SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITAS SCIENTIARUM SZEGEDIENSIS
MÉRNÖKI KAR

Energiahatékonyság vizsgálata ultraszűrő keverőegységben

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

Gergely Gréta

IV. évfolyamos biomérnök (Bsc)

hallgató

Témavezető:

Dr. habil. Kertész Szabolcs

egyetemi docens

SZEGED

2022.

ÖSSZEFOGLALÁS

ENERGIAHATÉKONYSÁG VIZSGÁLAT ULTRASZŰRŐ KEVERŐEGYSÉGEBEN

Manapság az egyik legfontosabb agrár-ipari ágazatnak a tejipar tekinthető, amely nap, mint nap hatalmas mennyiségű vizet használ fel a tejtermékek gyártásához. A termékek mellett azonban nagy mennyiségű szennyvíz is keletkezik, melynek kezelése és tisztítása további kihívásokkal járhat. Megoldásként szolgálhatnak például az olyan kombinált eljárások, technológiák, melyek részét képezi az ultraszűrés, melyet egyre gyakrabban alkalmaznak a szennyvíztisztításban, sőt a víztisztításban is. *TDK*- munkám során legfőbb célom volt a tejipari modellszennyvizet ultraszűrő keverőegység részletes vizsgálata és az energiafelvételének elemzése különböző keverési sebességek mellett, valamint egy a cellába illeszthető 3D nyomtatott promóter hatásának vizsgálata a szűrési tulajdonságokra. Ezek minél részletesebb kutatására a szűrlet fluxusok, membrán visszatartási értékek és a membrán ellenállási értékek bekövetkezett változásainak részletes tanulmányozását és összehasonlítását végeztem. Sőt matematikai, membrán eltömődési modelleket is illesztettem az eredményeimre.

ABSTRACT

Nowadays the most important agricultural industrial sectors is the dairy industry, which uses a huge amount of water every day for the production of dairy products. However, in addition to the products, a large amount of wastewater is also generated, the treatment and cleaning of which can pose additional challenges. However, ultrafiltration, which is increasingly used in wastewater treatment, can serve as a possible solution. The main goal of my *TDK* work is to investigate the energy consumption of the ultrafiltration stirring unit of the dairy model wastewater at different stirring velocities, as well as the effect of the integration of the 3D printed promoter into the cell. My goal is also to make a detailed study and comparison of the permeate fluxes and their changes, as well as the determination of the membrane resistance and retention values. In my thesis, with the help of the Hermia mathematical model and the resistance values, I determined the possible way of membrane fouling phenomena and analyzed the extent of the permeate reduction.

Tartalomjegyzék

Rövidítési lista **4**

Bevezetés **6**

1. Irodalmi rész **8**

1.1. Jelenlegi helyzetünkről 8

1.2. Szennyvizekről általánosságban 8

1.2.1. Élelmiszeripari szennyvizek 9

1.2.2. Tejipari szennyvizek 9

1.3. Szennyvíztisztítás napjainkban 13

1.4. Membrános műveletek 15

1.4.1. Membránok típusai 16

1.5. Membrános műveletek jellemző mutatói 18

1.6. Nyomáskülönbségen alapuló eljárások 21

1.6.1. Mikroszűrés (*MF*) 22

1.6.2. Ultraszűrés (*UF*) 22

1.6.5. Nanoszűrés (*NF*) 23

1.6.6. Reverz ozmózis (*RO*) 23

1.7. Háromdimenziós (3D) nyomtatás 23

1.7.1. A 3D nyomtatás szerepe a membránszeparációban 25

1.7.2. Modellezés 26

1.8. A szennyvíztisztítás energiafelhasználása 28

2. Anyagok és módszerek **31**

2.1. Modellszennyvíz előállítása 31

2.2. Membránszűrő berendezés felépítése 31

2.3. 3D nyomtatott promóter alkalmazása és jellemzői 32

2.4. Energiafogyasztásmérő műszer 32

2.5. Analitikai vizsgálatok mérőműszerei 33

2.6. A mérés menete 34

3. Eredmények és értékelésük **36**

3.1. Fluxusuk 36

3.2. Hermia modell tesztelése 38

3.3. Visszatartások 40

3.4. Ellenállások 41

3.5. Energetika 43

4. Összefoglalás **47**

RÖVIDÍTÉSI LISTA

Rövidítés	Teljesnév	Mértékegység
AM	(Additive Manufacturing), additív gyártás	
A_M	aktív membránfelület	[m^2]
ARB	Antibiotikum rezisztens baktériumok	
BOI	Biológiai Oxigénigény	[$mg \cdot L^{-1}$]
CA	cellulóz-acetát	
c_B	a betáplált oldat koncentrációja	[$mg \cdot L^{-1}$]
CFF	(Cross-flow filtration), keresztáramú szűrés	
*cos*φ	teljesítménytényező	[-]
c_{SZ}	a szűrlet oldalon kialakuló koncentráció	[$mg \cdot L^{-1}$]
DEF	(Dead-end filtration), statikus szűrés	
DOC	Oldott szerves szénvegyületek	[$mg \cdot L^{-1}$]
EDA	(European Dairy Association), Európai Tejipari Szövetség	
EPA	(United States Environmental Protection Agency), Amerikai Környezetvédelmi Ügynökség	
f	frekvencia	[s^{-1}; Hz]
FDM	(Fused Deposition Modelling), szálhúzásos technológia	
I	áramerősség	[A]
J	permeátum fluxus	[$L \cdot m^2 \cdot h^{-1}$]
J/J_0	relatív fluxus	
J_{SZW}	szennyvíz szűrésekor mért fluxus	[$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$]
J_{WA}	szűrés utáni vízfluxus	[$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$]
J_{WB}	szűrés előtti vízfluxus	[$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$]
K	eltömődési modell állandó	[-]
k_c	teljesen blokkoló modell állandója	[s^{-1}]
k_g	iszaplepény modell állandója	[$s \cdot m^{-2}$]
k_i	közbenső blokkoló modell állandója	[m^{-1}]
KOI	Kémiai Oxigénigény	[$mg \cdot L^{-1}$]
KOI_{Cr}	Kémiai Oxigénigény, kálium-bikromáttal	[$mg \cdot L^{-1}$]
KOI_{Mn}	Kémiai Oxigénigény, kálium-permanganáttal	[$mg \cdot L^{-1}$]
k_s	standard blokkoló modell állandója	[$m^{-1/2} \cdot s^{-1/2}$]
LOM	(Laminated Object Manufacturing), laminált objektum	
MF	(Microfiltration), mikroszűrés	
MWCO	(Molecular Weight Cut Off), vágási érték	[Da]
n	Hermia modellek állandója	[-]
NF	(Nanofiltration), nanoszűrés	
P	teljesítmény	[W]

PAN	poliakrilnitril	
PES	poliéter-szulfon	
$P_{é}$	éves teljesítményfelvétel	[kWh/év]
P_h	hasznos teljesítmény	[W]
P_{hf}	havi teljesítményfelvétel	[Ft/hó]
P_l	látszólagos teljesítmény	[VA]
P_m	meddő teljesítmény	[VA_r]
PP	polipropilén	
PR.	promóter	
PS	poliszulfon	
P_u	ultraszűrő keverőegység teljesítményfelvétele	[$kWh \cdot m^{-3}$]
PVDF	polivinilidén-fluorid	
Q	elektromos töltés	[C]
R	visszatartási érték	[%]
R_{IRREV}	irreverzibilis ellenállás	[m^{-1}]
R_M	(Membrane Resistance), membrán saját ellenállása	[m^{-1}]
RO	(Reverse osmosis), fordított ozmózis	
R_{REV}	reverzibilis ellenállás	[m^{-1}]
R_T	teljes ellenállás	[m^{-1}]
SLA	sztereolitográfia	
SLS	szelektív lézeres szinterezés	
t	membránszűrés ideje	[s]
T	periódusidő	[s]
TC	Összes szénvegyület	[mg $C \cdot L^{-1}$]
TDK	Tudományos Diákköri Konferencia	
TIC	Összes szervetlen szénvegyület	[mg $C \cdot L^{-1}$]
TMP	transzmembrán nyomás	[Pa]
TOC	Összes szerves széntartalom	[mg $C \cdot L^{-1}$]
t_{usz}	ultraszűrés ideje	[h]
U	elektromos feszültség	[V]
UF	(Ultrafiltration), ultraszűrés	
V_B	betáplált anyag térfogata	[m^3]
V_p	permeátum végtérfogata	[m^3]
VRR	(Volume Reduction Ratio), sűrítési arány	
V_{SZ}	szűrlet térfogata	[m^3]
W	elektromos munka	[J]
η_{SZW}	szennyvíz dinamikai viszkozitása	[Pas]
η_W	víz dinamikai viszkozitása	[Pas]
ϕ	fázisszög	[◦] ívfok

BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedek népességrobbanásnak és a feltörekvő országok gazdasági fejlődésének köszönhetően, rohamosan nő a globális élelmiszerkereslet. Napjainkban a Föld népessége elérte a 8 milliárd főt (www.vg.hu, 2022). Ráadásul, az ipari tevékenységekkel a vízfelhasználás és a termelődő szennyvizek mennyisége is megsokszorozódott, melyek megfelelő kezelése és tisztítása egyre nagyobb kihívást jelent. Az élelmiszeripari termékek gyártása során keletkező szennyvizek közül a tejipari szennyvizek jelentik a legnagyobb kockázatot a környezetre nézve. Kezelésük elmulasztása és a közvetlen környezetbe bocsájtásuk különböző környezeti problémákat okozhat, például eutrofizációhoz és ennek következményeként akár a biodiverzitás csökkenéshez is vezethet. Aggodalomra adhat okot továbbá az is, hogy a napjainkban alkalmazott hagyományos szennyvíztisztítási módszerek energiafelhasználása a szükséges beavatkozások miatt jelentősen megnövekedett. Amennyiben a népesség és az ipari tevékenységek száma ilyen mértékben fog növekedni, elképzelhető, hogy 2035-re a villamosenergia iránti igény 70%-kal fog emelkedni (Yuan és He, 2015). Valóban egyre sürgetőbbé vált annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy képes lesz-e a bolygónk megbirkózni a felmerülő környezeti problémákkal, és tud-e majd elegendő mennyiségű élelmet, ivóvizet, valamint energiát biztosítani az emberiség számára.

Megoldásként szolgálhatnak azonban a membránszeparációs eljárások, melyek az alternatív szennyvíztisztítási eljárások mellett nagyon jó kiegészítő módszerként funkcionálhatnak, alacsony energiaigényük és könnyű kezelhetőségük által pedig, egyre nagyobb teret hódítanak még a víztisztításban is. *TDK*-dolgozatom középpontjában a membránszűrési eljárásokhoz tartozó alacsony nyomásigényű ultraszűrés (*UF*) áll. Az ultraszűrő membrán pórusméretének köszönhetően a szubmikron méretű kolloid részecskék, különböző mikroorganizmusok és nagymolekulatömegű részecskék (pl. fehérjék) elválasztása is lehetséges. Előzetes irodalmi munkám során azt találtam, hogy a membránfelületi nyíróerők növelésének hatására, például a cellába/modulba illesztett elemek, ütközőfelületeket tartalmazó, esetleg 3D nyomtatott promóterek illesztésével jelentős mértékű szűrési hatékonyságnövelés prognosztizálható.

TDK-munkám célkitűzése, hogy megtudjam, hogy pusztán fizikai módszerrel, egy olcsón 3D nyomtatott promóternek a cellába illesztésével milyen hatásokat tudok elérni a szűrési tulajdonságok tekintetében, elsősorban javítására vonatkozóan, mint amilyen a

permeátum fluxus, membrán visszatartás és a membrán ellenállási értékeinek változása. Tehát kíváncsi voltam arra, hogy vegyszerek használata nélkül milyen hatékonyságokat lehet elérni. További célom volt, hogy elvégezzem egy tejipari modellszennyvizet ultraszűrő keverőegység energiafelvételének részletes elemzését a különböző keverési sebességek és az ultraszűrő cellába integrált 3D nyomtatott promóter hatásainak részletes vizsgálatára vonatkozóan. Továbbá matematikai, membrán eltömődési modelleket is illesztettem az eredményeimre, hogy megtudjam melyik modellel értelmezhető a legjobban a membrán eltömődésének folyamata. Mindezek érdekében egy olyan kísérlettervet raktam össze és mértem végig, amely tartalmazza a promóter illesztése nélküli kontrol méréseket 0-400 rpm-ig, 100 rpm-enként növelve (itt Reynolds-számokat is meghatároztam), és a promóter ultraszűrő cellába illesztett méréseket ugyanezen keverési sebességek mellett.

1. IRODALMI RÉSZ

1.1. Jelenlegi helyzetünkről

Napjainkban egyre sürgetőbbé vált annak a kérdésnek a megválaszolása, hogy képes lesz-e a bolygónk megbirkózni a felmerülő környezeti problémákkal, és tud-e majd elegendő mennyiségű élelmet, ivóvizet, valamint energiát biztosítani az emberiség számára. Az 1950-es évek óta ugyanis, a világ népessége kétszeresére, az általuk használt víz mennyisége pedig hatszorosára növekedett. A népességnövekedéssel az ipari tevékenységek száma, és ezáltal pedig a keletkező szennyvizek mennyisége is megsokszorozódott. Lényeges, hogy a Földünkön található vízmennyiség 97,5%-a sós, így önmagában, kezelés nélkül, nem fogyasztható. A maradék 2,5% édesvíznek pedig csupán csak 1%-a alkalmas közvetlenül emberi fogyasztásra (Ranade és Bhandari, 2014).

1.2. Szennyvizekről általánosságban

Szűkebb értelemben szennyvíznek tekinthető minden olyan víz, amely szennyeződést tartalmaz. Keletkezési helyük alapján megkülönböztethetünk lakossági és ipari szennyvizeket. A lakossági szennyvizek olyan összetett rendszert képeznek, melyben a mikroorganizmusok és azok növekedéséhez szükséges tápanyagok is jelen vannak. Továbbá az őket körülvevő közeg tulajdonságai (hőmérsékelt, pH) is hozzájárul a szaporodásukhoz. Az ipari szennyvizek fizikai jellemzői által ezek az élőlények csak kisebb számban, vagy egyáltalán nem fordulnak elő.

A lakossági szennyvizeket sokféle anyag alkothatja. Nagy számban tartalmaznak különböző vegyületeket, vagy vegyületcsoportokat alkotó komponenseket, melyek legfőbb forrása az emberek által elfogyasztott élelmiszerek. Ezek fehérje-, szénhidrát-, valamint zsírtartalma eltérő módon, vagy pedig egyáltalán nem hasznosítható az emberi szervezet számára, így a metabolikus utak mellék-, és végtermékei a szennyvízbe kerülnek.

Azok az ipari szennyvizek, melyek biológiailag könnyen lebomlanak és további veszélyt nem jelentenek a csatornahálózatra, illetve a szennyvíztisztítókra, a háztartási szennyvizekhez hasonlóan közvetlenül a csatornába vezethetők. Ide tartoznak a tej-, hús-, konzervipari gyártástechnológia során keletkező szennyvizek. Más iparágak szennyvizei (építőipar, vegyipar) gyakran tartalmaznak tűzveszélyes, toxikus, vagy

pedig nehezen ülepíthető anyagokat, melyek eltávolítása, kezelése feltétlenül szükséges mielőtt a közcsatornarendszerbe vezetik azokat (Kárpáti és Vermes, 2011).

1.2.1. Élelmiszeripari szennyvizek

A világ népességének növekedése, valamint a feltörekvő országok gazdasági fejlődésének köszönhetően egyre gyorsabban növekszik a globális élelmiszerkereslet. Az élelmiszergyártás minden lépése vizet igényel, így ez az iparág is nagy vízfelhasználónak tekinthető. Gyakran alkalmazzák az alapanyagok, illetve a gyártás során használt eszközök tisztítására, hámozáskor, főzéskor és hűtéskor is. Az élelmiszeripari szennyvizek összetétele nagymértékben eltér más ipari szennyvizekétől. Nem tartalmaznak mérgező kemikáliákat, csupán magas mikróba tartalmuk miatt igényelnek speciális kezelést. Az élelmiszergyártás során keletkező szennyvíz minősége, valamint mennyisége függ az alkalmazott technológiától és az üzemi körülményektől is, így az alábbi szempontok alapján csoportosíthatók (Jesús, 2003):

1. Keletkezési hely szerint
2. Szennyező anyagok típusa szerint
   -szerves anyagokat
   - szervetlen anyagokat
   -mindkettőt tartalmazó szennyvizek
3. Szennyvíztisztító üzemre gyakorolt hatás szerint
   -előkezelés szükséges/ nem szükséges
   -közcsatornarendszerbe vezethető/ nem vezethető
4. Hasznosítás szerint
   -újrahasznosítható/ nem hasznosítható

Az élelmiszeripari szennyvizek gyakran tartalmaznak értékes szerves erőforrásokat, mint például fehérjéket, lipideket, melyek visszanyerésével, újrafelhasználásával új gazdasági és környezetvédelmi értékek teremthetők. Mindezen tényezők ellenére eddig kevesen foglalkoztak az ilyen típusú szennyvizek elemzésével és hasznosításával (Lee és Stuckey, 2022; Bogárdi, 1975).

1.2.2.Tejipari szennyvizek

Az élelmiszeripari területek közül a tejipar tekinthető az egyik legnagyobb vízfelhasználónak és a leginkább szennyezett vizek kibocsátójának. Világviszonylatban nézve az Európai Unió 27 tagországa jelentős mértékben járul hozzá a keletkező tejipari szennyvíz

mennyiségi növekedéséhez, hiszen a világ második legnagyobb tejtermelői és sajtexportőrei. Ez évente összesen 192,5 millió m^3 szennyvizet jelent, mely 49%-a sajtgyártás, 19%-a fogyasztásra szánt tejtermelés, 18%-a savanyított tejtermékek és 13%-a pedig vajzsírtermékek gyártása során keletkezik (Stasinakis és társai, 2022). Az Európai Tejipari Szövetség (*EDA*) szerint a tejipari szennyvizek főként a tejtermékekből származó anyagveszteségekből, valamint az öblítéssel járó műveletek során keletkező szennyezett vizekből állnak (www.euromilk.org/eda, 2018). Ezek jellemzően nagy oxigénigénnyel és szerves anyag tartalommal, valamint gyors rothadó képességgel rendelkeznek. A tejipari csurgalékvizek magas szerves anyag tartalmát döntően a gyártás során keletkező savó, sajt, vaj, illetve túródarabok adják. Ezek a feltételek a felhasznált baktérium- és gombakultúrákon kívül más mikróbáknak is kedveznek, így a tejtermék maradványokat felhasználva könnyedén elszaporodnak, anyagcsere folyamataik által pedig a szennyvíz rothadását is elősegítik. Mielőtt ezeket a vizeket újra a környezetbe engedik, alapos analitikai vizsgálatokra, és a kapott eredményektől függően megfelelő kezelésre van szükség. Jellemzésük az alábbi szempontok alapján történik (Kertész, 2011):

A szervesanyaggal terhelt csurgalékvizek élővízbe történő elvezetésével az öntisztulás céljából aerob folyamatok játszódnak le. A biológiai lebontást végző mikroorganizmusok az ehhez szükséges oxigén mennyiségét a víz oldott oxigéntartalmából fedezik, melyet nagymértékben befolyásol a hőmérséklet és a parciális nyomásviszony is. A szennyvizek szervesanyag tartalmát ezért a lebontáshoz felhasznált oxigénmennyiség segítségével határozzák meg, melyhez a biológiai oxigénigény (*BOI*), kémiai oxigénigény (*KOI*), valamint az összes szerves széntartalom (*TOC*) mutatókat alkalmazzák (László és Beszédes, 2009; Jesús, 2003).

A biológiai oxigénigény (*BOI*) a vizekben, valamint szennyvizekben lévő heterogén mikroorganizmusok, aerob biológiai folyamatai során történő szerves anyag lebontását jellemzi. Értéke megadja, hogy egy meghatározott időtartam (5-20 nap) alatt a mikróbák mekkora mennyiségű oxigént használtak fel az oxidációs folyamataikhoz. A felhasznált oxigén mennyiség arányos a vizekben, valamint a szennyvizekben található szennyeződések mennyiségével, azaz a szennyezettségi koncentrációval. Ezt [$mg \cdot L^{-1}$] egységben fejezik ki. Tejipari szennyvizek *BOI* értéke átlagosan 40-48000 $mg \cdot L^{-1}$ (László és Beszédes, 2009; Jesús, 2003; Ahmad és társai, 2019).

A kémiai oxigénigény (*KOI*) megadja, hogy a szennyvizekben lévő szerves anyagok oxidálószerekkel (kálium-permanganát, kálium-bikromáttal) végzett lebontása során mennyi oxigén kerül felhasználásra. A szerves anyagok roncsolását kálium-permanganáttal ($KOI_{Mn)}$ és

kálium-bikromáttal (KOI_{Cr}) végzik. A kálium-bikromátos roncsolás után naszcensz oxigén keletkezik, amely a szerves anyagokat szén-dioxiddá és vízzé bontja. Az oxidálószerek közül ezt gyakrabban használják, hiszen minden víztípusnál (szennyvíznél, ivóvíznél) alkalmazható. A kálium-permanganátos roncsolás ezzel szemben csak ivóvizeknél és tiszta felszíni vizek esetében elterjedt. *TDK*-munkám során jómagam is végeztem *KOI* meghatározást, amelyhez a kálium-bikromátos roncsolást választottam. A tejipari szennyvizek *KOI* értéke 80-95000 $mg \cdot L^{-1}$ (László és Beszédes, 2009; Ahmad és társai, 2019).

A *BOI* és a *KOI* vizsgálatok alatt felmerülő esetleges hibák az összes szerves széntartalom (Total Organic Carbon, *TOC*) mérésekkel kiküszöbölhetők. Ezzel a módszerrel ugyanis, a mintában lévő összes szerves vegyület szénben kifejezett koncentrációja határozható meg [mg $C \cdot L^{-1}$] mértékegységben kifejezve. A *TOC* mérés során a szennyvíz szerves anyag tartalmának szén-dioxiddá és vízzé történő oxidálása megy végbe magas hőmérsékleten, katalizátor jelenléte mellett. A szennyvizek analízisekor megkülönböztethetünk még:

- összes szénvegyület (*TC*) - (szerves és szervetlen szénvegyületek egyaránt),
- összes szervetlen szénvegyületek (*TIC*) - (mint például karbonátok, szén-dioxid),
- oldott szerves szénvegyületek (*DOC*) - (mint például a membrános művelettel végrehajtott szűrési folyamatok során kapott minta) (Jesús, 2003; www.statex.hu).

Ahhoz, hogy a szennyvizek biológiai tisztítása végbe mehessen, semleges, vagy közel semleges pH-ra van szükség. Ennek érdekében ellenőrzik, hogy a csurgalékvíz pH értéke meghaladja-e a szigorúan szabályozott határértéket, vagy sem. Ugyanakkor az oxidációs folyamatok (pl. vizek öntisztulása) során nagymennyiségű szén-dioxid is keletkezik, amely hozzájárul a vizek pufferkapacitásának növekedéséhez. Ezért a kémhatás felülvizsgálata ugyanolyan fontos a lúgosság szempontjából is, mivel a savassághoz hasonlóan szintén szigorúan szabályozott paraméternek tekinthető (Jesús, 2003).

A vizek megfelelő kezeléséhez további vízminősítési vizsgálatok szükségesek, mivel a szerves szennyeződések mellett a szervetlen eredetűek sem elhanyagolhatók, hiszen ezek számos környezeti probléma okozói lehetnek. Az élővilágra egyaránt veszélyt jelentő anyagoknak tekinthetők a nehézfémek, nitrogén és a foszfor vegyületek (www.kkft.bme.hu). Általánosságban elmondható, hogy a szennyvizek alacsony koncentrációban tartalmaznak toxikus fémszennyeződéseket, viszont ezek a szennyezők képesek biológiai úton megkötődni és a biomassza részeként feldúsulni. Ezt a jelenséget bioakkumulációnak és/vagy

magnifikációnak nevezzük. A fémek környezeti kockázata nagymértékben függ az oldhatóságuktól, melyet a közegben jelenlévő szerves és szervetlen komplexképzők befolyásolhatnak. Egyes fémek oldhatatlanok, így biológiailag inaktívnak tekinthetők, azaz nem befolyásolják a vízminőséget. Gyakran előfordul azonban, hogy egy oldhatatlan fém komplexképzők segítségével máris oldhatóvá válik, ezzel pedig hatást gyakorol a minőségre is. Összeségében elmondható, hogy már kis mennyiségében is negatív hatással lehetnek a biológiai folyamatokra (László és Beszédes, 2009). Mennyiségüket [$mg \cdot L^{-1}$] mértékegységben fejezzük ki (Jesús, 2003).

A molekuláris nitrogén lebontása a nitrogén atomok közötti nagyenergiájú hármas kötések miatt, a kék algák és a heterotróf nitrogénfixáló baktériumokon kívül más mikroorganizmus számára hatalmas kihívást jelent. A nitrifikáló élőlények a nitrogént képesek megkötni és saját szervezetükbe építeni, majd anyagcsere-folyamataik által ammóniává alakítani. Ezt a folyamatot, amely során a nitrogént saját szerves vegyületeikbe építenek, majd a lebontó folyamataik által ammóniává alakítanak, ammonifikácónak nevezzük. Az ammónia jelenléte a vizekben és szennyvizekben bomló szerves anyag tartalomra utalhat. Az ammónia továbbá víz jelenlétében képes protont felvenni és ammóniumionná alakulni, mely fontos indikátora a szerves szennyeződéseket tartalmazó vizeknek. A magas nitrogéntartalomhoz az élelmiszeriparban alapanyagként felhasznált nitritek és nitrátok is hozzájárulnak. A vízvédelem szempontjából tehát nagy hangsúlyt kell fektetni a magas nitrogén-, valamint szerves anyag tartalmú szennyvizek megfelelő kezelésére, hogy a természetes vizek eutrofizációját elkerülhessük.

Az építőelemként funkcionáló foszfor természetes és mesterséges úton is vizeinkbe juthat. A foszfortartalmú kőzetek bemosódásával, valamint a műtrágyák, mosószerek alkalmazásával a természetes vizek foszfortartlama jelentősen megnövekedett. A nyers szennyvizek összes foszfortartalma átlagosan 5-20 $mg \cdot L^{-1}$, míg a tisztított vizeké 3-10 $mg \cdot L^{-1}$. A vízvirágzás elkerülése érdekében 10 $mg \cdot m^{-2}$ a megengedett foszformennyiség (László és Beszédes, 2009; www.kkft.bme.hu).

A szerves és szervetlen eredetű anyagok viselkedésüket tekintve lebeghetnek, leülepedhetnek és akár fel is úszhatnak. A kevésbé szennyezett csurgalékvizeknél, (<300 $mg \cdot L^{-1}$) a lebegőanyag-tartalmat zavarosság mérés során, míg a nagymennyiségben (1-4$g \cdot L^{-1}$) oldhatatlan lebegő szennyeződésekkel rendelkező szennyvizek és iszapok esetében két-fényutas fotocellás és ultrahangos méréseket alkalmaznak a meghatározáshoz (www.statex.hu). *TDK*-dolgozatom elkészítése során zavarosságmérővel határoztam meg a kezdeti tejipari modellszennyvíz és a szűrlet lebegőanyag-tartalmát.

Az ökoszisztémában sokrétű szerepet betöltő apró élőlények majdnem minden víztípusban előfordulnak, legyen szó hideg, meleg, sós, vagy pedig édesvizekről. A mikroorganizmusok megjelenéséből következtethetünk szennyező anyagok jelenlétére, de akár saját maguk is hozzájárulhatnak a toxikus anyagok mennyiségi növekedéséhez, illetve csökkenéséhez a lebontó folyamataik által. Az élelmiszeripari szennyvizek esetében a legnagyobb kihívást a kórokozó baktériumok (Salmonella, Shigella) jelentik, ezért meghatározásuk elengedhetetlen. A közegészségügyi veszélyek elkerülésének érdekében a megbetegedéseket okozó mikróbákat tartalmazó szennyvizeket szakszerű kezelések alá vetik (László és Beszédes, 2009).

1.3. Szennyvíztisztítás napjainkban

A szennyvíztisztítás legfőbb célja, hogy a fizikai, biológiai, valamint a kémiai kezelések által eltávolításra kerüljenek a káros és veszélyes anyagok, és így a víz visszanyerhesse eredeti állapotát, értékét. A szennyvíztisztító üzem területére beérkező csurgalékvizeken először mechanikai tisztítást végeznek. Ezeket a fizikai eljárásokat két nagy csoportba sorolhatjuk aszerint, hogy az elválasztás művelete szemcseméret, vagy pedig sűrűségkülönbség alapján történik. A különböző méretű, úszó, lebegő anyagokat rácsok, gerebek, homokfogók, valamint ülepítők segítségével távolítják el, míg az olajos szennyeződéseket olaj-, és zsírfogókkal. A mechanikai tisztítás során a *BOI*, illetve a *KOI* értékek is csökkenést mutatnak, de ez a változás nem olyan mértékű, hogy a kezelt vizeket közvetlenül egy felszíni fogadóba lehessen engedni. A szerves anyag tartalom további csökkentésének érdekében biológiai módszereket alkalmaznak, melyek alapját a mikroorganizmusok metabolikus folyamatai képezik. A nem ülepíthető kolloidokat és az oldott szerves anyagokat ugyanis, a jelen lévő mikróbák képesek szubsztrátként hasznosítani és számukra értékes szervetlen anyagokká alakítani. A szerves anyagok természetes úton történő lebontása a mikroflórától függően aerob, illetve anaerob módon is végbemehet az élővizek öntisztulása, vagy pedig a talajon való átszűrés során. Ahhoz, hogy az enzimek által katalizált biokémiai reakciók minél gyorsabban és kisebb helyen lejátszódhassanak, emberi beavatkozás szükséges. A mesterséges folyamatok berendezései a mikroorganizmusok, a levegő, valamint a szennyvíz érintkeztetésének módjában térnek el egymástól. A csepegtetőtestes tisztítási technológia során a szennyvizet egy szűrőfelületre csepegtetik, ahol a mikróbákkal együtt egy hártyát alkotnak, ezzel biztosítva a reakcióközeget a lebontó folyamatokhoz (Kárpáti és társai, 2014). Az eleveniszapos szennyvíztisztítás esetében viszont az előkezelt szennyvizet egy iszapos réteggel rendelkező bioreaktorokba vezetik, ahol a biológiai sejttömeggel érintkezve szuszpenziót képez. A lebontást követően a reaktorokból

elfolyó szennyvizet utóülepítőbe terelik, ahol iszapra és tisztított vízre választják szét. Ezután a fölösiszapot elvezetik, míg a recirkuláltatott iszapot visszaengedik a reaktorba (Tardy, 2006). A fizikai és biológiai tisztítás után a kezelt víz még mindig tartalmazhat a környezetre veszélyt jelentő szennyeződéseket, így további fizikai, valamint kémiai eljárások alkalmazása válhat szükségessé. A fertőtlenítést leggyakrabban klórral és annak különböző vegyületeivel végzik, mivel már kis koncentrációban is képesek a legtöbb patogén mikroorganizmus elpusztítására (Jesús, 2003). Napjainkban a klór felhasználásával járó egészségügyi kockázat csökkentésének érdekében, más típusú oxidálószerek használata is előtérbe került. Ilyen például az ózon, mely kiváló fertőtlenítőszerként viselkedik a vírusokkal és baktériumokkal szemben, továbbá íz-, szín- és szaghatások megszűntetésének céljából is igénybe vehető (Németh, 2019). A csatornahálózatban felmerülő, esetleges szennyeződések elkerülésének érdekében az ózonos tisztítást gyakran klóros fertőtlenítéssel is összekapcsolják. Korábbi kutatások eredményei is azt bizonyítják, hogy a hibrid kémiai szennyvíztisztítási módszerek nagyobb hatékonysággal bírtak, mint azok fertőtlenítési folyamatok, ahol a fertőtlenítő-, vagy oxidálószereket önmagukban alkalmazták. Egyes esetekben ugyanis, ahol csak klóros fertőtlenítést végeztek a Coliform fajok egy részét és az opportunista kórokozókat nem sikerült maradéktalanul elpusztítani. Azoknál a kísérleteknél viszont, ahol a klóros fertőtlenítést UV besugárzás is követte, azt tapasztalták, hogy a kombinált eljárás hatására jóval kevesebb vírus és antibiotikum rezisztens baktérium (*ARB*) maradt életben (Shekhawat és társai, 2021). Az oxidációs reakciók során gyakran keletkeznek pelyhes, lebegő anyagok, melyek eltávolítása feltétlenül szükséges mielőtt a tisztított vizet egy természetes befogadóba vezetik. Ezeket az anyagokat leggyakrabban szűréssel, aktív szenes adszorpcióval, távolítják el a kémiai kezeléseket követően (Simándi, 2011).

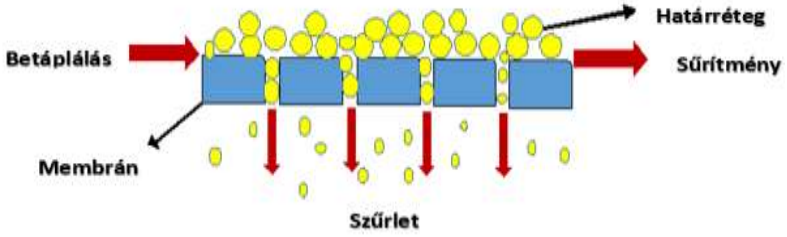
A víz- és szennyvíztisztítás hagyományos módszerei mellett, a technológia fejlődésének köszönhetően a membrános eljárások is egyre nagyobb szerepet kapnak. Robbanásszerű elterjedésük az alábbi okokkal magyarázható:

- megnövekedtek az ivóvíz minőségével kapcsolatos igények (egészségre káros mikroorganizmusok, vízkezelési melléktermékek maradéktalan eltávolítása)
- felerősödött környezettudatosság:
    - fokozott vízvédelem,
    - alacsony energiaigényű eljárások előtérbe helyezése,
    - vegyszerhasználat csökkentése (Simándi, 2011; Jesús, 2003).

A membránszeparációs műveleteket jellemzően gyógyszeripari és élelmiszeripari területeken alkalmazzák napjainkban. Az elmúlt néhány évtized kutatási eredményei alapján megállapították, hogy ezen iparágak szennyvizei nagymennyiségben tartalmaznak értékes elemeket, melyek visszanyerése számos kihívásokkal járhat. A vizsgálatok során arra jutottak, hogy a hulladékkeletkezést annak forrásánál kell kezelni, beleértve a szennyező anyagok csökkentését és a tápanyagok visszanyerését, valamint újrahasznosítását. A jelenleg rendelkezésre álló információk alapján, a membrántechnológiák a tápanyag-visszanyerés szempontjából kiváló módszernek bizonyulnak (Knežević és társai, 2022).

1.4. Membrános műveletek

A membránszeparációs eljárások olyan elválasztási műveleteknek tekinthetők, melyek során a szétválasztani kívánt, betáplálásra kerülő folyadékáram két részre osztódik a membrán tulajdonságaitól függően (pl. pórusméret és oldhatóság) (Szép, 2013). A különböző hajtóerők hatására, a permszelektív (permeábilis és szelektív) gátként viselkedő membrán felületén transzport folyamatok játszódnak le. A membránon áthaladó anyagok képezik a szűrletet, vagy permeátumot, míg a visszatartott komponensek alkotják a koncentrátumot, retentátumot vagy sűrítményt (1.ábra). Az elválasztási művelet céljától függően mindkettő főterméknek tekinthető. Amennyiben a művelet célja a különböző fehérje oldatok töményítése, a koncentrátum lesz a főtermék, míg a fázisok tisztításakor a szűrlet (Bélafiné és Nemestóthy, 2020).



1. ábra *Membránszeparációs műveletek működésének elve, keresztáramú kialakításnál (saját szerkesztés)*

A szeparációs műveletek hajtóereje sokféle lehet, ami alapján különböző csoportokba sorolhatjuk azokat:

- koncentrációkülönbség (pl. gázszeparáció, dialízis, pervaporáció),
- nyomáskülönbség (pl. mikroszűrés, ultraszűrés, nanoszűrés, reverz ozmózis),
- hőmérsékletkülönbség (pl. membrándesztilláció),

- elektromos potenciálkülönbség (pl. elektrodialízis, elektroforézis) (Bélafiné és Nemestóthy, 2020; Kapoor és társai, 2020).

Az eddig alkalmazott hagyományos elválasztási-technikák kisebb-nagyobb sikerekkel bírtak a szennyvízkezelések során. Gyakran előfordult ugyanis, hogy a szennyező anyagok a folyékony fázisból a szilárd, vagy pedig a gázfázisba helyeződtek át (Kavitha és társai, 2022). A szeparációs problémák kiküszöbölésének érdekében ígéretes alternatívákként szolgálhatnak a membrános eljárások (Kapoor és társai, 2020). Vitathatatlan előnyeik mellett azonban hátrányokkal is rendelkeznek, melyek a következőképpen összegezhetők:

Előnyök:

- alacsony energiaigényűek,
- más műveletekkel könnyen kombinálhatók (hibrid eljárások),
- könnyedén kezelhetők, variálhatók,
- működésük folyamatossá tehető,
- a méretnövelés egyszerűen kivitelezhető,
- környezetbarát, hiszen kemikáliák hozzáadását nem igénylik.

Hátrányok:

- a membránok viszonylag rövid élettartamúak,
- eltömődés (polarizációs réteg kialakulásának lehetősége),
- koncentráció-polarizáció a határrétegben,
- kicsi szelektivitás és csökkenő fluxus

(Bélafiné és Nemestóthy, 2020; Kavitha és társai, 2022).

1.4.1. Membránok típusai

A membránok többféle szempont alapján kategorizálhatók. Megkülönböztethetjük őket felépítésük, vastagságuk, morfológiájuk, töltésük és akár eredetük szerint is. A természetüknél fogva lehetnek természetes, valamint szintetikus eredetűek. A természetes, azaz a biológiai membránok tovább oszthatók, élő (pl. sejtfal) és nem-élő (pl. liposzómák) membrán struktúrákra. A másik nagy csoportot a szintetikus membránok képezik, melyek készülhetnek szerves anyagokból (pl. polimerekből-poliszulfonból (*PS*), poliéter-szulfonból (*PES*), cellulóz-acetátból (*CA*)), illetve szervetlenekből (pl. kerámia, fém) is (Bélafiné és Nemestóthy, 2020).

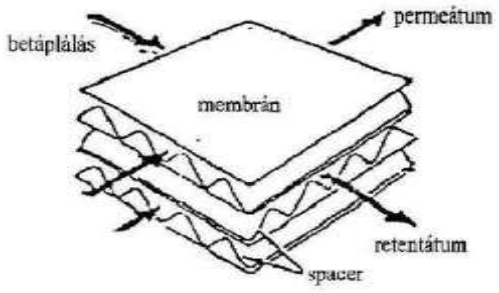
A membránok térbeli elhelyezkedését, azaz konfigurációját tekintve az alábbi membránmodul típusokat kell megemlítenünk:

- lap,

- spiráltekercs,
- cső,
- üreges szál, vagy kapilláris.

A különböző konfigurációjú membránok megalkotása során a legfőbb cél, hogy a lehetőségeinkhez mérten növelni tudjuk a modul felületére vonatkozó effektív membrán felületet [$m^2 \cdot m^{-3}$]. A membránmodulokkal szemben támasztott további követelmények, hogy nagy permeábilitással és szelektivitással rendelkezzenek, ellenállók legyenek a mechanikai és a kémiai igénybevétel során, valamint legyenek jól kontrolálhatók a koncentráció polarizációval szemben.

Az egymástól tartóelemekkel elválasztott, membránlapokból felépülő térbeli struktúrát lapmodulnak nevezzük. Az egyszerű szerkezetű modul egységnyi térfogatra vonatkoztatott felületének értéke általában 100-400 $m^2 \cdot m^{-3}$. Hátránya, hogy nagy helyigénnyel és nagy szivattyúzási költséggel rendelkeznek. A méréseim során az előbb említett membránmodul típust alkalmaztam, melynek felépítését a 2. ábra szemlélteti.



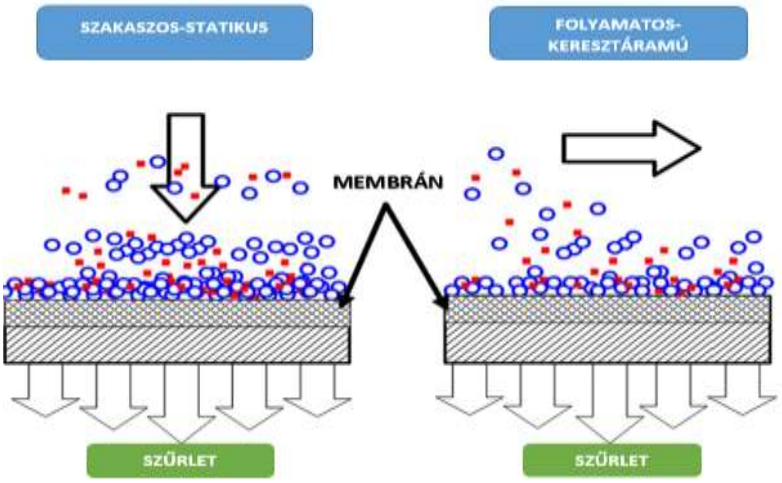
2. ábra *Lapmodul felépítése (Cséfalvay és Mika, 2008)*

Ennek továbbfejlesztett változata a következő típus, a spiráltekercses modul kialakítás, ami elsősorban a nagy helyigény csökkentésének érdekében lett megalkotva. A spiráltekercs, vagy más néven göngyölegmodulok felépítése igen összetett. A modul váza egy perforált cső, melyre több síklap formájú membránt tekercselnek spirál alakzatban. Ezt követően az egész szerkezet egy nyomócső burkolatot kap. A betáplált folyadék áramoltatása axiális irányba történik. A koncentrátum az elválasztó felületen, míg a permeátum a perforált csövön távozik a rendszerből. Az térfogategységre eső felület nagysága 300-1000 $m^2 \cdot m^{-3}$.

A legegyszerűbb felépítésű membránmodulnak a csőmodul tekinthető, mely a cső-a-csőben hőcserélőhöz hasonlóan, egyetlen cső alakú membránból és egy külső burkoló köpenyből áll. Leggyakrabban szuszpenziók koncentrálására alkalmazzák. Egységnyi térfogatra vonatkoztatott membránfelület általában kisebb, mint 300
$m^2 \cdot m^{-3}$.

A kapilláris és az üreges rostmembránokat nagymennyiségű kapillárisból összefogott membránkötegekből tevődnek össze. Ezeket a 0,5-1,5 mm átmérőjű kapillárisokat műgyantába való beöntéssel rögzítik a szerkezetben, majd az egészet egy külső köpennyel látják el. A modulok teljesítménye könnyen befolyásolható aszerint, hogy mennyi és milyen hosszú kapillárisok alkotják azokat. A térfogategységre jutó effektív membránfelület értéke az előbbi membránmoduloknál a legnagyobb, 600-1200 $m^2 \cdot m^{-3}$. Hátrányuk, hogy a koncentráció-polarizációval és az eltömődéssel szemben érzékenyebbek (Bélafiné és Nemestóthy, 2020; Cséfalvay és Mika, 2008).

A membránmodulok működtetése alapvetően kétféle módon történhet: szakaszos (dead-end), valamint keresztáramlásos (cross-flow) üzemmódban (Bélafiné és Nemestóthy, 2020). Az előbbi a statikus szűrés (Dead-end filtration , *DEF*) estében a betáplálás a membránfelületére merőlegesen történik, így bizonyos idő elteltével koncentráció-polarizációs réteg alakul ki, amely szűrőréteget képezve jelentősen 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 keresztirányú üzemmódot (Cross-flow filtration, *CFF*) jellemzően az eltömődés csökkentésének céljából tervezték (Cheng és társai, 2021). Ebben az esetben a szeparálandó fluidumot membrán felületével párhuzamosan vezetik be, viszont a hajtóerők hatására a permeátum merőleges irányban távozik a rendszerből. A tangenciális módnak köszönhetően az eltömődés jóval kisebb arányú, hiszen a membrán felülete folyamatos mosó hatásnak van kitéve. Ezzel a betáplálási móddal a szűrés akár folytonossá is tehető. A membránszeparációs műveletek többségét keresztirányú üzemmód szerint hajtják végre (Cséfalvay és Mika, 2008; Hodúr és társai, 2012).



3. ábra *A membránmodulok működtetési formái (Cheng és társai, 2021)*

1.5. Membrános műveletek jellemző mutatói

Egy adott membrán teljesítményének, vagy pedig hatékonyságának jellemzése több paraméter megadásával történhet. Az egyik legfontosabb az áteresztőképesség, vagy más néven fluxus (*J*), amely nem más, mint a membránon egységnyi idő alatt áthaladó szűrlet térfogata. Ez az alábbi egyenlet (1) alapján számítható:

$$J = \frac{dV_{SZ}}{dt} \times \frac{1}{A_M} \text{ [L·m}^{-2}\text{· h}^{-1}\text{]} \qquad (1)$$

ahol, *J* a fluxus, vagyis a térfogatáramsűrűség [L·m^{-2}· h^{-1}], V_{sz} a szűrlet térfogata [m^3], A_M a membrán aktív felülete [m^2], *t* pedig az idő [s] (Bélafiné és Nemestóthy, 2020). A *TDK*-dolgozatom elkészítése során meghatároztam a relatív fluxus mértékét is, melyhez J/J_0 összefüggést alkalmaztam. Az egyenletben szereplő *J* az időpillanatban mért fluxus, J_0 pedig a kezdeti fluxus értéke.

A membrán szelektivitása a retencióval (*R*), azaz a visszatartással jellemezhető, amely megadja, hogy az adott komponensre nézve (pl. *KOI*), hogy a kiindulási oldat hány százaléka maradt vissza a retentátban. A visszatartás a következő egyenlettel (2) írható le:

$$R = \left(1 - \frac{c_{SZ}}{c_B}\right) \times 100 \text{ [\%]} \qquad (2)$$

ahol, *R* a visszatartás, vagy retenció [%], c_{SZ} az oldat koncentrációja a szűrletben [a KOI esetében mg·L^{-1}], c_B pedig az oldat koncentrációja a betáplálási oldalon. (Cséfalvay és Mika, 2008; Bélafiné és Nemestóthy, 2020).

A membránszeparációs műveletek célja gyakran a sűrítmény térfogatának minimalizálása, melynek mértéke a (3) egyenletben szereplő sűrítési aránnyal (*Volume Reduction Ratio, VRR*) fejezhető ki:

$$VRR = \frac{V_B}{V_B - V_{SZ}} \text{ [-]} \qquad (3)$$

ahol, V_B a betáplált anyag térfogata [m^3], V_{SZ} a szűrlet térfogata [m^3] (Kertész, 2011).

A membránszeparációs műveletek során az idő előrehaladtával azt tapasztalhatjuk, hogy az eljárás hatékonysága gyengül, a fluxusértékek pedig csökkenni kezdenek. Ezt a jelenséget a koncentráció-polarizáció (concentration polarisation), vagy a membrán eltömődés (fouling) idézheti elő. Az utóbbi mértékére az ellenállási értékek megváltozásából következtethetünk. Ideális esetben az ellenállást csupán a membrán saját ellenállása (R_M, Membrane Resistance) jelenti, viszont a gyakorlatban a teljes ellenállás (R_T) sokféle tényezőből tevődik össze, melyek a következők: R_M, R_{IRREV}, R_{REV} (Bélafiné és Nemestóthy, 2020). A membrán hidrodinamikai

ellenállása a szűrést megelőző vízfluxus mérésekből számítható, hiszen ebben az esetben még nem alakul ki polarizációs réteg a membrán felületén és a pórusok sem tömődnek el (Szép és társai, 2008). A tiszta membrán ellenállása a (4) egyenlettel adható meg:

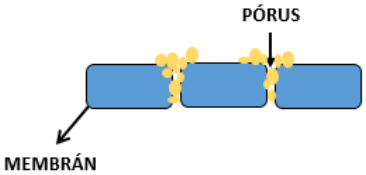
$$R_M = \frac{TMP}{J_{WB} \times \eta_W} [\%] \qquad (4)$$

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

A pórus eltömődés okozta ellenállási értékek (R_{IRREV}, R_{REV}) meghatározása a modul szétszerelése után, a membránfelület öblítését követően lehetséges. Ezt követően desztillált vízfluxus mérése szükséges. (*TDK*-munkám során a reverzibilis ellenállási értékeket a membrán felületen lerakódó anyagokból kialakúló, de egy egyszerű vizes öblítéssel eltávolítható rétegként értelmeztem, és az irreverzibilis ellenállási értékeket pedig azokkal azonosítottam, ami ezzel az egyszerű membrán felületi öblítéssel nem távolítható el.) Fontos megemlíteni, hogy a kémiai tisztítás mellőzése miatt a pórusokban lévő szennyezők az egyszerű mosásra nem reagálnak, továbbra is a helyükön maradnak, így ezek nagymértékben hozzájárulnak az irreverzibilis ellenállási érték (R_{IRREV}) növekedéséhez. A kimosódó szennyeződések ellenállásakor reverzibilis ellenállásról (R_{REV}) beszélhetünk. Az irreverzibilis ellenállás az (5) összefüggés alapján számítható:

$$R_{IRREV} = \left(\frac{TMP}{J_{WA} \times \eta_W} - R_M\right) [\%] \qquad (5)$$

ahol, *TMP* a transzmembrán nyomás [Pa], J_{WA} a membrán vízfluxusa [L·m^{-2}· h^{-1}] a szűrést követően, η_w a 25°C-os víz dinamikai viszkozitása [Pas], R_M a membránellenállás [%] (Kertész, 2011). Az irreverzibilis ellenállást az 4. ábra mutatja be.

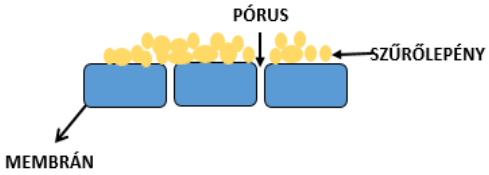


4. ábra *Irreverzibilis ellenállás kialakulásának elve (saját szerkesztés)*

A reverzibilis ellenállás értéke a következő egyenlettel (6) határozható meg:

$$R_{REV} = \left(\frac{TMP}{J_{SZW} \times \eta_{SZW}}\right) - R_M - R_{IRREV} [\%] \qquad (6)$$

ahol, *TMP* a transzmembrán nyomás [Pa], J_{SZW} a szennyvíz szűrésekor mért állandó fluxus [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$], η_{SZW} a szennyvíz dinamikai viszkozitása 25°C-on [Pas], R_M a membránellenállás [%], R_{IRREV} pedig az irreverzibilis ellenállás [%] (Kertész, 2011). A reverzibilis ellenállás kialakulásának elve az 5. ábrán látható.



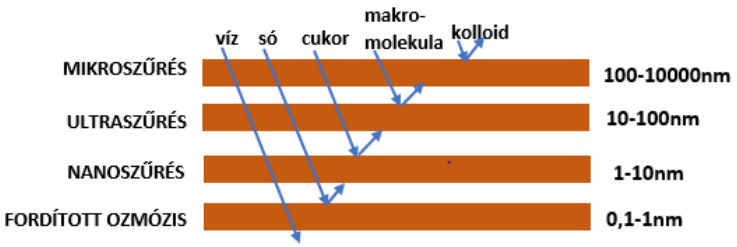
5. ábra *Reverzibilis ellenállás kialakulásának elve (saját szerkesztés)*

A három ellenállási érték összege megadja a teljes ellenállás (R_T) érétkét:

$$R_T = R_M + R_{IRREV} + R_{REV} \, [\%] \qquad (7)$$

1.6. Nyomáskülönbségen alapuló eljárások

A nyomáskülönbségen alapuló membrános eljárások hajtóereje a membrán két oldala között fennálló nyomáskülönbség. A nyomásvezérelt eljárások során alkalmazott membrán típusát a szűrendő oldott anyagok, vagy pedig a részecskék mérete határozza meg. A különböző mérettartományoknak megfelelően a következő membránszeparációs eljárásokat fejlesztették ki: mikroszűrés (microfiltration, *MF*), ultraszűrés (ultafiltration, *UF*), nanoszűrés (nanofiltration, *NF*) és fordított ozmózis (reverse osmosis, *RO*). Az előbb említett membránszűrési eljárások méret szerinti alkalmazhatóságát a 6. ábra foglalja össze. A mikroszűréstől a fordított ozmózis irányába a szeparálandó részecskék mérete egyre csökken, ebből adódóan az alkalmazott membrán pórusmérete is egyre kisebb. Az agyagátadási ellenállási értékek növekedése miatt, ugyanazon fluxus eléréséhez a nyomáskülönbséget fokoznunk kell. A részecskeméret növekedésével, egyre nagyobb pórusméretű membrán alkalmazása válik szükségessé, így azok kisebb ellenállásának köszönhetően a jellemző nyomásértékek is csökkennek (Bélafiné és Nemestóthy, 2020; Luis, 2018).



6. ábra *Nyomáskülönbségen alapuló membrános eljárások mérettartomány szerinti csoportosítása (saját szerkesztés)*

1.6.1. Mikroszűrés (*MF*)

A mikroszűrés (*MF*) olyan nyomáskülönbség szerinti membrános eljárás, melyet legfőképp víz-, és szennyvíztisztítási folyamatok előkezelési lépéseként, vagy pedig vízkezelési technológiák részeként alkalmaznak. Legelőször az 1980-as évek végén, a vizek esztétikai tulajdonágainak (pl. szín) javítására, valamint a kórokozók eltávolítására használták. A mikroszűrők pórusmérete (0,1-10μm) a szuszpenziók és emulziók mérettartományába esik, így velük közel azonos méretű mikroorganizmusok (baktériumok és gombák), kolloidok, lebegő és úszó részecskék leválasztására alkalmasak (www.oktatas.ch.bme.hu). Az *MF* membránok főleg kerámiából (alumínium-oxid, titán-dioxid), különféle polimerekből (polipropilén, (*PP),* poliszulfon (*PS*)), valamint szervetlen anyagokból (fém, üveg) készülnek (Szép, 2013). Szerkezetileg szimmetrikusak és aszimmetrikusak is lehetnek. Napjainkban a szennyvíztisztításon túl, biotechnológiai, élelmiszeripari, valamint gyógyszeripari területeken is egyaránt alkalmazzák (Priya és társai, 2020).

1.6.2. Ultraszűrés (*UF*)

Az ultraszűrés (*UF*) egy igen elterjedt elválasztási technológia, melyet számos iparágban alkalmaznak. Eredetileg frakcionálási célokra hozták létre az 1960-as évek végén. Az innovatív megoldásoknak köszönhetően, azóta az *UF* membránok vegyi anyagok visszanyerésére, sejtek összegyűjtésére, fermentációs enzimek tisztítására és akár gyümölcslevek sűrítésére is felhasználhatók. Mindemellett gyakran alkalmazzák, víz- és szennyvíztisztítási kezelésekkor a szerves anyagok, íz- és szagvegyületek, valamint peszticidek eltávolítására (Aani és társai, 2020). A mikroszűrő membránokhoz hasonlóan ezek is pórusosak, viszont kisebb méretűek (0,005-0,5μm), így csak sók és kisméretű molekulák képesek átjutni rajtuk (www.oktatas.ch.bme.hu). Az *UF* membránok szétválasztási tartományai a vágási értékkel (Molecular Weight Cut Off, *MWCO*) is jellemezhetők. Ez nem más, mint Daltonban kifejezett globuláris fehérjére vonatkoztatott móltömeg érték, melyet a membrán a szűrés során 90%-ban visszatart. Ez tehát azt jelenti, hogy az ultraszűrés egy olyan membránszeparációs eljárás, amellyel az 1000 Daltonnál nagyobb molekulatömeggel rendelkező molekulák leválasztása lehetséges (Szép; 2013). Az *UF* membránokat manapság poliszulfonból (*PS*), poliéter-szulfonból (*PES*), polivinilidén-fluoridból (*PVDF*), illetve poliakrilnitrilből (*PAN*) készítik fázisinverziós módszer segítségével (Kaya és társai, 2023). A

poliszulfon (*PS*) membránok egyik előnye, hogy az oxidációval szemben ellenállóbbak. Ez a bennük lévő kénatom legmagasabb oxidációs állapotával és a szulfon-csoport elektronvonzó képességével magyarázható. Ennek a tulajdonságnak köszönhetően a savakkal, lúgokkal, magas sótartalommal és hőmérsékelttel szemben a *PS* ultraszűrő membrán jobban ellenáll (Renner és Abd-El-Salam, 1991). A polimereken kívül szervetlen kerámia anyagokat is felhasználhatnak ezekhez a membránokhoz (Bélafiné és Nemestóthy, 2020).

Az ultraszűrési technológia bevezetése lehetővé teszi jó néhány iparág számára, hogy környezetkímélővé váljanak azáltal, hogy egy energiahatékony, vegyszermentes szeparációs módszert alkalmaznak a gyártási folyamataik során (Aani és társai, 2020).

1.6.3. Nanoszűrés (*NF*)

Nanoszűrést abban az esetben alkalmaznak, ha kis molekulatömegű oldott anyagok (pl.sók), vagy apró szerves molekulák (pl.glükóz) oldószertől való elválasztása a cél. Az *NF* membránok ultraszűréshez képest jóval kisebb (1-10nm) pórusmérettel és ezáltal pedig nagyobb ellenállással rendelkeznek. Ennél fogva a működtetéshez nagyobb transzmembrán nyomás szükséges. Vágási értékük jellemzően 100-1000 Da. A nanofiltrációt gyakran használják vízlágyításhoz, növényi olajok finomításához, illetve nehézfémek kiszűréshez is (www.oktatas.ch.bme.hu; Oatley-Radcliffe és társai, 2017).

1.6.4. Reverz ozmózis (*RO*)

A fordított ozmózis a legfinomabb szűrésnek tekinthető a membránszeparációs módszerek közül, mivel a permszelektív membránon gyakorlatilag csak az oldószert alkotó molekulák képesek átjutni. Az *RO* membránok visszatartása így az oldott sókra nézve 99-99,9%-os (www.oktatas.ch.bme.hu). Ha a reverz ozmózis során a transzmembrán nyomás értéke kisebb, mint az ozmózisnyomás, a víz a hígabb oldat felől a töményebb felé fog áramlani. Ahhoz, hogy a víz a töményebb oldat felől a hígabb felé áramoljon az *RO* ozmotikus nyomásától nagyobb nyomást kell alkalmazni (Kertész, 2011; Saleem és Zaidi, 2020). Az *RO*-technikát gyakran használják tengervizek és ipari szennyvizek sótalanítására, élelmiszer- és üdítőital-ipari célokra, valamint biokémiai és gyógyszeripari elválasztásokra (Szép, 2013; Goh és társai, 2022).

1.7. Háromdimenziós (3D) nyomtatás

A 3D nyomtatás nem más, mint különböző digitális modellek alapján történő háromdimenziós termékelőállítás. Eredetileg gyors prototípuskészítés, szabad formájú, illetve

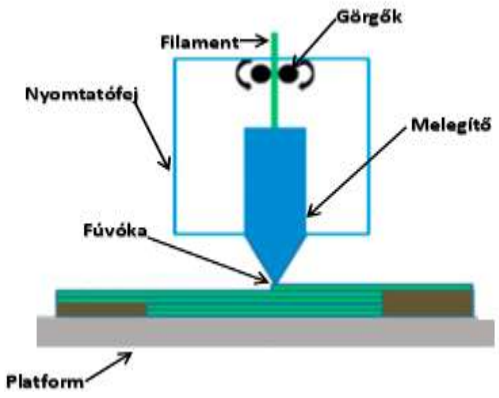
réteges gyártás néven vált ismertté. Ezt követően 2012-ben hivatalosan is egyesítették a különféle technológiák elnevezését és így az additív gyártás (Additive Manufacturing, *AM*) nevet kapta. Általában minden *AM* folyamat öt nagyobb lépésből tevődik össze, melyek a következők: 3D modellezés, adatkonverzió és továbbítás, ellenőrzés és előkészítés, építés és utófeldolgozás. A 3D nyomtatott objektumokhoz különböző polimereket, fémeket és azok ötvözeteit, kerámiákat, valamint kompozitokat használnak. Napjainkban az *AM* módszerek közül a szálhúzásos (Fused Deposition Modelling, *FDM*), a sztereolitográfia (*SLA*), a szelektív lézeres szinterezés (*SLS*), illetve a laminált objektum gyártás (Laminated Object Manufacturing, *LOM*) a legelterjedtebb.

A sztereolitográfia (*SLA*) az első olyan 3D nyomtatási eljárás, amelyet piacra dobtak. Ennél a különleges módszernél a 3D elemeket gyantapolimerből készítik. A 3D objektumok megalkotásához először egy lézerrel felmelegítik az UV-re megszilárduló fotopolimer folyadék felületét, ami a besugárzás hatására azonnal megkeményedik.

A szelektív lézeres szinterezés (*SLS*) szintén egy additív gyártási technológia, amelynél por polimert használnak a 3D objektumok létrehozásához. Az *SLS*-ben CO_2 lézer segítségével meghatározzák a kívánt geometriát, majd ezt követően a kamrák belsejében a por polimert az olvadáspont alá hevítik. A felhevített műanyag részek összeolvadnak és szilárd testet képeznek.

A laminált objektum gyártás (*LOM*) olyan *AM* gyártási eljárás, amely során a 3D elemeket egymáshoz ragasztott papír, vagy műanyag laminátumokból képezik. Először a laminátumot rögzítik egy hordozóhoz, majd lézerrel megfelelő méretre vágják az alakzatot. Ezt követően egy friss fémlapot hengerelnek a meglévő pozícióba, majd újabb réteget hoznak létre.

A szálhúzásos (*FDM*) technológia egy olyan eljárás, ahol az olvadékextrudálási módszert termikus műanyag szálak meghatározott mintázat szerinti leválasztásra használják. Mivel a *TDK*-dolgozati méréseimhez *FDM* eljárással készült eszközt (az ultraszűrő cellába illesztett promótert) is alkalmaztam, ezt a 3D nyomtatási módszert bővebben ismertetem. A *FDM* berendezés felépítését a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra *A szálhúzásos 3D nyomtató felépítése (Lee és társai, 2016)*

Első lépésként a készülék nyomtatófeje a görgők segítségével a beérkező alapanyagot, a filamentet olvadáspontig hevíti, majd a fúvóka segítségével réteget képez a felmelegített platformon. A fúvóka és az építő platform egymáshoz képest elmozdulhatnak. Ezt a mozgást kihasználva a fúvóka képes rétegről-rétegre haladni és felépíteni a kívánt objektumot (Lee és társai, 2016; Jadhav és Jadhav, 2022).

1.7.1. A 3D nyomtatás lehetséges szerepe a membránszeparációban

A membrános eljárásokkal kapcsolatos legfőbb kihívást a membránok eltömődése okozza, melynek kialakulásához döntően a szennyező anyagok (pl. mikróbák, szerves és szuszpendált anyagok) membrán póruson belüli és a felületen történő lerakódása vezet. Az eltömődés visszafordíthatatlannak tekinthető, ha a lerakódást vagy szennyeződést okozó anyagok a membrán pórusaiban halmozódnak fel. Reverzibilis szennyeződésről viszont akkor beszélhetünk, ha a lerakódó anyagok, (pl. nagyméretű molekulák, vagy molekulákhoz aggregálódott ionok) döntően a membrán felületén szűrőlepényt képezve rakódnak le. A membrán eltömődésének jelensége nem elhanyagolható, hiszen nagymértékben befolyásolhatja a membránszeparációs eljárások hatékonyágát. A lerakódások miatt, ugyanis csökkenhet a permeátum mennyisége, a fluxus értékek nagysága és a membrán élettartama is. Az elmúlt években számos kutatást végeztek a membrán eltömődési mechanizmusának megértésének és a lerakódási hajlam csökkentésének céljából. Az eredmények azt bizonyították, hogy a megoldás a membránmodulok hidrodinamikai feltételeinek megváltoztatásában is rejlhet (Dang és társai, 2021).

Az eltömődés mértéke egyrészt csökkenthető, ha a membránmodulban nagyobb mechanikai keverést biztosítunk, mivel a megnövekedett nyírási sebesség hatására kevesebb részecske tud majd a membrán felületén megtapadni.

A keverési sebesség változtatásán kívül, megoldásként szolgálhatnak az egyszerű műanyag távtartók és a 3D nyomtatott promóterek alkalmazása is. A membránmodulba helyezett akadályokkal, ugyanis a határréteg lamináris áramlási profilja megbontható, ezáltal örvények, lokális turbulenciák indukálhatók az áramlási mezőben. A turbulens áramlásnak köszönhetően, a membrán koncentráció-polarizációja és a membrán felületi lerakódások hajlama csökkenthető (Baitalow és társai, 2021). Fodor és társai a promóterek használata során azt tapasztalták, hogy a permeátum fluxus értékek növekedtek, a membránellenállás pedig csökkent (Fodor és társai, 2022).

Az intézményünkben lévő kutatócsoport (Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Biológiai Rendszerek Műszaki Intézete, Membrán- és Környezettechnikai Kutatócsoport: *MEKÖKUT*) munkájának köszönhetően, a *TDK*-dolgozati méréseim során 3D nyomtatással készült távtartóval is dolgozhattam. Egyetemünk volt alapszakos biomérnök hallgatója, Huszár Gabriella szakdolgozati munkájában korábban 6 db egyedi tervezésű 3D nyomtatott promótert tesztelt, melyek hozzájárultak a szűrési tulajdonságok javulásához. A kapott eredmények alapján a legnagyobb javulást a 150 kDa vágási értékű membrán esetében, a harmadikként vizsgált 3D törőelem/spacer/promóter (Spacer 3) eredményezte (Huszár, 2021). Ezért én a *TDK*-munkám során, a témavezetőm javaslatára, és az előbbieket szem előtt tartva, a méréseimhez csak a legjobbnak bizonyult promótert (Spacer 3) használtam és a továbbiakban részletesen tanulmányoztam. Célként különböző keverési sebességek hatásait kutattam, az ultraszűrési tulajdonságokra vonatkozóan, a cellába integrált promóterekkel és azok nélkül.

1.7.2. Modellezés

A 3D nyomtatott promóterek hatásainak, valamint a membráneltömődés jelenségének jellemzése és megfelelő leírása, értelmezése fél-empirikus és empirikus matematikai modellekkel segítségével történhet. *TDK*-dolgozati munkám során egy félempirikus matematikai modellel dolgoztam, mely a Hermia nevet viseli. A következőkben ezt szeretném bővebben ismertetni.

A Hermia egy olyan félempirikus matematikai modell, amely lehetővé teszi a permeátum csökkenésének leírását. Ez a modell a klasszikus, állandó nyomású szűrési eljáráson alapszik. Alkalmazásával a membrán eltömődés négy alapvető típusa azonosítható, melyek az alábbiak lehetnek: teljes blokkolás, közbenső blokkolás, standard blokkolás és iszaplepény szűrés. A Hermia-féle modell a (8) egyenlettel írható le:

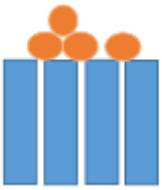
$$\frac{d^2t}{dV^2} = K(dt/dV)^n \qquad (8)$$

ahol, t a szűrési idő [s, min, h], V a szűrlet térfogata [m^3], K [-] és n [-] pedig az eltömődési modellek paraméterei.

A teljes blokkoló modell szerint azok a molekulák, melyek elérik a membrán felületét, teljesen elzárják a membrán pórus bejáratát. Ráadásul a membrán felületéhez tapadt molekulákra nem rakódnak újabbak. A blokkolás a membrán felületén történik, nem pedig a pórusokban. Ezeket a feltevéseket szem előtt tartva n értéke egyenlő 2-vel. A 8. ábra a teljes blokkolási modell által figyelembe vett szennyeződési mechanizmust mutatja be.

8. ábra *A teljes blokkolás kialakulásának mechanizmusa (saját szerkesztés)*

A közbenső blokkolási modell a teljes blokkolási modellhez hasonlóan kimondja, hogy a membrán felületét elérő molekulák képesek elzárni a membrán pórusokat. Ez a modell kevésbé korlátozó, mivel úgy véli, hogy egyes molekulák lerakódhatnak a már korábban leülepedett molekulák felszínén. Ezzel a modellel megbecsülhetjük, hogy a membrán felületére érkező molekula mekkora valószínűséggel blokkolja majd a membrán pórusait. Ebben az esetben n=1. A közbenső blokkolás által figyelembe vett szennyeződési módot a 9. ábra szemlélteti.

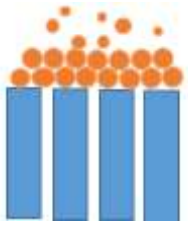


9. ábra *A köztes blokkolás kialakulásának mechanizmusa (saját szerkesztés)*

A standard blokkoló modell azt feltételezi, hogy a molekulák mérete kisebb mint a membrán pórusmérete, így azok könnyedén bejutnak a pórusokba. A blokkolás a pórusokon belül történik, ezért a membrán pórusok mennyisége arányosan csökken a szűrlet térfogatával. Ennél a blokkolási modellnél n= 1,5. A standard blokkolás által figyelembe vett szennyeződés mechanizmusát a 10. ábra jeleníti meg.

10. ábra *A standard blokkolás kialakulásának mechanizmusa (saját szerkesztés)*

Az utolsó Hermia-féle modell az iszaplepény modell, amely szerint a molekulák képesek felhalmozódni a membrán felületén úgy, hogy egy porózus iszaplepényt (cake) képezzenek. Ebben az esetben is igaz, hogy a molekulák mérete nagyobb, mint a membrán pórusoké, így nem képesek közéjük hatolni (Vela és társai, 2008; Hodúr és társai, 2021). Az iszaplepény modell szennyeződési mechanizmusát a 11. ábra ismerteti.



11. ábra *Az iszaplepény blokkolás kialakulásának mechanizmusa (saját szerkesztés)*

1.8 A szennyvíztisztítás energiafelhasználása

A jelenlegi kutatások alapján a szennyvizek hatékony kezelése, valamint a víz újrafelhasználása enyhítheti a vízhiányt, de a hagyományos szennyvíztisztítási eljárások nagymértékű energiafelhasználása újabb problémák kialakulásához vezethet. Például a háztartási szennyvíztisztító telepeken alkalmazott eleveniszapos eljárás, körülbelül 0,6 kWh energiát fogyaszt köbméterenként. Az Amerikai Környezetvédelmi Ügynökség (United States Environmental Protection Agency, *EPA*) beszámolt arról, hogy az Egyesült Államokban a szennyvíztisztítással foglalkozó cégek, a teljes villamosenergia fogyasztás 1-3%-át teszik ki. Az Egyesült Nemzetek Nevelésügyi, Tudományos és Kulturális Szervezetének (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation, *UNESCO*) felmérése alapján világszerte 1,3 milliárd ember számára nem áll rendelkezésre könnyen elérhető villamosenergia és a rohamos népességnövekedés miatt, 2035-re a villamosenergia iránti igény akár 70%-kal is megnövekedhet (Yuan és He, 2015).

TDK-dolgozati munkám legfőbb célja, egy membránszeparációs eljárásokhoz tartozó módszer, az ultraszűrés részletes vizsgálata, és a cellába integrálható promóter hatására bekövetkezett áramlási viszonyok javításának elemzése. Mélyen hiszem, hogy pusztán fizikai módszerek alkalmazásával (pl. keverés, promóter cellába illesztés), a környezetvédelem szempontjait is figyelembe véve, egy olyan mérnöki tervezésen alapuló eljárások kombinációja használható sikeresen, amely akár a hagyományos tisztítási technológiákkal együtt, vagy azok részeként jelentős hatékonyságnövelést eredményezhet.

A jelenlegi kutatási eredmények alapján úgy vélem, hogy a membránszeparációs módszerek kiváló kiegészítő eljárásokként funkcionálhatnak a már meglévő hagyományos szennyvíztisztítási technológiákkal együtt, vagy pedig részlépésükként alkalmazva. Akár elő-, akár utókezelésként is számos tudományos közleményt találtam, amiben arról számoltak be, hogy a membránszeparációs előkezeléseknek köszönhetően a kibocsájtáshoz, vagy újrafelhasználáshoz előírt vízminőséget kaptak (Kamranvand, 2020). Az elmúlt évtizedekben a membrános műveletek közül az ultraszűrés volt, azaz eljárás, amely egyre nagyobb teret hódított a biológiai szennyvíztisztítás területén is, hiszen az ultraszűrő membrán

pórusméretének köszönhetően az íz- és szaganyagok, a peszticidek, valamint a vírusok eltávolítása is lehetséges (Aani és társai, 2020). A számos kiemelkedő szűrési tulajdonság, és a hagyományos tisztítási eljárások magas energiafelhasználása miatt, különösen fontosnak tartottam az ultraszűrés energetikai szempontok szerinti vizsgálatát is. A kutatómunkám során, így az alábbi energiafelhasználásra jellemző mutatókat tanulmányoztam: feszültség, áramerősség, frekvencia, hatásos, és látszólagos teljesítmény, teljesítménytényező, havi, valamint éves teljesítményfelvétel. A következőkben az imént felsorolt mutatókat szeretném részeletesebben ismertetni.

Az elektronok mozgatásakor az elektromos mező munkát végez, melynek következtében a testek elmozdulhatnak. Az elektromos mező munkavégző képessége az elektromos feszültséggel jellemezhető. Az elektromos feszültség (*U*) megmutatja, hogy mennyi munkát végez az elektromos mező, miközben 1C töltést áramoltat az egyik pontból a másikba (www.zrinyi-encs.edu.hu). Az elektromos feszültéség a (9) egyenlet alapján számítható:

$$U=\frac{W}{Q}\ [\mathrm{V}] \qquad (9)$$

ahol, *U* az elektromos feszültség [V], *W* az elektromos munka [J], *Q* pedig az áramoltatott töltés nagysága [C].

Az áramerősség (*I*) a vezető keresztmetszetén egységnyi idő alatt áthaladó töltésmennyiséget jellemző fizikai mennyiség, melynek nagysága a (10) összefüggéssel adható meg:

$$I=\frac{Q}{t}\ [\mathrm{A}] \qquad (10)$$

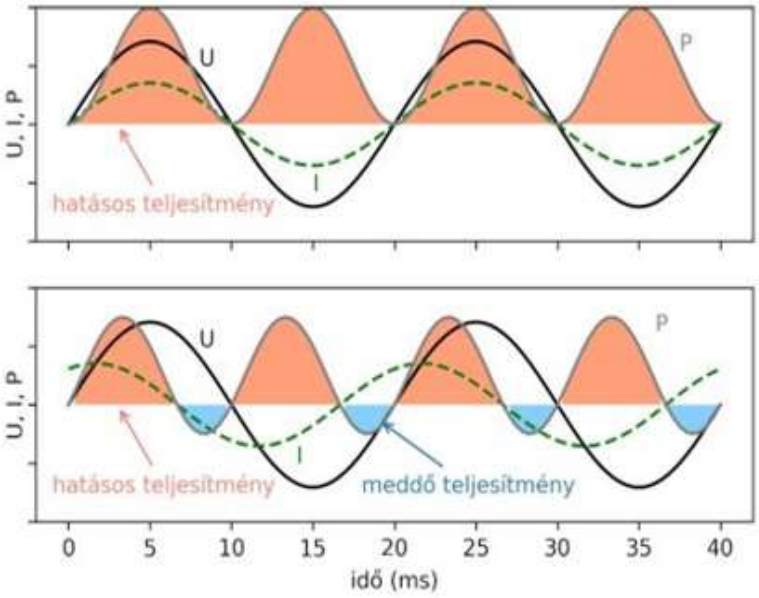
ahol, *I* az áramerősség [A], *Q* áramoltatott töltés nagysága [C], *t* az eltelt idő [s]. Amennyiben az áram erőssége időben állandónak tekinthető egyenáramról, ha viszont az áramerősség nagysága az idő elteltével megváltozik, váltóáramról beszélhetünk. Az egységnyi idő alatt végbemenő polaritás változások hatására, a váltóáramot létrehozó elektromos feszültség ismétlődően ellentétes értékeket vesz fel. Ez a periodikus változás a frekvenciával jellemezhető. Az európai országokban a hálózati áram 50 Hz frekvenciájú, amely azt jelenti, hogy az elektronok másodpercenként ötvenszer az egyik és ötvenszer a másik pólus irányába vándorolnak (www.energiapedia.hu). A frekvencia a (11) képlettel számolható:

$$f=\frac{1}{T}\ [\mathrm{s^{-1}};\ \mathrm{Hz}] \qquad (11)$$

ahol, *f* a frekvencia [s^{-1}; Hz], *T* pedig periódusidő [s].

A teljesítmény (*P*) az áramerősség (*I*) és a feszültség (*U*) szorzata. A váltóáramú hálózatok esetében az áramerősség és a feszültség értéke az időben ingadozik, így pillanatnyi értéküknek megfelelően a teljesítmény is változik. A hálózatok szempontjából ideálisnak

tekinthető, ha az áramerősség (*I*) és a feszültség (*U*) görbék az időben együtt haladnak, ahogy ez a 12. ábra felső részén látható. Ebben az esetben hatásos teljesítményről (P_h) beszélhetünk, hiszen a teljesítmény értéke pozitív. Előfordulhat azonban, hogy az áramerősség és a feszültség görbék az időben egymástól eltolva haladnak, ahogyan ezt a 12. ábra alsó diagramja is szemlélteti. Ekkor a teljesítmény értéke negatív, tehát meddő teljesítményről van szó.



12.ábra *A hatásos és a meddő teljesítmény görbék*
(forrás: www.vled.hu, 2019)

A látszólagos teljesítmény (P_l) a hatásos és a meddő teljesítmény összegeként számolható(www.vled.hu, 2019).

A hatásos és a látszólagos teljesítmény közötti fáziseltérés nagysága a teljesítménytényezővel ($cos\varphi$) fejezhető ki (www.uni-miskolc.hu).

TDK-dolgozati munkám során meghatároztam, továbbá a havi teljesítményfelvétel forintban és az éves teljesítményfelvételt [kWh], valamint az ultraszűrő keverőegység teljesítményfelvételét [$kWh \cdot m^{-3}$] mértékegységben kifejezve.

Kutatómunkám fókuszában tehát, az ultraszűrő keverőegység teljesítményfelvételének elemzése állt, melyet a megnövelt keverési sebességek és a cellába illeszthető 3D nyomtatott promóter alkalmazása melletti keverési sebesség növelés hatásainak függvényében is vizsgáltam. Az így kapott eredmények %-os javulás szerinti ismertetését hasznosabbnak véltem, mint a konkrét értékek bemutatását.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

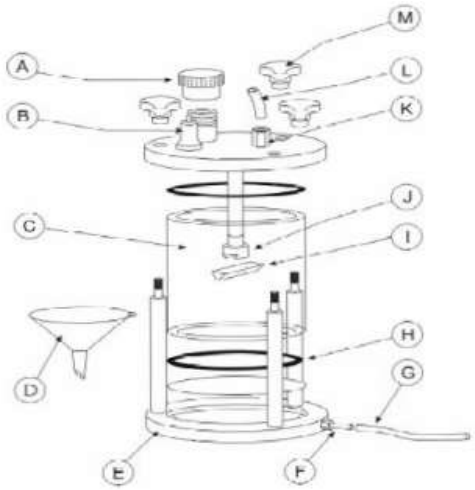
2.1. Modellszennyvíz előállítása

Laboratóriumi munkám során minden mérés előtt frissen összeállított 5g/l koncentrációjú tejipari modellszennyvizet használtam, melyet 5g sovány tejporból (Tutti Kft, Magyarország) és 0,5g C180 elnevezésű anionos detergensből (Sole-Mizo Zrt., Szeged, Magyarország), valamint 25°C hőmérsékletű csapvízből készítettem el. Az elegy homogenizálását minden esetben 30 percig mágneses keverővel végeztem.

Azért készítettem 5g/l töménységű modellszennyvizet mert a szakirodalom szerint a tejipari szennyvizek szerves anyag koncentrációja átlagosan 5g/l, így a tejpor és a detergens ilyen arányú oldata közelíti meg legjobban a valós tejipari szennyvizek koncentráció értékét.

2.2. Membránszűrő berendezés felépítése

Kutatómunkámhoz egy kevertetett micellaképződéssel elősegített ultraszűrő laboratóriumi berendezést (Merck Millipore, Németország) használtam. A mérésekhez az aktív szűrési felületet, egy 0,0040 m^2-es, 150 kDa vágási értékű, poléter-szulfon (*PES*) membrán szolgáltatta, mely az ultraszűrő berendezés alján (egy vékony, fél mm-es támasztó rácsfóliára helyezve) került elhelyezésre. A szűréshez szükséges transzmembrán nyomást nitrogén gáz (Messer, Magyarország) bevezetésével biztosítottam. A folyamatos kevertetést a reaktor közepén felfüggesztett mágneses keverő végezte. A permeátum elvezetése a cella alján lévő műanyag csövön keresztül történt. A permeátum mennyiségének nyomon követhetősége érdekében az elvezetéshez egy mérleget helyeztem, így a szűrlet pontos mennyiségének meghatározása minden időpillanatban lehetséges volt. Az ultraszűrő berendezés felépítését a 13. ábra szemlélteti.



13. ábra *Kevertetett ultraszűrő cella sematikus ábrája*
(forrás: műszer gépkönyve)
A*: nyomáscsökkentő sapka,* ***B****: biztonsági szelep,* ***C****:boroszilikát üveg,* ***D****: tölcsér,* ***E****:alaplemez,* ***F****: permeátum kifolyó nyílás,* ***G****: szűrletgyűjtő cső,* ***H****: kör alakú tömítő O-gyűrű,* ***I****:mágneses keverő,* ***J****: keverő befogófeje,* ***K****: a nyomás bemeneti nyílás tefloncsővel palackból,* ***L****: nitrogén palack kimeneti tefloncsöve,*
M*: rögzítő csavarok*

2.3. 3D nyomtatott promóter alkalmazása és jellemzői

Ahogyan azt már említettem, *TDK*-dolgozati méréseimnél egyetlen, korábban, egy másik hallgató által (6 db közül) a legjobbnak választott 3D nyomtatott promóterrel dolgoztam. Az áramlástani viszonyok javítása céljából két fő kérdést akartam részletesen megvizsgálni. Az egyik, hogy a keverési sebességet növelve milyen hatások érhetők el a szűrésre vonatkozóan, illetve, hogy a promótert szűrőcellába, a membrán felületére illesztve, milyen további hatékonyságjavulás érhető el. A promóter úgy lett megtervezve, hogy az alsó részén 2 db körgyűrűn támaszkodik a membrán felületére. Ezek közül az egyik, a külső gyűrű a tömítő O-gyűrűhöz szorosan illeszkedik, így a keverés hatására sem tud elmozdulni. A promóter vázát képező körgyűrűket terelőoszlopok kötik össze, melyek száma és helyzete nagymértékben befolyásolhatja az elválasztani kívánt anyagok áramlási viszonyait. A korábban legjobbnak bizonyult, általam választott, promótert a 14. ábra mutatja be.

14. ábra *Általam használt 3D nyomtatott promóter (saját kép)*

A promóter jellemzői: anyaga politejsav (*PLA*) alapú kompozit filament, a nyomtatása *FDM* technológiával történt (Fusion 360 szoftverben tervezve és Ultimate Cure 5.0.0 programban szeletelve) Creality CR-10S Pro V2 típusú 3D nyomtatóval (Kína), 0,2 mm rétegvastagsággal, 100%-os kitöltési sűrűséggel, 60°C-os tálca, valamint 215°C-os nyomtatási hőmérsékleten.

2.4. Energiafogyasztásmérő műszer

TDK-dolgozati munkám legfőbb célja az energiahatékonyság vizsgálata az ultraszűrő keverőegységben, melyhez a Voltcraft Energy-Logger 4000 műszert alkalmaztam. Az Energy-

Logger 4000 háromsoros kijelzőjén az energiafogyasztás mellett a hatásos- és látszólagos teljesítmény, CosPhi hatékonysági tényező, az áramerősség, frekvencia, valamint a feszültség értékek is leolvashatók. A méréseim során a műszerhez az ultraszűrű berendezés energiafogyasztó egységeit (pl. mágneses keverő, mérleg) csatlakoztattam. A 15. ábrán a Voltcraft Energy-Logger 4000 műszer látható.

15. ábra *Voltcraft Energy-Logger 4000 energiafogyasztómérő (forrás: www.conrad.hu)*

2.5. Analitikai vizsgálatok mérőműszerei

A szűrés során kapott mintákon analitikai vizsgálatokat is végeztem, melyek a következők voltak: pH, vezetőképesség, lebegőanyag- és szerves anyag tartalom meghatározás.

A kiindulási modellszennyvizek és a szűrlet kémhatását (Thermo Scientiifc Orion 5-Star Plus Multifunction Benchtop Meter, Egyesült Államok), valamint vezetőképességét (Consort C535 Basic Multi-parameter Analyser, Belgium) multiméterekkel határoztam meg. Az említett berendezéseket a 16. ábra mutatja be.

16. ábra *Zavarosság és pH méréshez használt műszerek (saját kép)*

A minták lebegőanyag-tartalmát [NTU] mértékegységben kifejezve, (Hach 2100N Turbidimeter, Egyesült Államok) zavarosságmérővel határoztam meg, melyet a 17. ábra szemléltet.

17. ábra *Lebegőanyag-tartalom meghatározásához használt turbidiméter (saját kép)*

A membránszűrést követően a kiindulási modellszennyvíz, a koncentrátum és a permeátum szerves anyag tartalmát is vizsgáltam. Meghatározásuk kémiai oxigénigény (*KOI*) mérésekkel történt. A mérés elején a mintákból 1ml-t pipettáztam a *KOI* tesztcsövekben lévő (kálium-bikromát tartalmú) reagensekhez, melyek méréstartománya 15000 mg/l volt. Ezután a tesztcsövek tartalmát 150°C-on, 2 órán keresztül roncsoltam az ECO 16 roncsoló blokkban (VELP Scientifica srl., Olaszország). A roncsolás végezetével a szobahőmérsékletre hűlt tesztcsöveket egy fotométerbe (Lovibond PC CheckIt fotométer, Németország) helyeztem, amely a minta *KOI* értékét [g/l] mértékegységben kifejezve adta meg. Az előbb említett berendezések a 18. ábrán láthatók.

18. ábra *KOI meghatározáshoz használt roncsoló blokk (saját kép) és a fotométer (forrás: wwww.astralpool.com)*

2.6. A mérés menete

A tejipari modell szennyvíz elkészítését követően a 13. ábra alapján összeszereltem a kevertetett ultraszűrő berendezést. A szennyvizes méréseket megelőzően, 15 percig, 1 bar nyomáson desztillált vízzel járattam az ultraszűrőt, hogy a membrán pórusait kellően átjárja a víz. A tiszta membrán jellemzésének céljából, egy stopperóra segítségével meghatároztam 100g, illetve 150g permeátum kifolyási idejét. Miután ezt háromszor megismételtem, a desztillált vizet elvezettem a rendszerből és a helyére 100g tejipari modellszennyvizet töltöttem. Az ultraszűrés során az alkalmazott transzmembrán nyomás nagysága minden esetben 4 bar, a szűrendő oldatok hőmérséklete pedig 25°C volt. A membránszeparációt különböző keverési

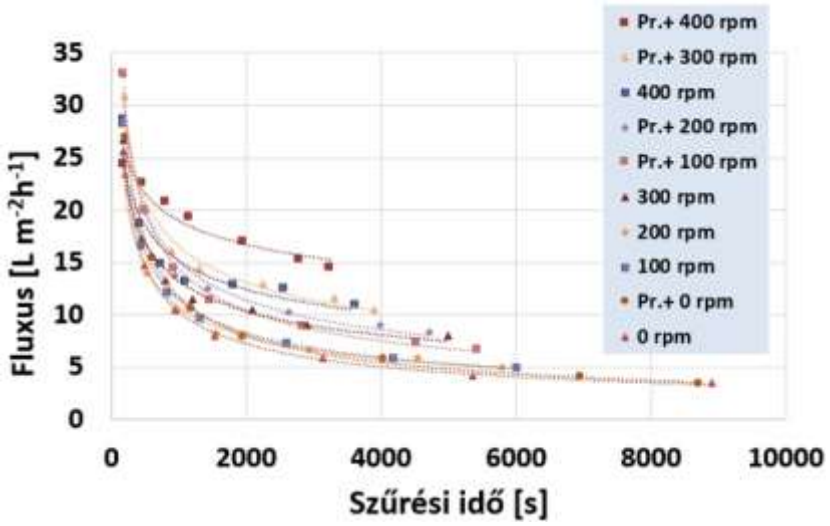
sebességeken (0 rpm, 100 rpm, 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm), kétszeres sűrítési arányig (*VRR*=2) végeztem. Az előbb említett szűrési paraméterek mellett meghatároztam 10g, 15g, 20g, 25g, 35g, 45g és 50g tömegű szűrlet kifolyási idejét. A sűrítmény eltávolítás után szétszereltem az ultraszűrő cellát, hogy a membrán felületén lévő esetleges lerakódásokat eltávolíthassam. Az egyszerű desztillált vizes mosást követően, a membránt visszahelyeztem a berendezésbe és újabb vizes szűréseket végeztem. Ahhoz, hogy megtudhassam mekkora a membrán eltömődésének a mértéke ismét a permeátum kifolyási idejét mértem. Ezután a kiindulási szennyvizeket, illetve a permeátumot különböző analitikai szempontok alapján vizsgáltam. Meghatároztam az oldatok kémhatását, vezetőképességét, lebegőanyag-, valamint a szerves anyag tartalmát az előző fejezetben említett műszerek segítségével. A *TDK*-dolgozati munkám során az imént említett méréseket promóter alkalmazás mellett is megismételtem.

Az ultraszűrő berendezés energiafelhasználásának megállapításához a 17. ábrán látható Voltcraft Energy-Logger 4000 műszert használtam. Az energetikai vizsgálatok a feszültség, áramerősség, frekvencia, hatásos- és látszólagos teljesítmény, valamint a teljesítménytényező mutatók méréséből álltak, melyek értékét 10 percenként ellenőriztem. A vizsgálataim célja az volt, hogy felmérjem, mennyi energiát fogyaszthat az ultraszűrő keverőegység nyugalmi állapotban, illetve desztillált víz és modellszennyvíz szűrése közben a megváltoztatott keverési sebességek (100 rpm, 200 rpm, 300 rpm, 400 rpm) és a 3D promóter beintegrálásának hatására.

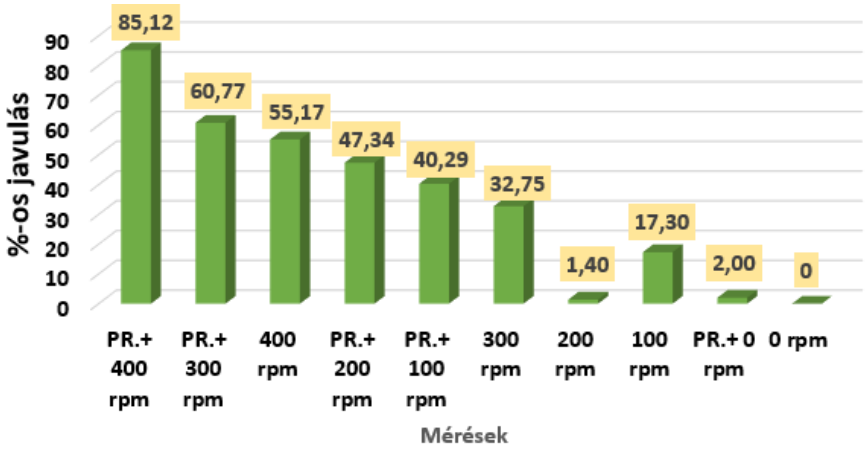
3. EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Fluxusok

TDK-dolgozati munkám során a szűrletek fluxusait a laboratóriumi méréseket követően az (1) egyenlettel kiszámoltam és összehasonlítottam. Ez azért fontos paraméter, mert a szűrésnek a sebességéről ad információt. A következő, 19. ábrán a fluxusokat ábrázoltam az ultraszűrések idejében különböző keverési sebességek mellett, illetve promóter cellába illesztésével és anélkül (hatványos trendvonallal ábrázolva). Látható, hogy minden esetben a kezdeti intenzív csökkenési tendenciát követően, ami döntően a gyors felületi lerakódásoknak tudható be, egy ellaposodó, állandósuló szakasz következett. A teljes lefolyási idők, amíg a 2-szeres sűrítési arányokat elértem, jelentős mértékben eltértek. Ezt a leglassabban a kontrol, 0 rpm-es esetben értem el, 8900 másodpercnél, míg a leggyorsabban a promóteres, 400 rpm-es keverés esetén, amivel ez 3240 másodpercnek adódott. Ez jelentős, kb. 2,7-szeres különbség. Továbbá az ábrán a fluxusok alakulásának a sorrendje is látható, különösen a jelmagyarázatot figyelve. Ennek még jobb szemléltetése érdekében, az ábrán a jelmagyarázatot olyan sorrendben tüntettem fel, hogy fentről lefelé csökkenő értékkel rendelkező mérések vannak. Az átlagfluxus értékek változásait a 20. ábra foglalja össze.



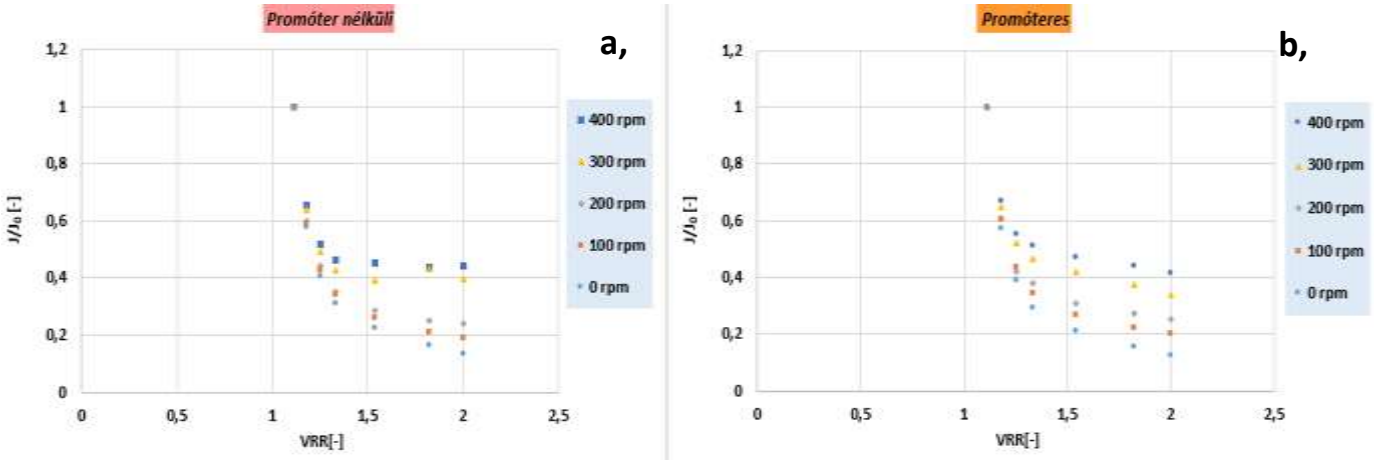
19. ábra *Permeátum fluxusok változása az idő függvényében az ultraszűrések alatt (T=25°C; TMP=4 bar)*



20. ábra *Az átlagfluxus értékek %-os javulása a keverési sebesség növelésének és a promóter integrációnak hatására*

(T=25°C; TMP=4 bar)

Továbbá kíváncsi voltam arra is, hogy ez mennyire passzol a relatív fluxusértékek ábrájával, ami a kezdeti fluxusértékek csökkenésének tendenciáját mutatja meg. Ezért a következő, 21. ábrán ábrázoltam a J/J_0 összefüggéssel meghatározott relatív fluxus értékeket az idő függvényében. Itt is az látható, hogy a promóter használata mellett végzett méréseim átlagosan magasabb értékeket eredményeztek, mint a promóter nélküliek. Az ábrán észrevehető az is, hogy a 19. ábrához képest a csökkenés tendenciája megváltozott, ami azt jelenti, hogy az eltérő keverési sebességek és a promóter alkalmazásával a kétszeres sűrítési arány hamar elérhető, mint a promóter nélküli mérések esetében. A jelmagyarázat sorrendje, tehát a fluxusok csökkenése csak egy pici mértékben változott meg (az előző ábrához képest), ami alapján a legjobb eredményeket egyértelműen a promóter használat mellett és a magasabb keverési sebességek alkalmazásával kaptam. Ez alól a relatív fluxus értéke alapján, csak a 200 rpm-es, illetve a 400 rpm-es méréseim lógtak ki, ezért ezt a kettőt megismételtem, de hasonló tendenciát mutató értékeket kaptam. A megismételt mérések által viszont bebizonyosodott, hogy a kísérleteim elég jól reprodukálhatóságot mutatnak.



21. ábra *Relatív fluxusok értékeinek változása a szűrési idő függvényében a promóter nélküli (a,) és a promóteres méréseimnél (b,)*
(T=25°C; TMP= 4 bar)

3.2. Hermia modell tesztelése

A Hermia modellezést a különböző ellenállási értékek (teljes blokkolás, közbenső blokkolás, standard blokkolás és iszaplepény szűrés) meghatározásával kezdtem. A teljesen blokkoló modell a (12) összefüggéssel számolható:

$$lnJ=lnJ_0-k_c\cdot t \qquad (12)$$

ahol, J a fluxus [$L\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$], J_0 a kezdeti fluxus [$L\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$], k_c a teljesen blokkoló modell állandója [s^{-1}], t a szűrés ideje [s, min, h]. A köztes blokkolási modell a (13) egyenlet segítségével, míg a strandard blokkolási modell a (14) képlettel adható meg:

$$\frac{1}{J}=\frac{1}{J_0}+k_i\cdot t \qquad (13)$$

ahol, J a fluxus [$L\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$], J_0 a kezdeti fluxus [$L\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$], k_i a közbenső blokkoló modell állandója [m^{-1}], t pedig a szűrési idő [s].

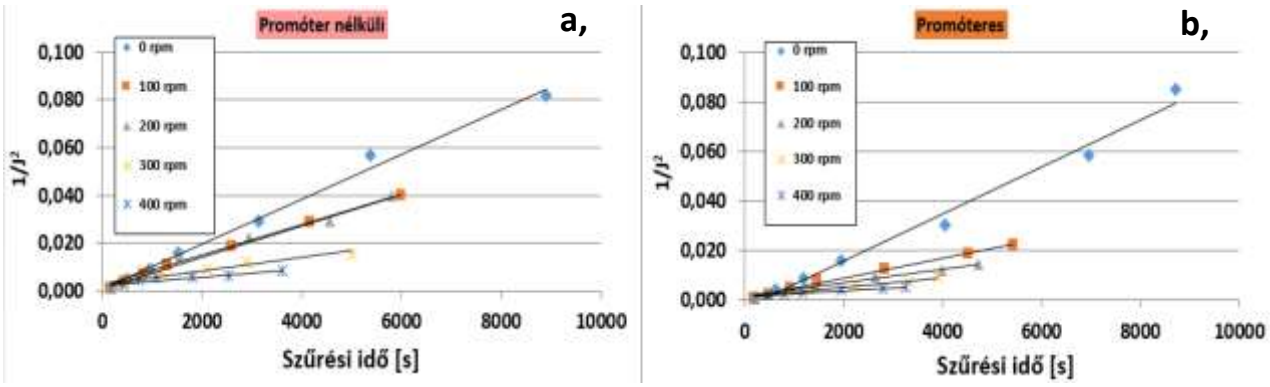
$$\frac{1}{J^{0,5}}=\frac{1}{J_0^{0,5}}+k_s\cdot t \qquad (14)$$

ahol, J a fluxus [$L\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$], J_0 a kezdeti fluxus [$L\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$], k_s a standard blokkoló modell állandója [$m^{-1/2}\cdot s^{-1/2}$], t a szűrés ideje [s, min, h]. Végezetül az iszaplepény szűrés modellel foglalkoztam, melynek meghatározásához a (15) egyenletet alkalmaztam:

$$\frac{1}{J^2}=\frac{1}{J0^2}+k_g\cdot t \qquad (15)$$

ahol, J a fluxus [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$], J_0 a kezdeti fluxus [$L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$], k_g az iszaplepény blokkoló modell állandója [$s \cdot m^{-2}$], t pedig a szűrés ideje [s, min, h]

Miután kiszámoltam a Hermia modelleket, összehasonlítottam a mért értékekkel. A négy eltömődési modell tesztelésének eredményei alapján, egyértelműen az iszaplepény modell adódott a legjobbnak, ezért a következő, 22. ábrán csak ezt mutatom be. Az $1/J^2$-eket ábrázolva a szűrési idő függvényében szépen látható, hogy a szűrési idő lerövidül a magasabb keverési sebesség értékeknél, ami a korábbi ábráimmal összhangban van. Továbbá az R^2 értékekből egy táblázatot is készítettem (1. táblázat), hogy az illesztésének pontosságáról is információt kapjak. Általánosságban elmondható, hogy a keverési sebesség növelésével csökken az illesztés pontossága, ami azzal magyarázható, hogy a nagyobb sebesség hatására a membránfelület közelében lévő részecskék sokkal nehezebben tapadnak meg és képeznek iszaplepényt.



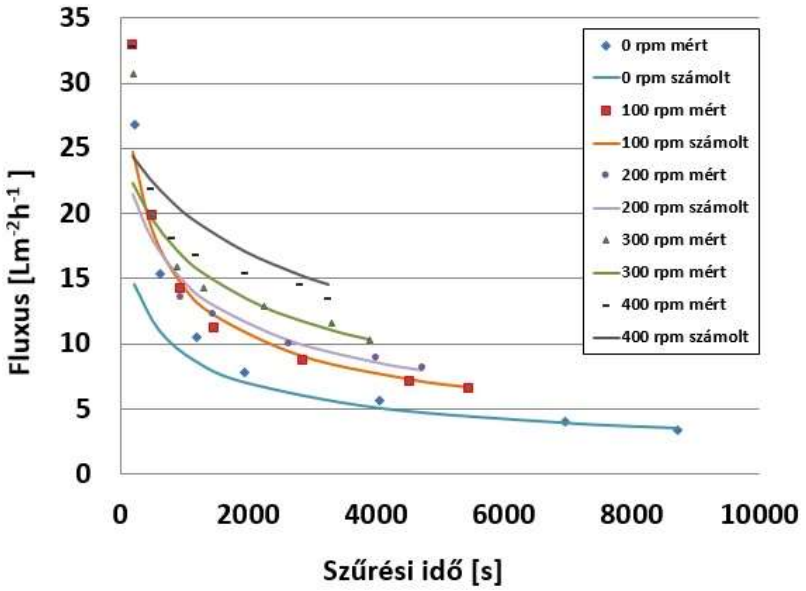
22. ábra *Iszaplepény modell illesztésének pontosságához szükséges egyenesek ábrázolása a promóter nélküli (a,) és a promóteres méréseimnél (b,)*
(T=25°C; TMP= 4bar)

1. táblázat R^2 értékeket összefoglaló táblázat

R^2, ($1/J^2$)	Promóter nélküli	Promóteres
Kontrol (0 rpm)	0,9922	0,9862
100 rpm	0,9980	0,9952
200 rpm	0,9757	0,9709
300 rpm	0,9338	0,9582
400 rpm	0,8372	0,9054

A következő 23. ábrán a promóter illesztése mellett mért fluxusértékeimet mutatom be úgy, hogy a 19. ábrán lévő hatványfüggvényes trendvonal illesztés helyett az iszaplepény modellel kiszámolt görbéket helyeztem. Így jól látható, hogy a számolt és mért értékek eléggé közel esnek egymáshoz, ami valóban azt mutatja, hogy a membrán eltömődés az iszaplepény modell

szerint történhetett. Mivel a promóteres és a promóter nélküli számolt és mért fluxusértékek között a differencia mértéke nem nagy, és nincs köztük lényeges különbség, ezért a könnyebb áttekinthetőség érdekében, csak a promótereseket ábrázoltam.



23. ábra *Promóteres méréseim permeátum fluxus értékeinek változása az idő függvényében (T=25°C; TMP= 4bar)*

Az iszaplepény modell segítségével az eltömődési modell állandókat is (k_g; [s·m^{-2}]) meghatároztam és a következő 2. táblázatban ábrázoltam. A táblázatba foglalt eredmények alapján észrevehető, hogy a keverési sebesség növelésével a k_g értékek csökkennek, ami azzal magyarázható, hogy a megnövekedett sebesség miatt a membránfelület közelében lévő részecskék kevésbé tudnak lerakódni és így iszaplepényt képezni.

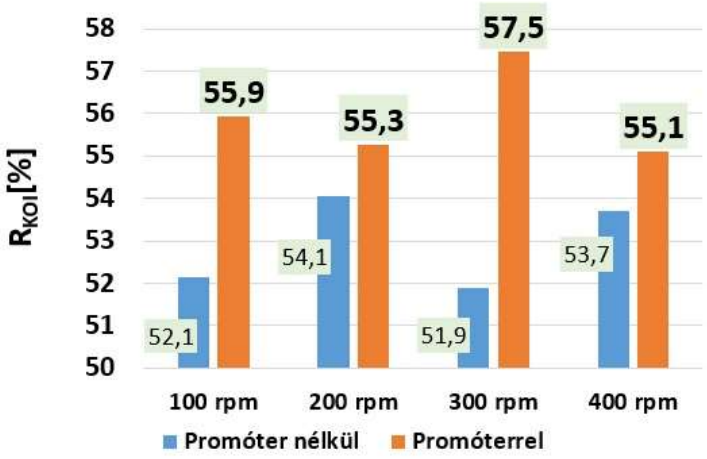
2. táblázat Eltömődési modell állandók (k_g)

Keverési sebesség	Promóter nélküli k_g, [s m^{-2}]	Promóteres k_g, [s m^{-2}]
Kontrol (0 rpm)	0,000009	0,000009
100 rpm	0,000007	0,000004
200 rpm	0,000006	0,000003
300 rpm	0,000003	0,000002
400 rpm	0,000002	0,000001

3.3. Visszatartások

Munkám során a membránok visszatartási értékeit is meghatároztam (az (2) képlet segítségével) a szerves anyagokra, a zavarossági értékekre és a teljes sótartalomra vonatkozóan is. Így az ultraszűrések minőségéről kaptam információt. A zavarosságra minden esetben

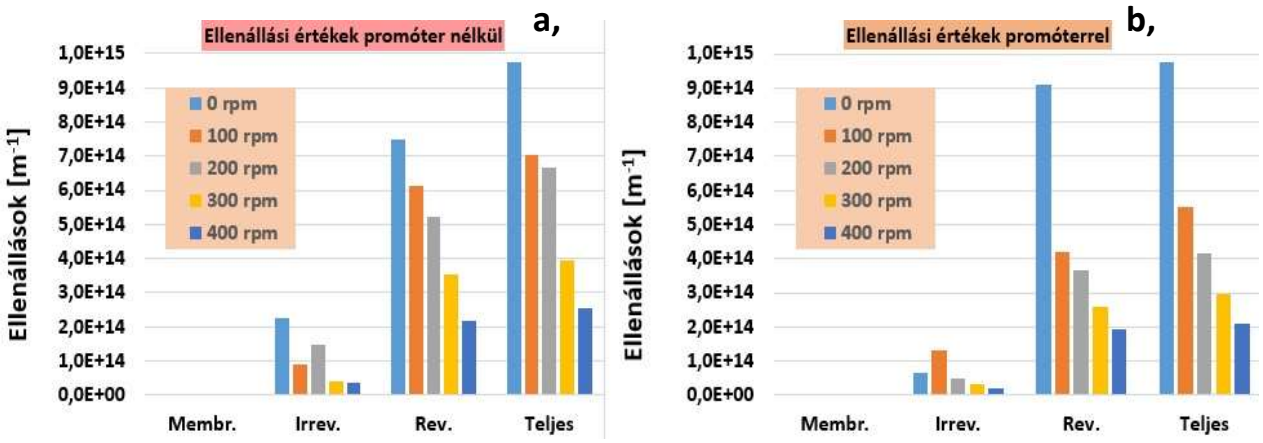
magasabb, mint 99%, ami így nem adott kedvező összehasonlítási alapot, de ez várható is volt, hiszen az ultraszűrések esetében ez a magas lebegőanyag-tartalom csökkentési tendencia. A vezetőképesség méréseim alapján pedig a teljes sótartalomra vonatkoztatott visszatartási értékek alacsony értékeket eredményezett 6% és 21% közöttieket. Ez sem volt meglepő, hiszen az ionok nagy része átjut az ultraszűrő membránokon. Azonban a szerves anyag tartalomra vonatkozó visszatartási értékek eredményeit a következő, 24. ábrán mutatom be különböző keverési sebességek mellett. Látható, hogy a visszatartási értékek 51,9 % és 57,5 % között változtak. Így a különbségek 100 rpm esetében a promóter hatására 3,8 %-os növekedés, 200 rpm esetében 1,2 %-os növekedés, 300 rpm esetében 5,6 %-os javulás és 400 rpm-nél 1,4%-os javulás. Mindezekből döntően azt a következtetést vontam le, hogy nem befolyásolja a promóter használata a visszatartási értékeket jelentős mértékben, de kisfokú javulást eredményez.



24. ábra *a membrán visszatartási értékek szerves anyag tartalomra vonatkoztatva, KOI mérések alapján (T=25°C; TMP= 4 bar)*

3.4. Ellenállások

TDK-dolgozati munkám során az ellenállások értékeit meghatároztam és a következő (4), (5), (6) egyenletek segítségével kifejeztem a reverzibilis, irreverzibilis, valamit a membrán saját ellenállási értékét. A (7) összefüggést felírva pedig megkaptam a teljes ellenállási értéket. A 25. ábrán az ellenállási értékek változását mutatom be a különböző keverési sebességek és a promóter cellába illesztésének hatására. Az előbb említett ábrán jól kivehető, hogy az ellenállási értékek közül a reverzibilis ellenállás a legjelentősebb, így valóban igaz az a feltételezés, miszerint a membrán eltömődés az iszaplepény modell szerint történhetett. Ez mindenképpen pozitív, mivel az ilyen típusú membrán eltömődést könnyebb tisztítani, eltávolítani, mint az irreverzibiliset!

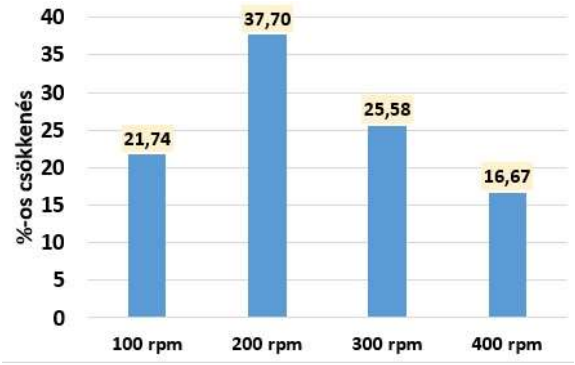


25. ábra *Membránellenállási értékek változása eltérő keverési sebességek és a promóter hatására. Ellenállási értékek a promóter nélküli (a,) és a promóteres (b,) méréseim esetében (T=25°C; TMP= 4 bar)*

A 25. ábra a, részénél jól kivehető, hogy a promóter nélküli szűrés esetében a 0 rpm keverési sebesség mellett kaptam a legnagyobb teljes ellenállási (R_T) értéket, ami viszont a sebesség növelésével nagymértékben lecsökkent. A 100 rpm-es keverési sebeség 28%-kal, a 200 rpm-es 32%-kal, a 300 rpm-es 59%-kal és a 400 rpm-es már 74%-kal csökkentette az R_T értékét. A 25. ábra b, részén is hasonló, de még jelentősebb csökkenési tendencia figyelhető meg a teljes ellenállási értékek csökkenésére vonatkozóan a keverési fordulatszám növelésével csak promóter használta mellett. A 100 rpm-es mérésem esetében 43%-os, 200 rpm-es 57%-os, a 300 rpm-es 70%-os és a 400 rpm-es 78%-os csökkenési értékeket tudtam meghatározni. Ez azt mutatja, hogy a promóter cellába integrálása még jobban megnöveli a membrán felületi nyíróerők értékeit, és a megváltoztatott áramlási viszonyok valószínű, hogy kedvezőbb fluxusértékeket is eredményeznek, ami a korábban bemutatott 21-26. ábráimnak is megfelel. Ezen kutatási eredményeimhez hasonló fluxusnövelő hatást publikáltak Ferreira és társai a közleményükben, ahol a 3D nyomtatott promóterek használatával 78%-kos permeátum fluxus növekedést értek el (Ferreira és társai, 2020).

Továbbá, ha az ábra a, és b, részét együttesen vizsgáljuk azonos keverései sebességeknél, akkor a promóter cellába illesztésének hatását kaphatjuk meg. Így a teljes ellenállási értékek csökkenésének mértékét százalékosan meghatározva érdekesebb tendenciát figyelhetünk meg. Ezért a következő, 26. ábrán az egyes keverési sebességekre vonatkozóan adtam meg a teljes ellenállási értékek csökkenésének mértékeit. Az eredményekből az látható, hogy a 200 rpm-es mérésnél a legnagyobb a csökkenés mértéke (38%), ami azt mutatja, hogy itt jobban tud érvényesülni a promóter teljes ellenállás csökkentő hatása. Ez azt mutatja, hogy egy kritikus

érték felett már alacsonyabb a csökkentő hatás, de még a 300 rpm-es 26% is és a 400 rpm-es 17% is jelentős változásnak mondható! Ez azért lehet kedvező, mert ezen a 200 rpm-es alacsonyabb keverési fokozaton is biztosítható a megfelelő hatékonyság. Ennek bizonyítására a későbbiekben az energiaértékek eredményeit is bemutatom és összevetem ezen eredményeimmel (lásd. 43-46 oldal). A két diagram eredményeit összehasonlítottam és a 26. ábra által összefoglalt eredményeket kaptam.



26. ábra *Teljes ellenállási értékek %-os javulása a promóter hatására*

3.5. Energetika

TDK-dolgozati munkám során meghatároztam az ultraszűrő keverőegység energiafelvétel szerinti legfontosabb mutatóit, melyek a következők voltak: hatásos, meddő, látszólagos teljesítmény, teljesítménytényező, éves, havi teljesítményfelvétel és az ultraszűrő keverőegység teljesítményfelvétele. A hatásos teljesítmény nagysága a (16), míg a meddő teljesítmény a (17) egyenlettel számolható:

$$P_h = U \cdot I \cdot \cos\phi \text{ [W]} \qquad (16)$$

ahol, P_h a hasznos teljesítmény [W], U az elektromos feszültség [V], I az áramerősség [A], ϕ pedig a fázisszög nagysága [◦].

$$P_m = U \cdot I \cdot \sin\phi \text{ [VA}_r\text{]} \qquad (17)$$

ahol, P_m a meddő teljesítmény [VA_r] (reaktív), U az elektromos feszültség [V], I az áramerősség [A], ϕ a fázisszög nagysága [◦]. A látszólagos teljesítmény meghatározását a (18) egyenlettel végeztem:

$$P_l = P_h + P_m \text{ [VA]} \qquad (18)$$

ahol, P_l a látszólagos teljesítmény [VA], P_h a hatásos teljesítmény [W], P_m pedig a meddő teljesítmény [VA_r] (www.vled.hu, 2019). A teljesítménytényező ($\cos\varphi$) értékét, a (19) összefüggéssel kaptam meg:

$$cos\varphi = \frac{P_h}{P_l} \text{ [-]} \qquad (19)$$

ahol, $cos\varphi$ a teljesítménytényező, P_h a hatásos teljesítmény [W], P_l látszólagos teljesítmény [VA] (www.uni-miskolc.hu). Az imént felsorolt energetikai mutatók változásának mértékét a 29. ábra szemlélteti.

Az éves teljesítményfelvételt a (20), a havi teljesítményfelvételt a (21), az ultraszűrő teljesítményfelvételét a (22) egyenletek alapján adtam meg:

$$P_é = P_h \cdot 365 \cdot 24/1000 \text{ [kWh]} \qquad (20)$$

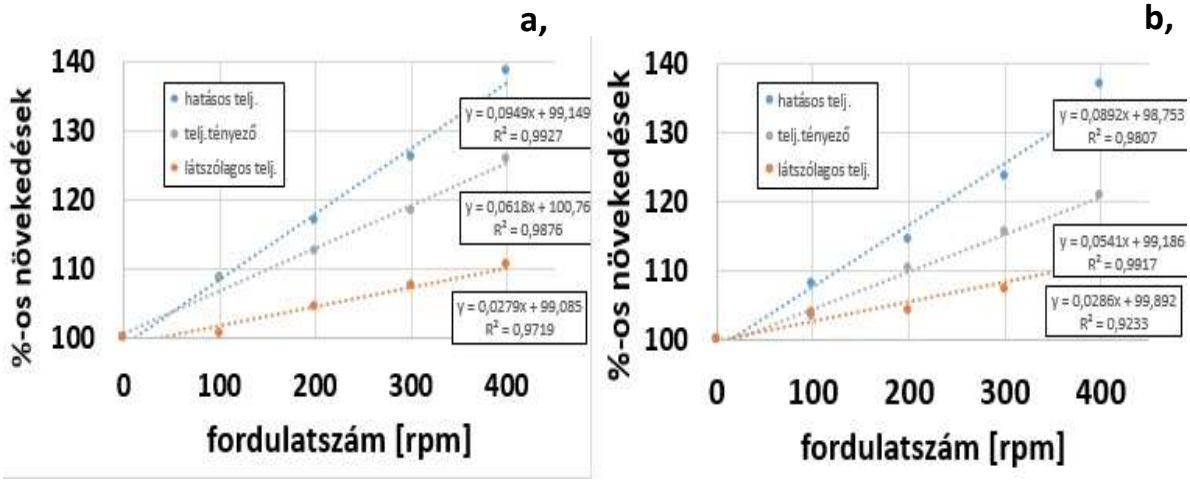
ahol, $P_é$ az éves teljesítményfelhasználás [kWh], P_h a hasznos teljesítmény [W].

$$P_{hf} = P_é \cdot 43{,}42 Ft /12 \text{ [Ft]} \qquad (21)$$

ahol, P_{hf} a havi teljesítményfelvétel [Ft], 1 kWh villamos energia ára a csúcsidőszakban: bruttó 43,42 Ft.

$$P_u = (P_h \cdot t_{usz})/V_p \cdot 1000 \text{ [kWh·m}^{-3}\text{]} \qquad (22)$$

ahol, P_u az ultraszűrő keverőegység teljesítményfelvétele [kWh·m^{-3}], P_h a hasznos teljesítmény [W], t_{usz} az ultraszűrés ideje [h], V_p pedig a permeátum végtérfogata [m^3].

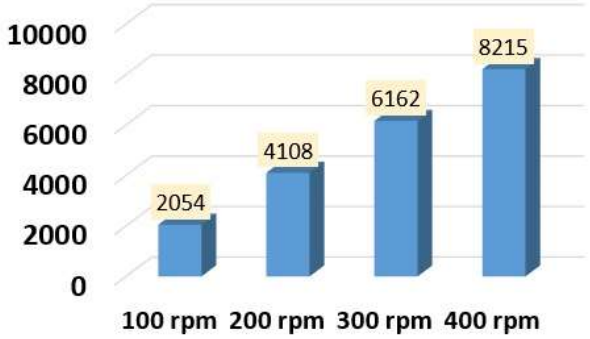


27. ábra *Ultraszűrő keverőegység hatásos, és látszólagos teljesítmény, illetve teljesítménytényező értékeinek változásai a fordulatszám növelés hatására. Promóter nélküli (a,) és a promóteres (b,) méréseim esetében (T=25°C; TMP= 4 bar)*

A 27. ábra által összefoglalt eredmények alapján elmondható, hogy a promóter nélkül (a,) és a promóterrel (b,) történő szűrés esetében is a hatásos és látszólagos teljesítmény értékek, valamint a teljesítménytényező nagysága a fordulatszám növelésével lineárisan változott. A megnövekedett keverési sebesség hatására, az ultraszűrő berendezés működtetése egyre

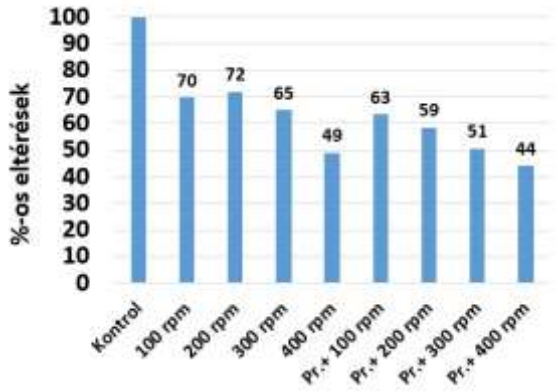
nagyobb energiafelvétellel járt, viszont a fajlagos energiafelhasználás kisebb volt. Ez azzal magyarázható, hogy a fordulatszám növelésével és a promóter szűrőcellába történő beillesztésével a szűrés ideje jelentős mértékben, max. 2,7-szeresen (lásd korábban 36. oldalon), lerövidült.

A szűrőcellában uralkodó áramlási viszonyok könnyebb szemléltetésének céljából, a keverési fordulatszámok vizsgálata helyett, a keverési Reynolds-számok nagyságát tanulmányoztam. Elmondható, hogy ezt a lineáris tendenciát követik a keverési Reynolds-szám értékek is a fordulatszám növelésének hatására, melyet a 28. ábra szemléltet. Ezeket a promóter nélküli mérésekre tudtam meghatározni, mivel a promóter beintegrálás hatására a membránfelület közelében kialakuló nyíró erőknek köszönhetően a lamináris áramlási profil megbomlik és turbulens áramlás alakul ki a cellán belül. Ennek szemléltetésére a későbbiekben, MSc munkámban folytatva valamilyen áramlási viszonyokat szemléltető program használatát is tervezem. Lehetséges és hasznos lehetne a sebességek változásának ismerete az adott cella, modul kialakításában. Erre hasonló, érdekes tudományos közleményt is találtam már, ahol különböző színekkel jelölték az áramlási sebességeket és a megjelenített áramvonalakkal szemléltették a folyadékáram útvonalát (Pawlowski és tárai, 2018).



28. ábra *Keverési Reynolds-számok változása a fordulatszám növelésének hatására a promóter nélküli méréseim esetében*

Úgy láttam célszerűnek bemutatni a rengeteg mérési eredményemet, hogy összehasonlítottam a (22) egyenlettel számolt fajlagos teljesítmény értékeket a promóteres és promóter nélküli szűrések esetében, melyet a 29. ábra mutat be. A 29. ábrán jól látható, hogy a 100 rpm-es keverési sebességek fajlagos teljesítmény értéke a promóter hatására 7%-os, a 200 rpm esetében 13%-os, a 300 rpm- nél 14%-os, a 400 rpm- nél pedig 5%-os csökkenést mutatnak.



29. ábra *Fajlagos teljesítmény értékek %-os csökkenése a 3D nyomtatott promóter hatására*

4. ÖSSZEFOGLALÁS

TDK-dolgozati munkám során tejipari modellszennyvizet ultraszűrő keverőegység jellemzésével, egy a szűrőcellába illesztett 3D nyomatott promóter szűrési tulajdonságokra gyakorolt hatásainak tanulmányozásával és az energiafelvételek változásainak részletes elemzésével foglalkoztam.

Kutatómunkám első felében az ultraszűrés keverési sebességének növelésével és a 3D nyomtatott promóter keverős cellába illesztésével járó permeátum fluxus, membrán visszatartási és eltömődési értékek változásait vizsgáltam. Az imént említett mutatók meghatározása elengedhetetlen, hiszen a fluxus a szűrés sebességéről, a membránvisszatartási értékek a szűrés minőségéről, az ellenállási értékek pedig a membrán eltömődésének mértékéről adnak információt. Az ultraszűrést eltérő keverési sebességeken (0-400 rpm-ig), kétszeres sűrítési arányig (*VRR*=2) végeztem, 3D nyomtatott promóterrel és anélkül. A kapott eredmények azt bizonyítják, hogy a sebesség növelésével a szűrési idő lerövidült az átlagfluxus értékek pedig növekedni kezdtek. A promóter nélküli kontrol mérés (0 rpm) esetében például 8900 másodperc alatt értem el a kétszeres sűrítési arányt, míg a 400 rpm-es keverési sebesség mellett 3600 másodperc is elég volt ugyanehhez a sűrítési arányhoz. A 3D nyomtatott promóter szűrőcellába illesztésével viszont a lefolyási idő tovább csökkenthető, ami azzal magyarázható, hogy az akadályként viselkedő beépített elem képes megbontani a cellában uralkodó lamináris áramlási viszonyokat és lokálisan, turbulenssé alakítani azokat. A kapott mérési eredményeim is ezt támasztják alá, hiszen a promóter nélküli kontorolhoz képest a promóteres 400 rpm-es keverési sebességgel a szűrési idő már 3240 másodpercre csökkent. Ez kb. 2,7-szeres különbség, ami elég jelentős.

A *TDK*-dolgozati munkám során a kapott átlagfluxus értékeket a 4 Hermia modell (teljes blokkolás, közbenső blokkolás, standard blokkolás és iszaplepény szűrés) mindegyikével összevetettem, melyek közül a legjobban illeszkedőnek az iszaplepény szűrési modell bizonyult. A modellre jellemző $1/J^2$ értékeket a szűrési idő függvényében ábrázoltam (24. ábra) és azt tapasztaltam, hogy a keverési sebességek növelésével és a promóter együttes alkalmazásával hasonló tendencia figyelhető meg, mint az átlagfluxus és a relatív fluxus értékek esetében. Továbbá az is megállapítható, hogy a keverési sebességek növelésével az illesztés pontosságát mutató R^2 értékek és az eltömődési modell állandó (k_g) nagysága lecsökken. Ez azzal magyarázható, hogy a nagyobb keverési sebesség és promóter alkalmazásakor a membránfelület közelében lévő részecskék nem képesek megtapadni és iszaplepényt képezni.

Kutatásom során meghatároztam továbbá a membránvisszatartási értékeket a szerves anyagokra, a zavarossági értékekre és a teljes sótartalomra vonatkozóan is. A zavarossági értékek alapján az ultraszűrés lebegőanyag-tartalom csökkenési tendenciája minden esetben 99% feletti volt, míg a vezetőképességre vonatkoztatott visszatartási értékek 6-21% között mozogtak. Ez sem meglepő, hiszen az ultraszűrő membránon az ionok nagyrésze képes átjutni. A szerves anyag tartalomra vonatkozó visszatartási értékek eredményei 51,9-57,5% között ingadoztak, ami a keverési sebesség változtatásával és promóter alkalmazásával magyarázható. A 100 rpm esetében a promóter 3,8 %-os, 200 rpm esetében 1,2 %-os növekedést, a 300 rpm esetében 5,6 %-os, míg a 400 rpm-nél 1,4%-os javulást eredményezett. Mindezekből döntően azt a következtetést vontam le, hogy nem befolyásolja a promóter használata a visszatartási értékeket jelentős mértékben, de kisfokú javulást eredményezhet.

A membrán ellenállási értékek vizsgálata során az reverzibilis ellenállási értékek bizonyultak a legnagyobbnak, amelyek szintén az iszaplepény modell szerinti eltömődési mechanizmust igazolja. Ez mindenképpen pozitív, mivel az ilyen típusú membrán eltömődést könnyebb tisztítani, eltávolítani, mint az irreverzibiliset. A keverési sebesség és a promóter, valamint az ellenállási értékek közötti kapcsolatot vizsgálva arra jutottam, hogy a sebesség növelése és a beintegrált 3D elem is hozzájárul a membrán teljes ellenállásának csökkenéséhez. A 100 rpm-es mérésem esetében 43%-os, 200 rpm-es 57%-os, a 300 rpm-es 70%-os és a 400 rpm-es 78%-os csökkenést értem el a promóter és sebesség növelés által.

A *TDK*-munkám további célja az ultraszűrő energiafelvételének vizsgálata volt. Munkám során meghatároztam az szűrőberendezés hatásos teljesítmény és a fajlagos teljesítmény értékeit különböző keverési sebességek és promóter alkalmazása mellett. Az eredmények azt bizonyítják, hogy a sebesség növelésével a hatásos teljesítmény értékek növekednek, hiszen a berendezés energiaszükséglete is megnő a nagyobb sebesség biztosítása miatt. A fajlagos teljesítmény értékek viszont csökkenő tendenciát mutattak, mivel a megnövekedett energiaszükséglettől függetlenül a promóter és a sebesség növelés hatására a szűrési idő lerövidült. A promóter hatására a 100 rpm-es keverési sebességek fajlagos teljesítmény értéke 7%-os, a 200 rpm-esek 13%-os, a 300 rpm- esek 14%-os, a 400 rpm-esek pedig 5%-os csökkenést mutattak.

TDK-dolgozati munkám során végzett kutatásom eredményeképpen elmondhatom, hogy a keverési sebesség és a 3D nyomtatott promóter együttes használata a laboratóriumi méretű, kevertethető ultraszűrő berendezésben egyértelmű javulásokat eredményezett minden szűrési paraméter esetében. A szűrlet fluxusok javultak, a membrán visszatartási értékek kismértékben ugyan, de ugyancsak javultak, és az eltömődés fokát jellemző ellenállási értékek

döntően csökkentek. Ráadásul a szűrési idő leredukálásával a szűrés energiafelvétele is csökkent, azaz javult. Eredményeim azt bizonyítják, hogy egy alacsonyabb keverési sebesség és 3D nyomtatott promóter alkalmazásával hasonló szűrési eredmények és alacsonyabb energiafogyasztás érhető el, mint egy nagyobb keverés esetén. További részletes kutatások azonban szükségesek, például más modulkialakításokban is sikeresen alkalmazható, javított áramlási viszonyok elérésének érdekében.

IRODALOMJEGYZÉK

Aniket Jadhav, Vijay S. Jadhav: *A review on 3D printing: An additive manufacturing technology*, Volume 62, 2022, pp. 2094-2099.
https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.558

Anthanasios S. Stasinakis, Panagiotis Charalambous, Ioannis Vyrides: *Dairy wastewater managment in EU: Produced amounts, existing legislation, applied treatment process and future challenges*, Journal of Environmental Managment,Volume 303, 2022
https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114152

Ashish Kapoor, Sivasamy Balasubramanian, Edward Kavitha, Elangovan Poonguzhali, Silvaraman Prabhakar: *Role of Membranes in Wastewater Treatmnet,* Environmental Chemistry for a Sustainable World, Volume 57, 2020, pp. 247-281.

Bac Van Dang, Alexander J. Charlton, Qiyuan Li, Yeo Cheon Kim, Robert A. Taylor, Pierre Le-Clech, Tracie Barber: *Can 3D-printed spacers improve filtration at the microscale?,*Separation and Purification Technology, Volume 256, 2021
https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117776

Bélafiné Bakó Katalin, Nemestóthy Nándor (2020): *Membrános műveletek,* Pannon Egyetem, pp.5-8., pp.14-18., pp.58-59.

Bogárdi János (1975): *Környezetvédelm-Vízgazdálkodás*, Akadémiai Kiadó, ISBN:9630506513 pp.61.

Cecília Hodúr, Nikolett Szpisják-Gulyás, Balázs Lemmer, Zoltán Jákói, Szabolcs Kertész, Zsuzsanna László, Gábor Veréb, Sándor Beszédes: *Comparison of filtering models for milk substitutes,* Journal of Food Science and Technology, Volume 58, 2021, pp. 4429-4436.

Cséfalvay Edit, Mika László Tamás (2008): *Vegyipari művelettan,* ELTE Kémiai Intézet, pp.119-120., pp. 123.

Darren L. Oatley-Radcliffe, Matthew Walters, Thomas J. Ainscough, Paul M. Williams, Abdul Wahab Mohamed, Nidal Hilal: *Nanofiltration membranes and processess: A review of research trends over the past decade,* Journal of Water Process Engineering, Volume 19, 2017, pp. 164-171
https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.026

E. Kavitha, E. Poonguzhali, D. Naditha, Ashish Kapoor, G. Arthanareeswaran, S. Prabhakar: *Current status and future prospects of membrane separation process fol value recovery from wastewater,* Chemosphere, Volume 291, 2022
https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132690

Emilija Fodor, Zita Seres, Gréta Gergely, Cecília Hodúr, Szabolcs Kertész: *Investigation of ultrafiltration parameters of different organic load wastewater types,* Analecta Technica Szegedinensia, Volume 16, 2022
https://doi.org/10.14232/analecta.2022.1.129-135

F. Kamranvand, C.J. Davey, L.Williams, A. Parker, Y. Jiang, S.Tyrrel, E.J. McAdam: *Ultrafiltration pretreatment enhances membrane distillation flux, resilience and permeate quality during water recovery from concentrated blackwater (urine/faeces),* Separation and Purification Technology, Volume 253, 2020

https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117547

Franz Berbert Ferreire, Grégori Ullmann, Luiz Gustavo Martins Vieire, Vicelma Luiz Cardoso, Miria Hespanhol Reis: Hydordynamic performance of 3D printed turbulence prooters in cross-flow ultrafiltrations of Psidium myrtoides extract, Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, Volume 154, 2020
https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108005

Haleema Saleem, Syed Javaid Zaidi: *Nanoparticles in reverse osmosis membranes for desalination: A state of the art review,* Desalination, Volume 475, 2020
https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114171

Heyang Yuan, Zhen He: *Integrating membrane filtration into bioelectrochemical system as next generation energy-efficient wastewater treatment technologies for water reclamation: A review,* A Bioresource Technology, Volume 195, 2015, pp. 202-209.
https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.058

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

Huszár Gabriella (2021): *Áramlási tulajdonságok változtatásának hatása a membránszűrésre*, szakdolgozat

Jesús Mora Molina (2003): *Ipari szennyvizek tisztítása membránszűréssel és pervaporációval*, doktori értekezés

Jian-Yuan Lee, Wen See Tan, Jia An, Chee Kai Chua, Chuyang Y. Tang, Anthony G. Fane, Tzyy Haur Chong: *The potential to enhance membrane module design with 3D printing technology,* Journal of Membrane Science, Volume 499, 2016, pp. 480-490.
https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.11.008

Kárpáti Árpád, Fazekas Bence, Kovács Zsófia (2014): *Szennyvíztisztítás korszerű módszerei*, Pannon Egyetem, pp. 39.

Kárpáti Árpád, Vermes László (2011): *Vízgazdálkodás- Szennyvíztisztítás,* Pannon Egyetem, pp.13-18.

Katarina Knežević, Krestin Rastädter, Julian Quehenberger, Oliver Spadiut, Jörg Krampe, Norbert Kreuzinger: *Circular production-Evaluation of membrane technologies for nutrient recylcling from microbial fermention effluent,* Journal of Cleaner Production, Volume 377, 2022
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134436

Kertész Szabolcs (2011): *Szennyvizek és folyékony halmazállapotú melléktermékek környezetterhelésének csökkentése membránszeparációs eljárásokkal,* doktori értekezés
https://doktori.bibl.u-szeged.hu/id/eprint/784/1/Kert%C3%A9sz_Szabolcs_%C3%89rtekezes.pdf

Kristina Baitalow, Denis Wypysek, Martin Leruthold, Stefan Weisshaar, Jonas Lölsberg, Matthias Wessling: *A mini-module with built-in spacers for high-throughput ultrafiltration,* Journal of Membrane Science, Volume 637, 2021

https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119602

László Zsuzsanna, Beszédes Sándor (2009): *Élelmiszeripari Környezetgazdálkodás*, Szegedi Tudományegyetem, pp.25-31., pp.33-34.

M. Cintia Vincent Vela, Silvia Álvarez Blanco, Jaime Lora Gracía, Enrique Bergañtinos Rodríguez: *Analysis of membrane pore blocking models applied to the ultrafiltration of PEG*, Separation and Purification Technology, Volume 62, 2008, pp.489-498.
https://doi.org/10.1016/j.seppur.2008.02.028

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

Németh József (2019): *A negyedik fokozatú szennyvíztisztítás műszaki, gazdasági, környezeti hatásai,* doktori értekezés

P.S. Goh, K.C. Wong, A.S. Ismail: *Membrane technology: A verstaile tool for saline wastewater treatment and resource recovery*, Desalination, Volume 521, 2022
https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115377

Patricia Luis (2018): *Fundamental Modeling of Membrane System*, Elsevier Science Publisher Ltd., ISBN: 978012813483, pp. 25-70.
https://doi.org/10.1016/C2016-0-02489-0

Recep Kaya, Ayse Yuksekdag, Sevde Korkut, Turker Turken, Mehemet Emin Pasaoglu, Mustafa Evren Ersahin, Hale Ozgun, Ismail Koyuncu: *Impact of membrane configuration ont he preformance and cost of a pilot-scale UF process treating surface water*, Separation and Purification Technology, Volume 304, 2023
https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122414

Renner E., Abd-El-Salam M.H. (1991): *Application of ultrafiltration in the dairy industry*, Elsevier Science Publishers Ltd., ISBN:9781851665310, pp. 78-95.

S.Pawlowski, N.Nayak, M. Meireles, C.A.M. Portugal, S. Velizarov, J.G. Crespo*: CFD modelling of flow patterns, tortuosity and residence time distribution in monolithic porous columns reconstructed from X-ray topography data*, Chemical Engineering Journal, Volume 350, 2018, pp.757-766.
https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.017

Saif Al Aani, Tameen N. Mustafa, Nidal Hilal: *Ultrafiltration membranes for wastewater and water process engineering:A comprehensive statistical review over the past decade*, Journal of Water Process Engineering, Volume 35, 2020
https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101241

Sandeep Singh Shekhawat, Niha Mohan Kulshreshtha, Vivekanand Vivekanand, Akhilendra Bhushan Gupta: *Impact of combined chlorine and UV technology on the bacterial diversity, antibiotic resistance genes and disinfection by-products in treated sewage*, Bioresource Technology, Volume 339, 2021
https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125615

Simándi Péter (2011): *Szennyvíztisztítási technológiák I.,* Szent István Egyetem, pp. 32-35., pp. 89-92., pp. 169, pp. 186., pp. 200-204.

Sze Ying Lee, David C. Stuckey: *Separation and biosynthesis of value-added compounds from food-processing wastewater:Towards suistainable wastewater resource recovery,*Journal of Cleaner Production, Volume 357, 2022
https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131975

Szép Angéla (2013): *Membránszűrés hatékonyságának javítása kombinált módszerek alkalmazásával ipari szennyvizek tisztítása során,* doktori értekezés

Szép Angéla, Kertész Szabolcs, Süveges Hajnalka, Hodúr Cecília, Szabó Gábor: Enzimkezelt feketeribizli besűrítése hiperszűréssel, *Magyar Élelmezésipari Tudományos Egyesület XVII. Országos Tudományos Diákköri Konferencia Programfüzet,* pp.14.

Tanwi Priya, Brijesh K. Mishra, Majeti Narasimha Vara Prasad (2020): *Disinfection By-products in Drinking Water,* ISBN: 9780081029770, pp. 23-58.
https://doi.org/10.1016/C2018-0-02575-X

Tardy Gábor (2006): *Eleveniszapos- biofilmes szennyvíztisztító rendszerek biológiai nitrogén eltávolításának kombinált optimalizálása,* doktori értekezés

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

Internetes hivatkozások:

http://energiapedia.hu/mi-az-aramerosseg-i (2022.11.12.)

http://oktatas.ch.bme.hu/oktatas/konyvek/vegymuv/VM_Torzs/Kornyezetbarat_technologiak/membranszepraracio.pdf (2022.11.01.)

http://statex.hu/cikkek/Osszegzo_parmeterek.pdf (2022.10.10.)

http://www.kkft.bme.hu/attachments/article/68/Szennyviz%20jegyzet%20f%C5%91%20r%C3%A9sz.pdf?fbclid=IwAR0CsuLzCWKB_FjIjwbGSJP7CnDgqALmVlIxKqP2fji6O_dyI_PBlXe2Sno (2022.10.01.)

https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR-DairyProducts_2018-04-25_V1.pdf (2022.09.24.)

https://www.uni-miskolc.hu/~gfmj/Villamossagtan_I_123.pdf (2022.11.12.)

https://www.vg.hu/nemzetkozi-gazdasag/2022/11/mar-8-milliard-a-vilag-nepessege-mi-jon-ezutan (2022.11.15.)

https://www.vled.hu/blog/mit-jelent-a-teljesitmenytenyezo (2022.11.12.)

https://zrinyi-encs.edu.hu/fizika/fizika8/az_elektromos_feszltsg.html (2022.11.12.)

Képek forrásai:

Cséfalvay Edit, Mika László Tamás (2008): *Vegyipari művelettan,* ELTE Kémiai Intézet, pp.119-120., pp. 123.

https://www.astralpool.com/de/de.html (2022.11.01.)

https://www.conrad.hu/p/energiafogyasztas-mero-sd-kartya-nyilassal-lcd-0001-9999-kwh-4320-ora-voltcraft-energy-logger-4000-125444 (2022.11.01.)

https://www.vled.hu/blog/mit-jelent-a-teljesitmenytenyezo (2022.11.12.)

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

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani a konzulensemnek, Dr. habil. Kertész Szabolcsnak, akinek áldozatos munkája és végtelen türelme nélkül nem jöhetett volna létre ez a *TDK*-dolgozat. Köszönöm Fazekas Ákos PhD hallgatónak a laboratóriumban nyújtott nélkülözhetetlen segítségét.
Végezetül hálásan köszönöm a családomnak, legfőképp az Édesanyámnak és a nővéremnek, akik egyetemi éveim alatt mindvégig bíztattak és támogattak.

Kertész Szabolcs témavezető köszönet mond a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFI) FK 142414 azonosítószámú projektnek és a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-5-SZTE-210 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásáért, valamint az MTA Bolyai János Kutatási Ösztöndíj (BO/00576/20/4) által nyújtott támogatásért.

NYILATKOZAT

Kijelentem, hogy a *TDK*-dolgozatom saját munkám, minden felhasznált forrásmunkát az irodalomjegyzékben megneveztem.

Szeged, 2023.01.09.

Gergely Géza

……..

aláírás