozatomban az általam megtervezett 3D nyomtatott áramlás terelőket mechanikai vizsgálatoknak (szakítószilárdságra és maximális nyúlásra) vettem alá. Előzetes irodalmi kutatásom és témavezetőm javaslatai alapján az áramlás terelőket műanyag szálból (*PLA*, *PETG*, *PCTG* és *TPU* filament), valamint gyantás alapanyagból készítettem. A következő kísérlet sorozatomban az előzőekben kapott eredmények alapján kiválasztott anyagú és kialakítású áramlásterelőkkel végeztem el a membránszűrési kísérleteket. Célom a szeparációs művelet sebességének (permeátum fluxusok alapján), minőségének (különböző anyagokra vonatkoztatott visszatartási értékek alapján) és gazdaságosságának (ellenállási értékek és energia értékek alapján) meghatározása volt. Ennek érdekében végeztem méréseket a berendezés alap konfigurációjában, azaz modulvibráció és áramlás terelő nélkül, magas/alacsony vibrációval és anélkül, áramlás terelők modulba illesztésével és anélkül, valamint ezek kombinációjával.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Szennyvizek és szennyvíztisztítás

2.1.1 Szennyvizek

A szennyvíz hivatalos definíciója a következő: “a termelési, szolgáltatási, fogyasztási tevékenység során használt, a használat – illetve az üzemi területen összegyűlő csapadékvizek esetében bemosódás vagy keveredés – következtében fizikai, kémiai vagy biológiai minőségében megváltozott, vízszennyező anyagot tartalmazó víz” (220/2004. (VII. 21.) Kormány Rendelet a felszíni vizek minősége védelmének szabályairól, 2023). Leegyszerűsítve tehát a szennyvíz, olyan háztartásban vagy iparban használt vizet jelent, mely valamilyen emberi behatás miatt, fizikai, kémiai vagy biológiai szempontból minőségromláson ment keresztül. Ahhoz, hogy ezt a vizet vissza tudjuk engedni a környezetbe vagy újból fel tudjuk használni, gondoskodnunk kell a szennyező anyagok megfelelő eltávolításáról, illetve ezen anyagok ártalmatlanításáról is.

A szennyvizek egyik legáltalánosabb jellemzője, hogy rendkívül heterogén összetételűek lehetnek, a szerves és szervetlen anyagok mellett, tartalmazhatnak mikroorganizmusokat, toxinokat és egyéb lebegő, szilárd részecskéket. A származásukból jól kikövetkeztethető a szennyvíz szennyezettségének mértéke és milyensége. A szennyvizet eredete szerint tudjuk besorolni három nagyobb kategóriába, melyek a következők:

Háztartási szennyvíznek nevezzük azokat a vizeket, amelyek mindennapi tevékenységek (fürdés, takarítás, főzés, WC használat) során kerülnek a szennyvízelvezető rendszerbe. A háztartási szennyvizek szennyezőanyag összetétele rendkívül összetett, kórokozók mellett nagymennyiségű foszfort és nitrogént is tartalmazhatnak (Widyarani et al., 2022). Ipari szennyvíznek nevezzük azokat a hulladék vizeket, melyek valamilyen gyártási folyamat során keletkeznek, legyen szó fizikai, kémiai vagy biológiai eljárásokról. Összetételük sokrétű lehet és erősen függ az előállítás ipari jellemzőitől, de általánosságban majdnem mindre igaz, hogy tartalmaz mind szerves, mind szervetlen anyagokat, nehézfémeket, mérgeanyagokat és egyéb, az emberre és a környezetre káros anyagot is (Oguttu et al., 2008). Mezőgazdasági szennyvíznek nevezzük a különböző mezőgazdasági tevékenységekből származó folyékony hulladékot. Ide tartoznak az öntözésből, trágyázásból, állattartásból és a mezőgazdasági termékek előállításából származó vizek is. Összetételük az előző két típushoz hasonlóan igen változatos lehet, azonban itt is megvannak az általánosan jelenlévő szennyező anyagok, mint a különböző tápanyagok (nitrogén és foszfor), növény- és rovarirtószeres, szerves anyagok és kórokozók (Hartini, 2022).

A szennyvizeket több analitikai szempontból is meg szoktuk vizsgálni, ezek közül a leggyakrabban használtak közé tartozik, a teljes oldott anyag koncentráció (*TDS*), a lebegőanyag-tartalom (*TSS*), a turbulencia (a különböző szilárd anyagok befolyásolják a fény folyadékban történő megtörését, ezt pedig számszerűsíteni tudjuk), az elektromos vezetőképesség, a pH érték, biokémiai oxigénigény (*BOI*), valamint a kémiai oxigénigény (*KOI*) mérése (Majerek et al., 2019).

2.1.2 Élelmiszeripari szennyvizek

Élelmiszeripari szennyvíznek nevezzük azokat a melléktermékeket, amelyek valamilyen termék előállítási technológiájában az étel vagy ital készítése során keletkeznek. Az élelmiszeripar számos területre osztható, melyekből származó elhasznált vizek összetétele merőben eltérhet egymástól. Összességében azonban elmondható, hogy ezeknek nagy a szerves, oldott és tápanyag tartalmuk.

A tejipari szennyvizeket magas *BOI* és *KOI* értékek jellemzik, nagy mennyiségben tartalmaz fehérjéket, zsírokat és laktózt. Ez az iparág a legnagyobb szennyvíztermelő az élelmiszeriparban, naponta akár 500 köbmétert is meghaladhatja a kibocsátott melléktermékek mennyisége (Pathak et al., 2016). A húsipari szennyvizet a vágóhidak és húsfeldolgozó üzemek melléktermékei, jelentős szerves anyag, fehérje- és zsírtartalom jellemzi. Kezelése kifejezetten nehéz feladatnak bizonyul a magas patogén tartalma miatt (Onet, 2010). Az italipari szennyvizekhez sorolandó mind az alkoholos, mind az alkoholmentes italok előállítása, ezért szennyvizei igen sokrétűek lehetnek, míg az alkoholos italok vizei magas szervesanyag tartalmú, addig egy üdítő előállítása során magas cukortartalmú és savas szennyvizek keletkeznek (Abrha & Chen, 2017). Gyümölcs- és zöldségiparban a gyümölcsök és zöldségek pucolása, feldolgozása, de legfőképpen mosása során keletkezik a legtöbb szennyvíz. Szerves és tápanyag tartalma az előző típusokhoz hasonlóan magas, azonban ennek a szennyvíznek van a legmagasabb lebegő szilárd anyag tartalma. Keményítő- és gabonaiparban a burgonya, kukorica vagy más gabonafélék feldolgozása során keletkező szennyvíz magas szervesanyag-tartalommal rendelkezik, és jelentős mennyiségű lebegő szilárd anyagot, valamint keményítőmaradványokat tartalmaz (Habibi et al., 2024).

2.1.3 Tejipari szennyvizek

Az előbbi listából a tejipari szennyvizeket emelem ki és részletezem a továbbiakban, mivel én méréseim során ezeket használtam, minden esetben friss szintetikus, modell szennyvíz előállítása után. Tejipari szennyvíznek nevezzük a tejtermékek előállítása (például tejfeldolgozás, sajtkészítés) során keletkező melléktermékeket. Ezeket a vizeket magas szervesanyag tartalom jellemzi, összetételük nagy részben zsírokból, fehérjékből, laktózból és különböző tisztítószerkekből áll, éppen ezért magas lesz a kémiai és biokémiai oxigénigényük. Egyes tejipari iparágak szennyvizei merőben eltérhetnek egymástól az előállított termékek típusa és az alkalmazott tisztítási módszerek közötti különbségek miatt (Pathak et al., 2016).

A tejipari szennyvizek megfelelő kezelése kulcsfontosságú szerepet játszik környezetünk megóvásában, ugyanis, ha túl magas szerves- és tápanyagtartalmú vizek jutnak a természetes vizeinkbe azok eutrofizációt, másnéven elalgásodást okozhatnak. A folyamat során a víz tápanyag (főként a nitrogén és a foszfor) tartalma drasztikusan megnő, ennek következtében a vízi növényzet, elsősorban az algák intenzív burjánzásba kezdenek. A növényzet túlzott elszaporodása csökkenti a vízben lévő oldott oxigén mennyiségét, ezzel a halak és más vízi élőlények pusztulásához vezethet, ezek bomlása során pedig üvegházhatású gázok jutnak a légkörbe. Tehát az eutrofizáció amellet, hogy felborítja a természetes vizeink ökológiai egyensúlyát, a klímaváltozást is negatívan befolyásolja (Janet Joshiba et al., 2019). Ezen felül az elmúlt években egyre több tejipari szennyvízben lett kimutatható néhány eddig még nem jellemző szennyező anyag, hormonok és szteroidok formájában. Ezeket a szennyeződések mikroszennyezőknek nevezzük, ebbe a kategóriába tartoznak többek között a humán és állati gyógyszerek, az ipari vegyszerek és a mikroműanyagok is. Kiszűrésükre a jövőben igen nagy hangsúlyt kell fektetünk, mert a környezetbe kerülésükkel, sokkal nagyobb károkat tudnak okozni, mint a fentebb említett egyéb szennyeződések (Muradin & Foltynowicz, 2017).

1. táblázat Szennyvíz mennyiségek egyes tejipari tevékenységekben (IPPC, 2005)

Terméktípus	Szennyvíz mennyiség (m ³ /t feldolgozott tej)
Fehértermék (pl. tej, tejszín, joghurt)	3
Sárga termék (pl. sajt, vaj)	4
Speciális termék (pl. szárított tejtermék)	5

A tejtermékek gyártása közben a szennyvíz jelentős része mosásnál keletkezik, legyen szó termékváltás miatti gépmosásról, pasztörözési folyamat indításáról vagy termékmosásról. A legtöbb üzem úgynevezett *CIP* (clean in place) rendszerrel van felszerelve, ami lehetővé teszi, hogy a gépeket, tartályokat és csőrendszereket szétszerelés nélkül lehessen megtisztítani. Továbbá a rendszer csökkenti a víz-, energia- és tisztítószerfelhasználást, viszont a tejjiparnak ennek ellenére is kiemelkedően magas a szennyvíztermelése.

2.1.4 Szennyvízkezelés

Szennyvízkezelésnek nevezzük azokat a folyamatokat, melyek során a szennyvizet begyűjtik, megfelelő módon kezelik és ártalmatlanítják. A végső célunk az, hogy a vízben lévő idegen anyagok számát a határértékek alá vigyük. A szennyvízkezelést 3 alap típusra tudjuk felosztani (mechanikai, biológia és kémia), ezek együttesen teszik ki a tisztítás teljes folyamatát.

I. fázis – Mechanikai tisztítás: A mechanikai tisztítás elsődleges feladata a szilárd részecskék kiszűrése, egészen a nagyobb daraboktól, a szemmel alig látható szennyeződésekig. Az eljárás során a vizet, több, általában szita vagy rácsos kialakítású szűrőn áramoltatjuk át, miközben lépésről lépésre csökkentjük a szűrőfelületek pórusméreteit. Miután a legnagyobb darabok kiszűrésre kerültek, a nehezen vagy egyáltalán nem szűrhető anyagokat ülepítő- vagy centrifugaberendezések segítségével választjuk el a víztől. Az eljárás során a nehezebb részecskék (pl.: homokszemek) a fenék mentén egy iszap réteget képeznek, míg a kisebb sűrűségű anyagok (pl.: olajok, zsírok) a víz felszínén gyűlnek majd össze. A mechanikai tisztítás nem csak azért lényeges lépés, mert megóvja a későbbi folyamatok során használt tisztító berendezéseket a kopást, eltömődést vagy egyéb károsodást okozó anyagoktól, hanem azért is, mert ezekkel az eljárásokkal közel 30%-kal csökkenthetjük a szennyvíz *BOI* és *KOI* értékeit (Zieliński et al., 2013).

II. fázis – Biológiai tisztítás: A biológiai tisztítás során a szennyvíz szerves anyag és tápanyag tartalmát csökkentjük. Ehhez különböző aerob és anaerob mikroorganizmust használunk fel, melyek lebontják a vízben található legtöbb szerves szennyeződést. A folyamat során leggyakrabban aktív iszapot, csepegtető szűrőket és biofilm reaktorokat használunk. A szerves anyagok lebontásával szintén a szennyvíz *BOI* és *KOI* értékeinek csökkenését fogjuk elérni. Az eljárások végére a szennyvíz szerves anyag tartalma akár 90%-kal is csökkenhet (Vasina & Basamykina, 2022).

III. fázis – Kémiai tisztítás: A szennyvíztisztítás utolsó fázisában a továbbra is fennmaradó szennyeződések (foszfor és nitrogén maradványok, patogének, vírusok és baktériumok) távolítjuk el kémiai módszerekkel. A különböző szennyeződések közül nagyobb részecskéket állíthatunk elő flokkuláció vagy koaguláció segítségével, melyeket könnyen eltávolíthatunk a fentebb említett módszerek valamelyikével. Emellett gyakori az ózonnal vagy *UV* fénnel való fertőtlenítés is ebben a fázisban, mely segít megszabadulni a szennyvízben lévő vírusoktól és baktériumoktól (Spychała & Nguyen, 2019).

Az eljárások végére (a folyamatok jellegétől függően) olyan tisztaságú vizet kaphatunk, mely alkalmas lehet újbóli ipari vagy mezőgazdasági felhasználásra. Amennyiben még tisztább eredményt szeretnénk elérni, úgy lehetőségünk van további tisztításra különböző eljárások, például membránszűrés segítségével.

2.1.5 Membránszeparációs eljárások

A membrán egy olyan szűrő egység, amely a szelektív áteresztőképessége révén, anyagokat választ szét anélkül, hogy a folyamat közben kémiai átalakulások következzenek be. Az *ESMST* (Európai Membrántudományi és Technológiai Társaság) meghatározása szerint a membrán közbenső réteggként működik két fázis elválasztásakor, és aktív vagy passzív válaszfalként részt vesz a vele érintkező fázisok közötti anyagátvitelben. A membránok azon képességét, hogy különböző anyagokat eltérő mértékben enged át, permszelektivitásnak nevezzük. A permszelektív kifejezés magában foglalja a membránszeparáció szempontjából lényeges két fő tulajdonságot: a szelektivitást és a permeabilitást, ami áteresztőképességet jelent (Fonyó Zsolt, 2004).

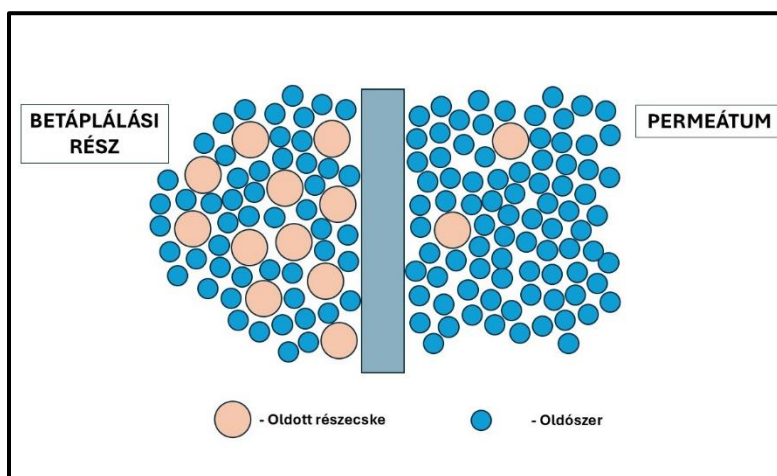
A membránok működési elve a következő; a szétválasztani kívánt közeget a membrán betáplálási oldalára vezetjük, majd a megfelelő hajtóerőt alkalmazva a kimeneti oldalon begyűjtjük a szűrletet, ami már csak azokat az anyagokat tartalmazza, melyek képesek voltak áthaladni a membrán felületén (1. ábra). A membránszeparációs műveleteket meghajtóerőik alapján tudjuk csoportosítani:

- Koncentráció különbség (pl.: gőzszeperáció, dialízis)
- Elektromos potenciálkülönbség (pl.: elektrodialízis)
- Hőmérsékletkülönbség (pl.: membrán desztilláció)
- Nyomáskülönbség (pl.: mikroszűrés, ultraszűrés, nanoszűrés, fordított ozmózis)

A membrános eljárások jellemzésére használt egyik érték a szűrés fluxusa, ami azt jelöli, hogy egységnyi idő alatt, a membrán egységnyi felületén mekkora tömegű vagy térfogatú permeátum jut át. Képlete a következő:

$$J = \frac{dV_{sz}}{dt} \cdot \frac{1}{A} [m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}] \quad (1)$$

Ahol, dV_{sz} a szűrlet mennyisége, dt az idő, A pedig a szűrőfelület.



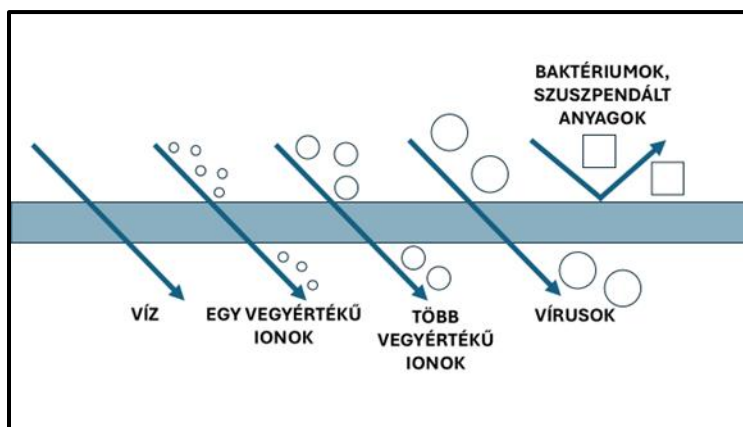
1. ábra Membránszűrés egyszerűsített ábrája (saját készítésű ábra¹)

2.1.6 Nyomáskülönbségen alapuló membránszeparációs eljárások

A nyomáskülönbségen alapuló membránszűrést széles körben alkalmazzák az iparban, elsősorban szennyvízkezelésre. A fenti felsorolásból is látszik, hogy a nyomáskülönbségen alapuló membránszeparációs eljárásokat 4 csoportba tudjuk osztani:

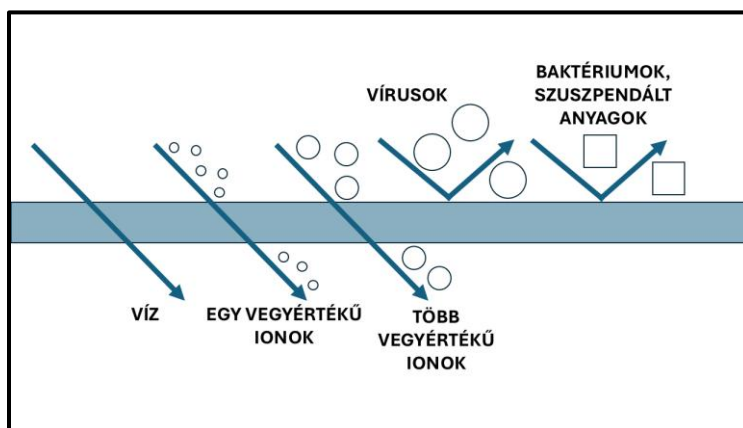
Mikroszűrés (MF): Az itt használt membrán jellemzően 0,1 és 10 mikrométer közötti pórusmérettel rendelkezik, a működéséhez szükséges transzmembrán nyomás (TMP) 10-500 kPa. A módszer lehetővé teszi a nagyobb részecskék, például lebegő szilárd anyagok, baktériumok és néhány kolloid elválasztását a folyadékoktól. A mikroszűrést gyakran használják előkezelési lépésként a szennyvízkezelés során, sterilizálásra a gyógyszeriparban és részecske eltávolításhoz az energia és mikroelektronika iparban (2. ábra).

¹ Minden ábra és fénykép saját készítésű, kivéve ahol egyéb forrás van megjelölve (7, 8, 9. ábra)



2. ábra Mikroszűrés szűrési tulajdonságai

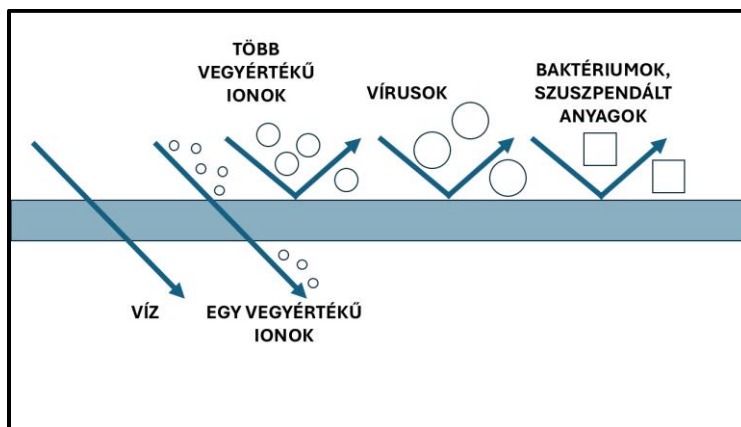
Ultraszűrés (*UF*): Az ultraszűrő membránok 1-100 nanométeres pórusméretekkel rendelkeznek és transzmembrán nyomásuk 0,1-1 MPa és képesek megtartani a makromolekulákat, fehérjéket és egyes vírusokat. Azonban általában a pórusméretet nem konkrét hosszúság-dimenzióval adják meg, hanem az úgynevezett vágási értékkel (*MWCO*), melynek mértékegysége a dalton [Da] (vagy kilodalton [kDa]). Ez az érték azt a globuláris fehérje móltömegét adja meg, melyet a membrán minimum 90%-ban visszatart. Az ultraszűrés széles körben alkalmazott az élelmiszer- és italiparban gyümölcslevek tisztítására, valamint a szennyvízkezelésben szerves anyagok és kórokozók eltávolítására (3. ábra).



3. ábra Ultraszűrés szűrési tulajdonságai

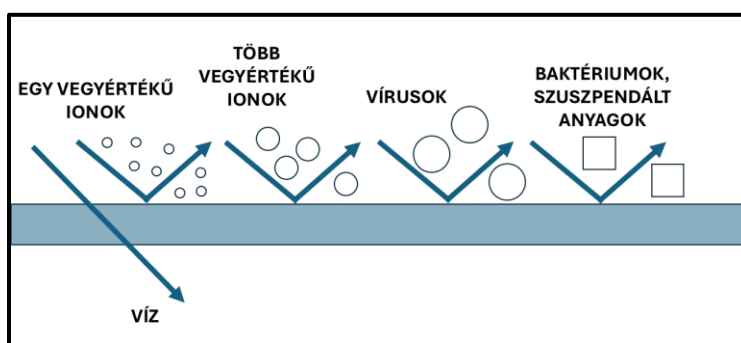
Nanoszűrés (*NF*): A nanoszűrő membránok képesek elkülöníteni a kis szerves molekulákat és a több vegyértékű ionokat (pl. kalciumot és magnéziumot) a közegüktől, miközben az egy vegyértékű ionok (pl. nátrium és klorid) áthaladhatnak rajta. A nanoszűrő egy nem pórusos membrán, éppen ezért jellemzésére valamilyen komponensre (általában ionra vagy sóra)

vonatkoztatott retenciós értéket használnak. A megfelelő működéséhez szükséges transzmembrán nyomás 0,6-4 MPa között mozog. Gyakran alkalmazzák ivóvíz előállításnál és a gyógyszeriparban, például antibiotikum gyártásánál (4. ábra).



4. ábra Nanoszűrés szűrési tulajdonságai

Fordított ozmózis (RO): A fordított ozmózis egy magas nyomású folyamat, amely egy bőrtípusú membránt használ, jellemzésére a nanoszűrőhöz hasonlóan komponensre vonatkoztatott retenciós értéket adnak meg, használata 2-10 MPa igényel. Hatékonyan távolítja el a feloldott sókat, szerves molekulákat és egyéb szennyező anyagokat a szűrni kívánt közegekből. A fordított ozmózist gyakran használják a tengervíz sótalanításra, valamint kazán tápvizek előkészítésére és ultratiszta vizek előállítására (5. ábra) (Dr. Kertész Szabolcs szóbeli közlés, 2024).



5. ábra Fordított ozmózis szűrési tulajdonságai

2.1.7 Membránok eltömődése

Membrán eltömődésről akkor beszélünk, ha szilárd részecskék, szerves anyagok felhalmozódása történik a membrán felszínén vagy annak pórusaiban, a membránnal végzett

szétválasztás alatt. Az eltömődés következményei sokrétűek lehetnek, elsősorban a szennyeződés a permeátum fluxusának csökkenéséhez vezet, ami megköveteli az üzemi nyomás növelését, a permeátum állandó áramlási sebességének érdekében. Ez magasabb energiafogyasztást és működési költségeket eredményezhet. Az eltömődött membránon keresztüli szűrés befolyásolhatja a permeátum minőségét is, egy eltömődött membrán szűrlete szennyezettebb lesz, mint egy új, tiszta membráné. Emellett az eltömődés csökkentheti a membránok élettartamát, ami gyakoribb cseréket és megnövekedett karbantartási költségeket eredményezhet (Du et al., 2020).

Két típusát különböztetjük meg az eltömődéseknek, aszerint, hogy a szennyeződések milyen mértékben kötődnek a membrán külső felületéhez és pórusaihoz. A még visszafordíthatót reverzibilisnek, a visszafordíthatatlant pedig, irreverzibilisnek nevezzük. A reverzibilis eltömődések fizikai módszerekkel kiküszöbölhetőek. A cél az ilyen eljárások során az, hogy nagy nyíróerőt hozunk létre, mely segítségével kimozdítjuk a szennyeződések a membrán felületéről és/vagy pórusaiból. Ilyen módszer például a vibráció, statikus keverőelemek beépítése vagy az ultrahang használata. Másik hasonló eljárás az úgynevezett backwashing, azaz recirkulációs mosás, melynek során a permeátumot rövid ideig nagy térfogatárammal visszaáramoltatjuk a membránon keresztül, így az kimossa a pórusokban és felületen maradt szennyeződések (Amirafzabi et al., 2014).

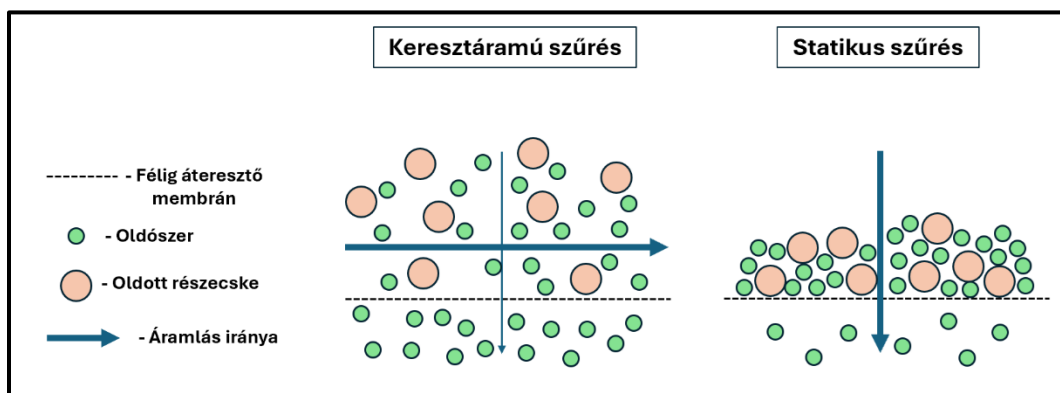
Fizikai tisztítási módszerek mellett, gyakran alkalmaznak kémia eljárásokat is, melyek a makacsabb szennyeződésekkel is elbánnak, mivel ilyenkor különféle vegyületeket használnak a szennyeződések oldására és eltávolítására. Az alkalikus oldatok, mint például a nátrium-hidroxid (NaOH), hatékonyak a szerves szennyeződések és biofilmek eltávolításában, mivel képesek lebontani az extracelluláris polimer anyagokat, amelyek a szennyeződések a membrán felszínéhez kötik. A savas vegyületeket, mint például a sósavat (HCl), gyakran utólagosan alkalmazzák a nem organikus lerakódások eltávolítására, valamint a szennyeződések és a membrán közötti kötések további gyengítésére. Az elmúlt pár évben egyre szélesebb körben végeznek kutatásokat olyan tisztítószer kifejlesztésére, amik kevésbé, vagy egyáltalán nem szennyeznek a környezetet (Sanawar et al., 2018).

A membránok eltömődésében nagy szerepet játszik a szűrési elrendezés is. Két alapvető típust különböztünk meg, a statikus (dead-end) és a keresztáramú (crossflow) elrendezést. A két módszer közötti legnagyobb különbség a szűrendő közeg áramlásának iránya a membrán

felületéhez képest. Jelentős eltérések figyelhetők meg mind a fluxus csökkenésének, mind a keletkező iszaplepleny vastagodásának mértékében (Dr. Kertész Szabolcs szóbeli közlés, 2024).

Statikus szűrés esetén a szűrendő közeget a membrán felületére merőlegesen vezetjük rá, tehát ebben az esetben a szűrlet és a szűrendő anyag, valamint a nyomóerő is egy irányba mutat. Az elrendezés előnye, hogy a folyamat elején kifejezetten nagy térfogatárama lesz a szűrletnek, azonban pont ezért, az iszaplepleny is nagyon hamar kialakulhat. Emiatt, a folyamatos fluxus eléréséhez a membrán folyamatos mosása, cseréje vagy betétekkel való tisztítása lesz szükséges.

Keresztáramú szűrésnél az áramlás iránya és a nyomóerő, valamint a szűrlet kivezetése egymásra merőlegesek. Ez azért előnyös, mert ahogyan a 6. ábrán is látható, a beáramló fluidum nem nyomja bele a membrán felületébe a kialakult gélréteget, így a membrán pórusai sokkal tovább maradnak átteresztőkészek (Jesús, 2003). A kísérletek során keresztáramú berendezést használtam.



6. ábra Keresztáramú és statikus szűrés összehasonlítása

2.2 3D nyomtatás

2.2.1 3D nyomtatási technológiák

A 3D nyomtatás már 1980-as években elérhető volt tudományos és katonai célokra, igaz ekkor még meglehetősen drágán és közel sem olyan minőségben, mint ma. Azonban az elmúlt 50 évben az egyik leggyorsabban fejlődő iparágává nőtte ki magát és ma már nem csak az üzemek és cégek, hanem az egyszerű hétköznapi felhasználók is hozzáférhetnek.

A módszer alapja egy digitális modell, amelyet számítógépes tervezőszoftverrel (CAD) hozhatunk létre. A folyamat elején az legyártani kívánt modellt egy külön erre a célra fejlesztett szoftver segítségével felszeleteljük, azaz vékony, nyomtatható rétegekre bontjuk. Ezek a rétegeket a nyomtató egyenként, a megadott pálya mentén haladva fogja egymásra építeni (a nyomtatási útvonal megadása *gcode* formátumú fájlokban történik, ezt készíthetjük el, a szeletelő programok

segítségével). A nyomtató valamilyen anyagot, leggyakrabban műanyagot, fémet vagy kerámiát helyez le rétegről rétegre, hogy felépítse a végleges tárgyat. Ez a rétegről rétegre történő felépítés lehetővé teszi összetett alkatrészek létrehozását, amelyeket hagyományos gyártási technikákkal nehéz vagy lehetetlen lenne kialakítani (Naveed, 2021). A technológia gyors fejlődése miatt, mára már több elterjedt módja is van a 3D nyomtatásnak:

Az egyik legszélesebb körben alkalmazott módszer az *FDM* (Fused Deposition Modeling), azaz a szálhúzásos nyomtatás, ahol a tárgyak rétegről rétegre történő felépítése során hőre lágyuló műanyag szálakat (úgynevezett filament-et) extrudálnak egy fűtött fűvókán keresztül. Ez a technika különösen népszerű a prototípusgyártásban, és egyszerűsége, valamint költséghatékonysága miatt széles körben használják ipari és fogyasztói alkalmazásokban egyaránt (Han & Cho, 2018).

A *SLA* (sztereolitográfia) egy fényforrást használ arra, hogy a folyékony gyantát megszilárdult műanyaggá kössön. Az *SLA*-t a nagy pontosság jellemzi, és gyakran alkalmazzák olyan területeken, ahol finom részletekre van szükség, például ékszertervezésben és fogászati alkalmazásokban. A módszer hátránya, hogy a szilárdítás után a műanyaga a többi módszerhez képest sok utómunkát (szárítás és alkoholos mosás) és tisztítást igényel (Kozior et al., 2020).

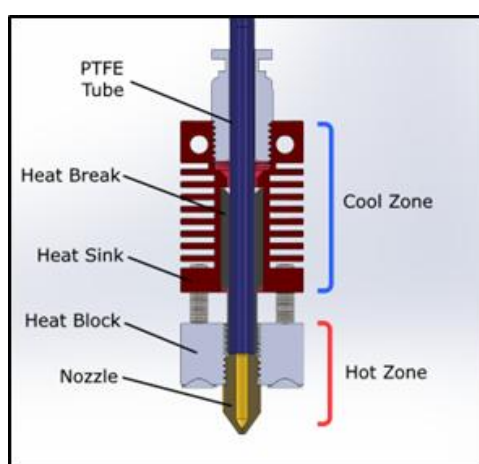
Az *SLS* (szelektív lézerszinterezés) egy lézert alkalmaz porított anyagok – általában fémek rétegenkénti összeolvasztására. A porított anyag felületre szórása után, a réteg körvonalát a lézer „körbe rajzolja”, közben megolvastva, majd megszilárdítva az anyagot. A módszer előnye hogy támasztószervezetekre kis mértékben vagy egyáltalán nincs szükség, így különösen sokat alkalmazzák a repülőgépiparban és az autóiparban (Han & Cho, 2018).



7. ábra *FDM – SLA – SLS* 3D nyomtatási módszerek összehasonlítása egy modellen
(<https://manufactur3dmag.com>, 2018)

2.2.2 FDM 3D nyomtatás

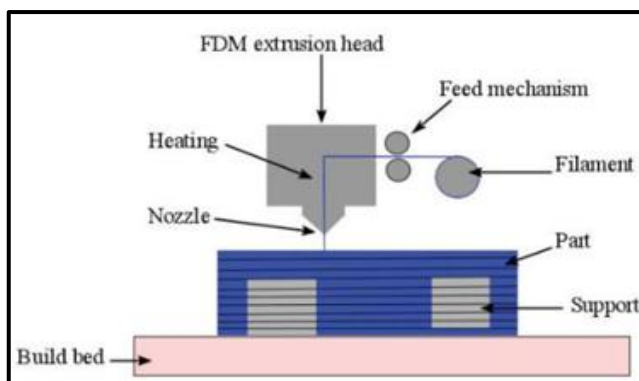
Az szálhúzásos 3D nyomtatás, egy additív gyártási eljárás, amely az anyagsajtolási technikák közé tartozik. Az *FDM* eljárás során a készített tárgyat úgy építik fel rétegenként, hogy az olvasztott polimert, egy előre meghatározott útvonal mentén helyezik le a nyomtatási felületre. A műanyagot egy extrudáló fejegységbe juttatjuk egy adagolómotor segítségével, ahol a műanyag olvasztása történik, anyagtól függően 200-270°C-on. Az egység egy etető *PTFE* csőből, egy fűtőelemből, egy fűvókából, szigetelésből, egy hűtőblokkból (szükség esetén ventilátorra ellátva) és az ezeket összetartó csavarokból áll (8. és 9. ábra).



- PTFE tube – teflon cső
- Heat break – hőelválasztó
- Heat sink – hűtőborda
- Heat block – fűtőblokk
- Nozzle – fűvóka

8. ábra FDM nyomtató fejegységének összeállítása
(forrás: <https://www.crealityexperts.com>, 2024)

Ez az egység egy háromtengelyes rendszerbe van építve, amely lehetővé teszi, az x-, y- és z-irányú elmozdulást. Az olvadt anyagot a gép vékony szálakban extrudálja, és rétegenként előre meghatározott helyeken helyezi le, ahol az lehűl és megszilárdul. A hűtés felgyorsítása érdekében az extrudáló fej mellé gyakran ventilátorok vannak beépítve. A nyomtatási felület jó tapadást biztosító anyagból készül, használt alapanyagtól függően üvegből vagy durva felületű műanyagból, melyet a hirtelen hűlés okozta deformációk és anyagfelválások elkerülése miatt szintén fűtenek (általában 45-75°C közötti hőmérsékletre).



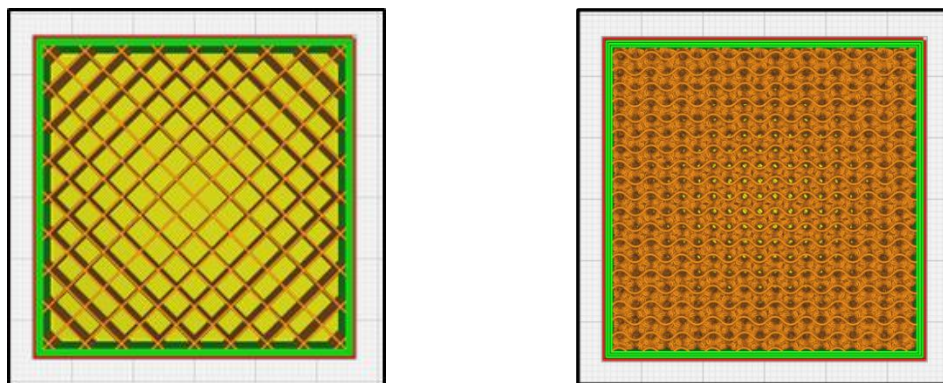
- Extrusion head – extrúder
- Heating – fűtő egység
- Nozzle – fűvóka
- Feed – etető
- Part – alkatrész

9. ábra FDM nyomtató általános működése (Pandzic et al., 2019)

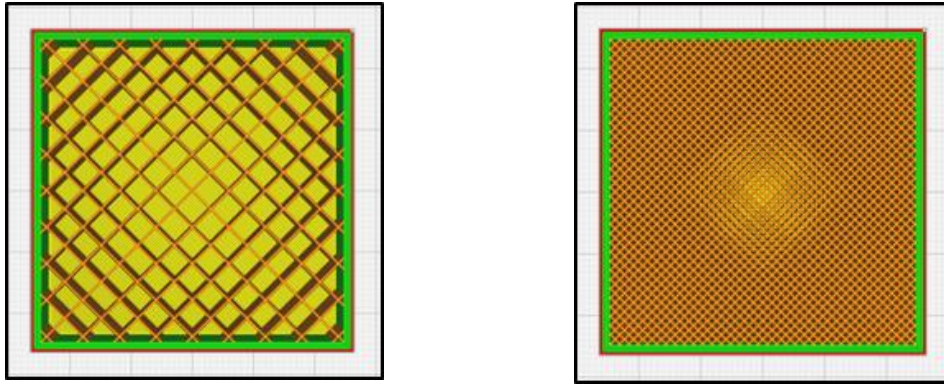
A nyomtatás során felhasznált anyagok hőre lágyuló polimerek, amelyeket leggyakrabban *PLA* (politejsav), *ABS* (akrilonitril-butadién-sztirol), *TPU* (hőre lágyuló poliuretán) vagy *PETG* (polietilén-tereftalát-glikol) szálak, azaz *filament-ek* formájában adagolnak a nyomtatóba. (<https://www.zaccord.com>, 2022)

Az elkészült modellek mechanikai tulajdonságai sok állítható paramétertől függenek, melyeket a nyomtatáshoz használt szeletelő programban módosíthatunk. A legfontosabb tényezők közé tartozik a kitöltési százalék és minta, a falvastagság, a rétegvastagság, a nyomtatási sebesség, valamint a nyomtatási hőmérséklet.

A kitöltési minta és sűrűség közvetlenül befolyásolja a nyomtatott alkatrész mechanikai szilárdságát és tömegét. A nagyobb kitöltési sűrűség (11. ábra) általában javítja a szakítószilárdságot és merevséget a megnövelt anyagterefogat miatt. Különböző kitöltési minták (10. ábra), mint például a „méhsejt” vagy a „gyroid”, szintén fokozhatják a szilárdságot azáltal, hogy optimalizálják a terhelő erők eloszlását az alkatrészben.



10. ábra „Grid” kitöltés és „Gyroid” kitöltés összehasonlítása 20%-os kitöltési sűrűséggel



11. ábra 20%-os és 80%-os kitöltési sűrűség összehasonlítása “Grid” kitöltés esetében

A vastagabb falak növelhetik az alkatrész általános szilárdságát és tartósságát, mivel több anyagot biztosítanak a teherhordásra. Azonban a túlzottan vastag falak problémákhoz vezethetnek, például egyenetlen hűlés okozta vetemedéshez, ami negatívan befolyásolhatja a méretbeli pontosságot, az alakot és a felületi minőséget.

A nyomtatás során alkalmazott rétegvastagság befolyásolja a felületi érdességet és a rétegek közötti tapadást. A kisebb rétegvastagság általában jobb felületi minőséget eredményez, valamint javítja a rétegek közötti kötést, ami fokozhatja az alkatrész teherbírását.

A nyomtatási sebesség szintén kritikus tényező, amely befolyásolja a rétegek közötti tapadást. A nagyobb nyomtatási sebesség miatt a polimerszál nem olvad meg kellőképpen, ami gyenge rétegtapadáshoz és csökkent mechanikai szilárdsághoz vezethet. Ezzel szemben az alacsonyabb nyomtatási sebesség jobb hőkapcsolatot biztosít a rétegek között, növelve az alkatrész általános szilárdságát (Sultana et al., 2024).

2.2.3 Nyomtatási alapanyagok mechanika tulajdonságai:

A nyomtatások során használt műanyagok mechanikai tulajdonságai nagy mértékben különböznek egymástól, ezért fontos meghatározni az elkészült alkatrészre ható terheléseket a megfelelő anyagválasztás elvégzéséhez. Fontos megjegyezni, hogy nem csak az alapanyag határozza meg egy-egy 3D nyomtatott alkatrész mechanikai tulajdonságait, hanem az is, hogy a nyomtatást milyen paraméterek mellett végezték (hőmérséklet, nyomtatási sebesség, fűtött közeg és tárgyasztal) (Geng et al., 2021).

Az egyik legszélesebb körben alkalmazott szál a *PLA*-t, nagy szakítószilárdság és merevség jellemzi, az általa kibírt feszültség elérheti a 50-70 MPa közötti értékeket, éppen ezért népszerű választás mind az otthoni, mind az ipari felhasználók körében. Azonban fontos megemlíteni, hogy rendkívül rideg anyag, ezért könnyen törik. A *PLA* Young-modulusa viszonylag

nagy, tehát merev anyag. Ezzel ellentétben a *PETG* egy középutat kínál a rugalmasság és szakítószilárdság között, melynek értéke 40-50 MPa között mozog, mindemellett pedig kevésbé rideg, mint a *PLA*. Ezen tulajdonságai, valamint jó kémiai ellenállósága és rossz nedvszívó képessége miatt előszeretettel használják beépíthető alkatrészek alapanyagaként (Ulkir, 2023).

A *PCTG* (amely a *PETG* egy változata), ötvözi a *PETG* és a *PLA* legjobb tulajdonságait, megalkotva ezzel az ideális alapanyagot mérnöki és ipari területeken való alkalmazásra. Szívóssága magasabb, szakítószilárdsága pedig általában hasonló a *PETG*-hez, azonban jobb ütésállóságot mutat, így ideális olyan alkalmazásokhoz, ahol elengedhetetlen a hosszú élettartam és strapabíróság.

A *TPU* rugalmasságáról és ütésállóságáról ismert. Szakítószilárdsága jellemzően 20-30 MPa között mozog, ami alacsonyabb, mint a *PLA* és a *PETG* esetében. Különleges jellemzője azonban, hogy az előző anyagokkal ellentétben, egyáltalán nem törik, ezért alkalmas olyan alkalmazásokra, ahol alapvetően gumit használnának, mint például hevederek vagy speciális alakú tömítések esetén (Mian et al., 2024).

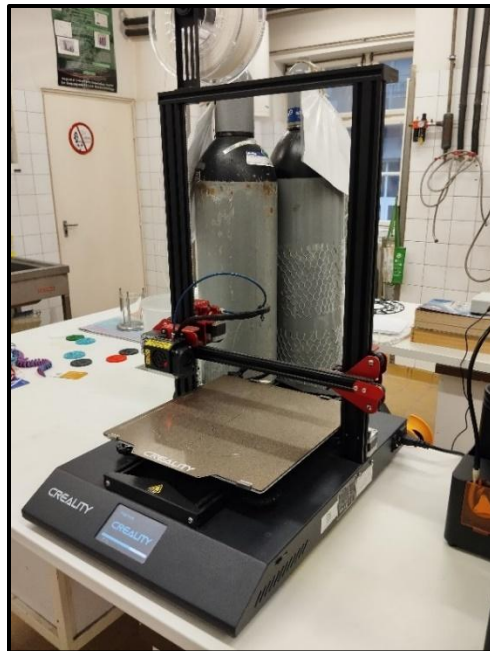
Az *SLA* gyanta a hőre lágyuló szálakkal ellentétben jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik, beleértve a nagyobb szakítószilárdságot és merevséget. Az *SLA* testek szakítószilárdsága meghaladhatja a 70 MPa-t, míg egyes speciális gyanták akár a 100 MPa-t is elérhetik. Azonban ezek az alkatrészek lényegesen törékenyebbek, mint hőre lágyuló társaik, ami korlátozhatja alkalmazhatóságukat olyan esetekben, ahol nagyobb rugalmasságra van szükség (Hussain et al., 2020).

3. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

3.1 3D nyomtatók

3.1.1 Szálhúzásos 3D nyomtató

Dolgozatomban használt *FDM* típusú 3D nyomtató (12. ábra) egy nagyméretű 300*300*400 milliméteres építési platformmal rendelkezik (Creality CR10S Pro V2, Kína). Az asztal egy speciális, durva felületű, levehető műanyag lappal van ellátva, mely megkönnyíti az első réteg letapadását és a kész modellek eltávolítását. Az extruder fejre felszerelt BLTouch automatikus szintező szenzor automatikusan beállítja a megfelelő távolságot a Z-tengely és a tárgyasztal között, kompenzálva az ágy esetleges egyenetlenségeit, ezzel biztosítva az első réteg optimális tapadását. Az extruder fejre felszerelt BLTouch automatikus szintező szenzor automatikusan beállítja a megfelelő távolságot a Z-tengely és a tárgyasztal között, kompenzálva az ágy esetleges egyenetlenségeit, ezzel biztosítva az első réteg optimális tapadását. A bemeneti szálátmérő a szabványos 1.75mm, ebből a fűvókán (mely akár 260 °C-ra is felhevíthető) keresztül 100-400 mikronos rétegek építésére alkalmas.



12. ábra. Creality CR10S Pro V2 3D nyomtató

3.1.2 Gyantás 3D nyomtató

OTDK munkámban egy *SLA* technológiájú 3D nyomtatót (13. ábra) is használtam, amely kiválóan alkalmas nagy felbontású és nagyméretű nyomatok készítésére (Phrozen Sonic Mega 8k,

Tajvan). A 15 hüvelykes mono *LCD* kijelzője akár 8K felbontást is támogat, ami lehetővé teszi a rendkívül részletgazdag modellek előállítását, akár 43 mikronos XY felbontással. Ez különösen előnyös bonyolult és aprólékos részleteket igénylő projektek esetében. A nyomtató 330 x 185 x 400 mm-es építési térfogattal rendelkezik, így egyszerre képes nagy méretű modellek, vagy több kisebb tárgy nyomtatására. A lineáris vezetősínes Z-tengely kiváló stabilitást nyújt a rétegek felépítése során, minimalizálva a vibrációt és a rétegeltolódást, amely simább felületet eredményez.

A nyomtatási folyamat nem ér véget a modell gyantafürdőből való eltávolításakor. A nyomtatás utáni kezelés első lépéseként a modellt izopropil-alkoholos fürdőben tisztítjuk meg a felesleges gyantától (Phrozen Wash Mega S, Tajvan). Az alkohol elpárolgása után a modellt egy külön szárító-szilárdító egységben helyezzük el, amely optimális fény- és légáramlási körülményeket biztosít a megfelelő utókezelés és száradás érdekében (Phrozen Cure Mega S, Tajvan).



13. ábra Phrozen Sonic Mega 8K S, valamint a mosó és szárító berendezések

3.2 Felhasznált szoftverek

3.2.1 Rajzolás és 3D tervezés

Az áramlás terelők megtervezésére egy, az egyetemi tanulmányaim során már sokszor használt szoftvert az Autodesk Inventor 2024-es változatát használtam. A program segítségével lehetőségem volt egy kezdetleges kézi vázlat alapján megrajzolni a kiindulási alakot, melyet aztán

a „Extrude” (Kihúzás) parancs segítségével emeltem át 3D-be. Ezután a modell egyes részeit letörésekkel láttam el, majd az ismétlődő részeket, egy adott szögtartományon belül kör alakú minta vételével másoltam, ezzel véglegesítve az áramlásterelő kialakítását. Tervezés közben ügyeltem arra is, hogy az elkészült modellt 3D nyomtatáshoz optimalizáljam, azaz biztosítottam, hogy azok a lehető legkevesebb „support”, vagyis támasztó elem segítségével elkészíthetők legyenek.

3.2.2 Szeletelés, gcode készítés

A modellek *FDM* nyomtatás előtti, úgynevezett szeletelését (vagyis a gcode-ok elkészítését) az Ultimaker Cura (5.7.0) nevű programban hajtottam végre, egyéni paraméterek beállításával, melyek többek között a következők voltak:

- Rétegvastagság: 0,2 mm
- Falvastagság: 0,84 mm
- Falak száma: 2
- Kitöltési sűrűség: 15%
- Kitöltés típusa: Cubic
- Nyomtatási sebesség: 60 mm/s
- Nyomtatási hőmérséklet: 210 °C *PLA* és *TPU* esetében, 240°C *PETG* és *PCTG* estében
- Tárgyasztal hőmérséklete: 50°C *PLA* és *TPU* esetében, 70°C *PETG* és *PCTG* estében
- Support: Normal, ZigZag,
- Support sűrűség: 15%

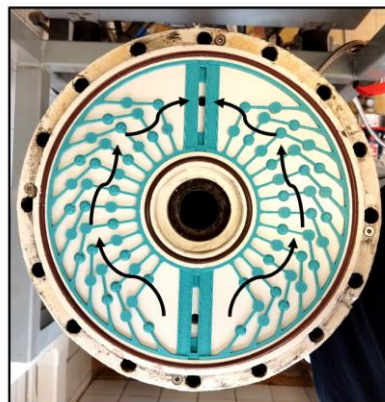
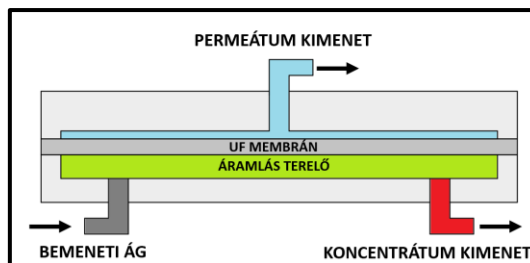
Ezen beállítások mellett az áramlásterelők kellően strapabíróak lettek, bár elsőre a 15%-os kitöltési sűrűség alacsonynak tűnhet, a relatíve vastag falak és viszonylag vékony kialakításnak köszönhetően ez is bőven elég volt a kellő szilárdság eléréséhez. Különböző anyagoknál ügyelni kellett, a különböző nyomtatási és tárgyasztal hőmérsékletek beállítására. A nyomtató képes lett volna ennél nagyobb (akár 80 mm/s) nyomtatási sebességre is, azonban nem szerettem volna, hogy az elkészült modellek minősége a nyomtatási idő lerövidítésének kárára menjen. Az *SLA* nyomtatóhoz való modellt a CHITUBOX nevű szoftver segítségével készítettem elő.

A nyers adatokból készített 3D felületdiagramok készítése, a TIBCO Statistica 14.0.1.25-ös verziójában történt.

3.3 Membránszűrő berendezés és használati paraméterei

A kísérleteimhez egy VSEP Series L típusú, modulvibrációra alkalmas membránszűrő berendezést használtam (14. ábra), amely a Mérnöki Kar Biológiai Rendszerek Műszaki Intézetének Membrános Laboratóriumában található. A berendezés megfelelő hűtésének biztosítására egy zárt, 300 literes hűtőfolyadék-keringető légkondicionált rendszert alkalmaztam, indirekt falhűtéssel ($25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$). A berendezésben a vibráció amplitúdója 0,635 és 2,54 cm között szabályozható, a vibrációs motor frekvenciájának beállításával. A mérések során ezeket az értékeket használtam, ezért a továbbiakban a 0,635 cm amplitúdójú módszert „alacsony vibrációnak”, a 2,54 cm amplitúdójút pedig „magas vibrációnak” fogom nevezni. A laboratóriumi membránszűrési méréseket, egy gyakran használt ultraszűrési, 30 kDa vágási értékű poliéterszulfon (PES) membrán alkalmazásával végeztem. Bizonyos méréseimnél 3D nyomtatott áramlás terelőket helyeztem a modul alsó része és a membrán szűrőfelülete közé.

A mérések során a transzmembrán nyomást (TMP) állandóan 0,8 MPa-on tartottam, miközben az anyagáramot 4 GPM-re (kb. 15,14 L/min) állítottam be. A membránszűrési folyamatok kezdete előtt a berendezés betápláló tartályát a homogenizált 10 literes szürendő anyaoldattal töltöttem fel, amelyet egy szivattyú továbbított a szűrőmodul felé. A keresztáramú technológia alkalmazásával a modell szennyvíz két frakcióra vált szét: szűrletre és koncentrátumra. A berendezés a koncentrátumot visszavezette a betápláló tartályba, míg a szűrlet egy külön csövön keresztül a gyűjtőedénybe került, melynek a térfogatát folyamatosan mértem és a 2. egyenlet segítségével a permeátum fluxusok értékeit megadtam. A folyamat végét akkor érte el, ha a gépben lévő koncentrátum elérte az ötszörös sűrítési arányt, azaz ~8 liter fluidum távozik a szűrlet kivezető nyíláson (mivel a berendezés holt térfogata ~1,5 liter) vagy ha 120 percen keresztül folytattuk a szűrést (mivel ennyi idő alatt a fluxusok értékei jó közelítéssel állandósulnak).



14. ábra VSEP Series L típusú, membránszűrő berendezés és működési elve

3.4 Modellszennyvíz

A mérésekhez frissen előállított, átlagos terheltségű modellszennyvizet használtam, amely a tejipari szennyvizek egyszerűsített változatát képezi. Egy-egy adag elkészítéséhez 10 liter szobahőmérsékletű csapvizet, 5 g/l sovány tejport (Tutti Kft, Magyarország), valamint 0,5 g/l lúgos tisztító- és fertőtlenítőszert (CHEMIPUR CL 80) alkalmaztam. A modellszennyvizet minden esetben közvetlenül a mérés előtt állítottam össze, és legalább 30 percig homogenizáltam egy laboratóriumi 4 ágú keverő segítségével, 400 fordulát/perc sebességen. A modellszennyvíz hőmérsékletét a mérések alatt $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten tartottam, amit a berendezéshez csatlakoztatott hűtőkör biztosított. A kiindulási oldat (OF – Original Fluid) analitikai értékei a mérések során rögzített eredmények átlaga alapján a következők voltak:

2. táblázat kiindulási oldat analitikai értékei

pH	Turbulencia [NTU]	Vezetőképesség [μS]	Kémiai oxigén igény [mgL^{-1}]	Teljes oldott anyag [ppm]
$8,5 \pm 0,2$	1100 ± 25	850 ± 10	4800 ± 200	420 ± 20

3.5 Analitikai módszerek

Annak érdekében, hogy a membránszűrések során kialakult membrán visszatartási értékeket meg tudjam adni, illetve a különböző paraméterek változásait megértsem, analitikai méréseket végeztem lebegőanyag tartalomra, vezetőképességre, pH-ra, teljes oldott anyagtartalomra és kémiai oxigénigényre, valamint a tejalkotók közül tejcukorra, fehérjére és szárazanyag tartalomra vonatkozóan. Ezekhez a szűréseim során mind a kiindulás/szűrendő modell szennyvizekből, a keletkező szűrletekből és a koncentrátumokból is mintákat vettem.

3.5.1 Lebegőanyag tartalom mérése

A zavarosság mérése során a vizsgált minta lebegőanyag-tartalmát mérjük, ez az optikai módszerekkel mérhető szennyezettség mértékét mutatja meg – különösen a szabad szemmel is jól látható tartomány határán belül. A méréshez használt küvettába töltött mintán, a gépbe (2100AN; HACH, USA) helyezés után automatikusan történik a mérés *NTU* mértékegységben (Nephelometric Turbidity Unit) a fényérzékelőn keresztül.

3.5.2 Vezetőképesség, teljes oldott anyag tartalom és pH mérése

A vezetőképesség és a teljes oldott anyag tartalom (*TDS*) mérésére az ADWA AD31 típusú eszközt használtam (ADWA Instruments, Magyarország), amely egyszerre méri mindkét paramétert. A pH méréseimhez pedig analitikai multimétert használtam (ADWA Instruments, Magyarország).

3.5.3 Szervesanyagok mennyiségének mérése, kémiai oxigénigény

A kémiai oxigénigény (KOI) meghatározása a mintában található szerves anyagok lebontásán, majd fotometriás tesztelésen alapult, amely a szerves szennyezőanyagok mennyiségéről adott értéket. A méréshez a 15000 mg/L, azaz HR (High Range) tartományú tesztcsöveket választottam. A mintákból 200 μL -t pipettáztam ezekbe a tesztcsövekbe, amelyek kálium-dikromátot is tartalmaztak. A minták roncsolása 120 percen keresztül történt, 150°C-on, a 15. ábrán látható ET 108 roncsoló blokkokban (Lovibond, Belgium). A roncsolás után fotometriás mérést végeztem egy spektrofotométerrel (Lovibond, Belgium), ahol kontrollként szennyezőanyag-mentes desztillált vízzel megtöltött HR tesztcsövet használtam.



15. ábra Lovibond ET 108 roncsoló blokk és fotospektrométer (saját fénykép)

3.5.4 Beltartalmi értékek mérése

A mintákban található különböző alkotóelemek pontos mennyiségének meghatározásra egy infravörös spektroszkópián alapuló Bentley 150 infravörös spektrofotométert (Bentley Instruments Inc., USA) használtam (16. ábra). Ez az infravörös fény spektrumának különböző hullámhosszait alkalmazza a mintákban található anyagok azonosítására és azok mennyiségének meghatározására.



16. ábra Bentley 150 infravörös spektrofotométer (saját fénykép)

3.6 3D nyomtatott áramlás terelők

A felhasznált áramlás terelőket saját tervek alapján készítettem, referencia modellek felhasználásával, *FDM* (Fused Deposition Modeling) és *SLA* (Stereolithography) 3D nyomtatási technikákkal. Ezen technológia előnye más műanyag gyártási eljárásokhoz képest (pl.: fröccsöntés), hogy olcsón és gyorsan juthatunk hozzá teljesen egyéni kialakítású alkatrészekhez, ennek köszönhetően könnyen tudtam finomításokat végezni a felhasznált modelljeimen. Az anyagválasztás legfőbb szempontjai a következők voltak: A felhasznált anyagok legyenek széleskörben elérhetőek, elterjedtek és már korábban is részletesen vizsgáltak. Továbbá legyen köztük olyan, ami megfelel a nagyobb igénybevételeknek mechanikai szempontból (ugyanis a vizsgált berendezésben, különösen a modul vibráció használata esetén igen jelentős erőhatások érhetik az áramlás terelőt). Ezért a következő anyagokra (Filatikum, Magyarország) esett a választás, melyekből végül összesen 12 áramlás terelőt készítettem:

- Hagyományos PLA (4 db)
- Gyanta (1 db)
- Wood PLA (farostokkal erősített, 1 db)
- Silk PLA (selyemfényű, 1db)
- TPU (1 db)
- PETG (3 db)
- PCTG (1 db)

A *PLA* anyag választás oka, hogy ez egy modern 3D nyomtatásban leggyakrabban alkalmazott anyag, széleskörben elérhető, ára igen kedvező és nem igényel speciális felszerelést vagy utókezelést a nyomtatása. A *PETG* -re azért esett a választásom, mert amellet, hogy népszerű alapanyag, a 2.2.3-as bekezdésben taglaltak szerint, jobb mechanikai tulajdonsággal rendelkezik, mint a *PLA* és ehhez képest nem sokkal nehezebb a nyomtatása sem. A *PCTG*-t pedig azért akartam mindenképp tesztelni, mivel kifejezetten mérnöki projekteken való alkalmazáshoz ajánlják.

A modellekből négy verziót készítettem, ezekből 2-2 (párokban: *Sp.1/Sp.2* és *Sp.3/Sp.4*) hasonló kialakítású. Az alakra vonatkozó módosításokat, finomhangolásokat a kísérleteim során gyűjtött tapasztalatok alapján hajtottam végre, hogy tovább növeljem egyes áramlás terelők hatékonyságát és/vagy élettartamát.

3. táblázat Áramlás terelők geometriai kialakításainak megnevezései

<i>Sp.1 – Hengeres kialakítású tervezés</i>
<i>Sp.2 – Kúpos kialakítású tervezés</i>
<i>Sp.3 – Tesla-szelep alapú tervezés</i>
<i>Sp.4 – Megerősített Tesla-szelep alapú tervezés</i>



17. ábra Sp.1 áramlás terelő



18. ábra Sp.2 áramlás terelő

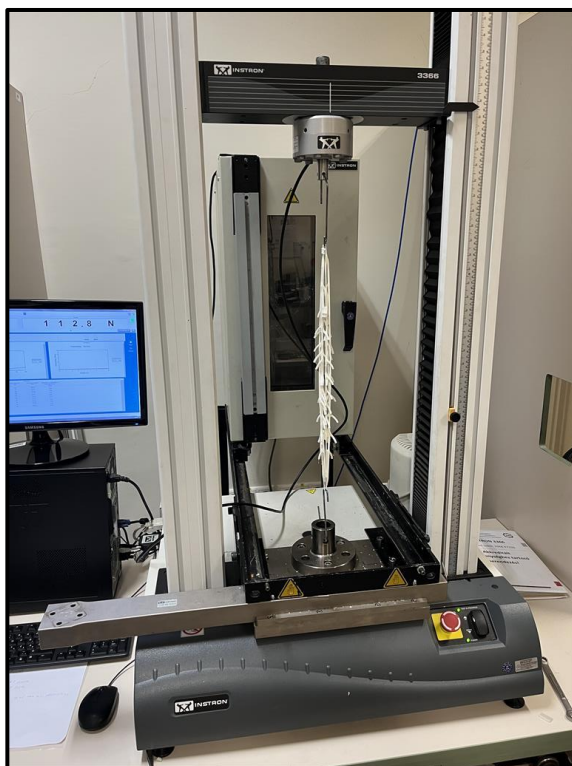


19. ábra Sp.3 áramlás terelő



20. ábra Sp.4 áramlás terelő

Továbbá a tényleges laboratóriumi membránszeparációs kísérleteim mellett fontosnak tartottam, hogy ezeket az elkészült áramlás terelő modellek mechanikai tulajdonságait is teszteljem. Ezért az irodalmi anyagok összehasonlítása mellett a konkrét áramlás terelők tesztelését is elvégeztem, elsősorban szakító szilárdságra és maximális nyúlásra vonatkozóan. Ezeket egy INSTRON 5900R 4482 típusú elektromechanikus szakítógép (21. ábra) segítségével végeztem el magukon a 3D nyomtatott áramlás terelőkön. Ezen mérés sorozatom eredményeiből választottam ki azokat az áramlás terelőket, amikkel a továbbiakban a membránszűrési kísérleteimet végeztem.



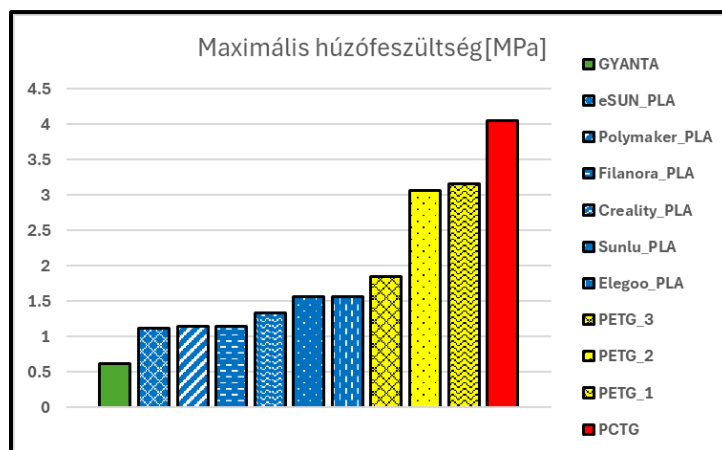
21. ábra INSTRON 5900R 4482 típusú elektromechanikus szakítógépbe helyezett TPU áramlás terelő

4. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

4.1 Anyagválasztás mechanikai tulajdonságok alapján

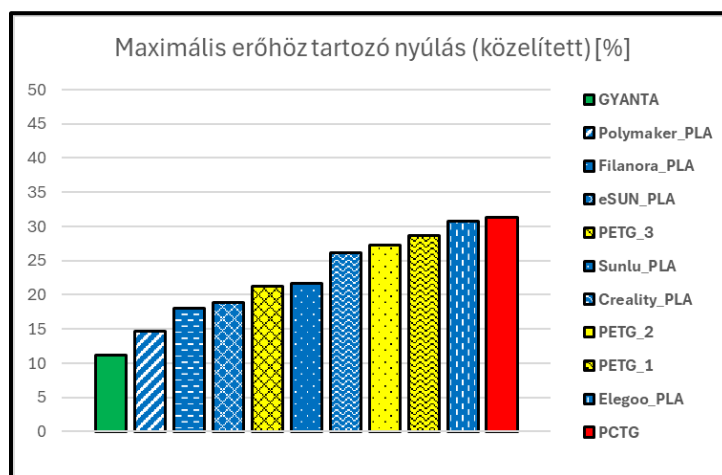
Az elkészült áramlás terelőket azért szerettem volna szakítóvizsgálatnak alávetni, mert kíváncsi voltam, hogy mennyiben térnének el az így kapott eredmények, (az irodalomban fellelhető) megegyező anyagok szabványos próbatesteken végzett vizsgálatainak eredményeitől, illetve, hogy kiderüljön a négy különböző geometriai kialakítás közül melyik a legjobban ellenálló a mechanikai igénybevételek ezen típusának. Ezek ismerete azért szükséges, mivel a vibráló modul belsejében igen intenzív nyíróerők ébrednek, aminek a hatására az áramlásterelők korábban szinte mindig eltörtek. Így tehát ezen eredmények birtokában előre következtethettem arra, hogy mennyire tud majd ellenállni egy-egy áramlás terelő a modulban uralkodó, extrém körülményeknek, illetve melyek az ellenállóbbak a többihez képest. Ezért 12 modellen végeztem el a vizsgálatot és az így kapott eredményeket oszlopdiagramokba foglaltam. Ezekből véleményem szerint a két legbeszédesebb a maximális húzófeszültséget (22. ábra) és a maximális erőhöz tartozó százalékos nyúlást bemutató ábra (23. ábra) lett. *(A TPU-val mért adatokat nem használtam fel a végső összehasonlítás során, mivel az elkészült modell a vártnál sokkal rugalmasabb lett, így az nem volt alkalmas a kísérleti felhasználásra).* A 22. ábrából tisztán látszik, hogy a várt eredményekkel összhangban, a legnagyobb terhelést kibíró modellek *PCTG*-ből (ábrán piros színnel jelölt) és a *PETG*-ből (sárga szín) készültek, pontosan úgy, ahogy arra az 2.2.3-as részben megfogalmazott irodalmi eredmények alapján következtetni lehetett. A legnagyobb húzófeszültséget a *PCTG* alapú modell bírta ki, több mint 4 MPa-t, ami majdnem 25%-kal több, mint a legerősebb *PETG*-ből készült darab által kibírt és csaknem 8-szorosa a leggyengébb mért értéknek (0,62 MPa), ami a gyantából készült modellhez tartozik. Hasonlóan az én eredményeimhez, hasonló eredményekre jutott Chaudhary és társai (2023) is, mikor 3D nyomtatási alapanyagokat teszteltek mechanikai igénybevételekre. Az ő méréseik szerint is, a *PETG* és a *PCTG* bizonyult a legjobb anyagoknak.

Továbbá, az alapanyag béli különbségek mellett, a geometriai kialakítások közötti különbséget is megfigyelhetjük, *PETG_3 Sp.1* kialakítású (Hengeres kialakítású tervezés) míg *PETG_2* és *PETG* mindketten *Sp.4* kialakítású (Megerősített Tesla-szelep alapú tervezés) áramlás terelők, tehát ezek alapján kijelenthetjük, hogy a megerősített modell lényegesen jobban teljesített, mint a többi kialakítás. A húzófeszültség szempontjából legerősebb modell pedig a *PCTG*-ből készült *Sp.4* lett.



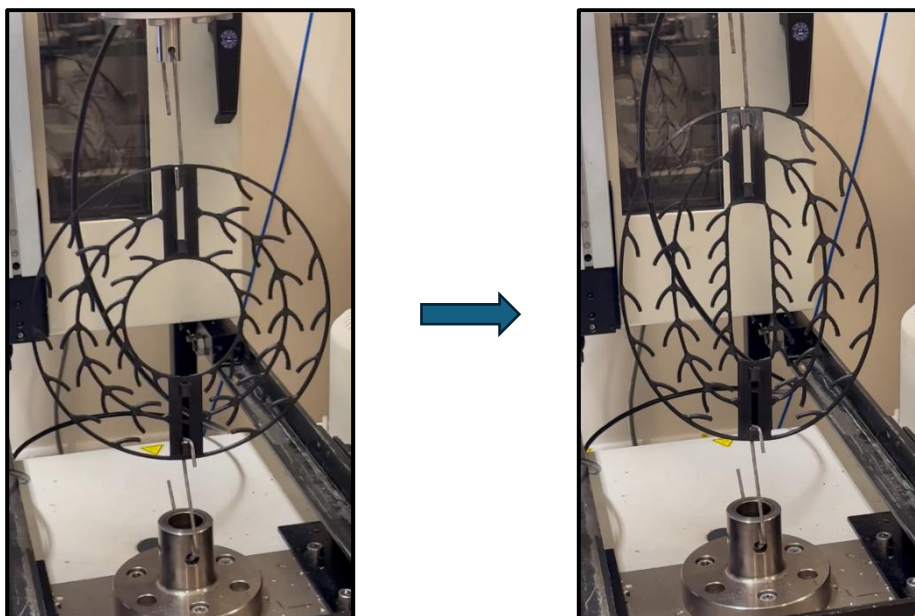
22. ábra Áramlás terelőkön fellépő maximális húzófeszültségek

Azonban nem csak a húzófeszültség szerint szerettem volna besorolni a darabokat, hanem rugalmasság szerint is, ugyanis véleményem szerint ez a tulajdonság szintén nagyon fontos szerepet játszhat a modul belsejében való alkalmazáskor. A nyúlást ábrázoló, 23. diagram alapján pedig bizonyítottam azt, hogy a legkiemelkedőbb eredményeket produkáló anyagoknak nem csak a szakítószilárdságuk volt nagy, hanem a rugalmasságuk is. A legrugalmasabb anyag a mérések alapján a *PCTG* volt majdnem 32%-os megnyúlással (24. ábra), melyhez a legnagyobb húzófeszültség és a legnagyobb erő is tartozik. Ezzel ellentétben a gyanta alapú modell nem csak gyenge volt, de a mérések alapján rendkívül rideg is (mindössze 11%-os nyúlással utolsó a többi eredményhez képest), ez lehetett korai törésének egyik oka. Fontos továbbá megemlíteni azt, hogy a geometriai kialakítások között is lényeges eltérések mutathatóak ki.



23. ábra Áramlás terelőkön fellépő maximális erőhöz tartozó százalékos nyúlások

Ezen kísérlet sorozatom eredményeinek kiértékelésével és az irodalomban talált információk alapján arra jutottam, hogy a további, laboratóriumi membránszeparációs méréseimhez a *PCTG*-ből és *PETG*-ből nyomtatott áramlás terelőket fogom használni. Előbbit a jó mechanikai tulajdonságai miatt választottam, utóbbit pedig azért, mert a jó eredményei mellett, ez az egyik legszélesebb körben alkalmazott anyag a 3D nyomtatás világában.



24. ábra PCTG áramlás terelő a szakítógépben és a szakítás előtti utolsó pillanatban

4.2 Membránszűrések sebessége, fluxusok

Vizsgálataim során az egyik legfontosabb mért és számított paraméter a membránszűrés műveleti sebessége, azaz a szűrletek permeátum fluxusa. Ez a paraméter szolgál az egyik legmegbízhatóbb visszajelzésként a szűrés hatékonyságának változásairól. Az eredményeket az alábbi képletet használva kaptam meg (Rajca et al., 2009).

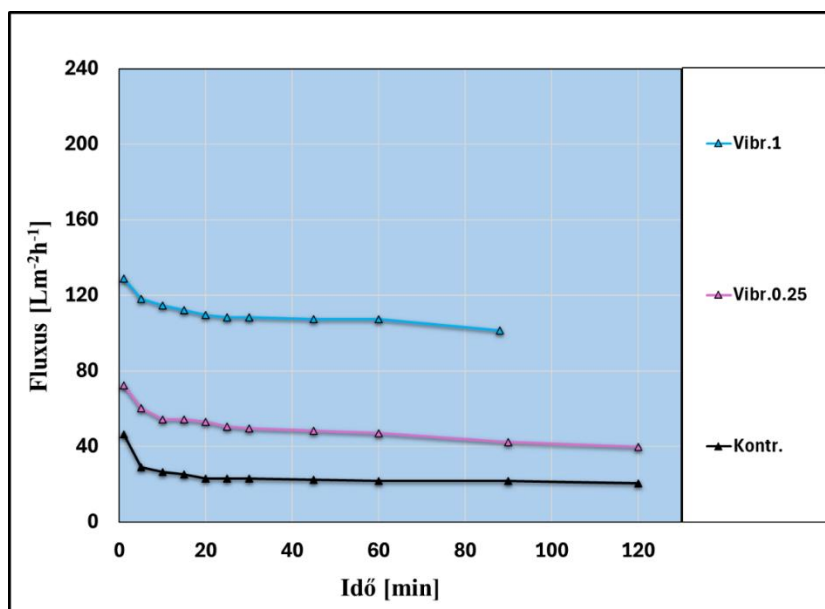
$$J = \frac{V_{perm}}{A \cdot t} [m^3 \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}] \quad (2)$$

Mielőtt megkezdtém volna a különféle membrán eltömődést késleltető módszerek tesztelését, egy kontroll mérést kellett lefolytatnom annak érdekében, hogy legyen mihez viszonyítani a méréseim eredményeit (itt sem modulvibrációt, sem pedig áramlás terelőt nem használtam). Ugyanakkor, az irodalomi részben már korábban megfogalmazott eredmények igazolására és visszacsatolására, kizárólag modulvibrációs és áramlás terelő teszteket is

folytattam. Ehhez a szűrőberendezés modulvibrációjának minimális és maximális amplitúdójú beállítását, valamint a négy darab áramlás terelő kialakítás egyesével, külön-külön is teszteltem.

4.2.1 Vibrációs méréseim eredményei

A különböző amplitúdójú eljárások közötti különbségek kifejezetten szembetűnőek voltak. A 25. ábrán jól látszik, hogy mindkét vibrációs méréseknél jóval nagyobb kezdeti és átlag fluxust kaptam a kontroll méréshez képest. A magas vibrációs beállítás a kontroll kezdeti $46 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ értékét $129 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ -ra emelte, ami majdnem 180%-os javulást jelent, míg az alacsony vibrációs mérés $72 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ -ra növelte a kiindulási fluxus értékét. Sőt a fluxus csökkenése mindhárom esetben hasonló ütemben zajlott, azonban a három mérés közül a kontrollnál állt be a végső állapothoz közeli értékre a leggyorsabban. Az állandósult fluxusértékekre vonatkozóan is hasonló különbségeket tudtam felfedezni, a magas vibráció ötször jobban, az alacsony vibráció pedig kétszer jobban teljesített, mint a kontroll. Fontos megjegyezni, hogy a magas vibrációs mérés a nagy kezdeti fluxus következtében lényegesen hamarabb, 88 perc alatt zajlott le, mivel az 5-ös sűrítési arányt ennyi idő alatt elérte. Átlag fluxusok tekintetében magas vibráció több mint négyszer, alacsony vibrációnál pedig kétszer jobb eredményt sikerült elérni.



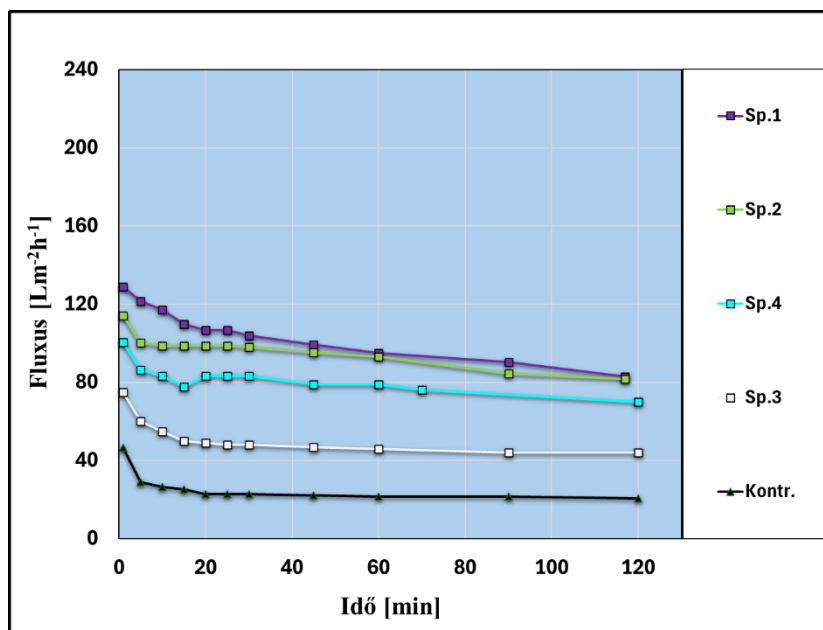
25. ábra Kontroll és vibrációval végzett mérések fluxusainak változásai az idő függvényében

Ebben a témában már több kutatás is készült, Akoum és társai (2002) például ugyanilyen VSEP membránszűrő modul segítségével jutottak arra a hasonló eredményre, magas vibrációval 146%-os fluxusnövekedést tudtak elérni egy 100kDa-os ultraszűrő membrán használatánál.

4.2.2 Áramlás terelőkkel végzett méréseim eredményei

Az áramlás terelők modulba illesztésével, még vibráció nélküli kísérletsorozatot is végeztem, hogy vizsgáljam az áramlásterelők fluxus növelő hatásait. Kiderült, hogy az összes vizsgált ultraszűrési kísérlet jobban teljesített, azaz magasabb fluxusokat eredményezett, mint a kontroll mérés. Különösen jól megfigyelhetők a geometriai kialakítások közötti eltérések. A 26. ábrán látható, hogy két fő kialakítás közötti különbség egyértelműen kirajzolódik: az *Sp.1* és *Sp.2* jelentősen jobb fluxusértékeket produkált, mint az *Sp.3* és *Sp.4*. A legjobban teljesítő áramlás terelő az *Sp.1* lett, amely a kontroll fluxusát közel háromszorosára növelte ($129 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ kiindulási és $81 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ beállt állapotú fluxus értékekkel). Az *Sp.2* eredménye szorosan követte ezt, mindössze 12%-kal alacsonyabb értéket ($115 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$) mutatott kezdetben, mint az *Sp.1*. A leggyengébb teljesítményt ilyen szempontból az *Sp.3* mutatta, amely csupán 47%-kal növelte meg a fluxust a kontrollhoz képest, ami egyébként így is jónak mondható. A kísérletek lefolyása majdnem azonos ideig tartott, *Sp.1* és *Sp.2* esetében 3-3 perccel volt rövidebb, mint két óra, mivel az 5-ös sűrítési arányt így hamarabb elértük.

Már több kutatás is igazolta, hogy a membránok eltömődésének késleltetésére tökéletesen alkalmasak az áramlás terelő betétek. Xie (2019) azt állapította meg, hogy a különböző kialakítású áramlás terelőkön máshogy halmozódnak fel a lerakódó anyagok. Ezek között a lerakódott mennyiségek között akár 45% eltérés is lehet, éppen ezért egyes kialakítások más-más fluxusértékekhez fognak vezetni. Hasonló eredményekre jutott Gáspár & Neczpál (2020) is, aki fluxus növelésre használt áramlás terelőket. Nekik is sikerült bebizonyítani, hogy 3D nyomtatott áramlásterelővel javítható a kiindulási fluxusok értéke, egyes esetekben akár a kontroll mérés ötszörösére is.



26. ábra Kontroll és az áramlás terelőkkal végzett mérések fluxusainak változásai

4.2.3 Kombinált módszerekkel végzett méréseim eredményei

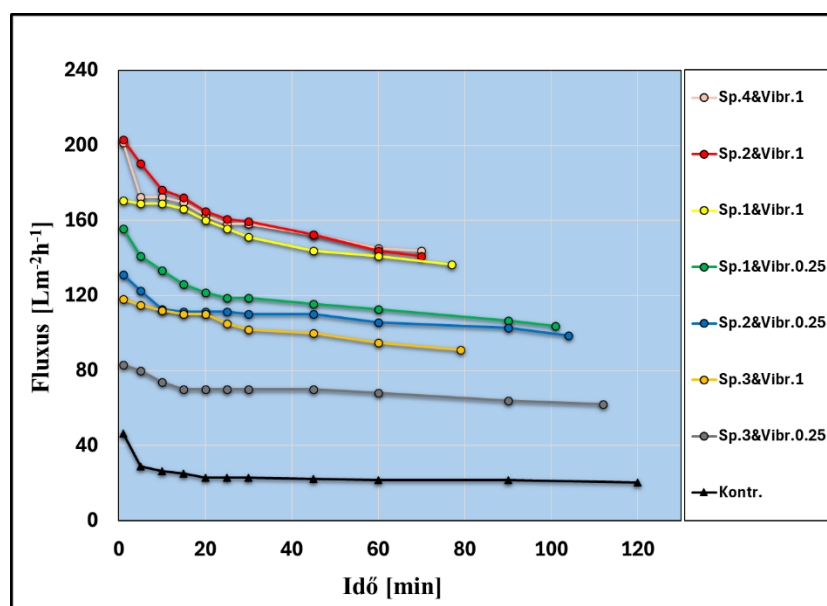
Ezen kísérletek fő célja az volt, hogy kiderítsem, mennyiben változnak a szűrési folyamat sebességét jellemző értékek, ha a két előzetesen vizsgált módszert, a modulvibrációt és a 3D nyomtatott áramlás terelőket egyszerre használom. Szerencsére a modellek finomításával és még pontosabb megtervezésével mára már lehetővé vált, hogy tökéletesen be tudjuk illeszteni a modulba a 3D nyomtatott áramlás terelőket. Ez lehetővé teszi, hogy ne mozduljanak el és a szűrések közben ne törjenek el, és ne sérüljön a membrán se.

Jelentős eltéréseket tapasztaltam az egyes kombinációk között, amit a 27. ábrán mutatok be. Egyrészt értelműen megállapítható, hogy mindegyik kombinált módszer javította a szűrlet fluxusát, egyes eljárások kiemelkedően jól működtek, míg mások még a korábban tárgyalt megoldásoknál is gyengébben teljesítettek. A két legjobban szereplő kombináció a magas vibrációjú *Sp.2* és *Sp.4* áramlás terelő kísérleteim voltak, melyeknél mindkét esetben több mint 300%-os javulás volt megfigyelhető az első percben mért fluxusok tekintetében. Ráadásul a szűrés időtartama és a fluxus csökkenés mértéke szempontjából is alig mutatkozott különbség a két kombináció között, a kiindulási, végső és átlag értékeik is közel azonosak voltak.

Az ábrán az is látható, hogy az alacsony vibrációval végzett mérések jobb adatokat hoztak áramlás terelőkkal, mint azok nélkül, de a legjobb értékeik sem közelítették meg az magas vibráció

eredményeit. Ezek közül az *Sp.1*-es kombináció bizonyult a legerősebbnek, de még ez is 23%-kal kisebb fluxust mutatott, mint az *Sp.2* és a magas vibráció.

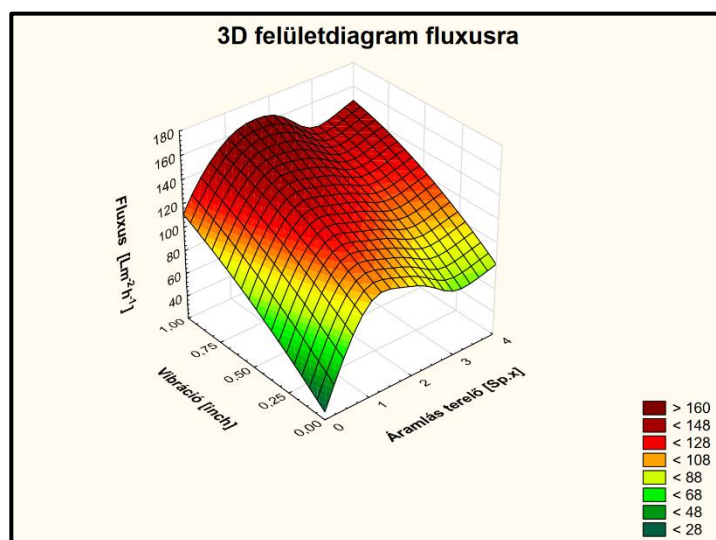
Összegzésül elmondható, hogy minden vizsgált módszer hatékonynak bizonyult az eltömődés késleltetésében, ugyanakkor nem mindegy, hogy mely módszerek kerülnek alkalmazásra, illetve, hogy egyenként vagy kombinálva használjuk őket. Az összes mérés közül fluxus szempontjából az *Sp.2/Sp.4* áramlás terelő, valamint a magas vibráció kombinációja bizonyult a leghatékonyabbnak, közöttük érdemi különbség nem volt. Ahhoz azonban, hogy pontosan meghatározhassuk, melyik módszer a jobb, további adatokra van szükség.



27. ábra Kontroll és az kombinált módszerekkel végzett mérések fluxusainak változásai

A fluxusok átlagértékeit egy 3D felületre vetített diagram segítségével (28. ábra) is ábrázoltam, hogy vizuálisan még jobban láthatóak legyenek az adatok közötti összefüggések, valamint a mérési eredmények változásai, attól függően, hogy milyen módszereket alkalmaztam az eltömődés késleltetésére. Ahhoz, hogy ezt megtehessem a diagramon fel kellett tüntetnem áramlás terelőkhöz tartozó értékeket is, amit a számuknak megfelelően tettem meg (0: áramlás terelő nélküli üzemmód; 1: Sp.1 kialakítás; 2: Sp.2; 3: Sp.3; 4: Sp.4). Ezek az értékek azonban nem valós statisztikai adatok és nem változtatnak semmit a kapott értékeken, csupán az ábrázolás miatt volt rájuk szükség. A diagramon pirossal jelzett terület a magasabb, míg a zölddel jelzett terület az

alacsonyabb fluxus értékekhez tartozik. Ebből látszik, hogy a fentebb említetteknek, átlag fluxus értékekben az *Sp.2*, illetve az *Sp.4* és a magas vibráció kombinációi hozták a legjobb értékeket.



28. ábra 3D felületdiagram a mérésekhez tartozó átlag fluxusok alapján
(Áramlás terelők számainak jelentése: 0: áramlás terelő nélküli üzemmód; 1: Sp.1 kialakítás; 2: Sp.2; 3: Sp.3; 4: Sp.4)

4.3 Membránszűrések gazdaságossága I. / Membránok ellenállásai

A membránok élettartamáról és felhasználhatóságáról az eltömődés mértéke nyújt részletes információt. Ez azért is fontos, mivel még napjainkban is a membrán eltömődést a membrános eljárások egyik legfőbb alkalmazási hátrányának tekintik, amit ezért ajánlatos minél jobban csökkenteni (Saffarimiandoab et al., 2021). Az ellenállási értékek meghatározásakor a teljes ellenállást három fő komponens alkotja: a membrán saját, hidraulikus ellenállása, valamint az irreverzibilis, azaz visszafordíthatatlan (belső pórusos eltömődés miatt kialakuló) és reverzibilis, azaz a megfordítható (döntően a membrán felületén kialakuló, könnyedén lemosható/eltávolítható) ellenállás. Ezeket az értékeket a szűrlet fluxusából, a transzmembrán nyomás (TMP) nagyságából és az áramló folyadék dinamikai viszkozitásából határozhattam meg a 3-6 egyenletek segítségével. Ahhoz, hogy a membránok ellenállásának mértékét meg tudjam állapítani, a szűrés előtt (a tiszta membránnak) és után is (a belső pórusosan eltömődött membránnak, tehát a felszíni lerakódó réteg eltávolítása után) megmértem a membránon áthaladó szobahőmérsékletű (25°C) víz permeátum fluxusait.

OTDK munkám során kíváncsi voltam arra, hogy hogyan alakulnak a teljes ellenállási értékek konkrét változásai, valamint ezek tendenciái. Továbbá azt is vizsgáltam, hogy az ellenállási

értékek megoszlása hogyan alakul a teljes ellenálláson belül (ha a legnagyobb részt a reverzibilis ellenállás teszi ki, akkor a kísérlet sikeresnek mondható, ugyanis ennek a kiküszöbölésére már vannak megoldások, például a membrán felületén keletkező gélréteg eltávolítása visszamosás segítségével (Smith et al., 2006)). A vizsgálataim során minden mérésnél ugyanazt a típusú ultraszűrőmembránt használtam, tehát a membrán saját ellenállása mindig konstans, és nagyon alacsony ($1,3398 \cdot 10^{13} \text{ m}^{-1}$) értékű volt, ezért ezt a 28. diagramon nem tüntettem fel.

$$R_M = \frac{TMP}{J_w \cdot \eta_w} [m^{-1}] \quad (3)$$

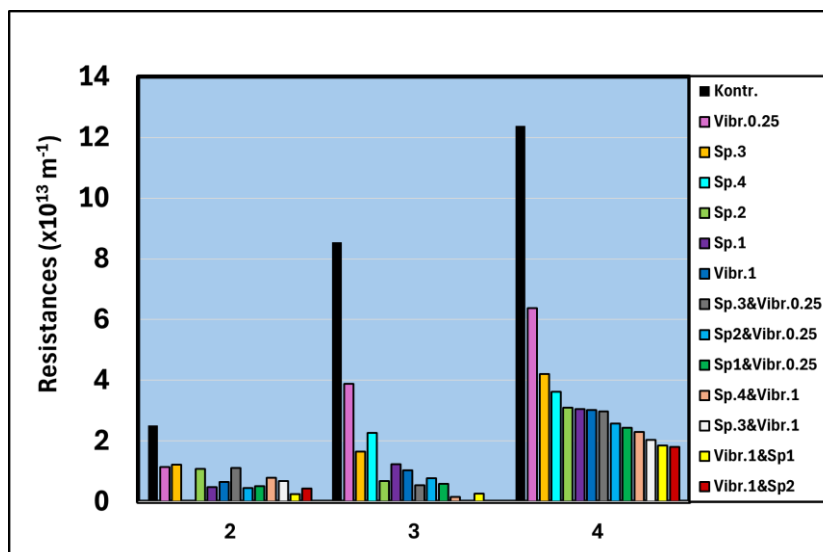
$$R_{REV} = \frac{TMP}{J_{tiszt} \cdot \eta_w} - R_M [m^{-1}] \quad (4)$$

$$R_{REV} = \frac{TMP}{J_{\text{all}} \cdot \eta_{ww}} - R_M - R_{IRREV} [m^{-1}] \quad (5)$$

$$R_T = R_M + R_{REV} + R_{IRREV} [m^{-1}] \quad (6)$$

Ahol, J_w a szűrés előtt kapott tiszta membrán víz fluxusértéke [$\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$], J_{tiszt} a mérést követő polarizációs réteg eltávolítása után mért tisztavízes fluxus [$\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$], J_{all} a modell szennyvíz szűrése során beállt állandó fluxus [$\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$], η_w a víz dinamikai viszkozitása szobahőmérsékleten [Pas], η_{ww} a modell szennyvíz dinamikai viszkozitása szobahőmérsékleten [Pas].

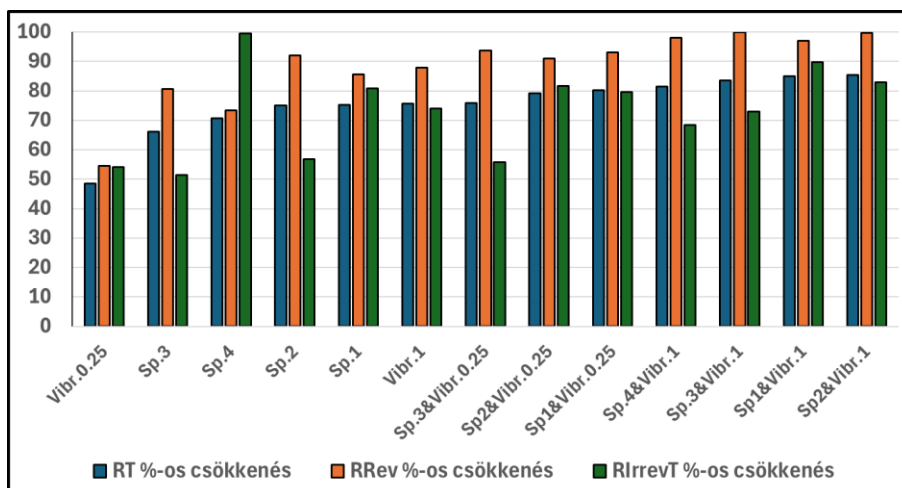
A 29. ábrán az ellenállások eloszlását ábrázolom a teljes ellenálláson belül. 2-essel jelölve az irreverzibilis, 3-assal a reverzibilis, míg 4-essel a teljes ellenállási értékek láthatóak. Kimutatható ezen ábra alapján, hogy a teljes vibráció tekintetében egyértelmű sorrend állt fel a módszerek tekintetében. A kontroll után sorban a következő módszer az alacsony vibráció alkalmazása volt, de már itt is majdnem 50%-os csökkenés volt elérhető. Ezek után következtek sorrendben az áramlás terelőkkal végzett mérések, majd a magas vibráció, ezután pedig az alacsony vibráció áramlás terelőkkal való kombinációja, átlagosan 70%-os csökkenéssel, majd a legjobban teljesítő módszerek, a magas vibrációja kombinációja az áramlás terelőkkal, itt akár 85%-os csökkenést ki tudtam mutatni. A teljes ellenálláson belüli eloszlások igen változóak voltak, a magas vibráció és áramlásterelők használatánál, majdnem teljesen megszűnt a reverzibilis ellenállás. Ez azért lehet, mert a terelők által kellett turbulens áramlások és a vibrációk által keltett nyíró erők nagyrésztben eltávolították vagy nem engedték kialakulni a gél réteget a membrán felületén.



29. ábra Összes mérésre vonatkozó irreverzibilis (2), reverzibilis (3) és teljes ellenállási értékek (4) eloszlása

A 30. ábrán is jól látható, hogy a különböző módszerek miként befolyásolják az ellenállások mértékét a kontroll állapothoz viszonyítva. Hasonlóan a fluxushoz, itt is az áramlás terelők és a magas vibráció kombinációi eredményezték a legjobb értékeket (miközben a fluxus esetében a minél nagyobb értékre kell törekedni, az ellenállásnál az alacsonyabb értékek elérése a cél). Ez összhangban áll azokkal irodalmi részben említett adatokkal, amelyek szerint egy membrán akkor érhet el magas szűrlet fluxust, ha alacsony a teljes ellenállása. A legnagyobb különbséget ellenállás tekintetében az *Sp.2* és a magas vibráció kombinációja produkálta, itt a kontrollhoz képest a teljes ellenállás értéke több mint 85%-os esést mutatott.

Kiemelkedő adat továbbá, hogy egyes esetekben, például az *Sp.4*-nél, az irreverzibilis ellenállás közel nullára csökkent, azonban, amikor ezt a modellt modulvibrációval kombináltam, az irreverzibilis ellenállás a legmagasabb értéket vette fel. Ezzel szemben, ha összehasonlítjuk az *Sp.2* sima és vibrációs méréseinek eredményeit, akkor azt láthatjuk, hogy a vibráció hozzáadása jelentősen javította az irreverzibilis ellenállás értékeit, magas és alacsony vibráció használata mellett is több mint 55%-os csökkenés volt tapasztalható. Ez azt jelzi, hogy ha kombinált módszereket alkalmazunk a szűrési folyamat során, rendkívül fontos a megfelelő geometria és vibrációs konfiguráció kiválasztása, hogy optimális ellenállási értékeket érhesünk el.

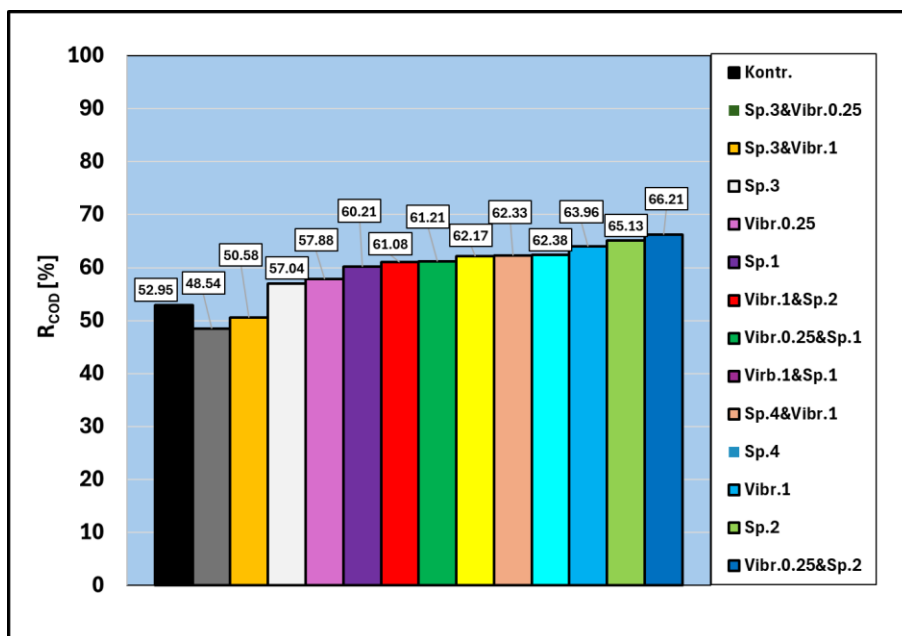


30. ábra A teljes, reverzibilis és irreverzibilis ellenállások csökkenése a kontroll mérés értékeihez képest

4.4 Membránszűrések minősége, visszatartási értékek, analitika

4.4.1 Szervesanyag tartalom változásai, Kémiai oxigénigény

A vizsgálatok során a betáplált oldat, valamint a folyamat végére keletkező szűrlet és koncentrátum szervesanyagtartalmára fókuszáltam. Ehhez a kémiai oxigénigény (KOI) roncsolásos eljárását alkalmaztam, amelynek során a mintákat roncsolószerrel és magas hőmérséklettel kezeltem egy adott időtartamon keresztül. A minta szervesanyag tartalmát az eljárás során bekövetkező színváltozás alapján határoztam meg. Amint a 31. ábrán is látszik, a vizsgált minták nagy része minimális javulást mutatott a kontroll értékekhez képest, átlagban 5-14%-ot, azonban kiemelkedően jó vagy rossz eredmények nem születtek. A minimális javulás annak a szennyező anyagok nem tudnak olyan könnyen a membrán belső szerkezetébe rakódni, inkább a felületén ragadnak meg, így még kevesebb szennyeződés jut át a membránon. A vibrációval kombinált *Sp.3*-mas eredmények kissé (4-2%-kal) gyengébben teljesítettek, mint a kontroll. Összességében elmondható, hogy a modulvibráció és az áramlás terelők külön-külön vagy együttes használata minimális változást okoz csak a szervesanyag visszatartásban.



31. ábra Az összes mérésre vonatkozó kémiai oxigénigény visszatartási értékek, növekvő sorrendben

4.4.2 Egyéb analitikai vizsgálatok (zavarosság, vezetőképesség)

Egy fluidum vezetőképességét a döntően benne lévő ionok mennyisége határozza meg. A kezdeti percekben vett mintákban ugyan észlelhető volt, hogy kisebb a vezetőképességük mint a kiinduló oldatnak, azonban a mérés végére az összes permeátum és az összes koncentrátum közötti különbség minimálisra csökkent, átlagosan mindössze 15%-ra. A vizsgált módszerek között nem volt számottevő különbség észlelhető, ez azzal magyarázható, hogy az eltömődést késleltető fizikai módszerek nem befolyásolják az átjutó ionok számát, így a különböző szűrletek vezetőképessége nem változik. Az ugyanezzel a műszerrel mért teljes oldott anyag tartalom hasonló eredményeket mutatott, a végső permeátumokon és koncentrátumokon mért eredmények között nincs érdemi különbség, csupán 2-4%.

Zavarosság méréseimnél szintén kiderült, hogy nagy különbségek nem tapasztalhatóak a különböző módszerek között, de ez nem meglepő, hiszen az ultraszűrő membránokon a lebegőanyag tartalom jelentős része nem juthat át. Az értékek egy tartományon belül maradtak, szinte minden esetben 99,5% felett. Az alacsony vibrációnál mért végső koncentrátumhoz tartozó érték a többinek csak a fele lett. Ez a különbség, mivel más helyen nem jelentkezett ennyire drasztikusan, betudható mérési hibának is.

4.4.3 Beltartalom mérések, Bentley 150

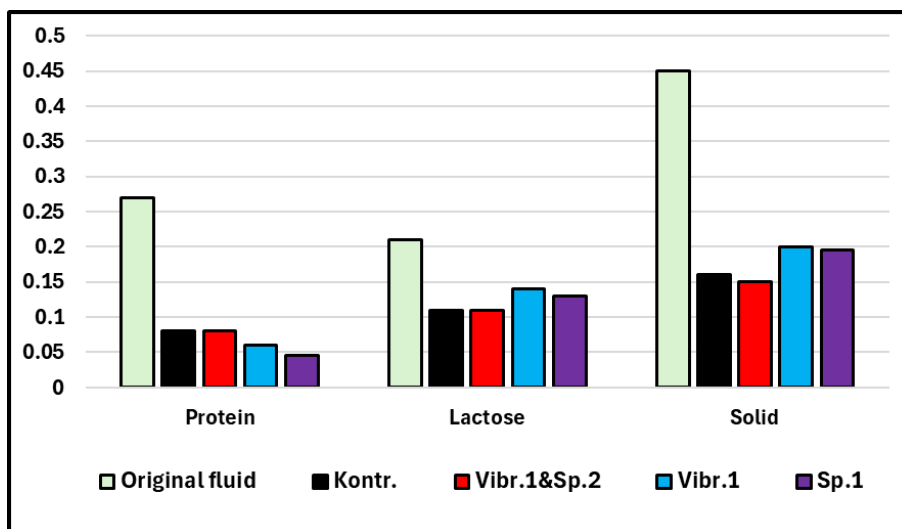
A beltartalom mérések során arra voltam kíváncsi, hogy egyes eltömődést késleltető fizikai módszerek mennyiben befolyásolják a kinyert szűrletek szervesanyag, fehérje, tejcukor és szilárd részecske tartalmát. Az előzőekhez hasonlóan itt is megvizsgáltam külön-külön a sima modulvibrációs, áramlás terelős és végül a kombinált mérési módszerek eredményeit. A minták nagy száma miatt, a kapott értékekből, eljárás típusonként (vibrációs, áramlás terelős és kombinált), a legjobb eredményeket produkáló módszerekhez tartozó adatokat ábrázoltam, a 32. diagramon.

Az eredmények alapján elmondható, hogy az anyaoldathoz képest már a kontroll méréssel közel 70%-kal csökkent a minták fehérje tartalma, a tejcukor majdnem a felére és az oldott anyag tartalom is 67%-kal csökkent. Ezen eredményeimhez hasonlóan, már több kutatás is született ennek igazolására, hasonló membrán visszatartásokkal (Marshall et al., 1993).

A vibrációs módszerekkel készített szűrletekben a fehérje tartalom további csökkenést mutatott, amint az 32. ábrán is látszik, magas vibráció mellett 77% volt. Tejcukor tartalomnál vibrációval végzett méréseknél szintén változás volt tapasztalható, mindkét módszer hatására közel 55%-ot csökkentett az anyaoldathoz képest. Szervesanyagtartalomnál nem volt számottevő különbség kontroll és a vibrációs módszerek között.

Áramlás terelőkkal végzett méréseknél a fehérje tartalom hasonlóan csökkent, *Sp.1* esetében 83%-kal. Tejcukor tartalom terén szinte azonos eredményt hozott mind a négy áramlás terelő betét, nagyjából 60%-os csökkenést mutattak az anyaoldathoz képest és 13%-kal teljesítettek rosszabbul, mint a kontroll mérés. A szervesanyag tartalom pedig, közel azonos volt a vizsgált mintákban, majdnem 60%-kal csökkentették az anyaoldathoz tartozó értéket.

A kombinációs mérések teljesítettek a leggyengébben a fehérje, tejcukor és oldott anyag visszatartások tekintetében. A magas vibráció és *Sp.2* kombinációja és a kontroll mérés szinte fej-fej melletti eredményeket produkált a fehérje és a tejcukor vizsgálatánál és 6%-os különbség volt kimutatható oldott anyagok tekintetében a kombinált módszer javára.



32. ábra Szűrletek fehérje, tejcukor és szilárd részecske tartalma Bentley 150 mérések alapján

4.5 Membránszűrések gazdaságossága II. / Energiaigények változása

A méréseket állandó TMP és térfogatáram mellett végeztem, így kiválóan ki lehet mutatni a mért adatok alapján, hogy az egyes módszerek mennyiben befolyásolták a VSEP által használt energiát, ez a mutató az egyik legalkalmasabb a hatékonyság mérésére. A pontos fajlagos energia fogyasztás kiszámítására a következő képletet használtam:

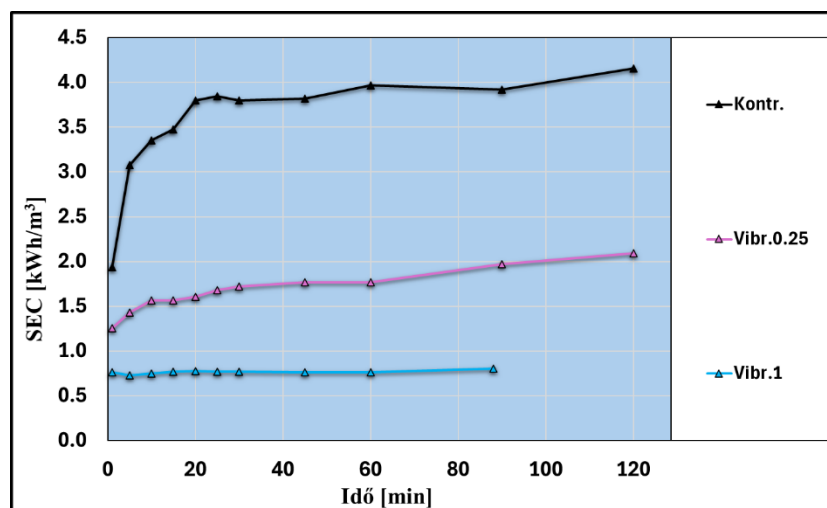
$$SEC = \frac{\eta_{sz} \cdot p_{sz} + \eta_{vm} \cdot p_{vm}}{J \cdot A_{aktív}} [\text{kWhm}^{-3}] \quad (7)$$

Ahol, η_{sz} és η_{vm} a tápszivattyú és a vibrációs motor hatásfoka, p_{sz} és p_{vm} a tápszivattyú és a vibrációs motor teljesítménye, J a pertmeátum fluxus, $A_{aktív}$ pedig a szűrésben részt vevő, hasznos membrán felület.

4.5.1 Vibrációs méréseim eredményei

Már a sima vibrációs méréseknél drasztikus esés tapasztalható az energiafogyasztásban. A kontroll mérés kezdeti pillanatától nagyjából a 20. percéig nagy mértékben nő a fogyasztás, majd ezután a pont után nagyjából állandó marad, egészen az utolsó 5 percig, ahol ismét emelkedni kezd. Ez a folyamat jól jellemzi, a membrán eltömődésének a folyamatát, a kezdetben tiszta membrán áteresztő képessége a szűrés elején rohamosan csökkenni kezd, ezért a kompresszornak több energiára van szüksége, hogy fenntartsa az állandó értékeket. Az alacsony vibráció kiindulási

energiafelvétele már 35%-kal kisebb, mint a kontrollé, azonban itt is jól kivehető a kezdeti megnövekedett energia felvétel a stabilizáció előtt. Itt is jól látható, hogy a mérés vége felé ismét emelkedni kezd az energia felvétel. A magas vibráció esetén az egész folyamat alatt viszonylag egyenletes marad az energiafelvétel az előző két esettel ellentétben. Ráadásul a kontroll mérésekhez képest a kezdeti energia felhasználás 60%-kal, az utolsó percekben mért pedig majdnem 80%-kal csökkent, ami biztató eredménynek mondható (33. ábra). Ugyanerre a megállapításra jutott Zsirai és társai (2016), akik megállapították, hogy egy membránszűrő rendszer fajlagos energiafelhasználása akár 0.1 kWhm^{-3} -re is csökkenthető, megfelelő amplitúdójú és frekvenciájú vibrációval.

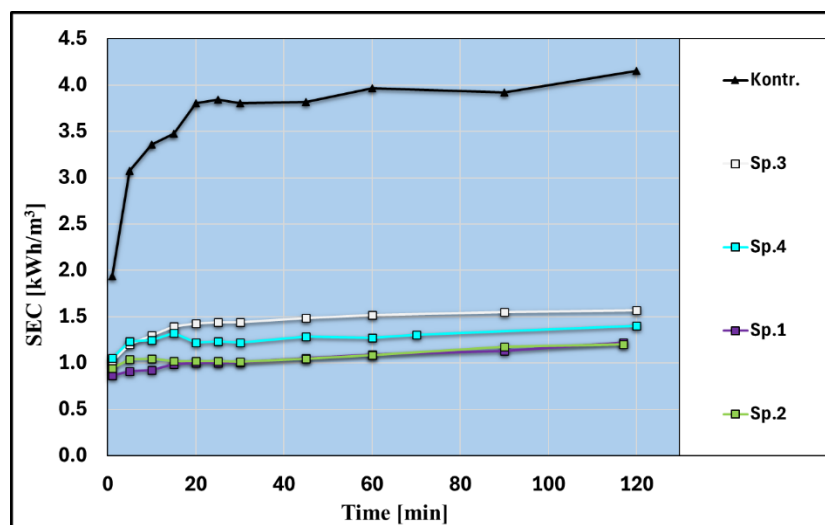


33. ábra Fajlagos energia fogyasztás az idő függvényében a kontroll és vibrációval végzett mérések esetében

4.5.2 Áramlás terelőkkal végzett méréseim eredményei

Az áramlás terelőkkal végzett mérések ábrája (34. ábra) merőben eltér a vibrációséktól. A 4 modell esetében a kezdeti energiafelvétel nagyjából egybe esik, $1\text{--}1,1 \text{ kWhm}^{-3}$ környékére. Ennek az értéknek a növekedése nem olyan hirtelen történik, mint vibráció esetén, hanem nyújtva, közelítőleg az első 15 percben. A végső energiafelvétel a kontrollhoz képest jelentősen csökkent mind a négy esetben, minimum 60%-kal, legjobb esetben (vagyis *Sp.2* használatakor) pedig 70%-kal. Amint a permeátum fluxusok értékeinél is, itt is kirajzolódik az a tendencia, hogy a két fő geometriai kialakítás között mekkora a különbségek vannak. Ahogy az előbb említett esetben is láttuk, itt is a *Sp.3* produkálta a többihez képest a leggyengébb eredményeket, őt követte az *Sp.4* és végül előttük az *Sp.1* és *Sp.2* szinte fej-fej mellett. Ezt a jelenséget már két paraméternél is láttuk,

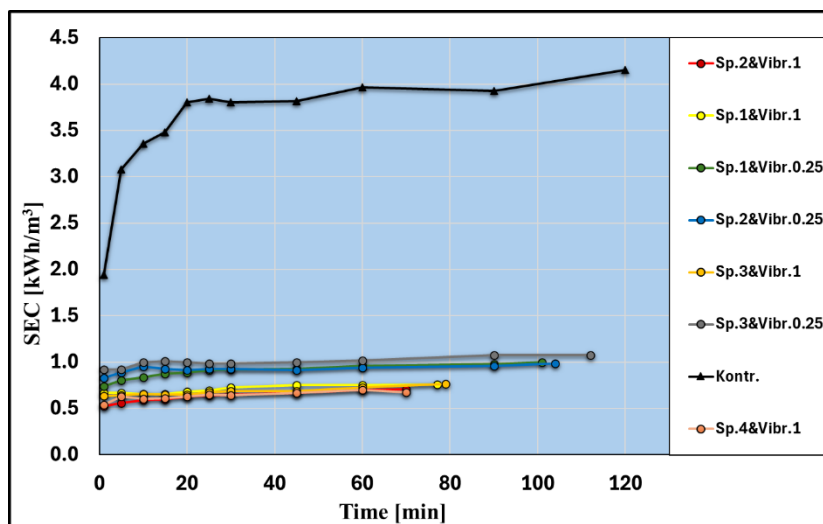
ezért egyre biztosabban ki lehet jelenteni, hogy ha simán áramlás terelőket alkalmazunk, akkor az *Sp.1* és *Sp.2* kialakítások jelentősen jobban teljesítenek, mint a másik két típus.



34. ábra Fajlagos energia fogyasztás az idő függvényében a kontroll és áramlás terelőkkal végzett mérések esetében

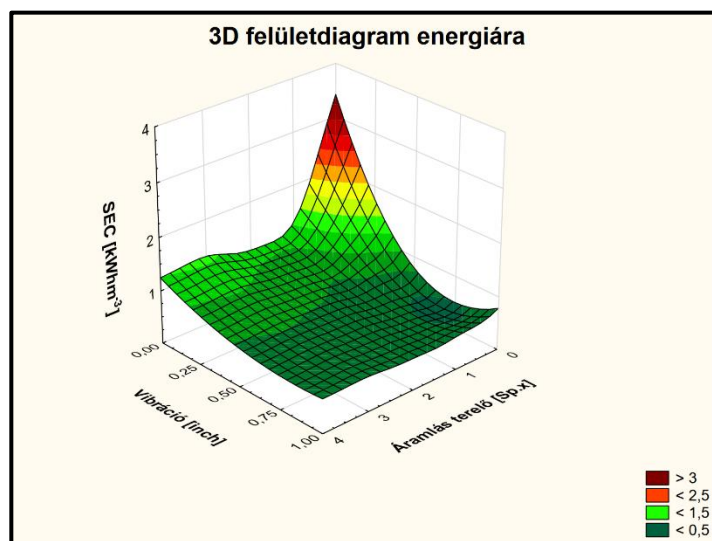
4.5.3 Kombinált módszerekkel végzett méréseim eredményei

A várt eredményekkel összhangban a fajlagos energia fogyasztásnál is a kombinált módszerekkel tudtam a legjobb eredményeket elérni (35. ábra). Ahogy a fluxusnál is, itt is eltérések voltak az alacsony és magas vibrációval végzett mérések között, utóbbiak lényegesen jobban teljesítettek. Ahogy az a 34. ábrán is látszik, az alacsony vibrációs mérések kezdeti energia felvétele 0,7 és 0,9 kWhm⁻³ között mozgott, míg ez az érték magas vibráció mellett 0,5-0,6 kWhm⁻³ körüli, ami 58%, illetve 71%-os csökkenést jelent. Az energiafelvétel itt növekszik a legkisebb mértékben a mérés folyamán, illetve az összes mérés közül, ezzel a módszerrel tudtam elérni a leghatékonyabb energiafelhasználást is, *Sp.4* és *Sp.2* magas vibrációval való kombinálásakor 0.63 kWhm⁻³-es fogyasztást értem el, az utolsó percekben, ami a kontrollhoz képest majdnem 85%-os csökkenést jelent. Tehát összegzésül elmondhatjuk, hogy a fajlagos energiafogyasztás szempontjából is egyértelműen a kombinált módszerek voltak a leghatékonyabbak, ezek közül is, pont ahogyan a szűrlet fluxusoknál láttuk az *Sp.2/Sp.4* magas modulvibrációval való használata bizonyult a leghatékonyabbnak.



35. ábra Fajlagos energia fogyasztás az idő függvényében a kontroll és a kombinált mérések esetében

Az átlag fluxus értékekhez hasonlóan, az energia felhasználáshoz is készítettem egy 3D felület diagramot (36. diagram). A kettő között az a különbség, hogy mivel a fluxusok a membránszeparációs művelet sebességéről adnak információt, az a kedvező, ha minél magasabbak. Energiafelhasználásnál viszont az alacsonyabb értékek kedvezőbbek, hiszen az 1 m³ szennyvíz megtisztásához szükséges energiát jelentik.



36. ábra 3D felületdiagram a mérésekhez tartozó átlag energia értékek alapján
(Áramlás terelők számainak jelentése: 0: áramlás terelő nélküli üzemmód; 1: Sp.1 kialakítás; 2: Sp.2; 3: Sp.3; 4: Sp.4)

5. ÖSSZEFOGLALÁS

OTDK dolgozatomban egy, a víz- és szennyvízkezelésben is nagyon fontos témakört, a membránszűrést, azon belül is, a membránok eltömődésének késleltetését és hatékonyságuk hosszútávú fenntartását vizsgáltam. Ez azért is kiemelkedően fontos mert, az EU a közeljövőben negyedleges szennyvíztisztítási fokozat kiépítését írja elő a nagyobb szennyvíztelepek számára. Ebben a fokozatban a membránszűrési eljárások preferáltak.

Elsősorban arra voltam kíváncsi, hogy milyen, környezetvédelmi megfontolások miatt, tisztán mechanikai módszerekkel lehet a legjobb eredményeket elérni a membránok eltömődésének késleltetése terén. Kutatásom a saját fejlesztésű, különböző geometriai kialakításokkal rendelkező 3D nyomtatott áramlás terelőkre, modulvibrációra, valamint ezek kombinációjára összpontosult. A kutatás során a kontroll, a vibrációs és az áramlás terelős módszerekkel kapott méréseim eredményeit hasonlítottam össze a kombinációs méréseim eredményeivel. A vizsgált paraméterek többek között, a szűrés során termelődő permeátum fluxusok, a membrán visszatartások és ellenállások, valamint a fajlagos energia fogyasztások alakulása volt.

Egy kezdeti szakítóvizsgálat eredményei alapján (ahol az eredmények a következő sorrendet követték: *PCTG*, *PETG*, *PLA* és gyanta) megválasztott anyagokból készítettem el az áramlás terelőket. Egyértelműen kimutatható lett a különböző technikákat alkalmazó mérések közötti különbség. A membránszűrések sebességét vizsgálva sikerült bebizonyítani, hogy a lehető legnagyobb szűrlet fluxus eléréséhez célszerű modulvibrációt és egy áramlás terelőt egyszerre alkalmazni. Magas vibrációval és a *PETG*-ből készült *Sp.2* (vagy az *Sp.4*) áramlás terelő egyidejű használatával több mint 300%-os javulás volt elérhető a fluxusok értékeiben a kontroll mérésekhez képest, azaz a művelet sebessége a négyszeresére nőtt.

A membrán ellenállások vizsgálatánál is hasonló eredmények születtek. Míg itt is elmondható, hogy az összes kipróbált módszer hatékony volt a kontroll méréshez képest, mégis a magas vibráció és ismét a *PETG*-ből készült *Sp.2* (vagy az *Sp.1*) együttes alkalmazása hozta a legjobb eredményeket, több mint 85%-os csökkenést a teljes ellenállás tekintetében.

A fajlagos energia fogyasztást mutató értékek alapján is egyértelmű következtetést sikerült levonnom, minden eltömődést késleltető eljárás kimutathatóan csökkentette a berendezés fajlagos energiafogyasztást, azaz az 1 m³ szűrlet (tisztított szennyvíz) előállításához szükséges energia mennyiségét. Az eddigi tendenciával összhangban itt is a magas vibráció és a *PETG Sp.2* (vagy *Sp.4*) egyszerre történő alkalmazása vezetett a legoptimálisabb értékekhez, ugyanis itt volt a

legnagyobb különbség a kontrollhoz képest, majdnem 85%-ot csökkent az energia fogyasztás és az egész folyamat alatt viszonylag egyenletes is maradt.

Membránszűrések minőségét, azaz a membránok visszatartását vizsgálva fény derült arra is, hogy az általam tesztelt eljárások lényegesen nem befolyásolják a sem kémiai oxigénigényt (maximum 12%-os eltérés volt megfigyelhető), sem a beltartalmi értékekre vonatkozott visszatartásokat (fehérje, tejcukor és szárazanyag tartalom).

Ezen eredmények alapján tehát egyértelműen levonható az a következtetés, hogy az áramlás terelők és a modul vibráció együttes alkalmazása jelentősen jobban teljesít a membrán élettartamának nyújtásában, mintha ezt a két módszert külön-külön használnánk. Ezek mellett elmondhatjuk azt is, hogy nem mindegy, hogy milyen erősségű vibrációt és milyen geometriai kialakítású áramlás terelőt alkalmazunk együtt. Méréseim alapján a magas (2,54 cm amplitúdójú) vibrációval és az *Sp.2* (kúpos kialakítású) áramlás terelővel lehetett a legoptimálisabb eredményeket elérni.

Megállapítottam továbbá azt is, hogy a legtöbb esetben az áramlás terelők alkalmazása kiválthatja a modulvibráció használatát. A vizsgált paramétereknél a sima áramlás terelőkkel végzett mérések jobban teljesítettek, mint az alacsony vibrációval végzettek és a legtöbb esetben megközelítették a magas vibrációval kapott eredményeket is. Ezen eredmények alapján kijelenthető, hogy az áramlásterelők alkalmazása csökkenti az energia felhasználást és ezen felül a mérési eredményeken is javít (fluxusok esetén majdnem kétszer jobb eredmények születtek áramlás terelőket használva, mint alacsony vibrációval).

Ahhoz, hogy bizonyítsam a mérési eredményeim ismételhetőségét, a magas vibráció és *Sp.4* kombinációját használó mérést háromszor is elvégeztem. A három mérés során kapott eredmények közeliek lettek egymáshoz, köztük csupán 5%-os eltérések mutathatóak ki.

MSc tanulmányaim során jelenlegi méréseim folytatásaként további geometriai kialakításokat fogok vizsgálni, valamint valós ipari szennyvizek kezelését is kutatom majd.

6. IRODALOMJEGYZÉK

Folyóiratban megjelent cikk:

- Abrha, B. H., & Chen, Y. (2017). Analysis of Physico-Chemical Characteristics of Effluents from Beverage Industry in Ethiopia. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 05(06), 172–182. <https://doi.org/10.4236/gep.2017.56016>
- Akoum, O. Al, Jaffrin, M. Y., Ding, L., Paullier, P., & Vanhoutte, C. (2002). An hydrodynamic investigation of microfiltration and ultrafiltration in a vibrating membrane module. *Journal of Membrane Science*, 197(1–2), 37–52. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(01\)00602-0](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(01)00602-0)
- Amirafabi, M. S., Mostoufi, N., Hosseinzadeh, M., & Mehrnia, M. R. (2014). Reduction of membrane fouling by innovative method (injection of air jet). *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40201-014-0128-0>
- Bulan Nasution, S., Endang Sofia S, Adi Rahmat, & Murni Sari. (2022). The Relationship Of Sanitation And Refill Water Quality With Stunting Events In The Work Area of Community Health Centers Titi Papan in Medan Deli District. *International Journal of Health and Pharmaceutical (IJHP)*, 2(1), 162–167. <https://doi.org/10.51601/ijhp.v2i1.26>
- Chaudhary, B., Li, H., & Matos, H. (2023). Long-term mechanical performance of 3D printed thermoplastics in seawater environments. *Results in Materials*, 17(December 2022), 100381. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100381>
- Chimuca, J. F. J., do Canto, C. S. A., de Sousa, J. T., Leite, V. D., & Lopes, W. S. (2022). Anaerobic dynamic membrane bioreactor applied to wastewater treatment: a review. *Afinidad*, 80(598), 20–34. <https://doi.org/10.55815/413319>
- Du, X., Shi, Y., Jegatheesan, V., & Ul Haq, I. (2020). A review on the mechanism, impacts and control methods of membrane fouling in MBR system. In *Membranes* (Vol. 10, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/membranes10020024>
- Gáspár, I., & Neczpál, R. (2020). Testing of 3d printed turbulence promoters for membrane filtration. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 64(3), 371–376. <https://doi.org/10.3311/PPch.15211>
- Geng, P., Zhao, J., Gao, Z., Wu, W., Ye, W., Li, G., & Qu, H. (2021). Effects of Printing Parameters on the Mechanical Properties of High-Performance Polyphenylene Sulfide Three-Dimensional Printing. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 8(1), 33–41. <https://doi.org/10.1089/3dp.2020.0052>

- Habibi, A., Sjaifuddin, S., & Pancawati, J. (2024). Characteristics of Wastewater Generated by the Snack Food (Cookies) Industry. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 21(1), 112–131. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v21i1.112-131>
- Han, H., & Cho, S. (2018). Fabrication of conducting polyacrylate resin solution with polyaniline nanofiber and graphene for conductive 3D printing application. *Polymers*, 10(9). <https://doi.org/10.3390/polym10091003>
- Hartini, H. (2022). *Revealing the Development of Agriculture Wastewater Treatment: A Bibliometric Analysis of Global Publications from 1971 to 2022 using Scopus Database*. 1–21.
- Hussain, A., Mahmood, F., Arshad, M. S., Abbas, N., Qamar, N., Mudassir, J., Farhaj, S., Nirwan, J. S., & Ghori, M. U. (2020). Personalised 3D printed fast-dissolving tablets for managing hypertensive crisis: In-vitro/in-vivo studies. *Polymers*, 12(12), 1–15. <https://doi.org/10.3390/polym12123057>
- Janet Joshiba, G., Senthil Kumar, P., Femina, C. C., Jayashree, E., Racchana, R., & Sivanesan, S. (2019). Critical review on biological treatment strategies of dairy wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 160, 94–109. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24194>
- Jesús, M. M. (2003). *Ipari szennyvizek tisztítása membránszűréssel és pervaporációval*.
- Kozior, T., Blachowicz, T., & Ehrmann, A. (2020). Adhesion of three-dimensional printing on textile fabrics: Inspiration from and for other research areas. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15. <https://doi.org/10.1177/1558925020910875>
- Majerek, D., Duda, S., Babko, R., & Widomski, M. K. (2019). Statistical analysis of the water pollution indicators pertaining to treated municipal sewage introduced to the river. *MATEC Web of Conferences*, 252, 09009. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201925209009>
- Marshall, A. D., Munro, P. A., & Trägårdh, G. (1993). The effect of protein fouling in microfiltration and ultrafiltration on permeate flux, protein retention and selectivity: A literature review. *Desalination*, 91(1), 65–108. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(93\)80047-Q](https://doi.org/10.1016/0011-9164(93)80047-Q)
- Mian, S. H., Abouel Nasr, E., Moiduddin, K., Saleh, M., & Alkhalefah, H. (2024). An Insight into the Characteristics of 3D Printed Polymer Materials for Orthoses Applications: Experimental Study. *Polymers*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/polym16030403>
- Mulyati, S., Rosnelly, C. M., Syamsuddin, Y., Arahman, N., Muchtar, S., Wahyuni, Lauzia, T.,

- Ambarita, A. C., Bilad, M. R., & Samsuri, S. (2023). Enhancing the Anti-Fouling Property of Polyethersulfonebased Membrane using Chitosan Additive from Golden Snail (*Pomacea canaliculata*) Shell Waste for Water Purification. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 23(2), 224–239. <https://doi.org/10.22146/ajche.79643>
- Muradin, M., & Foltynowicz, Z. (2017). Life Cycle Inventory of Anaerobic Digestion at the Wastewater Treatment Plant of a Dairy Company. *Studia Oeconomica Posnaniensia*, 5(7), 137–148. <https://doi.org/10.18559/soep.2017.7.10>
- Naveed, N. (2021). Investigating the material properties and microstructural changes of fused filament fabricated PLA and tough-PLA parts. *Polymers*, 13(9). <https://doi.org/10.3390/polym13091487>
- Oguttu, H. W., Bugenyi, F. W. B., Leuenberger, H., Wolf, M., & Bachofen, R. (2008). Pollution menacing Lake Victoria: Quantification of point sources around Jinja Town, Uganda. *Water SA*, 34(1), 89–98. <https://doi.org/10.4314/wsa.v34i1.180865>
- Onet, C. (2010). Characteristics of the Untreated Wastewater Produced By Food Industry [Características de las aguas residuales sin tratar producidas por la industria alimentaria]. *Analele Universității Din Oradea, Fascicula: Protecția Mediului*, XV, 709–714.
- Pandzic, A., Hodzic, D., & Milovanovic, A. (2019). Influence of material colour on mechanical properties of pla material in fdm technology. *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 30(1), 555–561. <https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.075>
- Pathak, U., Das, P., Banerjee, P., & Datta, S. (2016). Treatment of wastewater from a dairy industry using rice husk as adsorbent: Treatment efficiency, isotherm, thermodynamics, and kinetics modelling. *Journal of Thermodynamics*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3746316>
- Rajca, M., Bodzek, M., & Konieczny, K. (2009). Application of mathematical models to the calculation of ultrafiltration flux in water treatment. *Desalination*, 239(1–3), 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.010>
- Saffarimiandoab, F., Yavuzturk Gul, B., Tasdemir, R. S., Ilter, S. E., Unal, S., Tunaboyle, B., Menciloglu, Y. Z., & Koyuncu, İ. (2021). A review on membrane fouling: Membrane modification. *Desalination and Water Treatment*, 216, 47–70. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26815>
- Sanawar, H., Pinel, I., Farhat, N. M., Bucs, S. S., Zlopasa, J., Kruithof, J. C., Witkamp, G. J., van

- Loosdrecht, M. C. M., & Vrouwenvelder, J. S. (2018). Enhanced biofilm solubilization by urea in reverse osmosis membrane systems. *Water Research X*, 1, 100004. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2018.10.001>
- Smith, P. J., Vigneswaran, S., Ngo, H. H., Ben-Aim, R., & Nguyen, H. (2006). A new approach to backwash initiation in membrane systems. *Journal of Membrane Science*, 278(1–2), 381–389. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.11.024>
- Spychala, M., & Nguyen, T. H. (2019). Preliminary study on greywater treatment using nonwoven textile filters. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(15), 20–32. <https://doi.org/10.3390/app9153205>
- Sultana, J., Rahman, M. M., Wang, Y., Ahmed, A., & Xiaohu, C. (2024). Influences of 3D printing parameters on the mechanical properties of wood PLA filament: an experimental analysis by Taguchi method. *Progress in Additive Manufacturing*, 9(4), 1239–1251. <https://doi.org/10.1007/s40964-023-00516-6>
- Ulkir, O. (2023). Energy-Consumption-Based Life Cycle Assessment of Additive-Manufactured Product with Different Types of Materials. *Polymers*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/polym15061466>
- Vasina, A. I., & Basamykina, A. N. (2022). Local Wastewater Treatment Plant for Dairy Production: Challenges and Solutions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 988(3). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/3/032077>
- Widyarani, Wulan, D. R., Hamidah, U., Komarulzaman, A., Rosmalina, R. T., & Sintawardani, N. (2022). Domestic wastewater in Indonesia: generation, characteristics and treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(22), 32397–32414. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19057-6>
- Zieliński, M., Dębowski, M., Dudek, M., & Grala, A. (2013). Effect of the application of advanced oxidation technology on the effectiveness of anaerobic treatment of wastewaters with a high concentration of formaldehyde. *Archives of Environmental Protection*, 39(4), 81–91. <https://doi.org/10.2478/aep-2013-0040>
- Zsirai, T., Qiblawey, H., A-Marri, M. J., & Judd, S. (2016). The impact of mechanical shear on membrane flux and energy demand. *Journal of Membrane Science*, 516, 56–63. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.06.010>

Könyv:

Fonyó Zsolt, F. G. (2004). Vegyipari művelettani alapismeretek. 1042.

Szóbeli közlés:

Dr. Kertész Szabolcs (2024). Szóbeli közlés

Internetes forrás:

<https://manufactur3dmag.com> (2018). Letöltés dátuma: 2024. 09. 23, forrás:

<https://manufactur3dmag.com/3d-printing-technology-choice-fdm-v-s-sla-v-s-sls/>

<https://www.crealityexperts> (2024). Letöltés dátuma: 2024. 09. 23, forrás:

<https://www.crealityexperts.com/creality-hot-end-repair-guide>

<https://www.zaccord.com> (2022). Letöltés dátuma: 2024. 09. 23, forrás:

<https://www.zaccord.com/blog?id=9>

Jogszáály:

220/2004. (VII. 21.) Korm. rendelet a felszíni vizek minősége védelmének szabályairól (2023).

Letöltés dátuma: 2024.08.24, forrás: <https://njt.hu/jogszabaly/2004-220-20-22>

IPPC Útmutató az elérhető legjobb technika meghatározásához a tejfeldolgozás terén (2005).

Letöltés dátuma: 2024. 08. 25, forrás:

https://ippc.kormany.hu/download/c/e9/70000/tej_utmutato.pdf

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Kertész Szabolcs témavezetőmnek a tőle kapott támogatásért, időért és fáradhatatlan munkájáért, valamint Csenki Dorottya Zsuzsanna és Szpisják-Gulyás Nikolett intézeti mérnököknek az analitikai mérésekhez és Statistica program használatához nyújtott segítségért. Hálás vagyok a sok segítségért, útmutatásért és motivációért, amelyek nélkül ez a dolgozat nem jöhetett volna létre.

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal, NKFI-FK-142414 azonosító számú projektje finanszírozta.