

T D K D O L G O Z A T

Trancsik Martin



SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITAS SCIENTIARUM SZEGEDIENSIS
MÉRNÖKI KAR

***3D NYOMTATOTT PROMÓTEREK HATÁSAINAK
TESZTELÉSE
VIBRÁCIÓS MEMBRÁNSZŰRŐ EGYSÉGBEN***

TDK DOLGOZAT

Trancsik Martin

*IV. évfolyamos gépészmérnök
hallgató*

Témavezető:

Dr. habil. Kertész Szabolcs
egyetemi docens

SZEGED

2023

ÖSSZEFOGLALÁS

A TDK dolgozatomban arra kerestem a választ, hogy egy speciális, vibráltatható membránszűrő modulban, az áramlási viszonyok megváltoztatásával a szűrési tulajdonságok javíthatóak-e, és ha igen, milyen mértékben. Ennek érdekében különböző, ezen szűrőmodulba illeszthető 3D nyomtatott elemeket, áramlás gyorsítókat, promótereket, továbbiakban áramlásterelőket, terveztem, nyomtattam majd teszteltem. Mérnöki problémához kapcsolódóan az áramlásterelők adott vibrációs modulba illesztése, valamint a vibrációval együttes működtetése a korábbiakban az SZTE MK BRMI Intézetben nem volt megvalósítható. Ennek feloldására különböző módszereket dolgoztam ki és javaslatokat fogalmaztam meg. Tudományos Diákköri munkám laboratóriumi kísérleteinek előrehaladtával, így ezen áramlásterelőket újraterveztem, továbbfejlesztettem és teljesen új kialakítást is vizsgáltam. Ráadásul az anyag erősítés céljából alapanyag változtatást is végeztem. Kísérleteimet minden esetben frissen előállított átlagos szennyezettségű modell tejipari szennyvíz ultraszűrésének vizsgálatával végeztem.

ABSTRACT

In my TDK work, I looked for the answer to whether the filtration properties of a special vibrating membrane separation module can be improved by changing the hydrodynamic flow conditions, and if so, to what extent. In order to do this, I continuously design, redesign, print and test different 3D printed elements, turbulent promoters, spacers that can be inserted into the filter module. Due to an engineering problem, fitting the spacers into a given vibration module and operating them together with the vibration was previously not possible at the SZTE MK BRMI Institute. To resolve this, I developed different methods and made my suggestions. With the progress of my TDK laboratory experiments, I also redesigned and further developed these spacers and conducted my experiments with the vibrating membrane separation device, which was operated with freshly produced model dairy wastewater of average organic load. In addition to the further development of the flow deflectors, I also changed the material and experimented with uniquely designed flow deflectors.

Tartalom

1.	BEVEZETÉS	5
2.	RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE	7
3.	IRODALMI ÁTTEKINTÉS.....	8
3.1.	Élelmiszeripari Szennyvizek jellemzői	9
3.1.1.	Tejipari szennyvizek	10
3.2.	Szennyvizek kezelése	11
3.3.	Membránszeparációs eljárások	13
3.3.1.	Az ultraszűrés.....	16
3.4.	Membránszeparációs eljárásokhoz kapcsolódó fogalmak.....	17
3.4.1.	Membrán eltömődés jelensége	19
3.4.2.	Membrán ellenállások kialakulása	20
3.5.	Vibrációval elősegített membránszűrés.....	21
3.6.	3D nyomtatott elemek, áramlásterelők jelentősége.....	22
4.	ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK	24
4.1.	Modell szennyvíz előállítása	24
4.2.	Vibrációs membránszűrő berendezés.....	24
4.3.	Laboratóriumi ultraszűréseim menete.....	26
4.4.	Áramlásterelők 3D nyomtatása	26
4.4.1.	A megtervezett áramlásterelők.....	27
4.4.2.	Áramlásterelők membránszűrő modulba illesztése	30
4.4.3.	Használt nevezéktan.....	31
4.5.	Analitikai módszerek	32
4.5.1.	Zavarosság meghatározása	32
4.5.2.	Kémiai oxigénigény (KOI) meghatározása	33
4.5.3.	Tejalkotók analízise és pH	33
5.	EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK	34
5.1.	Alakfejlesztési kísérletsorozat	34
5.2.	Szálerősítési kísérletsorozat.....	38
5.3.	Rögzítési és tartásjavítási kísérletsorozat.....	39
5.4.	Fajlagos energiaértékek.....	42
6.	ÖSSZEFOGLALÁS	44
7.	HIVATKOZÁSOK.....	46

1. BEVEZETÉS

A mindennapi életben egyre jelentősebb szerepet kap a víz- és szennyvíztisztítás, hiszen az utóbbi évtizedekben a népességgrobbbanásnak köszönhetően megnőtt a vízfelhasználás és szennyvíztermelésnek a mértéke. Ez azért is nagyon fontos, mert a felhasználható ivóvízből igen csekély mennyiség áll rendelkezésünkre. Magyarország előnyös helyzetben van ilyen téren, mivel rengeteg szabad felszín alatti víz áll rendelkezésre, de ez nem jelenti azt, hogy felelőtlenül bányhatunk ezen természeti kincssel. TDK munkám során ezt a témát azért választottam, mert a víz analitikája, tisztítása iránti érdeklődésem már középiskolai éveim alatt megfogalmazódott, és azóta is folyamatosan foglalkoztat. Mindig is vonzott a gondolat, hogy egy olyan globális jelentőségű problémával foglalkozzak, amely létfontosságú az emberiség számára, és amely egyben mérnöki tudást és innovatív megoldásokat igényel. Ezenkívül a téma energiafelhasználási aspektusai is kulcsfontosságúak voltak a választásom során, tekintettel arra, hogy minden tevékenységünk energiaigényes. Ipari szinten a szennyvíztermelés jelentős mennyisége a különböző üzemekből kerül ki, amelyet a befogadóba eresztés előtt tisztítani szükséges. A víz hatékony tisztítására sok különböző technika és berendezés alkalmazható, akár külön-külön, akár egymás utáni folyamatokban integrálva. Az egyik már elterjedten használt eljárás az iparban a membránszűrés művelete. Számos előnye, hogy könnyen kombinálhatóak más kezelési módszerekkel, tisztítási hatékonyságuk kiemelkedő, ám mindemellett azonban még mindig a membránok eltömődése jelentős hátránnyá jelentkezik. A membrán felületén a szűrés során kialakul egy felületi, úgynevezett polarizációs réteg, valamint a pórusokban is eltömődések keletkeznek, amelyek mind-mind a szűrés hatékonyságát csökkentik (döntően a nyomásigény megnövekedése, vagy a szűrlet fluxusok lecsökkenése miatt). Munkám során a membránszűrés eljáráshoz tartozó ultraszűrést választottam, a viszonylag alacsony nyomásigénye és más módszerekkel történő kombinálása esetén tapasztalható kiemelkedő teljesítménye miatt. Mivel számos szennyvíztípus összetétele nem állandó, hanem sok paramétertől függ, és rendkívül fluktuál, ezért TDK munkám során minden esetben frissen készítettem el a méréseim előtt a tejipari szennyvízmodellt. Ezt vizsgálva, ultraszűrve egy speciális laboratóriumi membránszeparációs berendezéssel adott működtetési paraméterek mellett, megvizsgáltam modulba illesztett különböző áramlásterelővel, azok nélkül,

vibrációval, illetve vibráció nélküli üzemmódban is a szűrési hatékonyságok javulásának mértékeit. Ezekből kapott eredményeim összehasonlítását, mind a szűrés sebességének megadására használt permeátum fluxusokra, mind a szűrések minőségének jellemzésére használt permeátumok analízisére vonatkozóan elvégeztem. Kiszámoltam továbbá a kísérleteim során kialakult ellenállási értékeket is, amikből a membrán eltömődési tendenciájára, végső soron a művelet gazdaságosságára következtettem. Ez utóbbinak részletes jellemzésére fajlagos energiaértékeket is meghatároztam. Az elmúlt évtizedekben a 3D technológia robbanás-szerűen tört be szinte minden tudományterületre, beleértve a víz- és szennyvíztisztítást is. A nemzetközi szakirodalomban számos olyan kutatási eredményt található, amelyek azt bizonyítják, hogy 3D nyomtatott elemek használatával csökkenthető a membrán eltömődés mérték, ezáltal csökkentve a szükséges energiabefektetést. TDK munkám során fő célom a berendezés moduljába fejlesztett és illesztett 3D nyomtatott áramlásterelő szűrési tulajdonságaira gyakorolt hatásainak kutatása és részletes hatásvizsgálata. Az újdonsült alkalmazás azért lenyűgöző és innovatív, mert pusztán fizikai módszerrel, plusz energiabefektetés nélkül tudunk elérni jelentős költségmegtakarítást. Dolgozatom során több variációban is vizsgáltam ezen értékeket modul vibrációval és anélkül, valamint a vibráció mértékét növelve is. Ezidáig a modul vibráció áramlásterelő beillesztésével egyidőben még nem volt megvalósítható. Sikeres fejlesztéseimmel és javaslataimmal azonban le tudtam győzni ezt az akadályt, eleinte mechanikai elemmel később új tervezésű áramlásterelővel. Kísérleteim egy másik fő célja volt, hogy az áramlásterelők alakjának megváltoztatásával és mechanikai rögzítésével az alakfejlesztést tökéletesítsem. További célom volt, hogy megfelelő anyagválasztással az áramlásterelőt a membránszűrő modulba tudjam rögzíteni, úgy, hogy mellette még szálerősítést is végezzek. Valamint törekedtem az áramlásterelők további tökéletesítésére, az utolsó, tartásjavítási kísérletsorozatomban. Így mindezek eredményeképpen egy már aktuális, meglévő projektbe tudtam bekapcsolódni, és annak sikeréhez reményeim szerint hozzájárulni. Ennek érdekében egyedi, saját tervezésű áramlástörővel is vizsgáltam a szűrési tulajdonságokat, valamint az áramlásterelők hatására bekövetkezett energiaértékek alakulását, a fajlagos energiaértékek összehasonlítását is elvégeztem, ami a gazdaságossági szempontjából fontos.

2. RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

PES Poliéterszulfon

MF (Microfiltration) Mikroszűrés

UF (Ultrafiltration) Ultraszűrés

NF (Nanofiltration) Nanoszűrés

RO (Reverse Osmosis) Fordított ozmózis

VSEP (Vibratory Shear Enhanced Processing) Vibrációs membránszűrő berendezés

KOI Kémiai oxigénigény [gL⁻¹]

FDM (Fused Deposition Modeling) Szálhúzásos 3D nyomtatási technológia

TMP (Transmembrane Pressure) Transzmembrán nyomás [Pa]

NTU (Nephelometric Turbidity Unit) Nefelometrikus zavarossági egység

MWCO (Molecular Weight Cut-off) Vágási érték

J Permeátum fluxus, anyagáramsűrűség [m³m⁻²s⁻¹]

DEF (Dead-End Filtration) statikus membránszűrés

DWW (Dairy wastewater) tejipari szennyvíz

PLA (Polylactic acid) Politejsav

VRR (Volume Reduction Ratio) Térfogatcsökkentési arány [-]

CFF (Cross-Flow Filtration) keresztáramú membránszűrés

EU Európai Unió

R (Retention) Visszatartás [%]

R_M Membrán saját ellenállása [m⁻¹]

R_{REV} Polarizáció okozta reverzibilis ellenállás [m⁻¹]

R_{IRREV} Eltömődés miatt kialakuló pórusos ellenállás [m⁻¹]

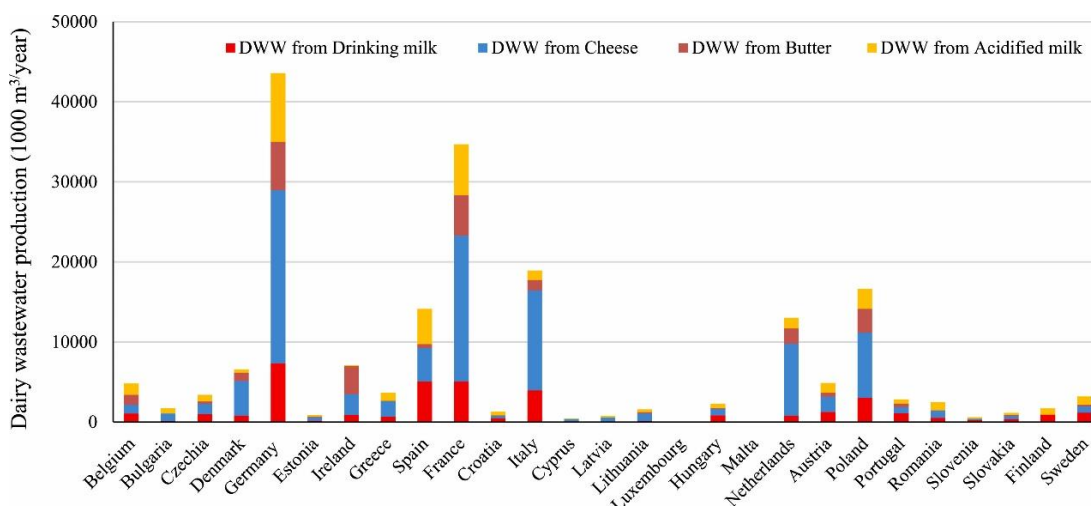
R_t Teljes ellenállás [m⁻¹]

V Térfogat [m³]

SED (Specific energy demand) Specifikus energiaigény [kWh·m⁻³]

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Személy szerint engem is, mint ahogy sok mindenki más is napjainkban, már régóta foglalkoztat a jelenkor egyre súlyosbodó témaköre a vízszennyezés, valamint az ehhez szorosan kapcsolódó szennyvízkezelési problémák és potenciális megoldási lehetőségeik. Nagy kérdés, képes lesz-e az emberiség szembe nézni a problémákkal és biztosítani megfelelő mennyiségű tiszta vizet, élelmet, valamint energiát. Az 1950-es évek óta ugyanis, a világ népessége kétszeresére, az általuk használt víz mennyisége pedig hatszorosára növekedett. Ehhez köthető, hogy a szennyezések is egyre fokozódtak, hiszen a víz kezelését követően nagyon kevés esetben kerül ki pontosan olyan paraméterekkel a „tisztított” víz a folyamat végén, mint ahogyan a kellene. Li és munkatársai (2021) megfogalmazása szerint a vízhiány ott lép fel, ahol a rendelkezésre álló vízmennyiséget meghaladja a vízigény. Fontos, hogy a Földünkön található vízmennyiség 97,5 %-a sós, így önmagában, kezelés nélkül alkalmatlan a fogyasztásra. A maradék 2,5 % édesvíznek pedig csupán csak 1 %-a alkalmas közvetlenül emberi fogyasztásra (Ranade és Bhandari, 2014). Arról nem is beszélve, hogy az előrejelzések alapján a 2050-re a világ 57 %-a szenved majd a vízhiánytól évente legalább egy hónapig (Programme, és mtsai., 2018). Tehát valóban egy globális problémáról beszélhetünk. Ezért szeretném én is kivenni a részem ezen problémák megoldásában, vagy legalábbis a részletes kutatásukban, ezért választottam a TDK munkám alapjául ezt a témakört. Az élelmiszeripari szennyvizek közül talán a tejipari szennyvizek keletkeznek az egyik legnagyobb mennyiségben, így kutatómunkám egyik céljának ezen szennyvizek kezelésének vizsgálatát választottam. Előbbit az is jól mutatja, hogy Magyarországon talán még mindig a tej az egyik legnagyobb mennyiségben fogyasztott folyékony élelmiszer. Az 1. ábrán mutatom be a termelt tejipari szennyvíz (DWW) becsült mennyiségét az Európai Unió 27 országában, az EU-27-ben. Innen is látszik milyen kiemelkedően fontos ezen nagy mennyiségű szennyvíz kezelésének kérdésköre. A diagram alapján ugyan látható, hogy Magyarországon az átlagos termelés a Németországihoz képest eltörpül, de az EU-27 a második legnagyobb tejtermelő és sajtexportőr a világon, amelyben Magyarország is kiveszi a részét. Ezen tanulmány szerint az EU-27 országokban évente összesen $192,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ DWW-t állítanak elő, ennek 49%-a sajtgártás, 19%, 18%-a és 13%-a sajtgártásból származik (Athanasios, Panagiotis, & Ioannis, 2022).



1. ábra. Az EU-27-ben a főbb tejtermékek előállítása során 2019-re termelt tejipari szennyvíz (DWW) becsült mennyisége 1000 m³/év-ben kifejezve (forrás: Athanasios, Panagiotis, & Ioannis, 2022).

Mivel az iparban általánosan magas a szennyvíztermelés, ezért ennek kezelése is igen komoly költségű 'befektetésnek' számít, ezért fontos, hogy találjunk olyan alternatív megoldásokat, újabb és fejlettebb, hatékonyabb technológiai részlépéseket is, amelyek segítenek e probléma megoldásában mindamellett, hogy a tisztításra előírt jogszabályoknak megfelelő legyen a tisztított víz.

3.1. Élelmiszeripari Szennyvizek jellemzői

Amióta él ember a Földön ismert a szennyvíz fogalma valamely formában, hiszen a vízszennyezés jórészt nem természeti jelenségnek, folyamatnak, hanem emberi tevékenységek következtében jön létre. A szennyvíz, szélesebb értelmezésben, olyan felhasznált víz, amely már nem alkalmas további emberi felhasználásra. Korábban a szennyvizekben található szennyező anyagok és szennyeződések kevésbé voltak károsak a bioszférára nézve. Napjainkban azonban egyre nagyobb kihívást jelent a folyamatosan növekvő mennyiségű szennyvíz tisztítása és a szennyezőanyagok eltávolítása azok számának és ellenállásának, rezisztenciájának megnövekedése miatt is. Ezenkívül problémát jelenthetnek a jelenleg, alkalmazott, néha nem megfelelő, elavult tisztítási módszerek és technológiák is (Martín-Rilo, és mtsai., 2015). Sajnos így a szennyvízben a kórokozók is megmaradhatnak, amelyek súlyos egészségügyi veszélyeket okozhatnak. A szennyvizeket a következő

forrásokhoz köthetjük: háztartási, mezőgazdasági, ipari szennyvíz. A szennyvízkibocsátás átlaga Magyarországon 100 l/fő/nap ami a világátlag duplája (Fodor Gábor, 2008). A legjelentősebb problémák mégis az utolsó két általam említett szennyvízforrásból adódnak, hiszen itt nagy mennyiségben bekerülnek olyan anyagok, amelyek veszélyesek lehetnek az életre, és így a szennyvíz messzemenően nem minősül ivóvíznek. Ahhoz, hogy a keletkező szennyvíz mennyiségét csökkenteni tudjuk, mind háztartási, mind ipari szinten törekedni kell a fajlagos vízfelhasználás csökkentésére. „Sok helyen viszont ez nem megoldható, így ilyenkor feltétlen szükséges a szennyvizek valamilyen előkezelése, illetve megtisztítása a környezetbe való kibocsájtás előtt.” (Somogyi, 2014). Szerencsére a 20. századtól kezdve jelentős szigorítások léptek fel, hiszen különböző bioakkumulációra affinis permetek és egyéb vegyszerek alkalmazása is be lett tiltva, illetve folyamatos kivizsgálás alatt vannak a jelenleg is. Az ipar rohamos fejlődésének a sajnálatos oldala azonban a nagy mennyiségű tisztításra szoruló szennyvíz, amelyet esetében nem engedhető meg, hogy kezeletlenül jusson vissza a környező vizekbe. A szennyvizek leírására a következő fontosabb jellemzőket használják:

- lebegőanyag tartalom,
- elektromos vezetőképesség,
- redoxi potenciál, azaz oxidációs állapot,
- üledékesi képesség,
- zavarosság.

3.1.1. Tejipari szennyvizek

Amikor a tejipari szennyvizekről beszélünk akkor az élelmiszeriparnak az egyik vezető szennyvíz termelő szekciójáról van szó, hiszen 1 liter tej előállításának következtében minimum 2,5 liter szennyvíz termelődik (Kárpáti, 1997). A tej kezelése, feldolgozása egy 'tipikus' élelmiszeripari gyárban évi átlag szerint elérheti a 200 tonna/nap mennyiséget. A tejipari szennyvizeknek, annak ellenére, hogy sok esetben hígított tejként asszociálnak rá, a keletkezése nem konzekvens, olyan értelemben, hogy a szennyeződések összeállítását, mint a napszak, évszak, célgép kora is meghatározhatja. A tejipar szennyvizei jelentős mértékű lebegőanyagokat, illetve zsír és fehérje részeket tartalmaznak. Ezek az alkotók méretük miatt gondot jelentenek a biológiai lebontásnál, ezért javasolt a fizikai tisztítási eljárások, legalább részbeni,

például előkezelésként történő alkalmazása (Fazekas, Kárpáti, & Kovács, 2014). A vegyi anyagok legnagyobb részét technológiai gépek és csővezetékek tisztításához és fertőtlenítéséhez használják, amelyek csak meghatározott időnként jelennek meg a szennyvízben. A magas szennyezettség miatt viszont gyakran a telepen történő tisztítást követően a kommunális csatornahálózatba jut további tisztításra. „Olyan esetben, ha élővízbe akarják vezetni, akkor mindenképp szükséges a telephelyen leggyakrabban egy biológiai szennyvíztisztító rész kiépítése is ahhoz, hogy a megfelelő, még szigorúbb határértékeket biztosítani tudják.” (Kárpáti., 1997). A tisztítóberendezéseknek tehát fel kell készülniük a szennyvízminőség ingadozására. A felhasznált víz 90-93 %-a szennyvízben jelenik meg (Ursula, és mtsai., 2005). Mivel sokrétű a szennyvíz szennyezőanyag terjedelme, ezért célszerű olyan minőség jellemzési paramétereket alkalmazni, amelyekkel minél pontosabb és sok mindenre kiterjedő mennyiségi meghatározás is megvalósítható. Ilyen összegparaméter például a szervesanyagok kimutatásának egyik legelterjedtebb meghatározása a kémiai oxigénigény mérése (*KOI*). Szennyvíztisztítás során leginkább kálium-dikromát segítségével azonosítjuk be a minták kémiai oxigénigényét, hiszen ez az oxidálószer sokkal erősebb, mint a kálium-permanganát. Mértékegységét leginkább mgL^{-1} -ben vagy gL^{-1} -ben adjuk meg, mivel a jogszabályban is így hivatkoznak a megengedhető mennyiségekre. A tejipari szennyvizekben található szennyeződések és tisztítószer maradványok megnövelik a kémiai oxigénigény értékét. Gyakran annak érdekében, hogy megfelelően eltávolítsák a lebegő és oldott komponenseket egyaránt a tejipari szennyvizekből, membránszeparációs kezelés, mint a technológia részét képező hatékony fizikai eljárás mindenképpen ajánlott (Karadag, és mtsai., 2015).

3.2. Szennyvizek kezelése

A szennyvíztisztítás feladata az olyan minőségű víz előállítása, amely már a befogadóba, vagy a csatornába, vagy élővízbe ereszthető. Az is cél, hogy például ne okozzon a vízi szervezetekben akkumulációt, azaz a szennyezőanyagok a felhalmozódását, és ma még ismeretlen, hosszabb idő után jelentkező károkat sem. A természetes folyamatoknál megemlíthetők olyan módszerek, mint például a szennyvíztavak, a szennyvizek elöntözése mezőgazdasági hasznosítás nélkül, a növényekkel vagy gyökérszűrő mezőkkel, zónákkal történő szennyvíztisztítás is. Ezek közül számosban részt vesznek a mikroorganizmusok, aerob és anaerob szervezetek,

sőt különböző növény és állatfajok is. A gyakorlatban azonban a lakosság agglomeráció miatt leginkább a mesterséges tisztítási eljárásokat alkalmazzák, ez az arány 90-95 % körül tehető (Tudástár, 2004). A szennyvíz kezelésének elsőrendű fontossága a megfelelő tisztaságú víz előállítása, a folyamat során a második fontos teendő az iszaphulladék kezelése, illetve annak elhelyezése. Mindezt úgy kell megoldani, hogy a lehető legkisebb környezeti szennyezéssel járjon. A szennyvíztisztítás harmadik legfőbb célja pedig a kinyert szerves hulladék biomassza talajjavító anyagokká és biogázzá való átalakítása, tehát az újrahasznosítás (Szennyvíztisztítás technológiája, 2023). A mai környezetvédelmi elvárásoknak megfelelően minimum 3 fokozatú szennyvíztisztítók alkalmazása kötelező, hogy megfelelő mértékű, minőségű legyen a tisztítás. A szennyvíz tisztításának a folyamata az elsődleges tisztítással kezdődik. Ez gyakran egy mechanikai berendezést jelent, amely durva szűrést végez el. Később a homokfogók és üleptők segítségével tudták elválasztani a nem oldott formában jelen lévő finomabb szennyeződések legnagyobb részét. A folyamat során következő részében kémiai és biológiai szeparációs szűrőberendezések segítségével távolítják el a még apróbb szennyeződések. A harmadik fázisban a foszfor és nitrogénvegyületek eltávolítására is koncentrálhatnak, amelyet anaerob baktériumok vagy vegyszerek segítségével érnek el. A legutolsó fázis általában a fertőtlenítés, melynek célja a fennmaradó fertőzésveszély megszüntetése.

Tehát a szennyvízkezelés egyik alappillérenek vehetjük a szűrést, amely célja a víz tisztítása, ivóvíz minősítés visszaszerzése, ennek érdekében különböző fizikai, kémiai, biológiai eszközöket alkalmaznak a különböző iparágakban. Hazánkban igen szerencsés helyzetben vagyunk, mivel területileg is nagy felszín alatti vízkészletekkel rendelkezünk. Bár sajnos, szüntelenül sok esetben felelősségtelenül használjuk ezeket Napjainkban már a felszínhez közelebb található vízkészleteinkben is kimutathatóak a különböző hormontartalmú és egyéb eredetű nanoszennyeződések (Sujuan Yu, és mtsai., 2023), amelyek kis mértékben ugyan, ám jelen vannak és ártalmasak lehetnek az élő szervezetekre (Ívóvíz kiskaté, 2016). Fokozott figyelmet kell tehát fordítanunk a szennyvizek megfelelő mértékű tisztítására, valamint nagyobb igényt kell teremtenünk a tisztított vizek ismételt hasznosítására is.

3.3. Membránszeparációs eljárások

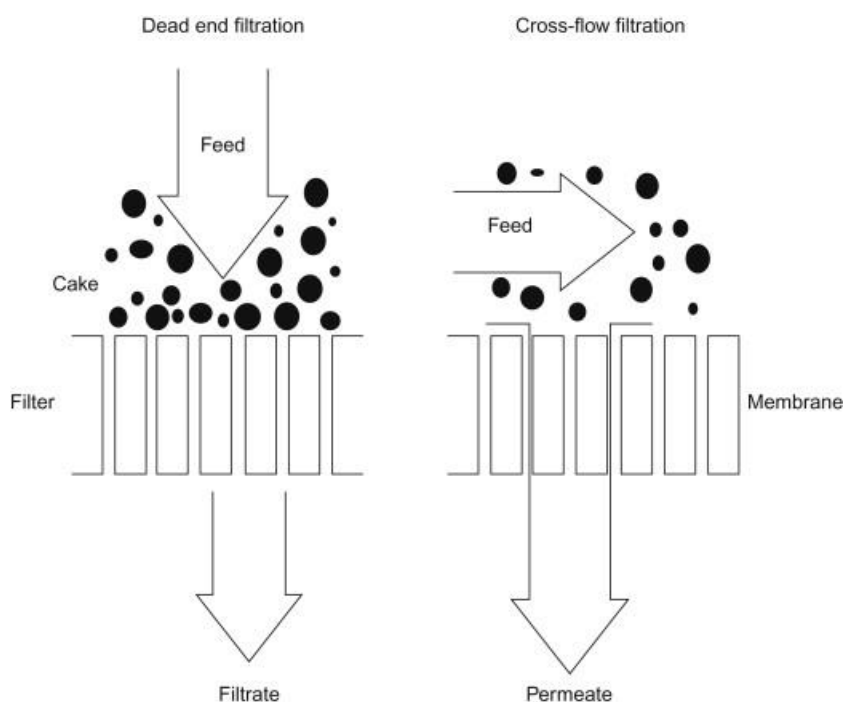
A membránszeparációs vagy membránszűrési eljárásoknak nevezzük azokat a nyomáskülönbségen alapuló membrános eljárásokat, amelyben egy félig áteresztő hártya, gyakran természetes polimer, segítségével a kiindulási oldatból (pl. tejipari szennyvízből) szűrletet (kezelt tisztább vizet) és retentátumot (sűrítményt) állíthatunk elő. Amennyiben a művelet célja a különböző fehérje oldatok töményítése, a koncentrátum lesz a főtermék, míg a fázisok tisztításakor, például egy szennyvíztisztítás esetén a szűrlet (Bélafiné & Nemestóthy, 2020).

A membránszeparációs eljárások során anyagátadási, komponenstranszport folyamat történik a membránon keresztül. E transzport általánosságban jellemezhető a J fluxussal, ami a membránon keresztüli permeátum vagy szűrlet anyagáramsűrűségét jelenti és amely az esetek többségében arányos a transzport hajtóerejével. A membrános műveleteknél a hajtóerő lehet a nyomás, a koncentráció, az elektromos potenciál vagy a hőmérséklet gradiense (Bélafiné & Nemestóthy, 2020). A különféle membrános elválasztási műveleteket leggyakrabban az alapján csoportosítjuk, hogy mi hozza létre a hajtóerőt, illetve aszerint, hogy a leválasztható komponensek milyen mérettartományba esnek (1. táblázat) (Fonyó & Fábry, 2004).

1. táblázat Membránszeparációs műveletek csoportosítása (Dr. Fonyó & Dr. Fábry, 2004)

Művelet	Hajtóerő	Átlagos leválasztási tartomány [μm]	Alkalmazási terület
Mikroszűrés (MF)	Hidrosztatikus nyomáskülönbség (0.1 – 5 bar)	0.1 – 10	Steril szűrés, előszűrés
Ultraszűrés (UF)	Hidrosztatikus nyomáskülönbség (1 – 10 bar)	10^{-2} – 10^{-1}	Makromolekulák szétválasztása oldatban
Nanoszűrés (NF)	Hidrosztatikus nyomáskülönbség (6 – 40 bar)	10^{-3} – 10^{-2}	Sűrítés, betöményítés
Reverz ozmózis (RO)	Hidrosztatikus nyomáskülönbség (20 – 100 bar)	10^{-4} – 10^{-3}	Sók leválasztása oldatban
Dialízis	Koncentráció-gradiens	10^{-2} – 10^0	Kisméretű molekulák elválasztása makromolekuláktól
Gázpermeáció	Hidrosztatikai nyomáskülönbség és koncentrációgradiens	-	Gázelegyek elválasztása
Pervaporáció	Nyomás- és hőmérsékletgradiens	-	Azeotróp elegyek elválasztása

A membránszűrésnek 2 allotróp változatát különböztetjük meg a felületi szűrés áramlásviszonyaihoz képest. Egyik a statikus (*DEF*), azaz a membrán felületre merőlegesen rávezetett kiindulási betáplálást jelent ('dead-end típus'), melynél bizonyos idő elteltével koncentráció polarizációs réteg alakul ki, amely szűrőréteget képezve jelentősen, hátrányosan befolyásolhatja a membrán szűrési tulajdonságait. A membrán teljes eltömődése esetén a műveletet le kell állítani és a membrán felületén lévő szennyezőket el kell távolítani. A másik típus a membrán felülettel párhuzamosan vezetett keresztáramú (*cross-flow*) típus (*CFF*), jellemzően az eltömődés csökkentésének céljából tervezték (Cheng, és mtsai., 2021). Ezt a következő 2. ábrán hasonlítom össze.



2.ábra Membránmodulok különböző működtetési elvei (forrás:

<https://daotaonec.edu.vn, 2023>)

Méréseimhez a keresztáramú típust használtam, mivel az általam használt vibrációs *VSEP* membránszűrő berendezés ezen az elven alapul. (Ennél a típusnál jelentősebb a membrán felületén kialakuló nyírási feszültségek hatása, amit ráadásul a modul vibrációs működtetéssel még nagyobb mértékig is tudtam növelni.) A membránszűrés műveleteknek a lényege, hogy a *TMP* hajtóerő hatására szelektív anyagátmenetet jön létre, azaz bizonyos komponensek átjutnak a szűrletbe, míg mások nem és a

koncentrátumban fognak megjelenni (Shujuan Gao, és mtsai., 2021). A nyomáskülönbség következtében kezdődik meg tehát az egyfajta specifikus szeparáció, hiszen a membrán a különböző anyagokat nem megegyező mértékben ereszti át, amit permszelektív tulajdonságnak is nevezhetünk. A membránokat többféle módon is csoportosíthatjuk, például halmazállapotuk, vagy a szűrési teljesítményük, esetleg az előállítási módszerük alapján. A membránok az előbbi alapján lehetnek gáz, folyadék vagy szilárd halmazállapotúak. TDK munkám során az utóbbival foglalkoztam, azaz a kereskedelmi forgalomba kapható polimer szilárd membránokat vizsgáltam.

A membrános eljárások legfőbb előnyei (Richard W. Baker, 2000):

- Hatékonyság: A membrános technológiák rendkívül hatékonyak számos szennyezőanyag eltávolításában, beleértve a mikroszkopikus szennyeződések és bizonyos vegyületeket is.
- Szelektivitás: Ezek az eljárások lehetővé teszik bizonyos molekulák vagy ionok célzott eltávolítását, ami különösen fontos lehet specifikus szennyezők vagy kívánt összetevők leválasztásához.
- Energiahatékonyság: Sok membrános eljárás, mint például az ultra- és nanoszűrés, alacsonyabb energiaigényű, összehasonlítva más tisztítási módszerekkel, mint például a hagyományos desztilláció.
- Környezetbarát: Ezek az eljárások kevesebb vegyi anyagot használnak, ami csökkenti a környezetre gyakorolt hatást.
- Modularitás és skálázhatóság: A membránrendszerek gyakran modulárisak, ami lehetővé teszi a kapacitás növelését vagy csökkentését anélkül, hogy az egész rendszert át kellene alakítani.
- Kontinuális működés: A membrános eljárások lehetővé teszik a folyamatos, stabil működést, ami növeli a feldolgozási hatékonyságot és csökkenti a munkaerő-igényt.
- Alacsony karbantartási igény: Bár a membránok idővel eltömődhetnek vagy kopnak, általában kevesebb karbantartást igényelnek, mint más tisztítási technológiák.
- Víz újrafelhasználása: A membrános eljárások lehetővé teszik a tisztított víz újrafelhasználását, ami különösen fontos a vízhiányos területeken.

Mivel a membránok fizikailag választják el a szennyeződések a kezelt víztől, szennyvíztől, így nincs szükség olyan mennyiségű kémiai vagy biológiai anyagokra, amelyek a lebegőanyagok leválasztására használnak (Strathman, 1980). Emellett a

biológiai szennyeződések, például baktériumok és vírusok, hatékonyan eltávolíthatók anélkül, hogy nagy mennyiségű klórt vagy más fertőtlenítőszert kellene alkalmazni. Ez nemcsak költségeket takarít meg, hanem csökkenti a környezetre ártalmas kémiai terhelést is.

A membránszeparációs eljárások típusai a következők:

-Mikroszűrés: Ez a módszer mechanikai elválasztáson alapul, ahol a membránok 0,1-10 mikrométeres pórusméretűek, és a nem oldott részecskéket szűrik ki. A folyamatot 1-3 bar közötti nyomáskülönbség hajtja.

-Ultraszűrés: Ez a technika 10-100 nanométeres pórusméretű membránokat használ, amelyek képesek eltávolítani a kolloidokat, makromolekulákat, fehérjéket és egyéb nagyobb részecskéket, miközben a vízmolekulák és kisebb sók áthaladnak. Alkalmazása széleskörű az élelmiszeriparban és tejiparban. Erről a dolgozatomban részletesebben is írok a következő fejezetben, mivel munkám során ezt a típust kutattam részletesen.

-Nanoszűrés: Ezt a módszert kis nyomású reverz ozmózisként is ismerik, 1-10 nm-es pórusméretű membránokkal. A nanoszűrés különösen hatékony a többértékű ionok eltávolításában.

-Fordított ozmózis: Itt a membránok 10-60 bar nyomáson működnek, elsősorban tengervíz sótalanítására és szerves anyagok szeparálására használják. A pórusméret 0,1-1 nm közötti, és a folyamat az ozmózis elvén alapul (Kereszty, és mtsai., 2018).

3.3.1. Az ultraszűrés

Az ultraszűrés, mint lehetséges technológiai lépés, a szennyvíztisztítás technológiájában gyakran egy részlépcső, például előkezelés egy biológiai tisztítás előtt vagy utókezelés egy kémiai csapadékképzés utáni fázisszeparálás céljából. Az ultraszűrés (UF) egy nyomás vezérelt membránszűrési eljárás, amely az oldatokban lévő mikro- és makromolekulák méretén alapuló szelektív szeparációt tesz lehetővé (Capannelli, Vigo, & Munari, 1983). Az ultraszűrés folyamatában használt membránok kulcsfontosságúak, hiszen ezek képesek megkülönböztetni a víz és az alacsony molekulatömegű anyagokat a magas molekulatömegű szennyeződésektől, mint például fehérjéktől, poliszacharidoktól és szuszpenzióktól. Mindemellett széles körben elismerték, hogy az ultraszűrés sokkal nagyobb szervesanyag eltávolítást érhet el a humusz-szerű anyagoknál, és ígéretes technológia a szervesanyagok eltávolítására

amelyek prekurzorként működhetnek a fertőtlenítési melléktermékekkel, valamint a problémás vegyületekkel mint a hormonok (Mehran, és mtsai., 2015). Az ultraszűrés különösen hatékony a szubmikron méretű kolloid részecskék, mikroorganizmusok, iszap, valamint a nagy molekulatömegű vírusok és fehérjék visszatartásában. Az ultraszűrés technológiája egyre nagyobb fontosságú a környezetvédelemben, az iparban és a víztisztítási eljárásokban egyaránt, mivel ezek a berendezések kiváló minőségű tisztítást tesznek lehetővé alacsony energiafogyasztás mellett. Alkalmazása igen elterjedt az élelmiszeriparban, vegyiparban, gyógyszeriparban, tejiparban. A tejiparban mind a feldolgozás során, mint például a tej sűrítésekor, vagy sajtgyártásnál, mind pedig a tejipari szennyvizek tisztításánál jelentkezik ez a művelet. A nyomáskülönbség általában 3-8 bar közötti. Ezek a szelektív áteresztő pórusos membránok, de jobban jellemezhetőek vágási értékkel, a vágási érték ($MWCO$, molecular weight cut off) 1-1000 kDa közt mozog. Az ultraszűrő membrán pórusain csak a vízmolekulák, sók és kisebb méretű molekulák haladnak át (Cséfalvay, 2016). A tesztek között szerepel a pórusméret és eloszlás ellenőrzése, a mechanikai szilárdság vizsgálata, valamint a szűrési hatékonyság tesztelése.

3.4. Membránszeparációs eljárásokhoz kapcsolódó fogalmak

Ebben a fejezetben szeretnék kitérni a membránszeparáció során felmerülő főbb alapfogalmakra, melyek a dolgozatom szempontjából relevánsak lehetnek. A szűrlet, azaz a permeátum vagy permeát az a rész, amely áthalad a membránon a membránszűrési folyamat során. A művelet során a membrán által visszatartott anyagokat tartalmazó oldat/rész a sűrítmény/koncentrátum vagy retentátum. Ez nagyobb molekulákat és a szűrés során kiszűrt szennyeződések is tartalmazza.

A permeátum fluxus megadja, hogy adott idő alatt adott a membrán adott felületén mekkora térfogatú vagy tömegű szűrlet képes átjutni a membránon. Ez függ a transzmembrán nyomástól, a membrán anyagától, a szennyeződés mértékétől, oldat viszkozitásától és még sok mástól is. A fluxust (J) az alábbi egyenlet (1.) szerint lehet meghatározni:

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

, ahol J a fluxus [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$], V_{sz} a szűrlet térfogata [m^3], t az idő [h], A az aktív membránfelület [m^2].

A következő fontos alapfogalom a transzmembrán nyomás (*TMP*) ami a membrán két oldala közötti nyomáskülönbség, amely az ultraszűrési folyamat fő hajtóereje. Ez a nyomás biztosítja tehát a szükséges erőt, hogy az oldat átáramoljon a membránon. A *TMP* az alábbi (2.) egyenlet segítségével tudjuk számolni:

$$TMP = \frac{p_1 - p_2}{2} - p_{sz} \text{ [Pa]} \quad (2)$$

ahol *TMP* a transzmembrán nyomás [Pa], p_1 a nyomás nagysága a modulba bemenő oldalon [Pa], p_2 a nyomás nagysága a modulból kilépő oldalon [Pa], p_{sz} a távozó, szűrlet oldali nyomás [Pa].

A membrán visszatartás vagy retenció (R: retention) a membránszűrési folyamatokban használt olyan kifejezés, amely azt mutatja meg, hogy egy membrán milyen mértékben képes visszatartani vagy kiszűrni a vizsgált oldatból a különböző méretű vagy fizikai-kémiai tulajdonságú részecskéket. A visszatartás mértékét adott anyagra vagy anyagokra általában százalékban adják meg. Ez kifejezi, hogy a betáplálási oldalon a kiindulási oldatban lévő adott anyagoknak mekkora részét tartja vissza a membrán, amit a következő képlettel (3.) tudjuk kiszámolni:

$$R = \left(1 - \frac{c_p}{c_f}\right) \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

ahol *R* a visszatartás [%], c_{sz} az oldat koncentrációja a permeátumban [mg/L], c_f a koncentrációja az oldatnak a betáplálási oldalon [mg/L].

A membránszeparációs műveletek célja gyakran a sűrítmény térfogatának minimalizálása, melynek mértéke a (4.) egyenletben szereplő sűrítési aránnyal (Volume Reduction Ratio, VRR) fejezhető ki:

$$VRR = \frac{V_B}{V_B - V_{sz}} [-] \quad (4)$$

ahol, V_B a betáplált anyag térfogata [m^3], V_{sz} a szűrlet térfogata [m^3].

A membránszeparációs eljárásoknál a mérés közben az idő múlásával gyakran tapasztalható, hogy az eljárás hatásfoka csökken, és a fluxus értékek is mérséklődnek. Ennek oka lehet a koncentráció-polarizáció vagy a membrán eltömődése. Az eltömődés mértékét az ellenállási értékek változásából lehet megállapítani. Ideális körülmények között csak a membrán saját ellenállása (R_M , Membrane Resistance) van jelen, de a valóságban a teljes ellenállás (R_T) több faktorból tevődik össze, mint például R_M , R_{IRREV} , R_{REV} (Bélafiné, és Nemestóthy, 2020). A membrán hidrodinamikai ellenállását a szűrés előtti vízfluxus mérések alapján lehet kiszámítani, mivel ebben a fázisban még nem alakul ki polarizációs réteg a membrán felületén, és a pórusok sem

tömődnek el (Szép, 2013). A tiszta membrán ellenállását a következő egyenlettel (5) lehet meghatározni:

$$R_M = \frac{TMP}{J_{WB} \cdot \eta_W} [\%] \quad (5)$$

ahol, TMP a transzmembrán nyomás, tehát a membránszeparáció fő hajtóereje [Pa], J_{WB} a szűrés előtti vízfluxus [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$], η_W pedig a 25°C-os víz dinamikai viszkozitása [Pas].

A pórus eltömődés okozta ellenállási értékek (R_{IRREV}) meghatározása a modul szétszerelése után, a membránfelület öblítését követő vízfluxus mérésekkel lehetséges. (Szakdolgozati munkám során a reverzibilis ellenállási értékeket a membrán felületen lerakódó anyagokból kialakuló, de egy egyszerű vizes öblítéssel eltávolítható réteggént értelmeztem, és az irreverzibilis ellenállási értékeket pedig azokkal azonosítottam, ami ezzel az egyszerű membrán felületi öblítéssel nem távolítható el.)

3.4.1. Membrán eltömődés jelensége

A membránszűrés legnagyobb hátránya, hogy a használt membránok élettartama viszonylag rövid, főleg, ha jelentősen szennyezett, vagy magas szerves anyag terhelésű szennyezett szennyvizet kezelünk velük. Ugyanakkor ennek oka a membrán eltömődés kialakulása. Ennek csökkentése még napjainkban is igen jelentős kutatott tématerületnek számít (Kumar, és mtsai., 2022). A membráneltömődést másképpen idegen szóval, angolul 'fouling'-nak hívják. A szürendő anyag részecskéi lerakódnak a membránfelületen (gyakran iszapleplenyt alkotva ezzel), valamint a membrán pórusaiba bejutva, részlegesen vagy teljesen eltömíthetik azt. Ennek eredményeként a szűrés hatékonysága jelentősen romlik, a fluxus értékek csökkennek, és esetenként a szűrlet minősége is változhat. A membrán eltömődése így tehát rövidíti a membránok használati idejét és csökkenti azok hatékonyságát, eltávolításukhoz pedig gyakran költséges kémiai tisztítási folyamatok vagy energiaigényes visszaöblítési/visszamosási ciklusok beiktatása szükségesek. A szennyeződés vagy részecske kötődésének mértékétől függően az eltömődés lehet visszafordítható vagy visszafordíthatatlan. A visszafordítható eltömődés jelentősen csökkenthető megfelelő nagyságú nyíróerő alkalmazásával (például vibrációval, statikus keverőelemekkel, ultrahanggal) vagy visszamosással (backwashing), míg a visszafordíthatatlan eltömődés fizikai módszerekkel nem orvosolható (Guo és mtsai., 2012). A

folyamatosan magas transzmembrán nyomás (*TMP*) miatt ezek a rétegek sűrűsödhetnek, és a részecskék bejuthatnak a membránpórusokba is. Ennek eredményeképpen a fluxus gyorsan csökkenhet, ami azt jelenti, hogy a membránt idővel tisztítani vagy cserélni kell a hatékony szűrés fenntartása érdekében. Ezzel szemben a keresztáramú szűrésnél az áramlás és a nyomásirány egymásra merőleges, tehát a tápláló oldalon az áramlás párhuzamos a membránfelülettel. Ez csökkenti a koncentráció polarizációját, mivel a visszatartott részecskék nem halmozódnak fel a membránfelületen. Továbbá, a „dead-end” szűréshez képest kevésbé alakul ki gélréteg, ami nem sűrűsödik össze annyira, így kisebb ellenállást képez, és a komponensek nehezebben jutnak be a pórusokba (Hodúr, és társai, 2012).

3.4.2. Membrán ellenállások kialakulása

A membránszűrési folyamatok kulcsfontosságú paramétere a membránszűrések során kialakuló, az eltömődés jelensége miatt megnövekedő ellenállása, amely, jelentősen befolyásolja a szűrés hatékonyságát és gazdaságosságát. Az így kialakuló teljes ellenállás (R_T) három fő komponensből tevődik össze: a membrán saját hidraulikus ellenállása (R_M), a koncentrációs polarizáció okozta reverzibilis ellenállás (R_{REV}), és az eltömődés (fouling) miatt kialakuló pórusos, belső, irreverzibilis ellenállás (R_{IRREV}). A teljes ellenállás a következő képlettel számolható (6):

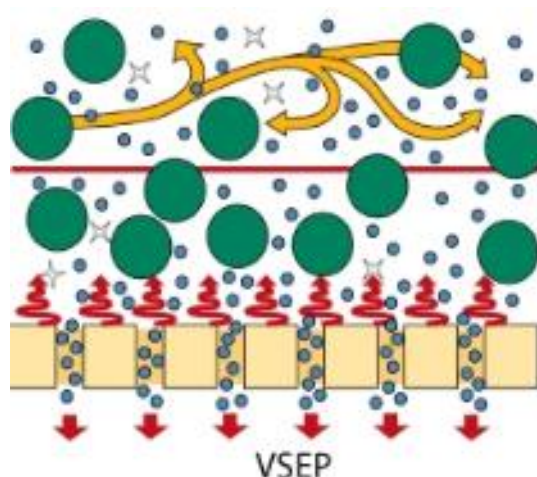
$$R_T = R_{REV} + R_M + R_{IRREV} \quad [m^{-1}] \quad (6)$$

A membrán saját hidraulikus ellenállása az anyag szerkezetéből és anyagából, valamint pórusméretéből/vágási értékéből fakad. Ezt döntően a membrán gyártása során alakul ki, a pórusméret és eloszlás, és a membrán vastagsága és porozitása szabja meg. Minél kisebb a pórusméret, általában annál nagyobb a hidraulikus ellenállás, mivel nehezebben áramlik át a folyadék a szűkebb csatornákon. Az eltömődésből származó ellenállás a legsúlyosabb kihívás, mivel a szennyeződések, biofilmek és egyéb anyagok lerakódása fizikailag gátolja a membrán pórusait vagy befolyásolja a membrán felszínének kialakítását, ezzel jelentősen növelve a szükséges szűrési nyomást. A 'fouling' típusától függően (organikus, anorganikus, biológiai, kolloidális), ez az ellenállás akár állandósulhat is, amennyiben a lerakódott anyagokat nem távolítják el megfelelően. A membrán ellenállásának csökkentése érdekében több stratégiát is alkalmazhatnak: a fizikai és kémiai tisztítási technikák, a membrán anyagának és szerkezetének optimalizálása, valamint az áramlási sebesség és

mintázatok szabályozása. Kísérleteimben pl. ehhez kapcsolódóan olyan fizikai áramlásterelőt terveztem a membrán mellé, ami közvetlenül a membránmodulba illeszthető, így ennek segítségével próbáltam javítani a modulban kialakuló áramlási viszonyokat, növelni a membrán felületi nyírási feszültségek mértékét, végső soron optimalizálni a szűrés hatékonyságát (Gao, és mtsai., 2011).

3.5. Vibrációval elősegített membránszűrés

1987-ben Dr. J. Brad Culkin az Egyesült Államokban fejlesztette ki és 1989-ben szabadalmaztatta a vibrációs nyíróerőt alkalmazó membránszűrési technológiát, ismertebb nevén a *VSEP* (vibratory shear enhanced process) módszert. Ennek a technológiának a lényege, hogy a vibráció által létrehozott nyíróerők jelentősen csökkentik a membrán eltömődését azzal, hogy megakadályozzák a szilárd részecskék felhalmozódását a membrán felületén. A *VSEP* rendszereket ma már széles körben használják különböző ipari folyamatokban. A *VSEP* működésének alapja (3. ábra), hogy a vibrációs modul oszcilláló mozgást végez, ami magas nyíróerőt generál a membránfelületen. Ez a nyíróerő jelentősen növeli a szűrőmembrán szennyeződésekkel szembeni ellenálló képességét, így hatékonyan megakadályozza az eltömődést, lehetővé téve a magasabb permeátum áteresztőképességet és minimalizálva a visszatartott térfogatot. A technológiát számos iparágban alkalmazzák, többek között a papír-, vegyi feldolgozásban és ipari szennyvizek kezelésében is (Zouboulis és mtsai., 2019).



3. ábra A vibrációs membránszűrés hatására kialakuló membrán felületi turbulenciák

(forrás: [VSEP turbulencia](#), 2023)

3.6. 3D nyomtatott elemek, áramlásterelők jelentőségeik

Az optimális visszatartás és fluxus elérése érdekében a membránszűrési rendszereket úgy kell kialakítani és üzemeltetni, hogy az adott alkalmazás igényeinek megfeleljenek. E célból, a TDK dolgozatomban során egy innovatív megközelítést alkalmaztam: egy 3D nyomtatott áramlástörőt építettem be a membránszűrő berendezésbe. Az elmúlt évtized során a 3D nyomtatás technológiája jelentős fejlődésen esett át számos területen. A membránszeparációs technológiák terén különösen az úgynevezett promóterek, amelyek a szűrőfelület mellé helyezhetők, valamint a 3D nyomtatással készült membránok jelentenek újítást. Ezek a fejlesztések új lehetőségeket nyitottak meg a membránszeparációs eljárások hatékonyságának és tervezésének javítására (Jing, és mtsai., 2021). Ez az áramlástörő is úgy lett tervezve, hogy segítse a szűrőmembrán felületén az áramlási minták kialakulását, csökkentse az anyagfelhalmozódást a membrán felszínén és optimalizálja a szennyeződések elsősorban felületi, reverzibilis lerakódások eltávolítását.

A 3D nyomtatási technológia lehetővé teszi, hogy az áramlásterelő geometriáját pontosan az adott alkalmazáshoz szabjuk, így jelentősen növelve a rendszer teljesítményét (Low, és mtsai., 2016). Az általam tervezett áramlásterelő speciális formájú csatornákat tartalmaz, amelyek növelik a modulban kialakuló áramlási körülmények, elsősorban a membrán felületén kialakuló lokális áramlások turbulenciáját (Tijing, és mtsai., 2020). A 3D nyomtatott áramlásterelők, könnyen modulba integrálhatók, ezzel akár jelentős költségmegtakarítást eredményezhetnek az üzemeltetés során, mivel így hosszútávon hosszabbíthatja a membránok élettartamát és csökkentheti a fajlagos energiaértékek alakulását. Az így tervezett rendszer rugalmasabb és hatékonyabb megoldást kínálhat az ultraszűrés területén, és új perspektívákat nyithat a membránok eltömődésének csökkentésében, ezáltal a membrántechnológia fejlődésében (Yanar, és mtsai., 2020). Továbbá Ho (2021) és kollégái számos vizsgálat során elemezték a 3D nyomtatott és a kereskedelmi forgalomban kapható kötőelemek közötti különbségeket. Általános megállapításuk szerint a saját tervezésű és 3D nyomtatással készült kötőelemek jobb teljesítményt nyújtottak. Jelentős pozitív eltéréseket tapasztaltak a fluxus értékekben, a nyomásesésben és a szennyeződések csökkentésében (Ho, és mtsai., 2021).

TDK munkám során egy az SZTE MK BRMI Intézetében korábban tervezett áramlásterelő tovább tervezését, majd annak finomhangolását végeztem el. Ez utóbbi

döntően alapanyagcserét, szálerősítést és vibráltatott modulban megvalósított rögzítést jelentett. Ezen említett *VSEP* vibrációs berendezésben még korábban senkinek nem sikerült úgy rögzítenie az áramlásterelőt, hogy vibrációval együtt sikeresen működtethető legyen.

4. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

4.1. Modell szennyvíz előállítása

TDK munkám során a laboratóriumi kísérleteimhez minden esetben frissen, általam készített, pontosan előállított, átlagos koncentrációjú modell szennyvízzel végeztem, annak érdekében, hogy valóban homogén kiindulás anyagot teszteljek, azaz, hogy az összetételbeli változásokat elkerüljem. (Így lehettem biztos abban, hogy valóban csak egyetlen paraméter változott a különböző méréseim során.) Ehhez sovány tejport, 5 g/L-es koncentrációban (Tutti Kft, Magyarország) és anionos detergenst, 0,5 g/L-es koncentrációban (Chemipur Cl80, Szeged, Magyarország) szobahőmérsékletű 10 liter csapvízben készítettem el. Ezt követően a homogenizálás érdekében 30 perces intenzív keverést végeztem (Scilogex 4 ágú fémfejű keverő, 450 rpm-en). A modellszennyvíz kiindulási paramétereit táblázatba foglaltam, amely a 2. táblázatban tekinthető meg.

2.táblázat a modellszennyvíz kiindulási paramétereit:

Modell szennyvíz	
Hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]	25 $\pm$ 0,7
Kémiai oxigénigény (KOI) [mg/L]	5000 $\pm$ 54
Összes oldott anyag (TDS) [ppm]	365 $\pm$ 15
Ph	8,26 $\pm$ 0,05
Zavarosság [NTU]	1439 $\pm$ 38
Vezetőképesség (EC) [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	918 $\pm$ 13

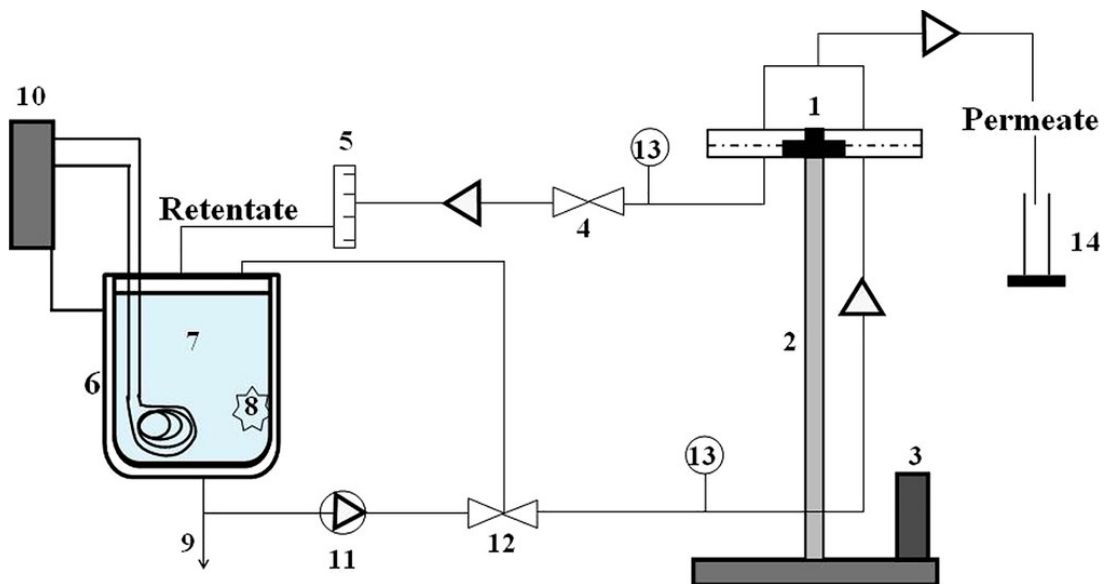
Ezek koncentráció tartomány kiválasztásának oka, hogy a valós tejipari szennyvizek kémiai oxigénigénye 3000 és 11000 mg/L között mozog, átlagosan 5000 mg/L értékkel (Dr. Kárpáti Árpád, 1997) (Bharati S. Shete, és mtársai, 2013). A modellszennyvíz hőmérsékletét méréseim során folyamatosan 25 $^{\circ}\text{C}$ -on tartottam, amelyet a betáplálási tartályom dupla falában keringetett hideg vízzel biztosítottam.

4.2. Vibrációs membránszűrő berendezés

A laboratóriumi kísérleteimhez a Mérnöki Kar Biológiai Rendszerek Műszaki Intézetének Membrános kutatólaboratóriumában elhelyezett VSEP (L-mode) vibrációs

membránszűrő berendezést használtam (New Logic Research Inc., USA) A 4. ábrán mutatom be a berendezés részeit:

- 1-Membránmodul a membrán alatti áramlásterelővel beintegrálva
- 2-Állvány, amely összeköti a vibráló alapot a szűrőrészsel (Torziós rugó)
- 3-Vibrációt biztosító motor
- 4-Visszacsapószelep
- 5-Áramlásmérő
- 6-Tárolóedény, amely alkalmas a közeg hűtésére
- 7-Szennyvíz
- 8- Hőmérő
- 9-Koncentrátum elvezetése a mérés után
- 10-Közeg hűtését biztosító berendezés
- 11-Tápszivattyú
- 12-Szelep
- 13-Nyomásmérő óra
- 14-Permeátum gyűjtése



4.ábra VSEP működésének vázlata (forrás: [VSEP vázlat, 2021](#))

A berendezés vibrációs üzemmódban és anélkül is működik. A modul vibrációjának amplitúdó szabályozója segítségével pedig lehetőségem volt kis mértékű vibráció (0,5 inch ~ 12,7 mm) és nagyobb vibrációs érték (1 inch) beállítására is. A membrán modulba illeszkedő, általam tervezett és 3D nyomtatott kötőelem a szűrőfelületi oldal és a modul alja közötti 3 mm-es áramlási térbe tökéletesen beilleszthető volt. Ez a

kötőelem nemcsak a membrán alátámasztásában játszott szerepet, hanem a modul és a membrán közötti kapcsolatot is elősegítette. Ezenkívül távtartóként is funkcionált, mivel fenntartotta a membrán és a modul szűrőfelületi oldala közötti állandó 3 mm-es távolságot, ami a transzmembrán nyomás (*TMP*) miatt máskülönben nem lenne konstans. A berendezésbe egy 500 cm² poliéterszulfon (*PES*) anyagú 30 kDa vágási értékű ultraszűrő membránt választottam.

4.3. Laboratóriumi ultraszűréseim menete

-A berendezés betápláló tartályát 10 liter előzetesen homogenizált modell szürendő szennyvízzel töltöttem fel.

-Ezt követően a berendezést bekapcsoltam és a működtetési paramétereket beállítottam, amelyek a következők voltak:

Állandó műveleti paraméterek: Hőmérséklet ($25 \pm 1^\circ\text{C}$), *TMP* (8 bar = 0,8MPa), Recirkulációs térfogatáram (4 GPM = 15,14 L perc⁻¹);

Változó műveleti paraméterek: Az adott kísérlettől függően a modul vibrációt 3 különböző üzemmódban működtettem: Vibráció nélkül (kontroll), Kis mértékű vibrációval (0,5 inch~12,7mm), Nagy mértékű vibrációval (1 inch~25,4mm);

Üres modul kialakítással vagy áramlásterelő modulba illesztéssel

-Méréseimet általában az 5-ös sűrítési arány eléréséig végeztem (*VRR*=5, azaz a kiindulási 10 literből 8 liter szűrletet gyűjtöttem). Bizonyos esetekben azonban 2 óráig követően a mérést leállítottam, illetve fellépő probléma esetén (pl.: áramlástörő törése) hamarabb.

-Ezt követően az eltömődött membrán fluxusát (Ami ahhoz kellett, hogy az irreverzibilis ellenállási értéket meg tudjam határozni) meghatároztam, majd a berendezést savas, lúgos, csapvizes mosásokkal kitisztítottam.

A keresztáramú technológia miatt a modell szennyvíz a későbbiekben szűrlet és a koncentrátum formájában haladt tovább. A koncentrátum visszakerült a betápláló tartályba, míg a szűrlet egy külön csövön keresztül egy gyűjtőedénybe vezetődött.

4.4. Áramlástörők 3D nyomtatása

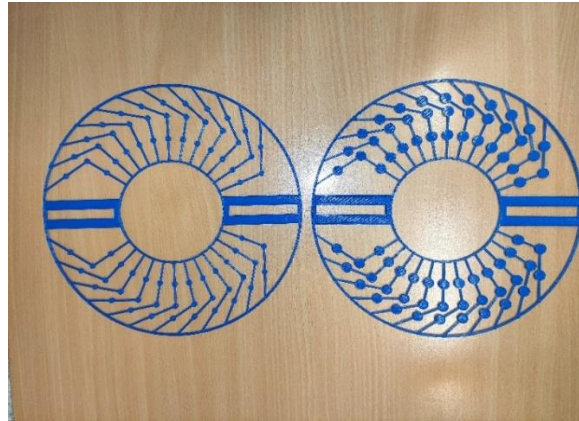
A digitális modelleket, amelyeket az Autodesk Inventor 3D tervező szoftverben készítettem háromdimenziós tárgyakká alkottam a Creality CR-10S Pro V2 3D nyomtatóval (Kína) nyomtató segítségével. Az előnye ennek a módszernek, hogy

egyedi gyártása gyors, költséghatékony és nagyon pontos. A munkadarab megtervezését követően egy szeletelő szoftverbe kell beintegrálni, amely segítségével le tudjuk formázni a file-t G-kódra, esetemben ez a Cura 5.0 szeletelőprogram volt. A nyomtatáshoz PLA anyagot használtunk (Filatikum Kft., Magyarország) fel, illetve annak erősített változatait (PLA Engineering és PLA Advanced Pro) amellyel el tudtuk érni, hogy kísérleteim közben ne érjen váratlan törés, amely miatt használhatatlanok lennének az adott mérés eredményei.

4.4.1. A megtervezett áramlásterelők

Munkám során a 3D modellt többször is újra terveztem, fejlesztettem a már meglévőket, tapasztalt mérnöki problémákra fókuszálva. Ilyen problémák voltak: Gyenge anyag (gyakran eltört a berendezés tisztítása végére), modulban elmozduló áramlásterelő, ami töredezve a membrán felületét megkarcolva a szűrési hatékonyságot csökkentette. A 3D nyomtatott elemeket más alapanyag, filament megválasztásával igyekeztem optimalizálni. Az áramlásterelő a VSEP modulban került elhelyezésre a mérések során a beáramló minta irányából a membrán mellett. Méretei tekintetében így a modul belső méreteihez kellett igazítani a tervezés során. Magasság tekintetében így 3 mm elemmagasságot, szélesség szempontjából 260 mm szélességet kalibráltam. TDK munkám során nem egy szimpla előre meghatározott méréssorozatot követtem, hanem a mérések mellett folyamatos eredménykiértékelést, problémamegoldást, fejlesztést is végeztem. Tehát a további méréseim szigorúan a kapott előző eredményeimre épültek.

TDK munkám elsődleges fő célja volt, a hatékonyságjavítás alakváltoztatással, azaz egy olyan 3D tervezett áramlásterelő tervezése, amely jobb szűrési viszonyokat produkál, mint a korábbi Halszálka elrendezésű, törőoszlopokkal ellátott promóter, amit a BRMI Intézetében legutóbb sikeresen, de vibrációs üzemmód nélkül teszteltek (Szegedi, 2022; Kertész, 2023). Az általam továbbfejlesztett megoldás a törőoszlopok megduplázása volt 5 mm átmérőről 10 mm átmérőre, amit a 5. ábra jobb oldalán mutatok be.



5.ábra Halszálka kialakítások továbbfejlesztése (bal oldal: sima kialakítású áramlásterelő (Halszálka): SÁT; jobb oldal: a Dupla kialakítású áramlásterelő: DÁT) (saját kép)

TDK munkám második fő célja volt a 3D áramlásterelő elmozdulásának megakadályozása a membránszűrő modulban a mérések közben. Az áramlásterelőket a VSEP berendezésben egy mindössze 3 mm-es sávban tudjuk elhelyezni és ezen vékony sávban való elhelyezés megtartását kellett tudnom biztosítani egy mérnöki megoldással. Ezt egy rozsdamentes acél hegesztéshez használható drót meghajtásával tudtam elérni alapos tervezés után, hiszen a homogenizált oldatnak a magas nyomás mellett biztosítanom kellett az eljutást, mindeközben pedig megfelelő stabilitást biztosítva az áramlásterelőnek. A felhasznált anyagot egy szánkóra emlékeztető kialakításra formáltam, amellyel sikeresen el tudtam érni a célt. Az első megoldásom a jobb oldalon a 6. ábrán látható „szánkók” tervezésével és hegesztésével (2mm-es hegesztőpálca hajlítása) tudtam megoldani, míg később a bal oldali már együttesen nyomtatott tartókkal értem el a stabilitást. Mindkét kialakítás az áramlási viszonyok fenntartása mellett tökéletesen biztosította az elmozdulás megakadályozását a teljes méréseim alatt.

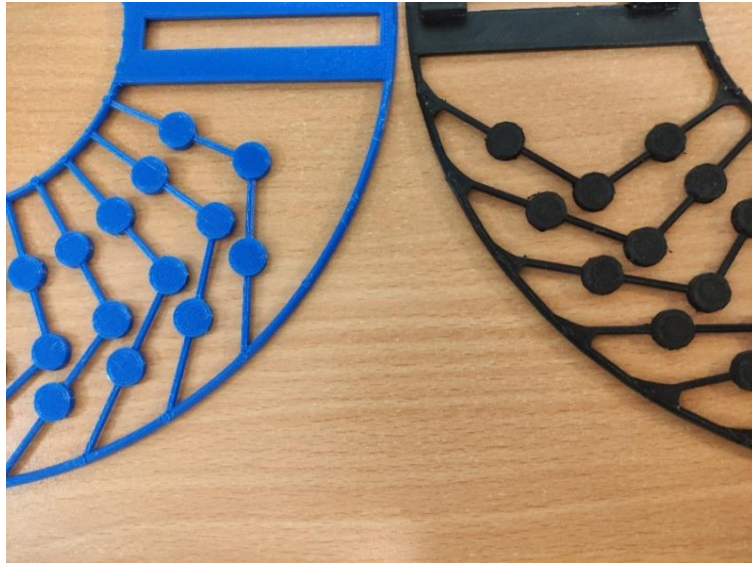


6. ábra Tartókkal együtt tervezett áramlásterelő (bal) és saját gyártású rozsdamentes acél támasztó, mechanikai rögzítő 'Szánkók' (jobb) (saját kép)

Harmadik fő célom a munkám során az újfajta áramlásterelő tervezése még nem meglévő kialakítással. Mindemellett a méréseim során felmerülő anyag törékenységeinek meggátolása újabb továbbfejlesztéssel, amelyet boltívek beintegrálásával tudtam elérni. A 7. ábrán az általam tervezett végtelenített 'Cikk-Cakk' megoldás látható, a 8. ábra bal oldalán pedig a boltívekkel erősített 'Double' áramlásterelő a sima 'Double'-hez képest.



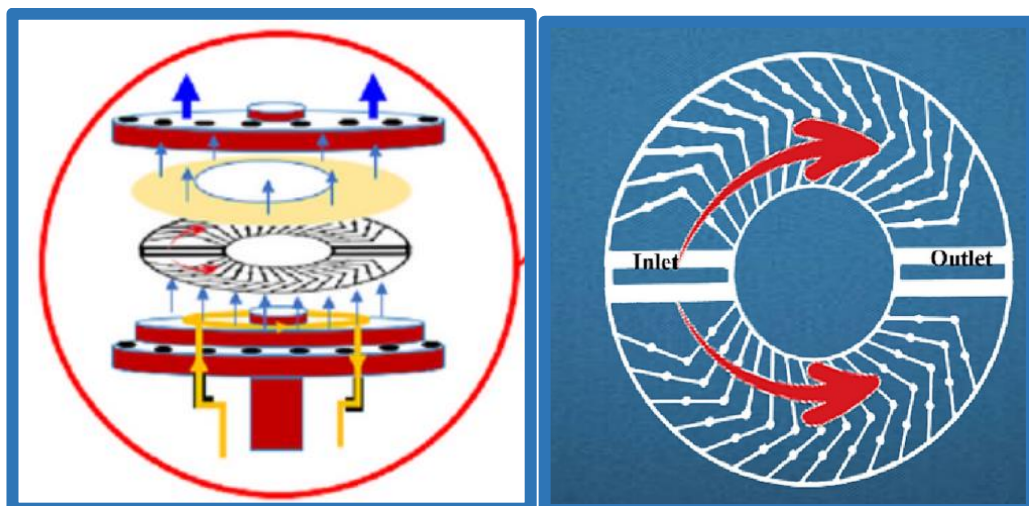
7. ábra A végtelenített, saját tervezésű 'Cikk-Cakk' kialakítású áramlásterelő membránszűrő modul alsó részébe illesztve



8.ábra A sima 'Double' kialakítású áramlásterelő (bal) az erősített, Boltívvel ellátott 'Boltíves Double' kialakítású áramlásterelő (jobb)

4.4.2. Áramlásterelők membránszűrő modulba illesztése

A 3D nyomtatott áramlásterelő VSEP membránszűrő modulba illesztését és abban a szennyvíz betáplálási irányát az x ábrán mutatom be. Látható, hogy a modul alsó részébe helyeztem az adott, vizsgálandó áramlásterelőt, majd a membránt szűrőfelülettel lefelé arra ráhelyezve, majd a modul tetejét, felső részét. Ebből a permeátum elvezető csövön tudott távozni az ultraszűréseim során keletkező szűrlet. Így egy zárt, kompakt nyomástartó modult kaptam, ami akár vibráltatott üzemmódban is használható volt.



9.ábra A VSEP membránszűrő modulba illesztése (bal) és a szennyvíz fő áramlási iránya a modulban (jobb) (Kertész, 2023)

4.4.3. Használt nevezéktan

A dolgozatomban használt további rövidítések jelentését a 3. táblázatban a rövidebb és a hosszabb elnevezéssel is elláttam, annak érdekében, hogy könnyebben áttekinthető legyen

3.táblázat a dolgozatom kiértékelésénél használt rövidítési jelölések jelentéséről.

Kontrol	Áramlástörő nélküli mérés / Üres membránmodul kialakítás modul vibráció nélküli üzemmódban
NoVibr_DÁt	Szűrőmodul vibráció nélküli üzemmód 'Double' kialakítású áramlástörővel
0,5Vibr_DÁt	Szűrőmodul alacsony (0,5inch=12,7mm) vibrációval működtetve 'Double' kialakítású áramlástörővel
1Vibr_DÁt	Szűrőmodul magas (1 inch=25,4mm) vibrációval működtetve 'Double' kialakítású áramlástörővel
0,5Vibr_SÁt	Szűrőmodul alacsony (0,5inch=12,7mm) vibrációval működtetve 'Sima' (Halszáлка) kialakítású áramlástörővel
1Vibr_ErosDÁt	Szűrőmodul alacsony (0,5inch=12,7mm) vibrációval működtetve 'Double' kialakítású áramlástörővel valamint erősebb PLA Engineering anyaggal
NoVibr_ErosCC	Modul vibráció nélküli üzemmódban erősebb PLA Engineering anyaggal 'Cikk-Cakk' kialakítású áramlástörővel
0,5Vibr_VégsőDÁt	Szűrőmodul alacsony (0,5inch=12,7mm) vibrációval működtetve 'Boltíves Double' kialakítású áramlástörővel
1Vibr_VégsőDÁt	Szűrőmodul magas (1 inch=25,4mm)

	vibrációval működtetve	
	'Boltíves Double'	kialakítású
	áramlástörővel	

4.5. Analitikai módszerek

Mintavételek:

A szűrési folyamat során vett kezdeti, permeátum/szűrlet és retentátum/koncentrátum mintákat alapos analitikai vizsgálatoknak vetettem alá, következetes módszertannal.

A mintavétel minden egyes szűrési alkalommal az alábbiak szerint történt:

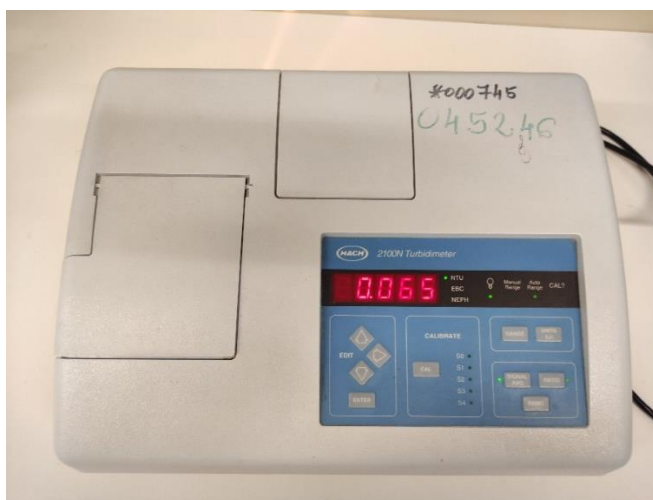
A szűrés kezdetén a betáplált, kiindulási, friss modell szennyvízből 45 ml minta.

A szűrés végén a maradékból, azaz a koncentrátumból 45 ml minta.

A szűrés végéig keletkezett átlag permeátumból 45 ml minta.

4.5.1. Zavarosság meghatározása

A zavarossági vizsgálat durván a mintában lévő lebegőanyagok mennyiségét határozza meg, ami akár az elsődleges indikátora lehet a minta szennyezettségének, különösen azokban az esetekben, amikor a szennyeződés szabad szemmel is észlelhető. Ez az eljárás optikai módszereken alapul. A mérést egy 2100AN típusú HACH (USA) műszerrel végeztem, amelynek küvettájába töltött minta a fény útját akadályozta. A tiszta vízhez képest idegen anyagok jelenléte csökkentette a műszer szenzorába érkező fényintenzitást. Ez a csökkenés a zavarosság mértékét jelzi, amit NTU-ban (Nephelometric Turbidity Unit, azaz nefelometrikus zavarossági egység) fejezünk ki.



10.ábra Zavarosság meghatározására alkalmas műszer (saját kép)

4.5.2. Kémiai oxigénigény (KOI) meghatározása

A kémiai oxigénigény meghatározásával a mintákban lévő szerves anyagok oxidációját követően fotometriás teszttel állapítottam meg a szerves szennyezőanyagok mennyiségét. A mintákból 200 μL -t pipettáztam a KOI tesztcsövekbe, amelyek kénsavat, higany-szulfátot és kálium-dikromátot tartalmaztak. A tesztelés során a 0-15000 mg/l mérési tartományt választottam az elvárható eredmények alapján. A 120 perces oxidációs folyamatot roncsoló blokkokban (ECO 8, Belgium) végeztem, 150°C-os hőmérsékleten. A tesztcsövek miután lehűltek egy fotometriás mérést hajtottam végre egy Lovibond spektrofotométerrel (Belgium), ahol kontrollként szennyezőanyag-mentes desztillált vízzel töltött csövet használtam.



11. ábra Szerves anyag tartalom meghatározására alkalmas KOI mérő berendezés (jobb) (saját kép) és roncsoló blokk (bal) (saját kép)

4.5.3. Tejalkotók analízise és pH

A tejalkotók részletes meghatározására a BENTLY infravörös spektrofotométert használtam (USA), ami az infravörös spektroszkópia elvén működik, azaz a műszer az infravörös fény spektrumának különböző hullámhosszait használja fel a mintákban lévő anyagok azonosítására és mennyiségük meghatározására. A spektrofotométer a mintán áthaladó infravörös fény elnyelődését méri, amely információt nyújt a mintában lévő kémiai kötések és molekulák jellemzőiről.

A mintáim pH értékét egy kalibrált (Thermo Scientific Orion 5-Star Plus Multifunction Benchtop Meter, Egyesült Államok) mérőeszközzel határoztam meg.

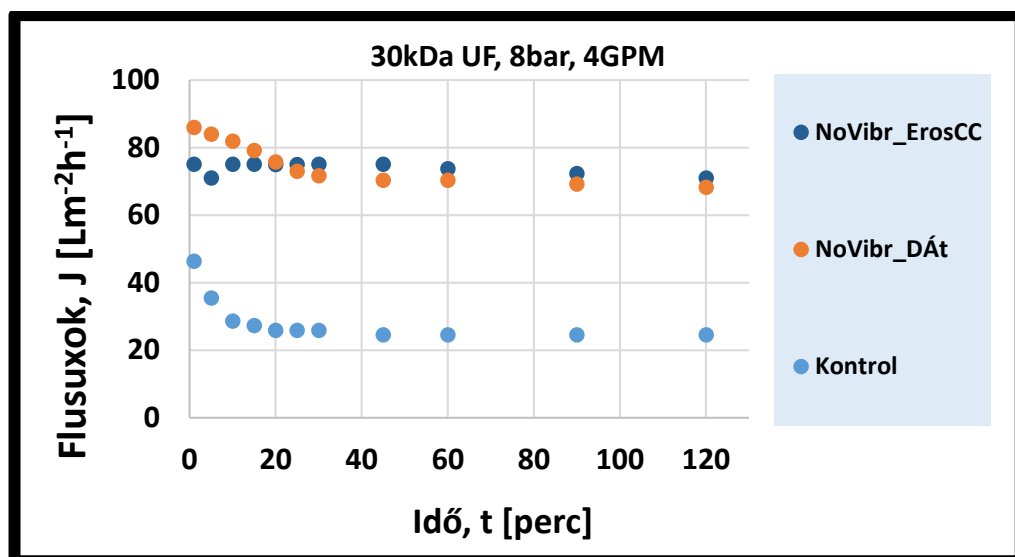
5. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉSÜK

A TDK munkám során az előre megtervezett 3D nyomtatott áramlásterelők tesztelését és finomhangolását 3 fő témakörre, problémakörre csoportosítottam. Az első kísérlet sorozatban az áramlásterelők alakjának megváltoztatására és mechanikai rögzítésre (alakfejlesztési kísérletsorozat), a másodikban a megfelelő anyagválasztásra és alakba tervezett modulba rögzítésre (szálerősítési kísérletsorozat), míg a harmadikban az áramlásterelők további tökéletesítésére fókuszáltam (rögzítési és tartásjavítási kísérletsorozat). Így a kapott eredményeimet is ebben a logikai sorrendben mutatom be.

5.1. Alakfejlesztési kísérletsorozat

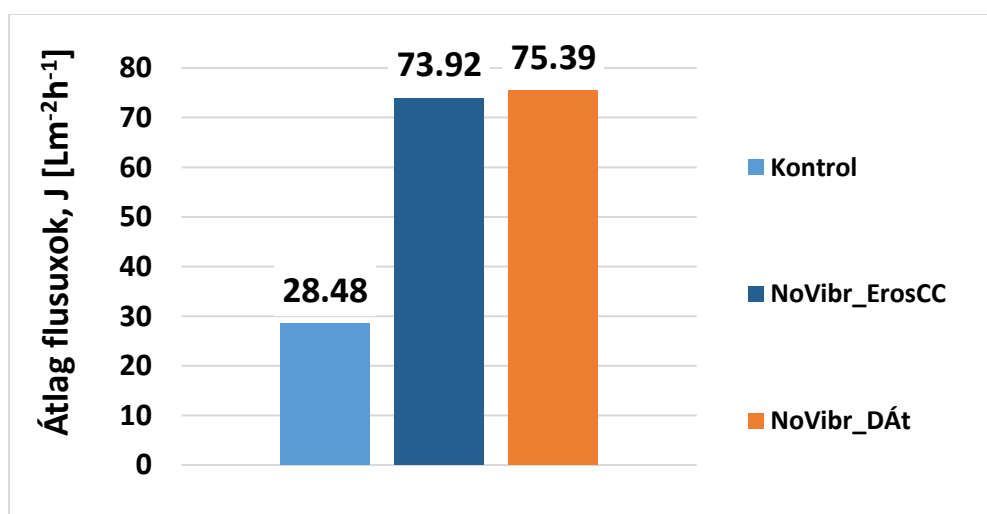
Munkám során a 3D nyomtatandó áramlásterelő alakjának kiválasztást modul vibráció nélküli kísérleteim során választottam ki, mivel kezdetben még a vibrációs üzemmódban az áramlásterelők elmozdultak és különböző problémákat okoztak (membrán felületének megsértése, nyomásnövekedés...). Három különböző alakú kialakítást hasonlítottam össze a kontrol mérésemmel, ami modul vibrációs üzemmód és áramlásterelő modulba integrálása nélküli mérést jelentett. A 'Double' kialakítás (második vizsgált áramlásterelő), ami a 'Sima' Halszáлка kialakítás (első vizsgált áramlásterelő) továbbfejlesztése volt, amit egy az Intézetben végzett korábbi szakdolgozatos hallgató munkája során tesztelt (Szegedi, 2022). A végtelenített 'Cikk-Cakk' kialakítás (harmadik vizsgált áramlásterelő) megtervezésekor az elvárásom az volt, hogy a nyomás hatására lassan mozogni fog a modulban, amellyel talán így lenyírhatná a membrán felületén folyamatosan kialakuló lerakódó réteget, iszaplepenyt. Ebben, döntően a reverzibilis ellenállási értékek jelentős csökkentési lehetőségében igen nagy potenciált láttam a törőoszlopok kialakítása miatt.

A következő, 12. ábrán szemléltetem a permeátum fluxusok görbéit, amit a 'Double' és 'Cikk-Cakk' kialakítású áramlásterelőkkel kaptam. Ezeket a Kontrol mérésemhez hasonlítva értékelem.



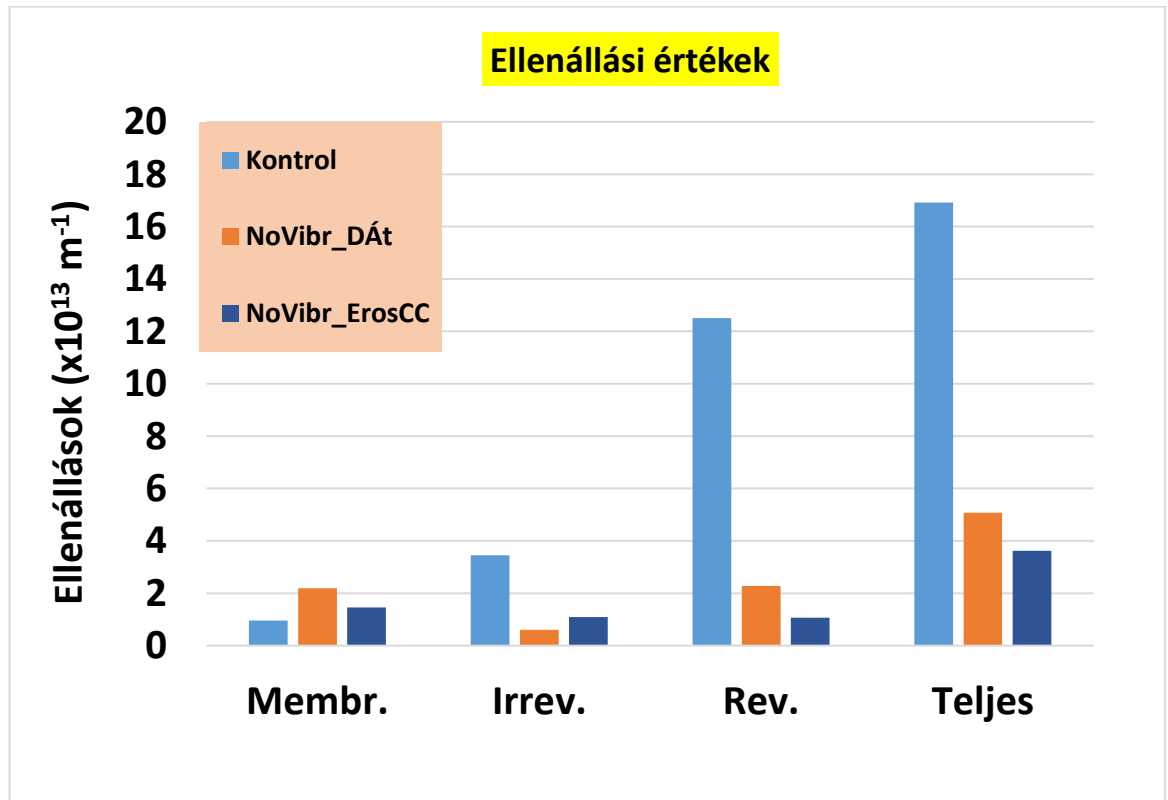
12. ábra A permeátum fluxusok változása az ultraszűrések idejének függvényében modul vibráció nélkül az Alakfejlesztési kísérletsorozatban

A diagrammon látható, hogy a Kontrolhoz képest, bármelyik áramlásterelő modulba integrálása a fluxusok közel háromszorosát eredményezte. Ráadásul 'Double' és a végtelenített 'Cikk-Cakk' is magasabb fluxus értékkel rendelkeztek, mint az eredeti, 'Sima' Halszáлка kialakítás, amely 15%-al alacsonyabban állandósult az Intézet korábbi mérései során (Szegedi, 2022). Ezek alapján az elsődleges alaktervezésem sikerrel járt, mivel mindkét, azaz a továbbfejlesztett 'Double' és az új 'Cikk-Cakk' tervezési alak típusok is jelentős fluxusjavulásokat eredményeztek ez megtekinthető a 13. ábrán is, ahol az átlag fluxusok a mérések során tekinthetők meg.



13. ábra Átlagfluxusok az első, Alakfejlesztési kísérletsorozatban

Jól látható, hogy a különböző kialakítások szinte megegyező mértékben múlják felül a Kontroll mérést. Mindezek ellenére sajnos a 'Cikk-Cakk' modul vibrációval együttesen alkalmazva nem hozta meg a hozzá fűződött eredményességét, mivel nem kezdett forgó mozgásba. Így ezt nem sikerült modul vibrációval együtt működtetnem. A fluxusok mellett azonban az ellenállások értékei is nagyon fontosak, így a következő, 14. ábrán ezeket mutatom be.

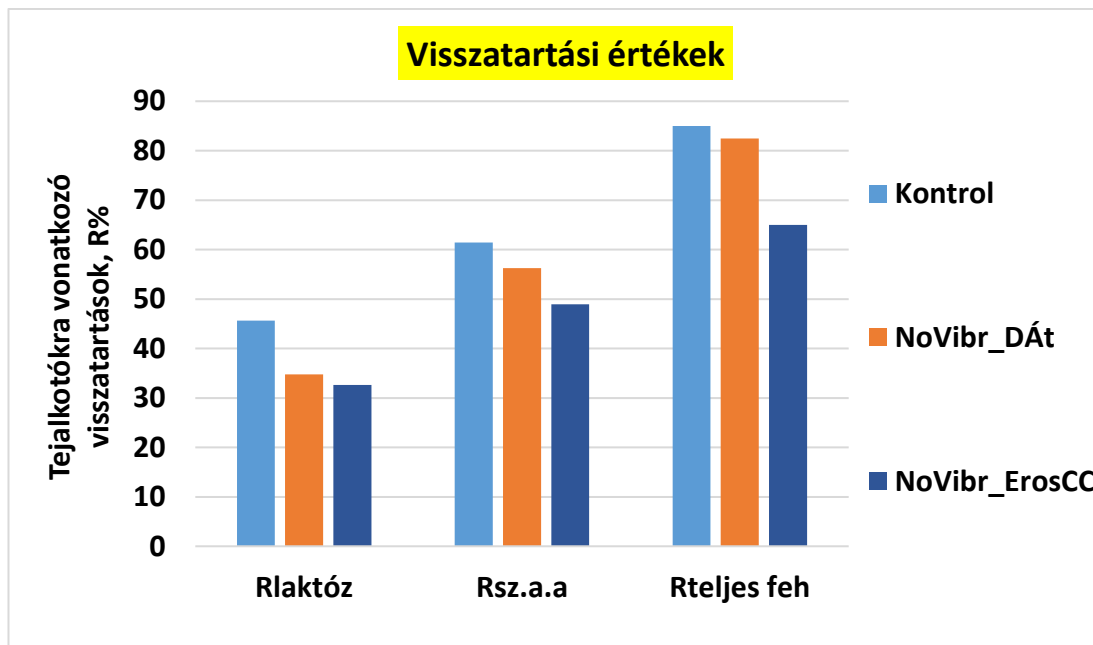


14. ábra Az ellenállások értékének alakulása az Alakfejlesztési kísérletsorozatban

Az ellenállási értékek részletes vizsgálatánál megállapítottam, hogy az áramlástörő modulba illesztése mindkét esetben a teljes ellenállási értékek igen jelentős csökkentését eredményezte. Hiszen a 'Double' kialakítás esetén ez 70%-os, míg a 'Cikk-Cakk' kialakításnál 78%-os csökkenést, azaz javulást eredményezett a Kontroll mérésnél kapott teljes ellenállási értékekhez képest. A 14. ábrán még az is látható, hogy a Kontrol és a 'Double' méréseknél a teljes ellenálláson belül a reverzibilis a legmagasabb, míg a 'Cikk-Cakk' kialakításnál az irreverzibilis.

Továbbá a membránok visszatartási eredményeinek kiértékeléséből az is kiderült, hogy a 'Double' kialakítás minden esetben túlteljesítette a 'Cikk-Cakk' áramlásterelőt. A 15. ábrán látható, hogy a laktóz visszatartásában ~2%-os, a szárazanyagában ~7%,

és a teljes fehérje tartalmában pedig ~18%-os eltérés van a 'Double' és a 'Cikk-Cakk' kialakítások között a 'Double' javára! Ráadásul a szervesanyagtartalomra vonatkozó visszatartásban már ~24%-al bizonyult jobbnak a 'Double'-os kialakítás esetében.



15. ábra A tejcukorra (laktóz), szárazanyag tartalomra és teljes fehérjetartalomra vonatkozó membrán visszatartások az Alakfejlesztési kísérletsorozatban

Mindezen eredményeim alapján (fluxusok, ellenállások, visszatartások) az első kísérletsorozatomban megállapítottam, hogy a 'Double' kialakítás eredményesebb, így a továbbiakban ezt választottam, majd tovább is fejlesztettem.

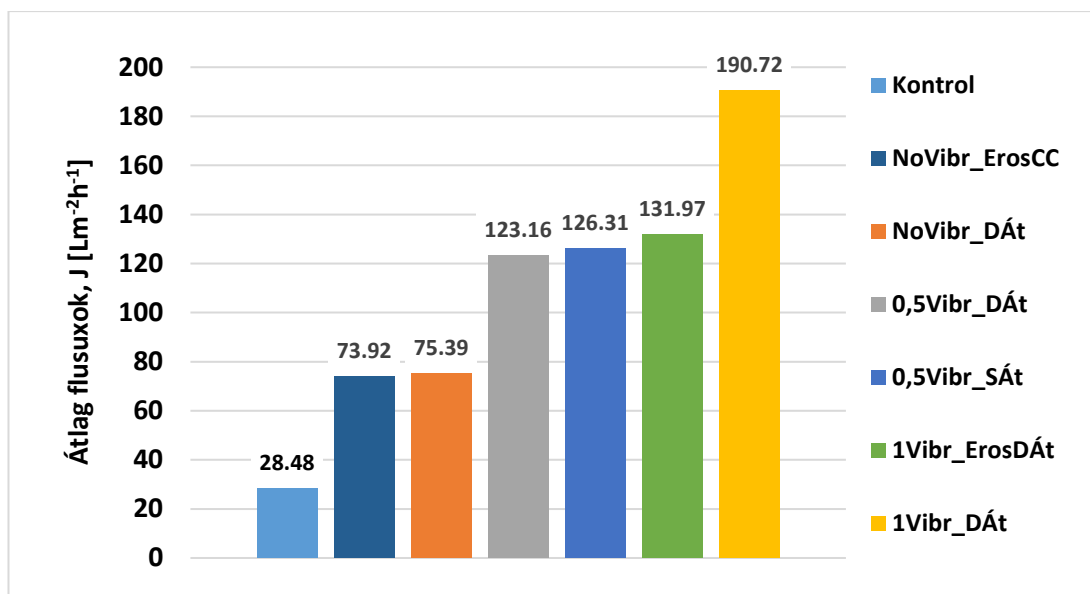
TDK munkám során kíváncsi voltam arra is, hogy a berendezést vibrációs üzemmódban működtetve, azaz modul vibrációt is alkalmazva hasonlóan pozitív, esetleg még jobb eredmények kaphatók-e? Ennek kutatására kipróbáltam a 'Sima' Halszálka és a 'Double' kialakításokat modulba integrálva vibrációs üzemmódban is. Ebben a kísérletsorozatomban azonban döntően a legyőzendő mérnöki feladat, az áramlásterelők stabilitására vonatkozott, mivel a vibrálás során könnyen elmozdulhattak és eltörhettek volna. Ezek olyan problémákat eredményeznének, mint a terelők darabjainak letörése, a nyomásesés megemelkedése és fluktuálása, esetleg a membrán megsérülése, átszakadása. Mindezen problémák kiküszöbölése érdekében megterveztem és legyártottam egy szánkóra emlékeztető mechanikai tartó elemet rozsdamentes acélból 2mm-es hegesztőpálca hajlításával (lásd. 6. ábra jobb), amelyet a ki és beáramlási pontokba integrálva megfelelően stabilan tartotta az áramlásterelőt

a modulban. Sőt ennek úgy kellett illeszkednie, hogy kellő áramlási keresztmetszetet is hagyjon a modulban áramló tisztítandó szennyvíz áramának. Mindezt 3 mm magasságon belül kellett megoldani, hogy a kicsiny tartó 'Szánkók' elegendően strapabíróak is legyenek, mégis tudjon mellette elhaladni az áramlás.

5.2. Szálerősítési kísérletsorozat

TDK munkám során a következő, szálerősítési kísérlet sorozatomban összehasonlítást tettem az alacsony (0,5inch=12,7mm) modulvibrációjú 'Sima' és 'Double' kialakítású áramlásterelőkkal. A 16. ábrán mutatom be az átlag fluxusok értékeinek alakulását a vibráció fokának hatására. A 16. ábrán egyrészt az látható, hogy mind az erősített 'Cikk-Cakk' (0,5Vibr_ErosCC) mind a 'Double' kialakítású áramlásterelő (0,5Vibr_DÁt) jelentős mértékben javította (160% és 165%-kal) az átlag fluxusok értékeit a Kontrol mérésekhez képest. Másrészt az is jól látható, hogy az alacsony vibráció (0,5Vibr) és a magas vibrációs üzemmód (1Vibr) között nincs lényeges különbség. Ezért az alacsony vibrációs üzemmód alkalmazását javasolnám a továbbiakban. Az ábrán ezek alól egy kivétel van, aminek az oka, hogy a magas vibráció (1inch=25,4mm) alkalmazásakor a 'Double' kialakítású áramlásterelő megrongálódott, eltört, ezért annak értéke nem releváns, mivel jelentősen kiugró a fluxura (lásd. 16. ábra sárga oszlop 190,72-es értéke). Sőt le is kellett állítani a mérést, mivel a visszatartási értékek a permeátumban hirtelen megnövekedtek, ami a membrán megsérülésére utalt.

Továbbá a membránszűrési paraméterek állandó értéken tartása is problémássá vált, így még ebben a kísérletsorozatban szükségessé vált a kiindulási alapanyag azaz a 3D nyomtatáshoz használt filament erősebbre cserélése. Így a sima PLA-t lecseréltem egy kevésbé rideg PLA-Engineering-re (Filatikum Kft.). (Ezzel és a továbbiakban, a következő kísérlet sorozatomnál, a csatlakozási pontok megerősítésével egy jelentősen strapabíróbb áramlásterelőt tudtam használni. Ez már a magasabb vibrációs üzemmódban is sikeresen alkalmazható volt sérülés nélkül!) A 16. ábrán az „Eros” szócska már erre utal, hogy az alapanyag ott már az erősebb filamentból előállított volt.

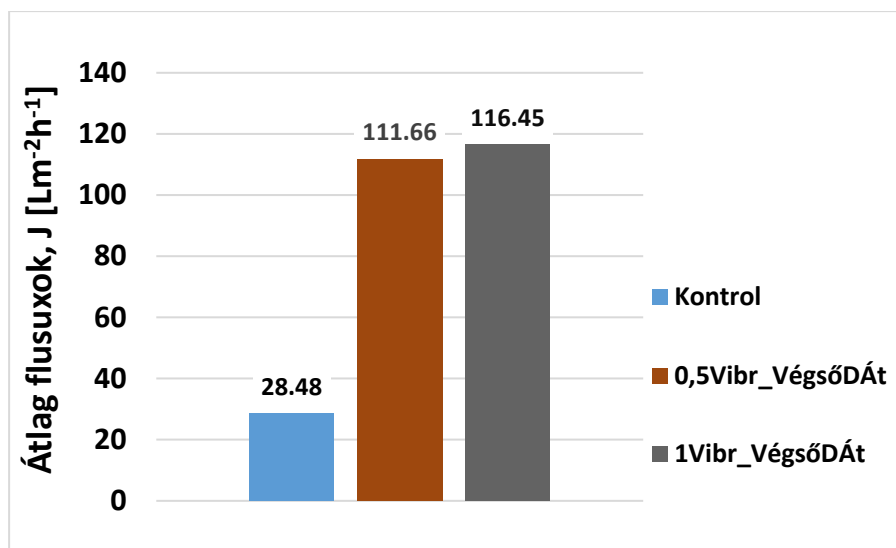


16. ábra Az átlag permeátum fluxusok növekedésének alakulása a különböző mértékű modul vibrációk hatására a Szálerősítési kísérletsorozatban

Tehát a 16. ábrán látható, hogy a modul vibrációs rásegítés kiemelkedően megemelte a hatékonyságot a fluxusok javításában, ám ez nem volt meglepő, a modul vibrációs kísérletek fluxusjavulását más mások is bizonyították (Genkin, és mtsai., 2006; Kaya, mtsai., 2023). Az eredményeim alapján azonban nem volt jelentős eltérés a vibráció mértékének hatására, így a harmadik kísérlet sorozatban amellet, hogy tökéletesítettem az áramlásterelők strapabírását a boltívek segítségével, kíváncsi voltam, kimutatható lesz-e még jobban detektálható különbség a vibráció mértékei között. Munkám során kapott végső áramlásterelő kialakításhoz a korábbi rögzítéseket is lecseréltem, mivel ezek plusz elemként rozsdamentes acélból álló 'Szánkók' voltak. Ezek kiváltására az áramlásterelők alakjába betervezett 3D nyomtatott tartópöccöket alkalmaztam (lásd. 8. ábra bal oldal).

5.3. Rögzítési és tartásjavítási kísérletsorozat

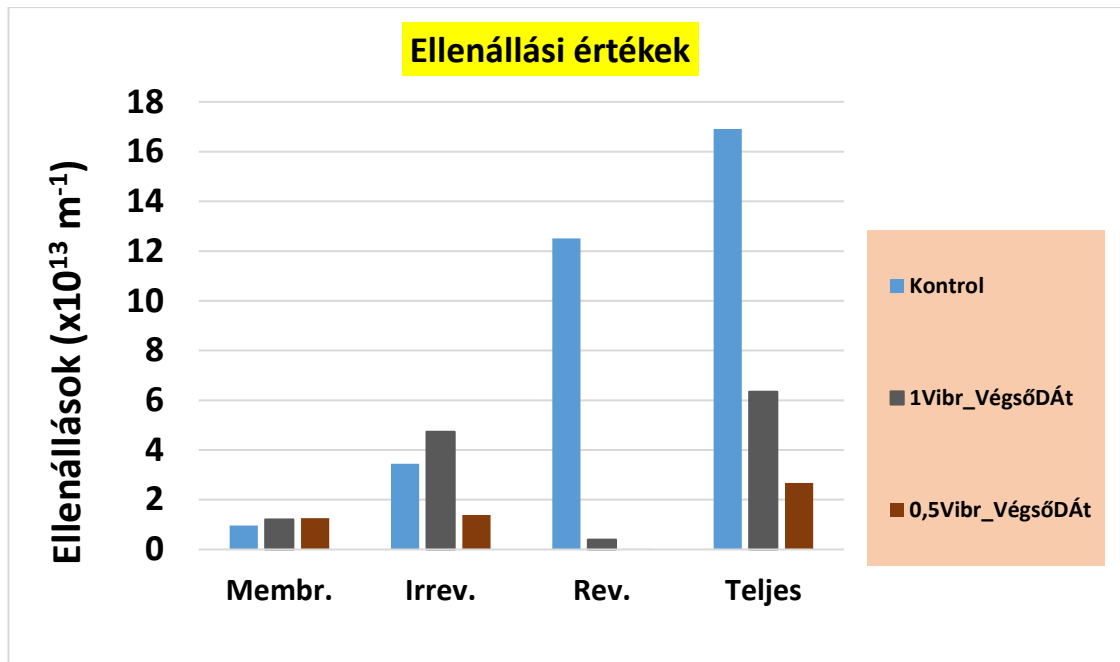
A következő, utolsó kísérlet sorozatomban összevettem a végső kialakításom minden aspektusát, hogy választ kapjak az alacsony, illetve a magas vibráció közti különbségekre. A 17. ábrán a különböző vibrációs fok mellett kapott átlag fluxusokat ábrázoltam a végső, erősített 'Double' kialakítású 3D nyomtatott áramlásterelő esetében.



17. ábra Az átlag permeátum fluxusok változása a végső kialakításnál vibráció hatására a Szálerősítési kísérletsorozatban

Az ábrán látható, hogy a kontrol méréshez képest az alacsony fokú, kis vibráció jelentős, 292%-os javulást eredményezett (ami kb. 3,9 szerese), míg a magasabb fokú vibráció pedig 309%-ost (ami kb. 4,1 szerese). Ez nagyon jelentős fluxus javulás, ami spontán az áramlástan viszonyok változtatással érhető el, és a jelenleg is futó áramlásterelő vizsgálatával kapcsolatos OTKA projektben ez kiemelkedő jelentőséggel bír (Kertész szóbeli közlés, 2023). További jelentős eredménynek számít, hogy az alacsony és a magas vibrációs üzemmódok között pusztán 4,2 %-os eltérés adódott. Ez a kis különbség ezért érdekes, mert felvetődik a kérdés, hogy vajon az alacsony vagy a magasabb vibráció minősül hatékonyabbnak, az ellenállások, visszatartások és persze a fajlagos energiaértékek szempontjából? Utóbbi a gazdaságosság miatt lehet kulcskérdés.

Mindezek kiderítése érdekében tovább kutattam, vizsgáltam ezen kérdésekre keresve a válaszokat. A 18. ábrán az ellenállási értékek változását mutatom be a végső kialakítású áramlástörővel (VégsőDÁT: 'Double').

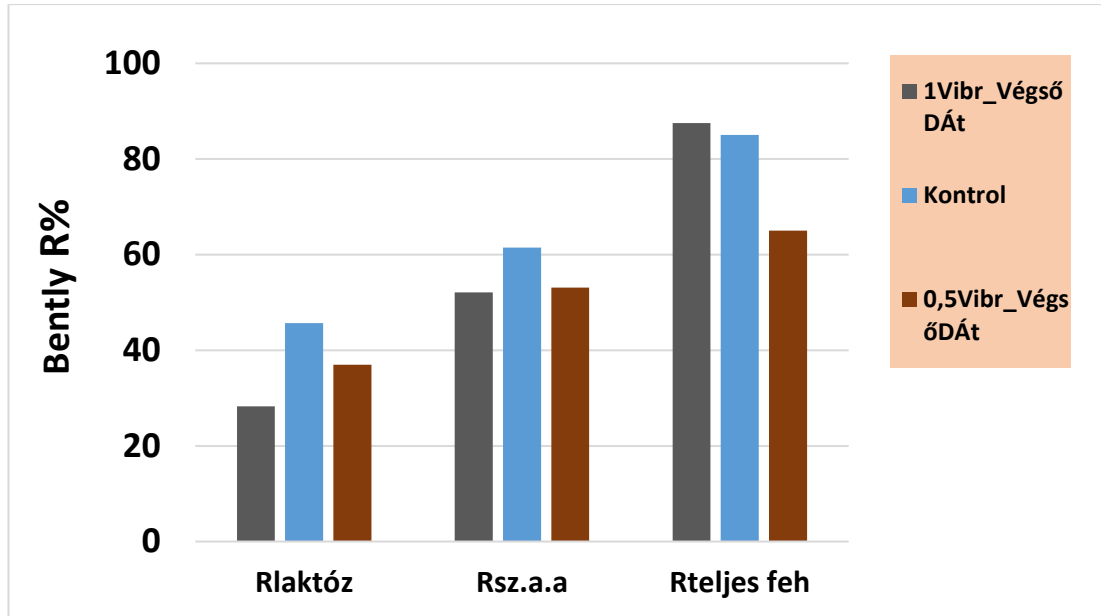


18. ábra Az ellenállási értékek alakulásai a végső kialakítású áramlástörővel a Szálerősítési kísérletsorozatban

Az ábrán egyrészt látható, hogy a teljes ellenállási értékek a kontrol mérés eredményeihez képest 63%-kal csökkentek a magas fokú, és 84%-kal az alacsonyabb fokú vibrációs üzemmód esetén. Bár ez érdekes, jelentős különbség a 2 vibrációs fok között, ami kb. 42%, a z alacsonyabb vibráció javára. Továbbá az ábrán az is látható, hogy a teljes ellenállásokon belül, mind a reverzibilis ellenállások értékei, mind az irreverzibilis ellenállások értékei lényegesen alacsonyabbak az alacsony vibrációs üzemmódnak, azaz kedvezőbbek. Mindez lehetséges attól, hogy egy túlzottan magas, kritikus vibrációs érték már inkább negatívan befolyásolta az ellenállási értékeket.

Mindezek alapján megállapítottam, hogy a végső kialakítású áramlásterelő használatával az ellenállási értékeknél is szembetűnően az alacsonyabb vibrációs működtetés eredményezett kedvezőbb membrán eltömődési viszonyokat.

Ezek után kíváncsi voltam a két vibrációs üzemmód közötti analitikai méréseim eredményeire, azaz hogy a permeátumokban található koncentrációk hogyan alakultak egymáshoz képest. Ezt a következő, 19. ábrán mutatom be a tejalkotóra vonatkozó membrán visszatartások esetében.



19. ábra A tejalkotók visszatartásának mértéke a Szálerősítési kísérletsorozatban

Az ábrán látható, hogy a teljes fehérje visszatartásban 21 %-os különbség adódik a magasabb vibrációs működtetés javára.

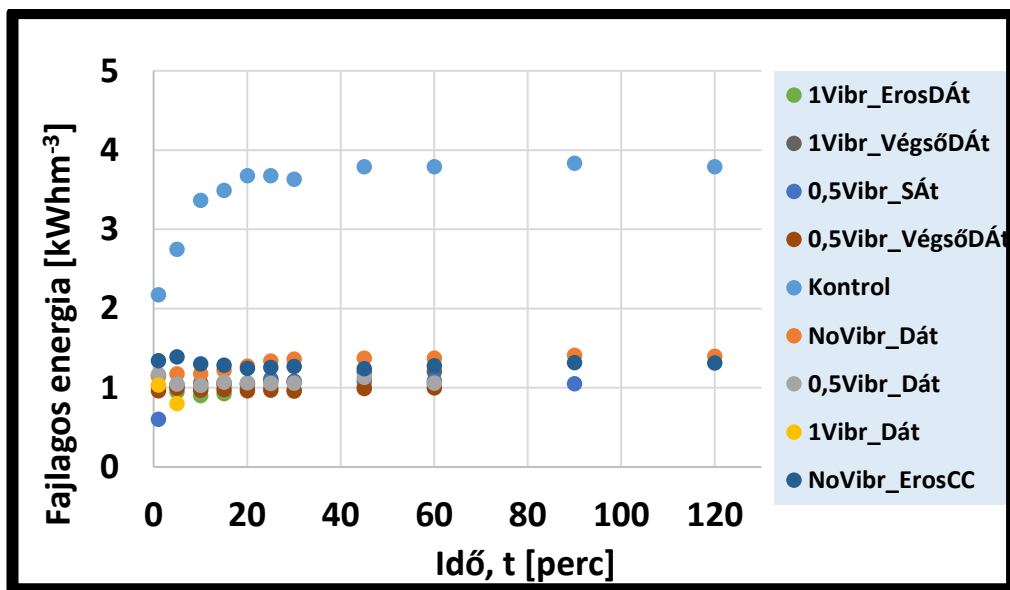
5.4. Fajlagos energiaértékek

Az energiafelhasználásának mértékét a laboratóriumi ultraszűréseim során folyamatosan mértem és táblázatba foglaltam. Ezen értékekből a következő 7. egyenlet segítségével fajlagos energiaértékeket számoltam ki, aminek változásait a következő, 20. ábrán mutatok be.

$$SED_{VN} = \frac{\eta_{TSZ} \cdot P_{TSZ} + \eta_{VM} \cdot P_{VM}}{J \cdot A_{hasznos}} \quad (7)$$

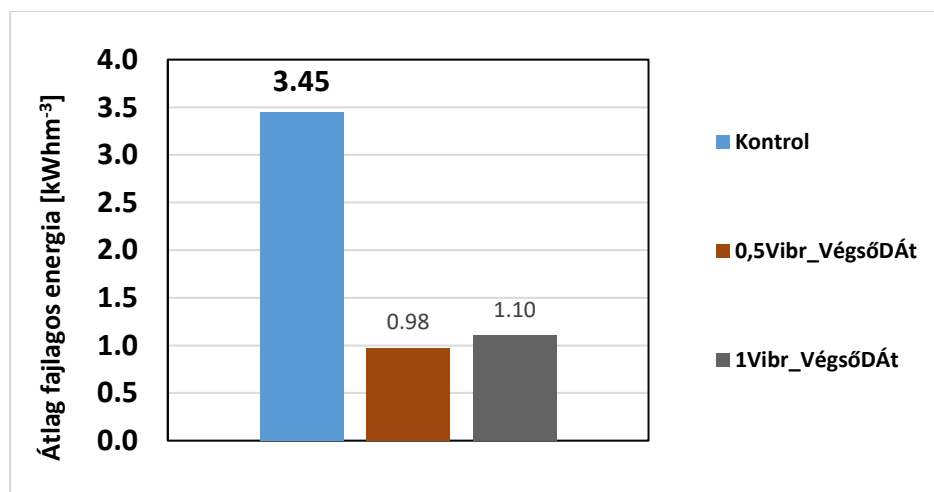
, ahol SED_{VN} (specific energy demand) vibráció nélküli speciális energiaigény [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$], SED_V vibrációval egybekötött speciális energiaigény [$\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$], J permeátum fluxus [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$], $A_{hasznos}$ a membrán hasznos szűrőfelülete; η_{TSZ} a tápszivattyú hatásfoka [-], η_{VM} a vibrációs motor hatásfoka [-], P_{TSZ} a tápszivattyú teljesítménye [kW] és P_{VM} a vibrációs motor teljesítménye [kW]

Ez valójában azt jelenti, hogy 1 m^3 permeátum előállításához mekkora energiára van szükség. Kutattam, hogy mekkora különbségek vannak a vibráció nélküli, Kontrol és alacsony illetve magas vibrációk energiafelhasználása közt. Az ábrán egyrészt az látható egyértelműen, hogy a Kontrol értékei adódtak a legnagyobbaknak, míg a '0,5Vibr_VégsőDÁT' (alacsony vibrációjú 'Boltíves Double' végső kialakítású áramlástörő) értékei a legkisebbeknek.



20.ábra A fajlagos energiaértékek alakulása az ultraszűréseim során

Az is látható, hogy az áramlásterelők minden esetben jelentős mértékben csökkentették az energiafelhasználást, valamint fontos megállapítás, hogy a diagram nem mutat jelentős eltérést a vibrációval és a nélküli értékek közt. A végső kialakítások hatékonyságának még szemléletesebb összehasonlításaként a következő 21. ábrán az átlag energiafelhasználást mutatom be.



21.ábra Az átlag fajlagos energiaértékek alakulása az ultraszűréseim során különböző fokú vibráció hatására

Megállapítható, hogy az alacsonyabb vibrációs üzemmód a Kontrol mérésekhez képest 72%-os csökkentést eredményezett, míg a magasabb vibráció 68%-ost. Bár a 2 vibrációs fok között nem nagy a különbség, az alacsonyabb a kedvezőbb.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatomban a napjainkban komoly kihívást jelentő ipari szennyvizek kezelésének egy speciális területét, a membránszeparációs szennyvíztisztítást vizsgáltam. Fókuszomban a hagyományos keresztáramú, vagy „cross-flow” technológia és a modern, feltörekvő 3D nyomtatási technológia kombinálhatósága, kísérletekben való alkalmazásuk javítása állt alaki és vibrációs módosítással. Kiemelt figyelmet fordítottam a 3D nyomtatás FDM, azaz szálhúzásos technológiájával készült modulba illeszthető áramlásterelők fejlesztésére és tesztelésére. Dolgozatom eredményeképpen három megkülönböztető részt tudok összefoglalni. Az első kísérletsorozatban sikeresen fejlesztettem olyan áramlásterelőket, amelyek jelentősen befolyásolták a pozitív irányba a szűrési hatékonyságot. Eredményeim másodlagos nagy érdeme a különböző áramlásterelők sikeres rögzítésre hozzáadott mechanikai elemmel, később áramlásterelő fejlesztésével. Harmadlagos érdem a dolgozatban az áramlásterelők tökéletesítése mind erősítés, mind anyagválasztás révén, amely segítségével sikerült bizonyítást nyernem a magasabb vibrációs működtetés jobb hatékonyságát illetően úgy, hogy az energiafelhasználás nem növekedett jelentősen.

A különböző kötőelemek gyártásával és laboratóriumi alkalmazásukkal kapott eredményeim igazolták, hogy ezek a távtartók jelentősen csökkenthetik a membráneltömődést, amely a membránszűrés egyik legnagyobb hátrányát jelenti. Az ilyen eszközök beintegrálása révén nemcsak az eltömődésből adódó reverzibilis ellenállás csökken, hanem a membrán élettartama is megnövekedhet a ritkább cseréknek köszönhetően.

Következtetések és javaslattelemek:

A kutatásom során három eltérő kialakítású áramlásterelőt hasonlítottam össze, melyek közül a legígéretesebbet továbbfejlesztettem. A kutatási folyamat során összesen kilenc különböző mérési sorozatot végeztem, azonban egyiket sajnálatos módon törés miatt korai szakaszban kellett megszakítanom. Ennek ellenére a törés egy váratlan, de igen hasznos eredményt hozott: rámutatott arra a lehetőségre, hogy az áramlásterelők turbulenciát generáló képességét tovább finomítva jelentősen javítani tudnám a teljesítményparaméterek. Ezt a felismerést követően a Tesla szelep működési elvét kezdtem el vizsgálni, amely egy mechanikai alkatrészek nélküli visszacsapó szelep, teljes mértékben az áramlás turbulenciáját kihasználva működik. Ezt alapul véve inspirációt merítettem, terveim között szerepel egy hasonló elven működő, új

áramlásterelő kialakításának kidolgozása. A kutatás során felmerült bennem az is, hogy az áramlásterelő anyagát meg kell változtatni, mivel a magas vibrációs terhelés könnyen károsíthatja hosszabb távon a jelenleg használt anyagot. A következő kísérletek során TPU vagy PETG anyagokat tervezek használni, amelyek kevésbé ridegek és törékenyek, így jobban ellenállnak a vibrációnak. Az új áramlásterelő kialakítását számos vibrációs beállítás mellett tesztelném, különös tekintettel a 0,25 inch változatra vagyok nagyon kíváncsi, amely szerintem kedvezőbb lehet a visszatartás és az energiatakarékosság szempontjából. A további kutatásaimat szeretném kiegészíteni áramlástan szimulációs szoftverek alkalmazásával. Ezek a szoftverek lehetővé teszik a kísérleti elrendezések modellezését, így előzetesen optimalizálhatom az áramlásterelő felületét, figyelembe véve a homogénebb nyomáseloszlást és az áramlás dinamikáját. Ez a megközelítés lehetővé tenné számomra a kísérletek hatékonyságának növelését, miközben csökkenti a fizikai prototípusokon végzett tesztek számát. Ezen felül, a szimulációs szoftverek lehetővé teszik az áramlásterelők geometriájának és anyagának virtuális tesztelését is. Ez különösen fontos, mivel lehetővé teszi számomra, hogy különböző anyagok és formák hatását előzetesen értékeljem anélkül, hogy fizikai prototípusokat kellene készítenem. Ez jelentős idő- és költségmegtakarítást jelent, mivel a legígéretesebb kialakításokat és anyagokat választanám ki a tényleges gyártás előtt.

7. HIVATKOZÁSOK

- Li, R., Greenchem, /, Chemistry, G., Wu, Y., Chen, J.-Y., Ning, J., Jiang, X., Deng, J., Deng, Y., Xu, R., & He, W.-M. (2021). Green Chemistry Cutting-edge research for a greener sustainable future Electrochemical multicomponent synthesis of 4-selanylpyrazoles under catalyst-and chemical-oxidant-free conditions Electrochemical multicomponent synthesis of 4-selanylpyrazoles under catalyst-and chemical-oxidant-free conditions †. *Green Chem*, 23, 3950. <https://doi.org/10.1039/d1gc00562f>
- Vivak V. Ranade and Vinay M. Bhandari (2014): Industrial Wastewater Treatment, Recycling, and Reuse, ISBN:9780080999685, pp.1-80.
<https://doi.org/10.1016/C2012-0-06975-X>
- Programme, authorCorporate:UNESCO W. W. A. (2018). The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water. *UN Water Report*, 154.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000261424>
- Stasinakis, A. S., Charalambous, P., & Vyrides, I. (2022). Dairy wastewater management in EU: Produced amounts, existing legislation, applied treatment processes and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 303, 114152.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.114152>
- Martín-Rilo Santiago, N. Coimbra Ricardo, Martín-Villacorta Javier, Otero Marta (2015): Treatment of dairy industry wastewater by oxygen injection: performance and outlay parameters from the full scale implementation, *Journal of Cleaner Production* 86, 15-23.
- Fodor Gábor, *Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium - Aktuális - Kiemelt témák*. Retrieved November 6, 2023, from <https://web.archive.org/web/20170810210031/http://www.kvvm.hu/index.php?pid=4&sid=82&khid=1789>
- Somogyi Imre (2014): Tejipari technológia II., Nemzeti Agrárszaktanácsadási, Képzési és Vidékfejlesztési Intézet, Budapest
- A tejfeldolgozás szennyvizei és tisztításuk DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS dr. Kárpáti Árpád Kémiai tudomány program-VM4 alprogram Veszprémi Egyetem.* (1997).
- Kárpáti Árpád, Fazekas Bence, Kovács Zsófia (2014): Szennyvíztisztítás korszerű módszerei,Pannon Egyetem, pp. 39.

- Prof. Dr. Ursula Deister, Prof. Dr.-Ing. Jutta Kerpen, Prof. Dr.-Ing. Franjo Sabo, Jürgen Prediger (2005): Útmutató az elérhető legjobb technika meghatározásához a tejfeldolgozás terén https://ippc.kormany.hu/download/c/e9/70000/tej_utmutato.pdf
- Karadag Dogan, Köroglu Oguz Emre, Ozkaya Bestami, Cakmakci Mehmet (2015): A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater, *Process Biochemistry* 50(2), 262–271.
- Tudástár, K. (2004). “*A Felsőoktatás szerkezeti és tartalmi fejlesztése*” című pályázat keretében. Konzorciumvezető: Pannon Egyetem Pannon Egyetem-Környezetmérnöki Intézet.
- Szennyvíztisztítás technológiája*(2023)
https://www.maviz.org/fogyasztoi_informaciok/a_szennyviztisztitas_technologiaja
- Yu, S., Tan, Z., Lai, Y., Li, Q., & Liu, J. (2023). Nanoparticulate pollutants in the environment: Analytical methods, formation, and transformation. *Eco-Environment & Health*, 2(2), 61–73. <https://doi.org/10.1016/J.EEHL.2023.04.005>
- Országos közegészségügyi központ. Ivóvíz kiskaté (2016).
- Bélafiné Bakó Katalin, Nemestóthy Nándor (2020): Membrános műveletek, PannonEgyetem, pp.5-8., pp.14-18., pp.58-59.
- Dr. Fonyó, Z., & Dr. Fábry, G. (2004). Vegyipari műveletteni alapismeretek. Budapest:Nemzedékek Tudása Tankönyvkiadó; ISBN: 963-195-315-7.
- Ming Cheng, Xiaomin Xie, Philippe Schmitz, Luc Fillaudeau: Extensive review about industrial and laboratory dynamic filtration modules: Scientific production, configurations and performances, *Separation and Purification Technology*, Volume 265, 2021 <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.118293>
- Gao, S., Wang, Z., Ren, T., & Zhang, Y. (2021). A combined mechanism (the open pores-cake dissolution) model for describing the trans-membrane pressure (Pb(t)) reduction in the backwash process at a constant flow rate. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106871. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2021.106871>
- Membrane Technology and Applications - Richard W. Baker - Google Könyvek.* (n.d.). Retrieved November 22, 2023, from https://books.google.hu/books?hl=hu&lr=&id=EyXgEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA525&dq=MEMBRANE+TECHNOLOGY+AND+APPLICATIONS+SECOND+EDITION+Richard+W.+Baker&ots=i4TkHFFuUY&sig=XFq-O82lvE8qyJYGi0D7JwHQ6gk&redir_esc=y#v=onepage&q=MEMBRANE%20TE

[CHNOLOGY%20AND%20APPLICATIONS%20SECOND%20EDITION%20Richard%20W.%20Baker&f=false](https://books.google.hu/books?hl=en&lr=&id=CHNOLOGY%20AND%20APPLICATIONS%20SECOND%20EDITION%20Richard%20W.%20Baker&f=false) books.google.hu

- Strathmann, H. (1981). Membrane separation processes. *Journal of Membrane Science*, 9(1–2), 121–189. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)85121-2](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)85121-2)
- Kereszty Flóra, Kiss Szonja Bianka, Nemeskéri Zsolt, Terebesi Csilla (2018). Reverz ozmózis. [http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/abet/bioelvalmuveletek/2018/Small%20projects/Reverzozmo%23769%3Bzis%20VE%23769%3BGLEGEs\(1\).jav%C3%A Dtott.pdf](http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/abet/bioelvalmuveletek/2018/Small%20projects/Reverzozmo%23769%3Bzis%20VE%23769%3BGLEGEs(1).jav%C3%A Dtott.pdf)
- Capannelli, G., Vigo, F., & Munari, S. (1983). Ultrafiltration membranes — characterization methods. *Journal of Membrane Science*, 15(3), 289–313. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)82305-4](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)82305-4)
- Mehran, M. M., Norasfard, M. R., Abedinzade, M., & Khanaki, K. (2015). *Lamium album* or *urtica dioica*? which is more effective in decreasing serum glucose, lipid and hepatic enzymes in streptozotocin induced diabetic rats: a comparative study. *Afr J Tradit Complement Altern Med*, 12(5), 84–88. <https://doi.org/10.4314/ajtcam.v12i5.13>
- Cséfalvay Edit, (2016). Membránszeparáció <https://docplayer.hu/23324192-Membranszeparacio-csefalvay-edit.html>
- Szép Angéla (2013): Membránszűrés hatékonyságának javítása kombinált módszerek alkalmazásával ipari szennyvizek tisztítása során, doktori értekezés
- Sreedhar, N., Kumar, M., Al Jitan, S., Thomas, N., Palmisano, G., & Arafat, H. A. (2022). 3D printed photocatalytic feed spacers functionalized with β -FeOOH nanorods inducing pollutant degradation and membrane cleaning capabilities in water treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 300, 120318. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2021.120318>
- Guo, W., Ngo, H.-H., & Li, J. (2012). A mini-review on membrane fouling. *Bioresource Technology*, 122, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.089>
- Hodúr Cecília, Beszédes Sándor, Kertész Szabolcs, László Zsuzsanna, H. Horváth Zsuzsanna, Szabó Gábor: A membrán-szeparáció és annak hatékonyságát növelő kombinált eljárások kutatása a Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Karán, *Élelmiszer Tudomány Technológia*, Volume 66, 2012
- Gao, W., Liang, H., Ma, J., Han, M., Chen, Z. lin, Han, Z. shuang, & Li, G. bai. (2011). Membrane fouling control in ultrafiltration technology for drinking water production:

- A review. *Desalination*, 272(1–3), 1–8.
<https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2011.01.051>
- Zouboulis, A., Peleka, E., & Ntolia, A. (2019). Treatment of Tannery Wastewater with Vibratory Shear-Enhanced Processing Membrane Filtration. *Separations*, 20.
<https://doi.org/10.3390/separations6020020>
- Jing , W. K., Jia, S. H., Jia, A., Yi, Z., Chee, K. C., & Tzyy, H. C. (2021). A review on spacers and membranes: Conventional or híbrid additive manufacturing?. *Water Research*, 188, 116497. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116497>
- Low, Z.-X., Chua, Y. T., Ray, B. M., Mattia, D., Metcalfe, I. S., & Patterson, D. A. (2016). *Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques*. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.10.006>
- Tijing, L. D., Dizon, J. R. C., Ibrahim, I., Nisay, A. R. N., Shon, H. K., & Advincula, R. C. (2020). 3D printing for membrane separation, desalination and water treatment. *Applied Materials Today*, 18, 100486. <https://doi.org/10.1016/J.APMT.2019.100486>
- Yanar, N., Kallem, P., Son, M., Park, H., Kang, S., & Choi, H. (2020). A New era of water treatment technologies: 3D printing for membranes. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 91, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2020.07.043>
- Ho Ng, V., Hoon Koo, C., Chan Chong, W., & Yuen Tey, J. (2021). Progress of 3D printed feed spacers for membrane filtration. *Materials Today: Proceedings*, 46, 2070–2077.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.241>
- Szegedi Balázs (2022). Tejipari szennyvizek membránszűrési Tulajdonságainak analízise 3d nyomtatott Kötőelemek használatával
- Kertész, S. (2023). Evaluation of VSEP module-integrated 3D printed spacers for enhanced wastewater ultrafiltration. *Water Environment Research* 95(8), 10912,
<https://doi.org/10.1002/WER.10912>
- Genkin, G., Waite, T. D., Fane, A. G., & Chang, S. (2006). The effect of vibration and coagulant addition on the filtration performance of submerged hollow fibre membranes. *Journal of Membrane Science*, 281, 726–734.
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.04.048>
- Kaya, R., Ersahin, M. E., Ozgun, H., Kose-Mutlu, B., Pasaoglu, M. E., & Koyuncu, I. (2023). Vibratory membrane bioreactor systems in wastewater treatment: A short review. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103865.
<https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2023.103865>

Internetes hivatkozások:

[https://akjournals.com/configurable/content/journals\\$002f066\\$002f50\\$002f1\\$002farticle-p42.xml?t:ac=journals%24002f066%24002f50%24002f1%24002farticle-p42.xml](https://akjournals.com/configurable/content/journals$002f066$002f50$002f1$002farticle-p42.xml?t:ac=journals%24002f066%24002f50%24002f1%24002farticle-p42.xml)

(2023.11.05.)

<https://daotaonec.edu.vn/mo-hinh-dead-end-filtration/> (2023.05.08.)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetemet fejezem ki mindazoknak, akiknek a segítségével idáig eljuthattam, és azoknak, akik mindvégig mellettem álltak. Elsősorban köszönöm témavezetőmnek, Dr. Kertész Szabolcsnak, aki türelmével és szakértelmével végig mellettem állt, valamint Dr. Nagy-Elekes Petrának, aki segítségével és tanácsaival hozzájárult munkám sikeréhez. Köszönettel tartozom a családomnak és közvetlen környezetemnek, akik rengeteg türelmet tanúsítottak velem szemben és tanácsaikkal segítettek szakdolgozatom elkészítésében.

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

NYILATKOZAT

Kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám, minden felhasznált forrásmunkát az irodalomjegyzékben megneveztem.

Szeged, 20.... .. hó ... nap.

.....

aláírás