



Szent István Egyetem

**Membránműveletek anyagátadásának intenzifikálása az
élelmiszeriparban és környezetvédelemben statikus keverő
alkalmazásával**

GÁSPÁR IGOR

Budapest

2016

A doktori iskola

- Megnevezése:** Szent István Egyetem
Élelmiszertudományi Doktori Iskola
- Tudományága:** Élelmiszertudományok
- Vezetője:** **Dr. Vatai Gyula**
Egyetemi tanár, DSc
SZIE, Élelmiszertudományi Kar,
Élelmiszeripari Műveletek és Gépek Tanszék
- Témavezetők:** **Dr. Vatai Gyula**
Egyetemi tanár, DSc
SZIE, Élelmiszertudományi Kar,
Élelmiszeripari Műveletek és Gépek Tanszék
- Dr. Koris András**
Egyetemi docens, PhD
SZIE, Élelmiszertudományi Kar,
Élelmiszeripari Műveletek és Gépek Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
Témavezető jóváhagyása

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, A KITŪZÖTT CÉLOK

Az ipari szennyvizek közül az olaj-víz emulzió mind a gépiparban, mint az élelmiszeriparban, jelentős mennyiségben keletkezik és kezelése vagy hatástalanítása fontos környezetvédelmi feladat. A környezetvédelmi törvények szabályozzák a kibocsátható szennyező anyagok koncentrációját. Ez az olajos alapú szennyvizekre is vonatkozik, melyek esetében az olajtartalma nem haladhatja meg az 50 mg/L értéket. Ez a szétválasztás mikroemulziós olajok esetében, ülepitéssel gyakran nem megvalósítható, ilyenkor speciális tisztítási technológiákat kell alkalmazni. A bepárlás nagyon energiaigényes művelet viszont membrántechnikával kiegészítve, ez a szeparáció gazdaságosabban megvalósítható. Membránszűrés esetében a megtisztított víz a technológiába visszaforgathatóvá válik, vagy esetleg csatornába vezethető. Szűréssel a besűrített emulzió víztartalma jelentősen csökkenhet, így az már bepárlással, kevesebb energiával, teljesen szétválasztható.

A membránszűrési kutatásaimban sajtgyártáskor keletkezett édes savót is használtam. A nanoszűrés alkalmas a tejsavóban található fehérjék és a laktóz besűrítésére, de a benne lévő zsiradékok és lebegőanyagok eltömíthetik az iparban elterjedt spiráltekercs modul távtartó rétegét (spacer-t). Én a savó mikroszűrésével foglalkoztam, ami ilyenkor egy fontos előművelet, amivel ezek az anyagok eltávolíthatók.

Kutatásom fő célja, hogy megvizsgáljam, hogy a kerámia csőmembrán belsejébe helyezett statikus keverő milyen hatással van az előbb említett anyagok membránszűrésének teljesítményére (szűrletfluxus) gazdaságosságára (fajlagos energiafogyasztás) és minőségére (visszatartás).

További céljaim voltak az olaj-víz emulzió ultraszűrésének és a savó mikroszűrésének modellezése, optimális műveleti paraméterek meghatározása.

Olaj-víz emulzió ultraszűrésénél alkalmazott kerámia csőmembránt (beépített statikus keverővel) összehasonlítottam a kerámia kapilláris membrán és a polimer alapú lapmembrán szűrési tulajdonságaival.

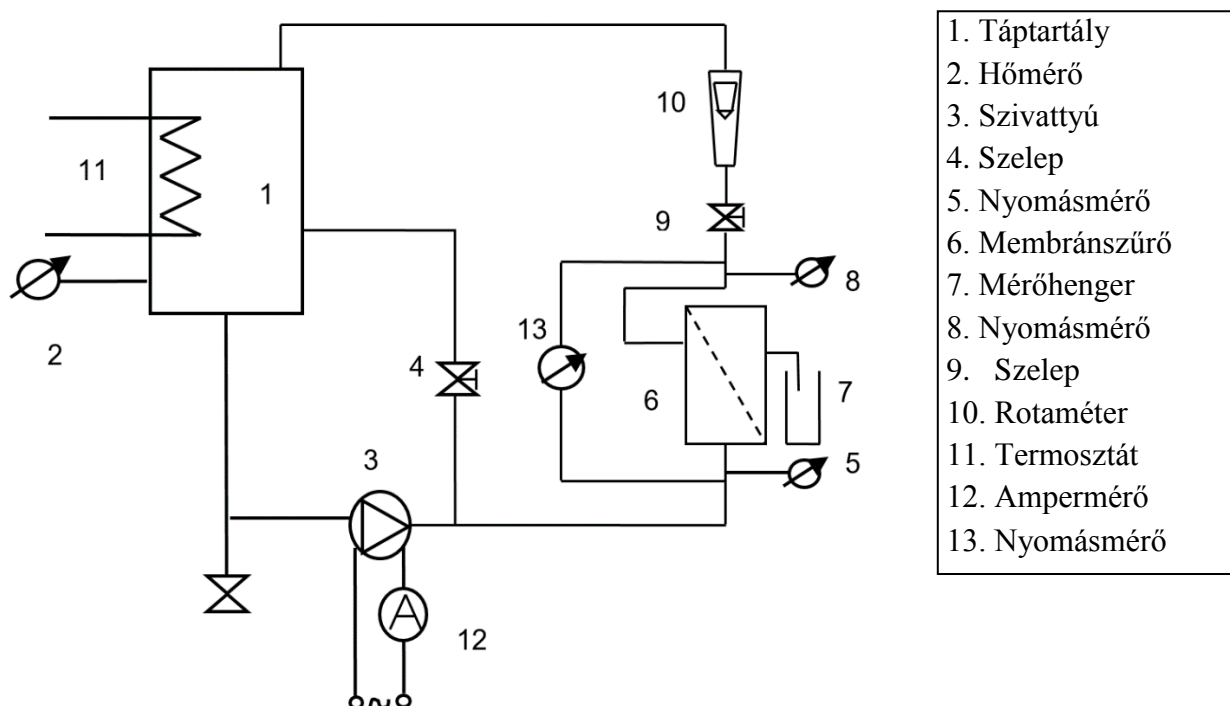
Kutatásaimat a kereskedelemben kapható Kenics statikus keverő alkalmazásával kezdtem. Hamar kiderült, hogy ez a keverő pozitív hatással van a szűrlet fluxusára és a membrán visszatartására, viszont fő hátránya, hogy aránylag nagy, a membrán hosszában keletkező súrlódási nyomásest okoz. Ez adta az alapot a következő célkitűzésemhez.

Olyan új statikus keverő geometriát kerestem, ami használat közben nem eredményez jelentős súrlódási nyomásesést, de megtartja a Kenics keverő két fő előnyét. Mivel kereskedelemben ilyen célra nem kapható keverő, először számítógépes folyadékdinamika szimulációval vizsgálnám új formákat. Majd utolsó lépés lenne az új turbulencia-növelők legyártása és valós körülmények közötti tesztelése.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Alkalmazott berendezés

A kísérleteimet a Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Karának, Élelmiszeripari Műveletek és Gépek Tanszékén tervezett és kivitelezett, laboratóriumi keresztáramú (cross-flow) membránszűrő berendezésen hajtottam végre (1. ábra).



1. ábra Alkalmazott keresztáramú membránszűrő berendezés sematikus vázolata

2.2. Membránszűrésnél alkalmazott anyagok

Olaj-víz emulziós méréseim során 5 tömeg %-os modell oldatot használtam melyet MOL Unisol ásványi makroemulziós olaj felhasználásával állítottam elő desztillált víz hozzáadásával.

Tejsavós kísérleteimben a kísérleti anyag sajtgyártáskor keletkezett édes savó volt melynek összetétele az 1. táblázatban megtekinthető.

1. táblázat Alkalmazott tejsavó kiindulási összetétele (m/m %)

Szárazanyag tartalom	Zsírtartalom	Fehérjetartalom	Laktóz tartalom	Egyéb
7,55%	0,18%	0,67%	5,45%	1,25%

2.3. Alkalmazott membránok

Olaj-víz emulzió ultraszűrés során műanyag lap-, kerámia cső- és kerámia kapilláris membránokat alkalmaztam. Membránok fő jellemzőit a 2. táblázat tartalmazza:

2. táblázat A olaj-víz emulzió elválasztásához használt membránok.

Gyártó	Membrán jelölése	Típusa	Anyaga	Pórusméret	Felület
BFM Germany	BFM 70100-P	Lap	PAEK*	100 kDa	470 cm ²
Pall Exekia	TI-70-20-Z	Cső	Cirkónium-oxid	20 nm	50 cm ²
Hyflux	M20-011-0.04	Kapilláris	Alumínium-oxid	20 nm	400 cm ²

*PAEK – Poly Aril Éter Keton

A savó mikroszűrési szeparáció kutatásához 50, 200 és 1400 nm pórusméretű, 50cm² szűrőfelületű és 6,8mm belső átmérőjű Membralox (Pall, USA) kerámia csőmembránokat alkalmaztam.

2.4. Statikus keverő

Kerámia csőmembránnal végzet ultra- és mikroszűrésnél a kereskedelemben kapható ¼” (6,35 mm) átmérőjű és 250 mm hosszú Kenics statikus keverőt alkalmaztam. További 5 új statikus keverő került megtervezésre, legyártásra és tesztelésre. Ezeket részletesebben az eredményeknél ismertetem.

2.5. Kísérleti terv

A vizsgált paraméterek szűrletfluxusra (J) és visszatartásra (R) kifejtett hatását 2^P és 3^P típusú teljes faktoros kísérleti tervek segítségével végeztem. Az adatok feldolgozását Statistica 6.0 szoftverrel hajtottam végre.

2.6. Vizsgálati módszerek

A betáplált emulzió és a szűrletek olajra nézett koncentrációját spektrofotométerrel határoztam meg. Abszorbanciát $\lambda = 600$ nanométer hullámhosszon mértem, majd kalibrációs görbe segítségével határoztam meg az olaj koncentrációt.

Tejsavó összetételének vizsgálata szintén spektrofotométeres mérésen alapult, de a komplexebb eljárás miatt, ezeknél a méréseknél külső szolgáltatást vettem igénybe.

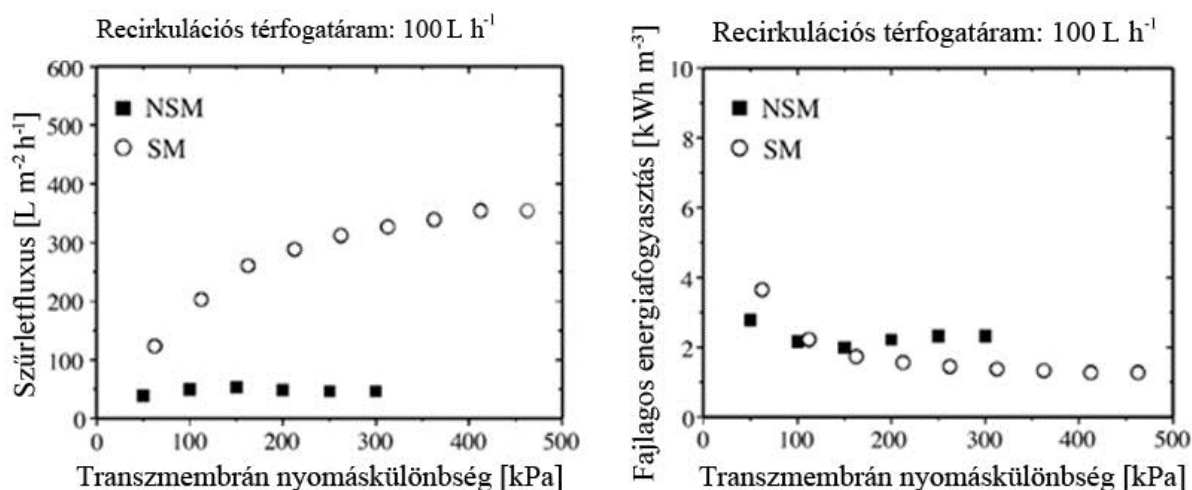
2.7.Számításos folyadékdinamika (CFD)

Számításos folyadékdinamikát modellező programkódhoz (angolul Computational Fluid Dynamics, CFD) Lattice Boltzmann algoritmust alkalmazó nyitott forráskódú szoftvert használtam (<http://www.openlb.org> – hozzáférve 2012. június 11.). Algoritmus bemenete a membránt körbevevő teret leíró 3D mátrix 0,1 mm felbontásban. További bemeneti paraméterek voltak a recirkulációs térfogatáram RFR = 50 L/h és transzmembrán nyomáskülönbség TMP = 200 kPa. Algoritmus kimenete szintén egy 3D mátrix, mely minden egyes eleme tartalmazza az adott részecske sebességi és örvényességi vektorokat. Ezt a hatalmas adathalmazt ParaView 3.6.1 (<http://www.paraview.org/> hozzáférve 2012. június 11.) szoftverrel tudtam elemezni és három dimenzióban megjeleníteni.

3. EREDMÉNYEK

3.1. Stabil olaj-víz emulzió ultraszűrésének intenzifikálása statikus keverő alkalmazásával

Olaj-víz emulzióval végzett kísérleteknél elsőnek azt igazoltam, hogy a Kenics statikus keverő beépítése egy kerámia csőmembrán belsejébe pozitív hatással van a szűrletfluxusra és az olaj visszatartására. Kutatásaim igazolták, hogy nagyon fontos a megfelelő recirkulációs térfogatáram kiválasztása, mert statikus keverő alkalmazásával, csak alacsonyabb tartományban lesz kedvezőbb a fajlagos energiafogyasztás. A recirkulációs térfogatáram növelésével, a membrán hosszában tapasztalható súrlódási nyomásesés exponenciálisan nő.



2. ábra Szűrletfluxus (balra) és fajlagos energiafogyasztás (jobbra) változása a transzmembrán nyomáskülönbség függvényében 100 L·h⁻¹ recirkulációs térfogatáramon mérve (NSM): statikus keverő nélkül és (SM): statikus keverővel

Kenics statikus keverővel felszerelt kerámia csőmembrán és polimer alapú (PEAK) lapmembrán összehasonlító kísérletek eredménye igazolja, hogy a két membránnal közel azonos szűrletfluxust lehetett elérni (közel azonos műveleti paramétereken). A fajlagos energiafogyasztás értékei a kerámia csőmembrán esetében a statikus keverő végett körülbelül kétszer nagyobbak voltak, mint a polimer membránál, de a kedvezőbb olaj visszatartás indokolja a többlet energiafogyasztást.

3. táblázat Kerámia (beépített statikus keverővel) és polimer membránnal végzett szűrés rövid összehasonlítása

	v [m/s]	TMP [kPa]	J [L/(m ² h)]	E [kWh/m ³]	Cp [mg/L]	
Kerámia + SM	1,2	150	90	2,2	21	←állandósult J
	1,8	200	120	3,3	39	
Polimer	1,2	150	60	1,6	110	
	1,8	200	100	1,8	151	←állandósult J

Ahol v: áramlási sebesség, TMP: transzmembrán nyomáskülönbség, J: szűrletfluxus, E: fajlagos energiafogyasztás, Cp: olajkoncentráció a szűrletben, állandósult J: azokat a paramétereket jelenti, ahol a TMP további növelése nem okozott szignifikáns szűrletfluxus növekedést.

A kerámia csőmembránt (beépített statikus keverővel) összehasonlítottam a kerámia kapilláris membránok egyik típusával. A mérési pontok meghatározásánál olyan recirkulációs térfogatáram (RFR) tartományokat választottam, hogy az áramlási sebesség (v) intervalluma mindkét membránszűrés esetében közel azonos legyen. Legnagyobb eltérés a szűrletfluxusok értékében mutatkozott. A 4. táblázatban azokat a műveleti paramétereket mutatom be (transzmembrán nyomáskülönbség (TMP), recirkulációs térfogatáram (RFR)), melyeken a legnagyobb szűrletfluxust (J) mértem a hozzá tartozó fajlagos energiafogyasztással (E) és visszatartással (R).

4. táblázat Legnagyobb szűrletfluxus értékekhez tartozó műveleti paraméterek, fajlagos energiafogyasztás és olaj visszatartás.

	v [m/s]	RFR [L/h]	TMP [kPa]	J [L/(m ² h)]	E [J/m ³]	R[%]
Csőmembrán+SM	1,2	150	400	300	$2,6 \cdot 10^6$	99,99
Kapilláris	1,2	1200	400	45	$2,3 \cdot 10^6$	98

Fenti adatok alapján, úgy néz ki, hogy a kapilláris membrán nem alkalmas az általam alkalmazott statikus keverővel szerelt csőmembrán kiváltására. Viszont a nagyobb egységnyi térfogatra eső szűrőfelület végett, érdemes tovább vizsgálni a kapilláris membránok ipari alkalmazását például statikus keverő beépítésével.

Következő kísérletsorozatban, létrehoztam egy olyan modellt, amivel adott körülmények között, a transzmembrán nyomáskülönbség és a Reynolds szám

alapján megbecsülhető a polarizációs réteg- és membrán ellenállás hányadosa. Az összefüggést leíró egyenlet:

$$\left(\frac{R_p}{R_M}\right) = f\left(\text{Re}, \frac{\text{TMP}}{p_0}\right) \Rightarrow \left(\frac{R_p}{R_M}\right) = a \cdot (\text{Re})^b \cdot \left(\frac{\text{TMP}}{p_0}\right)^c$$

ahol az **a**, **b** és **c** konstansok értékei a 5. táblázatban láthatók:

5. táblázat A modellegyenlet konstansainak értékei statikus keverő- és statikus keverő nélküli (NSM) üzemmódban.

konst.	Statikus keverővel (SM)	Statikus keverő nélkül (NSM)
a	13196	146726
b	-1,212	-1,425
c	1,274	1,126

Olaj-víz emulzió besűrítési kísérletet is végeztem az optimalizált paramétereken. Eredményként azt állapítottam meg, hogy 5 tömegszázalékos kiinduló olaj koncentrációjú emulzió szűrése esetében, 20 nm pórusméretű csőmembránnal (beépített statikus keverővel), kicsivel több, mint 4-es besűrítési arányig (VCF) lehet tartani az 50 mg/L koncentrációt az összegyűjtött szűrletben. Ennél a besűrítési aránynál a szűrletfluxus megközelítőleg a felére csökkent a kiinduló értékhez képest.

Mérési adataimat felhasználva, egy lineáris modellegyenletet állítottam fel, amivel megbecsülhető a műveleti paraméterek (TMP, v) a kezdeti szűrletfluxusra gyakorolt hatása (mérési tartományon belül). Két vizsgált paraméter közül az áramlási sebesség hatásának értéke közel kétszerese a transzmembrán nyomáskülönbség hatásának. A felállított modell egyenlet az 5. tézisben található.

3.2. A statikus keverés hatásának vizsgálata tejsavó mikroszűrése esetén

Tejsavó mikroszűrésénél (mint nanoszűrés előművelete), első lépésben megvizsgáltam az 50, 200 és 1400 nm pórusméretű kerámia csőmembrán hatását a szűrletfluxusra, majd a laktóz- és fehérje visszatartására. Eredményeim alapján a vizsgált membránok közül a 200 nm-es membrán minősült a legmegfelelőbbnek.

Következő lépésben vizsgáltam a statikus keverő hatását a szűrletfluxusra és a fajlagos energiafogyasztásra. A szűrletfluxusra gyakorolt hatása egyértelmű volt, a vizsgált tartományban, minden mérési pontban 60-80% javulás volt kimutatható.

Fajlagos energiafogyasztásnál hasonlóan alakultak az arányok, mint olaj-víz emulzió szűréskor, csak alacsony térfogatáramon kedvezőbb a statikus keverő alkalmazása. Rövid összehasonlítást a 6. táblázat tartalmaz.

6. táblázat *Kenics statikus keverő hatása a fluxusnövekedésre és energia-megtakarításra 200 nm kerámia csőmembránnal (pozitív érték a statikus keverő kedvezőbb hatását jelenti)*

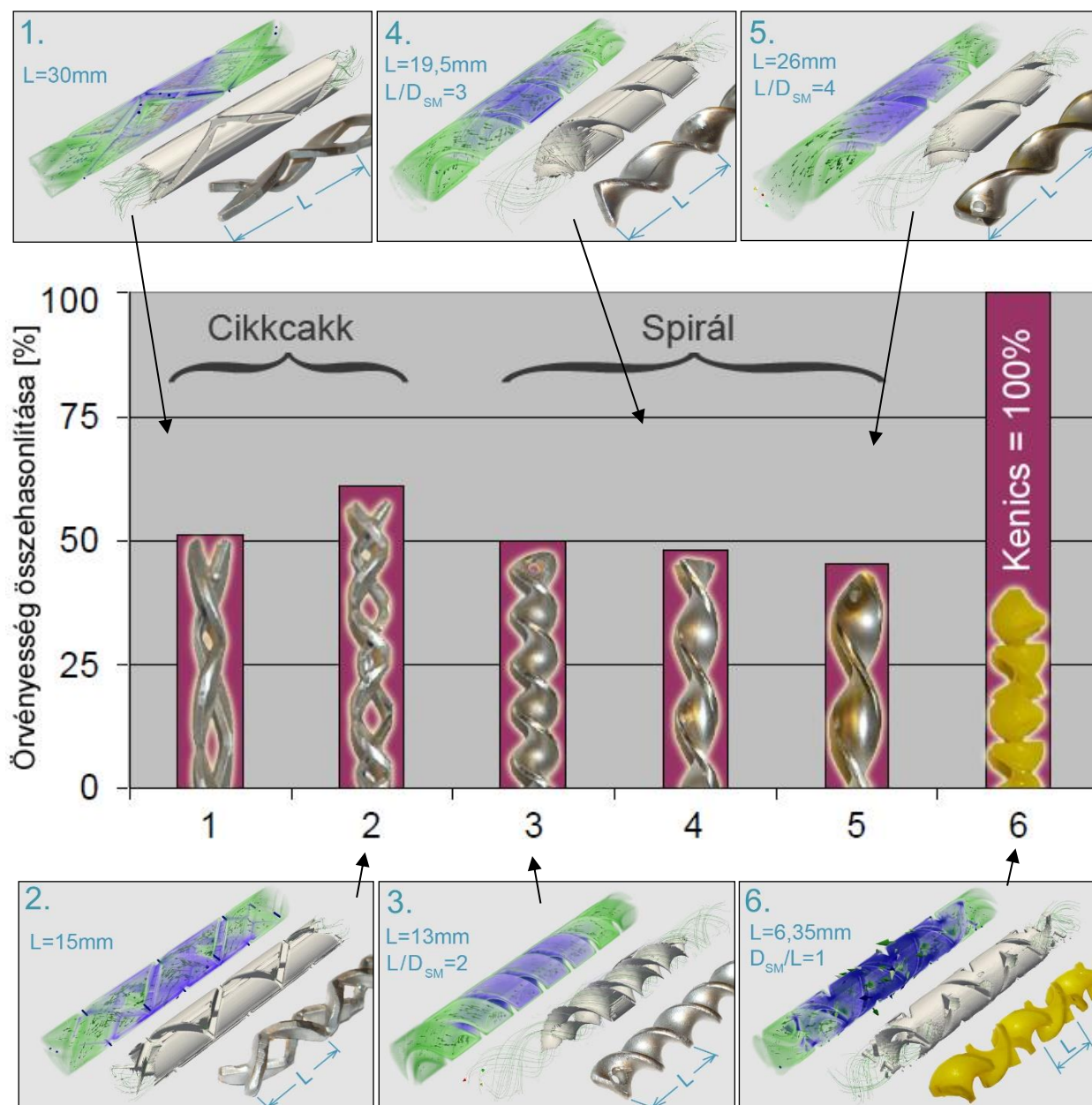
RFR [L/h]	TMP [kPa]	J [%]	E [%]
50	200	64	+10
100	200	70	-428
150	200	73	-982

Kerámia csőmembránba szerelt statikus keverő hatása a tejsavó komponenseinek visszatartására változó volt. A folyamat jobb megértése miatt, a kísérleti tervet 2^P részfaktor terv szerint végeztem el. Az adatok feldolgozását Statistica 6.0 szoftverrel végeztem el. A módszer segítségével világos képet kaptam a különböző hatások vagy keresztthatások nagyságáról. Kimutatható volt, hogy a vizsgált komponensek közül (TMP, RFR, SM), a statikus keverő hatása a legnagyobb. Mindhárom komponens visszatartása esetében a statikus keverő hatása 2 – 3-szorosa volt a RFR vagy TMP hatásának. A felállított modellek a 7. tézisben megtalálhatók, segítségükkel, a műveleti paraméterek ismeretében, megbecsülhető a kezdeti visszatartás a savó egyes komponenseire.

3.3.A statikus keverő optimalizálása számítási folyadékdinamika (CFD) segítségével

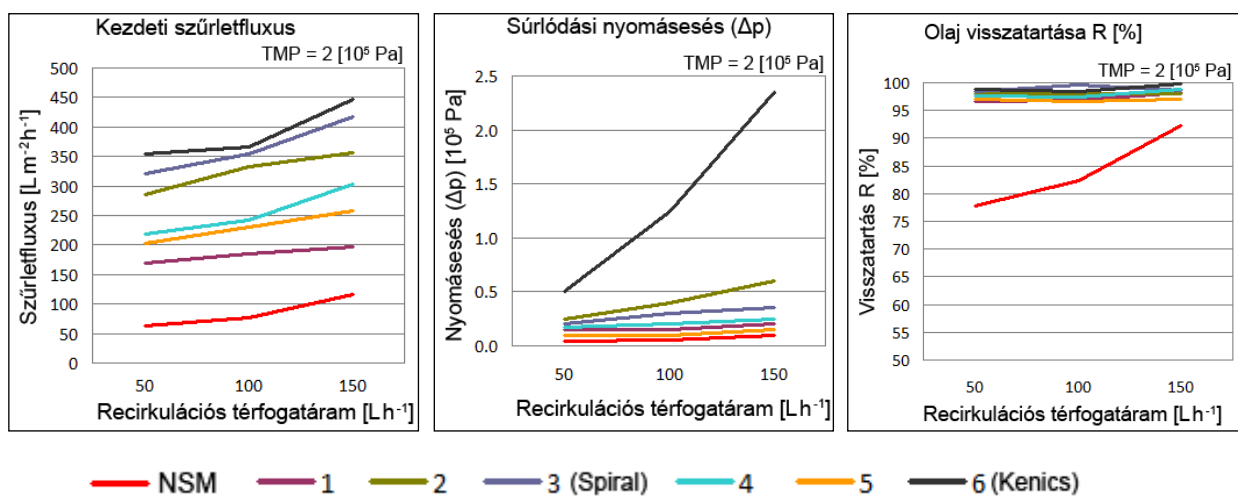
A Kenics keverő pozitív hatását a szűrletfluxusra és a membrán visszatartására egyértelműen sikerült igazolni. Sajnos a hosszában keletkező jelentős súrlódási nyomásesés egyenes arányban hatással van a fajlagos energiafogyasztás növekedésére. Ezért először számítógépes folyadékdinamika (CFD) szimulációval megvizsgáltam ezt a csőmembránon belül keletkező jelenséget. 3D térbeli

mátrixszal vittem be a Kenics statikus keverő geometriáját a nyitott forráskódú lattice Boltzmann algoritmusba. További 5 új statikus keverő geometriát fejlesztettem, és ezeket szintén megvizsgáltam az imént említett CFD módszerrel. A szimulációban 50 L/h recirkulációs térfogatáramot és 200 kPa transzmembrán nyomáskülönbséget alkalmaztam. Az eredményeket vizuálisan is tudtam elemezni, de pontosabb módszer, ha számszerű adatokat dolgozok fel. Így elkészítettem a 3. ábrát, ahol az örvényességi adatokat hasonlítom össze.



3. ábra Statikus keverők szimulált örvényességének összehasonlítása

Kenics keverőé volt a legnagyobb normált örvényességi érték, ezt vettem 100%-nak. Látható, hogy viszonylag alacsony szimulált térfogatáramon (50 L/h) is a többi keverő örvényessége nagyjából fele akkora. Feltételezésem szerint nagyobb térfogatáramokon ez a különbség még nagyobb lesz, de ehhez le kellett gyártani az új statikus keverőket és a valóságban is kipróbálni őket. CFD szimulációval a visszatartásokra nem lehetett következtetni, csak a membrán hosszában keletkező nyomásesésre és az ebből számolt fajlagos energiafogyasztásra. A következő három ábra a különböző recirkulációs térfogatáram függvényében ábrázolja a szűrletfluxust, a súrlódási nyomásesést és az olaj visszatartását.



4. ábra Kezdeti szűrletfluxus, súrlódási nyomásesés és olaj visszatartása a recirkulációs térfogatáram függvényében

Laboratóriumi mérésem is egyértelműen igazolták, hogy a 3-as számmal jelölt Spirál statikus keverő megtartotta a Kenics statikus keverő pozitív tulajdonságait, de használható nagyobb térfogatáramokon is, mivel a súrlódási nyomásesés ilyenkor is kellően alacsony. 3-as számú spirál statikus keverő főbb jellemzői: menetemelkedés és átmérő aránya: 2; csavart lemez vastagsága 1 mm; menetemelkedési szög 32°; anyaga: rozsdamentes acél.

3.4. Új, tudományos eredmények

1.

Megállapítottam, hogy Kenics FMX típusú statikus keverőt illesztve az ultraszűrő kerámia csőmembránba (Pall, Schumasiv), keresztáramú üzemmódban végezve a membránszűrést fajlagos energia-megtakarítás és nagyobb szűrletteljesítmény érhető el a statikus keverő nélküli csőmembránnal végzett szűréshez viszonyítva.

A laboratóriumi kísérleteket stabil, olaj-a-vízben típusú mikroemulzióval (MOL, Unisol), modelloldattal végeztem (emulzió koncentráció 5 m/m%, üzemi hőmérséklet 50°C), a $4000 \pm 10\%$ -os Reynolds szám alatti tartományban.

A kísérletek alapján a transzmembrán nyomáskülönbség $TMP = 150 - 300$ kPa és a recirkulációs térfogatáram $RFR = 100$ L/h értéke mellett az energia-megtakarítás 10-42%-os volt, a szűrletteljesítmény pedig 3,3-6 - szorosra nőtt.

2.

Mérésekkel igazoltam, hogy a Kenics FMX típusú statikus keverővel felszerelt kerámia csőmembrán (Pall, Schumasiv) képes ugyanakkora fluxust biztosítani, mint a polimer alapú (Poli Aril Éter Keton - PAEK) membrán, miközben a permeátumban lényegesen alacsonyabb olajkoncentrációt biztosít, illetve a műveleti energia-igények között nincs jelentős eltérés. Ez bizonyítja, hogy az újszerű, kedvezőbb tulajdonságú (hosszabb élettartam, jobb hő- és pH tűrés) kerámia membránok alkalmasak az iparban használt polimer membránok kiváltására.

A Kenics FMX statikus keverővel felszerelt kerámia csőmembrán szűrletteljesítménye az iparban használt műanyag PAEK membránnal összevetve azonos, ugyanakkor a permeátumban megjelenő olaj koncentrációja a statikus keverővel szerelt csőmembránnak egy nagyságrenddel alacsonyabb volt, mint a PAEK típusú műanyag membrán alkalmazásakor. Így a statikus keverős kerámia membránnál a szűrlet minősége közvetlenül megfelelt a környezetvédelmi követelményeknek (50 mg/L olajtartalom alatti érték a permeátumban).

Mindkét membrán esetében, az összehasonlított paramétereken, a fajlagos energia-igény $2 \pm 10\%$ kWh/m³ volt. A statikus keverővel felszerelt kerámia

csőmembrán esetén a transzmembrán nyomáskülönbség 150 kPa és a recirkulációs áramlási sebesség 1,2 m/s, míg az összehasonlításhoz választott PAEK membrán esetén ezek az értékek 200 kPa és 1,8 m/s; az első esetben Fluxus = 90 L/(m²h) és a szűrlet olajkoncentrációja 21 mg/L volt a második esetben Fluxus = 100 L/(m²h) és a szűrlet olajkoncentrációja 151 mg/L érték.

3.

A Kenics FMX statikus keverővel szerelt kerámia csőmembrán (Pall, Schumasiv) és az újdonságnak számító kerámia-kapilláris membrán (Hyflux) összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a vizsgált műveleti tartományban (TMP = 200 – 400 kPa, áramlási sebesség 0,4 – 1,2 m/s) a Kenics FMX statikus keverős kerámia csőmembrán egy nagyságrenddel magasabb fluxus-értéket biztosít.

Stabil, 5m/m%-os olaj-víz modell emulzió szűrése során a Kenics FMX statikus keverővel ellátott laboratóriumi csőmembránnal a mért maximális érték TMP = 400 kPa és RFR = 150 L/h esetén 300 L/(m²h), míg a kapilláris membránnál mért maximális érték TMP = 400 kPa és RFR = 1200 L/h esetén 45 L/(m²h) volt. Ennek jelentősége az, hogy az újnak számító, kerámia kapilláris membrán, stabil olaj-víz emulzió szeparációja során, a méréseim alapján nem alkalmas az általam alkalmazott statikus keverővel szerelt csőmembrán kiváltására.

Azonban, mivel a kapilláris membránok esetén az egységnyi térfogatra eső szűrő felület nagyobb, mint a csőmembránoknál, ezért a kapilláris membránok ipari alkalmazását még érdemes tovább vizsgálni (pl. statikus keverő beépítése).

4.

Modellt fejlesztettem ki, amelynek segítségével, a transzmembrán nyomáskülönbség és az áramlási viszonyok (Reynolds-szám, Re) alapján, kiszámítható a polarizációs réteg ellenállása (R_P) a műveleti paraméterek és a membránellenállás (R_M) függvényében. A kifejlesztett modell-egyenlet, a következőképpen írható fel:

Statikus keverő alkalmazásával (SM):

$$R_p = 13196 \cdot Re^{(-1,212)} \cdot \left(\frac{TMP}{p_0} \right)^{1,274} \cdot R_M \quad [1/m]$$

Statikus keverő nélküli mérésnél (NSM):

$$R_p = 146726 \cdot Re^{(-1,425)} \cdot \left(\frac{TMP}{p_0} \right)^{1,126} \cdot R_M \quad [1/m]$$

ahol R_p - polarizációs réteg ellenállása [1/m], Re - Reynolds szám (-), TMP - transzmembrán nyomáskülönbség [kPa], R_M - membrán ellenállása [1/m], p_0 - légköri nyomás [kPa]. Érvényességi feltételek: TMP : 100-300 kPa, hőmérséklet: 50°C, membrán: 20 nm pórusméretű kerámia csőmembrán, Reynolds számok: 2408 - 7223 (SM esetében) és 2019-6057 (NSM esetében). Mérések 5m/m%-os olaj-víz emulzió membránszűrésre vonatkoznak. Pontosság: $\leq 15\%$.

5.

Statisztikai módszerrel modellt állítottam fel a Kenics FMX statikus keverővel végzett membránszűrés kezdeti fluxusának becsléséhez/számításához.

$$J = (2,619 + 0,733 \cdot v - 0,371 \cdot TMP + 1,817 \cdot v \cdot TMP) \cdot 10^{-5} \quad [m^3/(m^2s)]$$

ahol J – szűrletfluxus [$m^3/(m^2s)$] , v - áramlási sebesség (m/s), TMP – transzmembrán nyomáskülönbség [10^5 Pa]. Az érvényesség tartománya: $v = 0,36 - 1,08$ (m/s), $TMP = 1 - 3$ [10^5 Pa]. A képlet érvényességének további feltételei: 20 nm pórusméretű kerámia csőmembrán beépített Kenics statikus keverővel. 50°C folyadék hőmérséklet. Az adatok az 5 m/m% olaj-víz emulzió szűrésére vonatkoznak. A közölt modell esetén 95%-os szignifikancia szintet alkalmaztam.

A mérési adatok és a kifejlesztett modell alapján meghatároztam az optimális üzemi paramétereket, a szűrletfluxus és az olajvisszatartás figyelembevételével, és megállapítottam, hogy Kenics FMX típusú keverővel szerelt kerámia csőmembrán alkalmazásánál a 200 kPa transzmembrán nyomáskülönbség és a 0,6 m/s áramlási

sebesség esetén a művelet az olajvisszatartás szempontjából optimális (teljesíti a környezetvédelmi előírást). Megállapítottam továbbá azt is, hogy az optimális paraméterek alkalmazása mellett az emulzió 4-es sűrítési arányig (VCF) koncentrálható, megfelelően a környezetvédelmi előírásoknak – a permeátum átlagos olajtartalma ≤ 50 mg/L.

6.

Bebizonyítottam, hogy édes tejsavó membránszűrővel kivitelezett derítésénél (zsírmentesítés), a Kenics FMX típusú statikus keverő beépítésével, a kerámia csőmembránokban jelentősen növelhető a szűrletfluxus.

Megállapítottam, hogy a vizsgálati tartományon belül ($v = 0,36 - 1,08$ m/s, TMP = 100 – 300 kPa, az optimális áramlási sebesség tejsavó mikroszűrésénél 0,36 m/s, az optimális transzmembrán nyomás pedig 300 kPa értéken van. Az optimális üzemi körülmények esetén az elért fluxusnövekedés átlagos értéke 64-65%. Megállapítottam továbbá, hogy a 200 nm pórusméretű membránnal átlagosan 30%-kal nagyobb permeátumfluxust tudtam elérni, mint az 50 nm-es membránnal.

7.

Modelleztem a zsír-, a fehérje- és a laktóztartalom változását/visszatartását a műveleti paraméterek függvényében (a transzmembrán nyomáskülönbség, a recirkulációs térfogatáram, a Kenics FMX statikus keverő jelenléte és annak hiánya esetén), 200 nm pórusméretű kerámia csőmembránnal a sajtgyártásban keletkezett édes tejsavó mikroszűrővel történő zsírtalanítása esetében.

A százalékos fehérje kezdeti visszatartást leíró modell:

$$R_{\text{feh}} = 29,33 - 0,95 \cdot \left(\frac{\text{TMP} - 200}{100} \right) - 1,77 \cdot \left(\frac{\text{RFR} - 100}{50} \right) - 6,79 \cdot M [\%]$$

ahol, R_{feh} - fehérje visszatartás [%], TMP – transzmembrán nyomáskülönbség [kPa], RFR – térfogatáram [L/h] és M a statikus keverő SM (M=1) NSM (M=-1).

A százalékos laktóz kezdeti visszatartást leíró modell:

$$R_{\text{lakt}} = 19,5 - 1,61 \cdot \left(\frac{\text{TMP} - 200}{100} \right) - 0,32 \cdot \left(\frac{\text{RFR} - 100}{50} \right) - 6,4 \cdot M [\%]$$

ahol, R_{lakt} százalékos laktóz visszatartás [%], TMP – transzmembrán nyomáskülönbség [kPa], RFR – térfogatáram [L/h] és M a statikus keverő SM (M=1) NSM (M=-1)

A százalékos zsír kezdeti visszatartást leíró modell:

$$R_{\text{zsír}} = 83,56 - 2,15 \cdot \left(\frac{\text{TMP} - 200}{100} \right) - 0,76 \cdot \left(\frac{\text{RFR} - 100}{50} \right) - 4,78 \cdot M [\%]$$

ahol, $R_{\text{zsír}}$ százalékos zsír visszatartás [%], TMP – transzmembrán nyomáskülönbség [kPa], RFR – térfogatáram [L/h] és M a statikus keverő SM (M=1) NSM (M=-1).

Az egyenletek alkalmazhatósági tartománya TMP = 100 – 300 [kPa], RFR = 50 – 150 [L/h]. Képlet érvényességének további feltételei: 200 nm pórusméretű és 6,8 mm belső átmérőjű kerámia csőmembrán. M=1 érték esetében beépített Kenics statikus keverővel (SM). 40°C folyadék hőmérséklet. Mindhárom képletben a TMP-ből kivont érték 200 kPa a mérési tartomány középértéke. A TMP tag nevezőben szereplő 100 kPa viszont a mérési tartomány értékének fele. Hasonlóan az RFR-ből kivont érték 100 L/h a mérési tartomány középértéke és a nevezőben látható érték 50 L/h a mérési tartomány értékének fele. A közölt modellek esetén 95%-os szignifikancia szintet alkalmaztam.

8.

A méréseim, illetve a számítási folyadékdinamika (Computational Fluid Dynamics - CFD) szimulációk segítségével megállapítottam, hogy a Lattice-Boltzmann algoritmussal kapott normált örvényesség értékek és a mérés során tapasztalt súrlódási nyomásesés között összefüggés van. A laboratóriumi mérési adatokból látható, hogy az újonnan kifejlesztett keverők nyomásesése a Kenics keverő által létrehozott nyomásesésnek csupán a fele, ami igaz a CFD-vel

meghatározott normált örvényességek esetén kiszámolt értékekre is (RFR = 50 L/h, TMP = 200 kPa).

A kutatás jelen állása szerint az általam használt normált örvényesség értékekből nem lehet közvetlenül kiszámítani a membrán hosszában jelentkező nyomásesést, de alkalmas a különböző statikus keverő által okozta nyomásesések számítógépes összehasonlítására.

9.

Modern számítógépes szimuláció segítségével kiválasztottam és laboratóriumi kísérletekben is teszteltem stabil olaj-a-vízben emulzió membránszűrése esetében a leginkább hatékony keverő kialakításokat.

Optimálisnak az a keverő kialakítás számít, amely a Kenics statikus keverőhöz viszonyítva, hasonló szűrletfluxust és visszatartást eredményezett, de (nagyobb térfogatáramokon szűrve) jelentősen kisebb a membrán hosszában keletkező súrlódási nyomásesés.

A 250 mm hosszú Kenics keverőnél tapasztalt súrlódási nyomásesés értéke $\Delta p = 230$ kPa (RFR = 150 L/h és TMP = 200 kPa beállításnál), az optimális, új, keverőnél ugyanezen paramétereknél csupán $\Delta p = 30$ kPa.

Az általam fejlesztett 5 féle statikus keverő közül az optimális statikus keverő kialakítás paraméterei a következők lettek: Spirális keverő; amelynek a menetemelkedése (L) és a keverő átmérőjének (D_{SM}) aránya egyenlő a kettővel. Ebből számolt menetemelkedési szög: 32° . A megcsavart fémszalag vastagsága: 1 mm.

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Kutatásaim során, olaj-víz emulzió ultraszűrése és tejsavó mikroszűrése esetében is igazoltam, hogy a Kenics statikus keverő beépítése a kerámia csőmembrán belsejébe pozitív hatással van a szűrletfluxusra és a fajlagos energiafogyasztásra (alacsonyabb áramlási sebességen). Olaj-víz emulzió ultraszűrése esetében sikerült igazolnom, hogy a Kenics statikus keverő beépítése növeli a membrán olaj-visszatartását és 5 m/m% kiinduló koncentrációjú emulzió esetében, akár 4-es besűrítési arányig tudja tartani az 50 mg/L olajkoncentrációt a szűrletben, ami megfelel a szennyvízkezelés környezetvédelmi előírásainak. Mindkét vizsgált anyag esetében meghatároztam az optimális műveleti paramétereket, amelyeken a kerámia csőmembrán és a Kenics statikus keverő együttes hatása a membránszűrés teljesítményére és a fajlagos energiafelhasználásra a legkedvezőbb. A felállított modell képletek segítségével a membránszűrés egyes paramétereinek az értékei mérés nélkül megbecsülhetők.

Új statikus keverőt fejlesztettem ki, mely megtartotta a Kenics keverő pozitív tulajdonságait (szűrletfluxus növelő hatás és jobb visszatartás), de nem okoz jelentős súrlódási nyomásvesztést a membrán hosszában, így az használható nagyobb áramlási sebességen is, ami várhatóan jobban késlelteti a membrán eltömődését.

Javaslatok:

- Az új (spirális) statikus keverővel végzett olaj-víz emulzió ultraszűrés optimális műveleti paramétereinek a meghatározása, kibővítve a mérési tartományt nagyobb áramlási sebességekre.
- Spirális statikus keverő hatásának vizsgálata a tejsavó mikroszűrés paramétereire.
- Célszerű minél több anyaggal megfigyelni a Spirális statikus keverő hatását a membránszűrés folyamatra
- Az új statikus keverő hatásának CFD és laboratóriumi vizsgálata kerámia kapilláris membrán alkalmazása esetében.

5. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

IF-os folyóiratcikk

Igor Gaspar, Andras Koris, Zsolt Bertalan, Gyula Vatai (2011): Comparison of ceramic capillary membrane and ceramic tubular membrane with inserted static mixer. *Chemical Papers* 65 (5) 596–602 (2011). DOI: 10.2478/s11696-011-0045-y (IF: 0,791)

Krisztina Albert, András Koris, Igor Gáspár, Gábor Rácz, Gyula Vatai (2014): Production of microemulsion by ceramic tube membrane equipped with static turbulence promoter. *Acta Alimentaria Volume 43 Vol.43*, p. 1-8, Supplement 2014 (IF 2013: 0,427)

Igor Gaspar, Predrag Tekic, Andras Koris, Albert Krisztina, Miodrag Tekic, Gyula Vatai (2015): CFD and laboratory analysis of axial cross-flow velocity in porous tube packed with differently structured static turbulence promoters. *Hemijaska industrija*, Vol 69 (2015), No 1. DOI:10.2298/HEMIND140312001G (IF 2013: 0,562)

NEM IF-os folyóiratcikk, idegen nyelv

Igor Gáspár, András Román, Gyula Vatai, András Koris, Edit Márki (2010): Effects of Static Mixing on the Ultrafiltration of Milk Whey. *Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology and Nutrition* 5 (1-2), (2010) Pages 5-9 (ISSN:1847-3423)

Gyula N. Vatai, Darko M. Krstić, András K. Koris, Igor L. Gáspár, Miodrag N. Tekić (2009): Ultrafiltration of oil-in-water emulsion: Comparison of ceramic and polymeric membranes, *EuroMed 2008, Desalination and Water treatment*, Vol. 3(1-3) p. 162-168. (IF: 0,752 in 2010)

Publikáció konferenciakiadványban**Magyar nyelvű (teljes)**

Gáspár Igor, Román András, Vatai Gyula (2008): Tejsavó mikroszűrésének intenzifikálása statikus keverővel. Magyar Tudományos Akadémia Agrártudományok Osztálya, Agrárműszaki Bizottság XXXII. Kutatási és fejlesztési tanácskozás, Gödöllő, Nr. 32, 1. kötet, 111-115 oldal. ISBN: 978 963 611 451 0, ISBN: 978 963 611 452 7

Magyar nyelvű (összefoglaló)

Gáspár Igor, Koris András, Vatai Gyula (2007): Olaj-víz emulzió statikus keveréssel kombinált membránszűrési besűrítésének optimális műveleti paraméterei. Műszaki Kémiai Napok '07 Veszprém, 297. oldal, ISBN: 978-963-9696-15-0

Igor Gáspár, András Koris, Predrag Tekic (2010): CFD alkalmazása Kenics- és spirális típusú statikus keverők esetében. MTA-AMB 2010. évi XXXIV. KUTATÁSI ÉS FEJLESZTÉSI TANÁCSKOZÁS, Gödöllő, 23. o. ISBN: 978-963-269-165-7

Bertalan Zsolt, Márki Edit, Gáspár Igor, Vatai Gyula (2010): Olaj víz emulzió szétválasztása kerámia kapillárcsöves membrán alkalmazásával. Műszaki Kémiai Napok 2010, Konferencia kiadvány, 244. oldal, ISBN: 978-963-9696-93-8

Gáspár Igor, Koris András, Vatai Gyula (2011): Stabil olaj-víz emulzió bontása kerámia kapillárcsöves membránnal. Műszaki Kémiai Napok 2011, ISBN: 978-615-5044-07-6

Gáspár Igor, Koris András, Vatai Gyula (2012): Statikus keverő geometriájának hatása olaj-a-vízben mikroemulzió ultraszűrési besűrítésére. Műszaki Kémiai Napok 2012, (Veszprém 2012. április 24-26) ISBN: 978-615-5044-54-0

Igor Gáspár, András Koris, Krisztina Albert, Gyula Vatai (2014): Effect of the static mixer geometry on membrane fouling during microfiltration of oil-in-water emulsion. Műszaki Kémiai Napok '14, Veszprém, 47 p., ISBN 978-963-010-3

Nemzetközi konferencia (teljes)

Szilvia Bánvölgyi, Igor Gáspár, Fanni Savanya, Flóra Nyéki, Gyula Vatai (2015): Effect of static mixer to the initial flux of red- and black currant juice using microfiltration. Food Science Conference 2015, Budapest, Konferencia-kiadvány (CD), ISBN 978-963-503-603-5

Nemzetközi konferencia (összefoglaló)

András KORIS, Darko M. KRSTIĆ, Gyula VATAI, Igor GASPARG, Xianguo HU (2007): Effect of static mixing inside a tubular membrane on the ultrafiltration of an oil-in-water emulsion. Membrane science and technology conference of visegrad countries, Permea, p.100. ISBN: 978-963-9319-69-1

Gáspár Igor (2007): Energetic analysis for membrane filtration of oil-in-water emulsion combined with static mixer, XXIV Summer School of the European Membrane Society, Genova, Italy, Book of abstracts (CD)

A. Koris, X. Hu, I. Gáspár, Gy. Vatai, E. Békássy Molnár (2007): Static mixing for economical cleaning of oily wastewater by membrane separation. Hungarian Network of Excellent Centres on Nanosciences, II. Technology Transfer Day, Budapest, pp. 67. ISBN: 978-963-06-3264-5

Gáspár Igor, Koris András, Yuefei Wang, Vatai Gyula (2007): Áramlási viszonyok modellezése olaj-víz emulzió membránszűrésénél. Lippay-Ormos-Vas Tudományos Ülésszak (LOV), Budapest, p. 216-217. ISBN 978-963-06-3350-5

Igor Gaspar, Andras Koris, Jozsef Csanadi, Gyula Vatai (2008): Effect of operating parameters on the retention of whey components using microfiltration. International Conference on Science and Technique in the Agri-Food Business, Szeged, book of abstracts p. 189-190. ISBN: 963 482 676 8

Gyula N. Vatai, Darko M. Krstić, András K. Koris, Igor L. Gáspár, Miodrag N. Tekić (2008): Ultrafiltration of oil-in-water emulsion: Comparison of ceramic and polymeric membranes, EuroMed 2008, Desalination Cooperation among Mediterranean Countries of Europe and the MENA region. Book of abstracts p.19-20.

Gáspár Igor, Koris András, Vatai Gyula (2009): Mathematical model of permeate flux prediction for ultrafiltration of oil-in-water emulsion enhanced with static mixer, Műszaki Kémiai Napok '09, Veszprém p. 242a ISBN 978-963-9696-68-6

Igor Gaspar, Andras Koris, Erika Bekassy-Molnar, Gyula Vatai (2009): A model for the microfiltration of whey with ceramic tube membranes. Permea, Prague, p. 166. ISBN: 978-80-85009-58-3

I. Gaspar, A. Koris, L. Somogyi, Gy. Vatai (2009): Design and development of membrane filtration equipment for crude rapeseed oil treatment. SYNERGY & Technical Development, Gödöllő, Book of abstracts p. 91. ISBN: 978-963-269-111-4

Gáspár Igor, Koris András, Vatai Gyula, Békássyné Molnár Erika (2009): Olajvíz emulzió és tejsavó membránszűrési jellemzők összehasonlítása. Comparasion of membrane filtration properties of oil-in-water emulsion and whey., Lippay – Ormos – Vas tudományos ülészak,– Budapest, Book of abstracts p. 194-195. ISBN: 978-963-503-397-3

Igor Gaspar, Andras Koris, Zsolt Bertalan, Gyula Vatai (2010): Comparison of ceramic capillary membrane and ceramic tube membrane with static mixer inside. Membrane Science and Technology conference of Visegrad Countries, Permea, Tatranske Matliare, Slovakia, Book of Abstracts (CD), ISBN: 978-80-227-3339-7

Andras Koris, Igor Gaspar, Edit Marki, Darko Krstic, Gyula Vatai, Predrag Tekic (2010): A model for the pressure-drop prediction of an ultrafiltration tubular membrane equipped with static mixer. Membrane Science and Technology Conference of Visegrad Countries, Permea, Tatranske Matliare, Slovakia, Book of Abstracts (CD) ISBN: 978-80-227-3339-7

I. Gaspar, A. Koris, C. Dechambre, S. Koskinen and G. Vatai (2011): Effects of the static mixer's geometry on the intensified ultrafiltration of oil-in-water emulsions. Synergy in the Technical Development of Agriculture and Food industry, Gödöllő, Book of abstracts p. 26. ISBN 978-963-269-249-4