

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 tettem. TDK munkám laboratóriumi kísérleteinek előrehaladtával, így ezen áramlásterelőket újra terveztem, valamint tovább fejlesztettem és kísérleteimet minden esetben frissen előállított átlagos szennyezetségű modell tejipari szennyvízzel végeztem. Az áramlásterelők továbbfejlesztése mellett alapanyag változtatást is végeztem, valamint egyedi tervezésű, kialakítású áramlásterelőkkel is kísérleteztem.

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.

BEVEZETÉS

A mindennapi életben egyre jelentősebb szerepet kap a víz- és szennyvíztisztítás, hiszen az utóbbi évtizedekben a népességrobbanásnak köszönhetően megnőtt a vízfelhasználás és szennyvíztermelésnek a mértéke. Ez azért is nagyon fontos, hiszen 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 bánhatunk 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 hátránként jelentkezik. A membrán felületén a szűrés során kialakul egy felületi, úgynevezett polarizációs réteg, valamint a pórusokban is eltömődések keletkeznek, amelyek mind-mind a szűrési hatékonyságot csökkentik (döntően a nyomásigény megnövekedése, vagy a szűrlet fluxusok lecsökkenése miatt. Munkám során a membránszűrés eljárásokhoz 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 én is 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 lehet találni, 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, 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 plusz hozzáadott termékkel később új tervezésű áramlásterelővel. Kísérleteim egy másik fő célja volt, hogy új irányba tudjam elmozdítani a kutatást és egyedi tervezésű áramlásterelővel is vizsgáljam a szűrési tulajdonságokat. Ugyancsak vizsgáltam az áramlásterelő hatására bekövetkezett energiaértékek alakulását a fajlagos energiaértékek összehasonlításával, hogy gazdaságossági szempontból is vizsgáljam kísérleteim.

RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

PES Poliéterszulfon

MF (Microfiltration) Mikroszűrés

UF (Ultrafiltration) Ultraszűrés

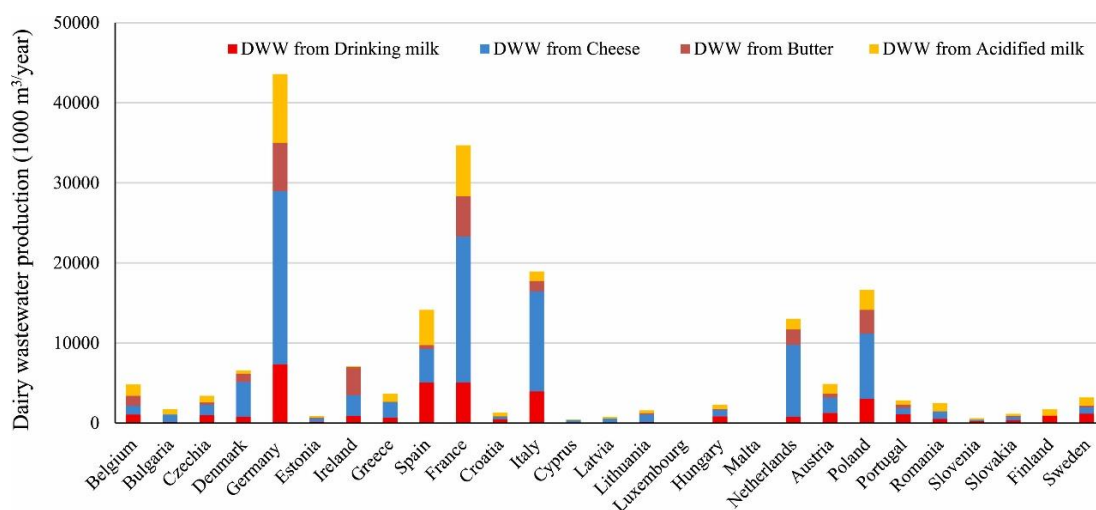
NF (Nanofiltration) Nanoszűrés

<i>RO</i> (Reverse Osmosis) Fordított ozmózis	
<i>VSEP</i> (Vibratory Shear Enhanced Processing) Vibrációs membránszűrő berendezés	
<i>KOI</i> Kémiai oxigénigény	[gL ⁻¹]
<i>FDM</i> (Fused Deposition Modeling) Szálhúzásos 3D nyomtatási technológia	
<i>TMP</i> (Transmembrane Pressure) Transzmembrán nyomás	[Pa]
<i>NTU</i> (Nephelometric Turbidity Unit) Nefelometrikus zavarossági egység	
<i>MWCO</i> (Molecular Weight Cut-off) Vágási érték	
<i>J</i> Fluxus	[m ³ m ⁻² s ⁻¹]
<i>DEF</i> (Dead-End Filtration), statikus szűrés	
<i>DWW</i> (Dairy wastewater), tejipari szennyvíz	
<i>PLA</i> (Polylactic acid) Politejsav	
<i>VRR</i> Térfogatbesűrítési-arány	[-]
<i>CFF</i> (Cross-Flow Filtration), keresztáramú szűrés	
EU Európai Unió	

2 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

Személy szerint engem is, mint ahogy sok mindenki mást is napjainkban, már régóta foglalkoztat a mindennapjaink egyre súlyosbodó témaköre a vízszennyezés és 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. ábra) 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 igaz, hogy Magyarország átlagos termelés a Németországihoz képest eltörpül, de Az EU-27 a második legnagyobb tejtermelő és a fő sajtexportőr a világon, amelyben Magyarország is kiveszi a részét az átlaghoz képest. Az eredmények szerint az EU-27 országaiban évente összesen $192,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ DWW-t állítanak elő, ennek 49%-a sajtgyártás, 19%, 18%-a és 13%-a sajtgyártásból származik.



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.

2.1 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 adódik, hiszen itt nagy mennyiségben bekerülnek olyan anyagok, amelyek veszélyesek lehetnek az életre, és így 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 nem engedhetünk

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.

2.1.1 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, cél gép 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 készülnie 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 képző hatékony fizikai eljárás mindenképpen ajánlott (Karadag, és mtsai., 2015).

2.2 Szennyvíz kezelése

A szennyvíztisztítás feladata az olyan minőségű víz előállítása, amely már a befogadóba, vagy a csatornába, vagy élővízbe ereszthető. Ez is cél, hogy például ne okozzon a vízi szervezetekben akkumulációt, azaz a szennyezőanyagoknak 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 fokozatos 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 soron 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 használunk 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 ám jelen vannak és ártalmasak lehetnek az élő szervezetekre (Ivóvíz kiskaté., 2016). Fokozott figyelmet kell tehát fordítanunk a szennyvizek megfelelő mértékű tisztítására, valamint nagyobb igényt kell teremtenünk a tisztított vizek ismételt hasznosítására is.

2.3 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).

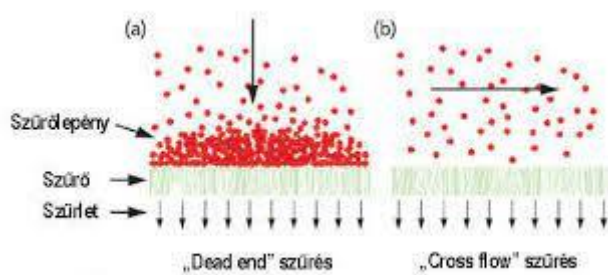
A membránszeparációs eljárások során anyagátadási, komponenstranszport folyamat történik a membránon keresztül. E transzport általánosságban jellemezhető a J fluxussal, ami a membránon keresztüli permeátum vagy szűrlet anyagáramsűrűségét jelenti és amely az esetek többségében arányos a transzport hajtóerejével. 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 szűrés 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

Méréseimhez én 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 TDK dolgozatom során.

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 (Membrane separation process, 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 Flóra et. al., 2018)

2.3.1 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 membránszűrés eljárás, amely az oldatokban lévő mikro- és makromolekulák méretén alapuló szelektív szeparációt tesz lehetővé (Ultrafiltration membranes 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. Mindemelllett 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 et al., 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 (www.oktatas.ch.bme.hu, 2022; www.doktori.bibl.u-szeged.hu, 2022). A nyomáskülönbség általában 3-8 bar közötti (Miao és társai, 2021; Luo és társai, 2021) 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 (Membránszeparáció Cséfalvay Edit, n.d.). A tesztek között szerepel a pórusméret és eloszlás ellenőrzése, a mechanikai szilárdság vizsgálata, valamint a szűrési hatékonyság tesztelése.

2.2 Membránszeparációs eljárásokhoz kapcsolódó fogalmak

Ebben a fejezetben szeretnék kitérni a membránszeparáció során felmerülő főbb alapfogalmakra, melyek a dolgozatomban 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 sűrítmeny/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 másától is. A fluxust (*J*) az alábbi egyenlet (1.) szerint lehet meghatározni:

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

ahol *J* a fluxus [*L/(m²h)*], *V_{sz}* a szűrlet térfogata [*m³*], *t* az idő [*h*], *A* az aktív membránfelület [*m²*].

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:

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

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:

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

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 áll 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 és társai, 2008). A tiszta membrán ellenállását a következő egyenlettel (5) lehet meghatározni:

$$RM = \frac{TMP}{J_{WB} \times \eta_w} [\%] \quad (5)$$

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.)

2.3.2 Membrán eltömődés

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 et al, 2016). 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 szűrlés 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 (Cséfalvay és társai, 2011).

2.3.3 Membrán ellenállások

A membránszűrési folyamatok kulcsfontosságú paramétere a membrán ellenállása, amely jelentősen befolyásolja a szűrés hatékonyságát és gazdaságosságát. A membrán ellenállása 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 (5):

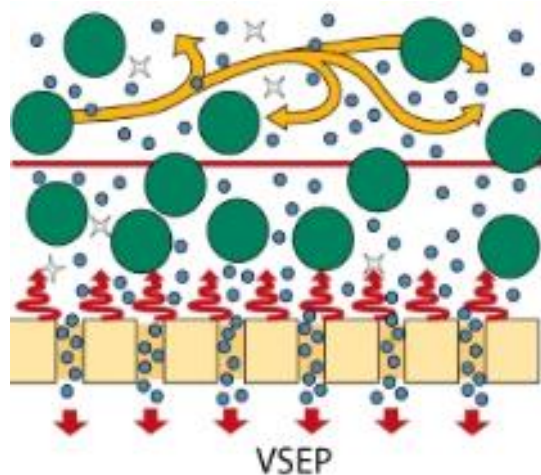
$$R_T = R_{REV} + R_M + R_{IRREV} \quad [m^{-1}] \quad (5)$$

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, koloidális), 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. Én 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 (Wei Gao et al, 2011).

2.4 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)

2.5 3D nyomtatott áramlásterelő

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 dolgozatom 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 társai, 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 (Ze-Xian Low et al, 2017). Az általam tervezett áramlásterelő speciális formájú csatornákat tartalmaz, amelyek növelik a modulban kialakuló áramlási körülmények, elsősorban a membrán felületén kialakuló lokális áramlások turbulenciáját (Leonard D. Tijning 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 (Numan et al 2020). Továbbá Ho 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 Ng, et al., 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.