



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**Membránműveletek
alkalmazhatóságának
vizsgálata a söriparban**

Varga Áron

Gödöllő

2021

A doktori iskola

Megnevezése: Élelmiszertudományi Doktori Iskola

Tudományága: Élelmiszertudományok

Vezetője: **Simonné Dr. Sarkadi Livia, D.Sc.**

egyetemi tanár

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet,
Táplálkozástudományi Tanszék

Témavezetők:

† Dr. Márki Edit, Ph.D.

egyetemi docens

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet,
Élelmiszeripari Műveletek és Folyamattervezés
Tanszék

Dr. habil. Koris András, Ph.D.

egyetemi docens

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem,
Élelmiszertudományi és Technológiai Intézet,
Élelmiszeripari Műveletek és Folyamattervezés
Tanszék

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

A munka előzményei, a kitűzött célok

E dolgozat témája a membránműveletek (MSPs) alkalmazásának a vizsgálata a söriparban. Mivel a membránműveletek egy környezetkímélő technológia, ami hatékony szétválasztási képességgel és enyhe működési körülményekkel rendelkezik, és feltörekvő technológia a söriparban, az értekezés témája fontos és releváns.

A részletes szakirodalmi feltárás után, négy főbb hiányos témát vizsgáltam meg, ezek a következők voltak: sörlé membránszűrése (WMF), sör membránszűrése (BMF) statikus keverő (STP) segítségével, sör membránszűrése (BMF) szilikagél (SG) segítségével, sör alkoholmentesítése (BDA) reverz ozmózis (RO) segítségével.

A sörlé membránszűrésének (WMF) a céljai a következők voltak: a hideg és a forró seprő teljes eltávolítása a komlózott sörléből membránszűrés segítségével, a membránszűrés hatásának a tanulmányozása az analitikai paraméterek változására, permeátum fluxus értékek meghatározása.

A sör statikus keverővel (STP) történő membránszűrésének (BMF) a céljai a következők voltak: egy modell kifejlesztése, ami leírja a folyamatot; a modell szignifikáns paramétereinek a hatásmagyságának a meghatározása; a modell optimumának és a szignifikáns paraméterek optimális értékeinek a megtalálása.

A sör szilikagéllel (SG) történő membránszűrésének (BMF) a céljai a következők voltak: egy modell kifejlesztése, ami leírja a folyamatot; a modell szignifikáns paramétereinek a hatásmagyságának a meghatározása; a modell optimumának és a

szignifikáns paraméterek optimális értékeinek a megtalálása.

A BMF membránmosásának célja volt, egy olyan újszerű és hatékony membránmosási eljárás kifejlesztése a mikroszűrő membránhoz, amellyel vissza lehet nyerni a membrán kezdeti ellenállását.

Az RO-val történő sör alkoholmentesítésének (BDA) a céljai a következők voltak: egy modell kifejlesztése, ami leírja a folyamatot; a modell szignifikáns paramétereinek a hatásnagyságának a meghatározása; a modell optimumának és a szignifikáns paraméterek optimális értékeinek a megtalálása.

Az RO-val történő BDA membránmosásának célja volt, egy olyan újszerű és hatékony membránmosási eljárás kifejlesztése a reverz ozmózis membránhoz, amellyel vissza lehet nyerni a membrán kezdeti ellenállását.

Anyag és módszer

Anyagok

A következő anyagokat használtam fel a kísérleteim során: sörfőző víz (13°dH teljes keménység) a WMF és a BMF kísérletekhez; maláták: Pilsner Malt (Boortmalt, Magyarország) a WMF kísérlethez, Extra Pale Premium Pilsner Malt (Weyermann, Németország) a BMF kísérletekhez; komlók: Hallertauer Tradition T90 komló pellet (HVG, Németország) a WMF kísérlethez; Hallertauer Magnum T90 komló pellet (HVG, Németország) a BMF kísérletekhez; élesztő: folyékony lager élesztő (Cara Technology, Egyesült Királyság) a BMF kísérletekhez; sörök: 0.5 literes dobozos Soproni Klasszikus szűrt

világos lager sörök (HEINEKEN Hungária, Magyarország) 4.5% (V/V) alkoholtartalommal az RO-val történő BDA kísérletekhez; statikus keverő: SPIRAL LD2 STP (Inox, Szerbia) az STP-vel történő BMF kísérletekhez; szilikagél: Stabifix W MF (Stabifix Brauerei-Technik, Németország) az SG-vel történő BMF kísérletekhez.

A *Táblázat 1* mutatja a membránműveletek során használt membránok tulajdonságai

Táblázat 1: A membránműveletek során használt membránok tulajdonságai

Alkalmazás	Gyártó	Típus	Anyag	Pórusméret
WMF	Pall, USA	Membralox T1-70	kerámia	0.2 μm
BMF STP-vel	Pall, USA	Membralox T1-70	kerámia	0.5 μm
BMF SG-vel	Pall, USA	Membralox T1-70	kerámia	0.5 μm
BDA RO-val	Alfa Laval, Svédország	RO99	poliészter	^a

^a A reverz ozmózis membránt nem lehet besorolni pórusméret alapján, mivel a szelektív réteg bőr típusú. $R_{\text{NaCl}} \geq 98 \%$, mérve: 2000 ppm NaCl, 16 bar, 25 °C.

Berendezések

50 L kapacitású félüzemi sörfőzde (HBH, Hungary) segítségével állítottam elő a sörlevet és a szűretlen söröket. Saját fejlesztésű kísérleti keresztáramú mikroszűrő (CFMF) berendezést használtam a WMF és a BMF kísérleteknél, míg "HF-528/08." típusú keresztáramú reverz ozmózis berendezést (CFRO) (Hidrofilt, Hungary) használtam az alkoholmentesítési

kísérleteknél.

Módszerek

Sörlevet állítottam elő a WMF kísérlethez és szűretlen söroket főztem a BMF kísérletekhez. A szűretlen sör receptjét, ami egy “2A. International Pale Lager” típusú sör volt, a Beer Judge Certification Program (BJCP) alapján terveztem meg.

A tanulmányban vizsgált membránműveletek működési paraméterei a *Táblázat 2* mutatja.

Táblázat 2: A tanulmányban vizsgált membránműveletek működési paraméterei

Kísérlet	TMP	Q	STP	SGC
WMF	0.4 bar	50 L h ⁻¹	-	-
BMF STP-vel	0.4, 0.8, 1.2 bar	50, 125, 200 L h ⁻¹	nem, igen	-
BMF SG-vel	0.4, 0.8, 1.2 bar	50, 125, 200 L h ⁻¹	-	0, 40, 80 g hL ⁻¹
BDA RO-val	10, 20, 30 bar	120, 180, 240 L h ⁻¹	-	-

TMP = transzmembrán nyomáskülönbség, Q = retentátum térfogatáram,
STP = statikus keverő, SGC = szilikagél koncentráció

A membránműveletes kísérletek 10 ± 1 °C-on voltak kivitelezve, de az RO-val történő BDA kísérletek 15 ± 1 °C-on történtek. A betáplálási mennyiségek a következők voltak: 3 L (WMF esetében), 3 L (STP-vel történő BMF esetében), 3 L (SG-vel történő BMF esetében), 5 L (RO-val történő BDA esetében). A sűrítési arányok (VCF) a következők voltak: 1.04 (WMF esetében), 1.1 (STP-vel történő BMF esetében), 1.1 (SG-vel történő BMF esetében), 1.06 (RO-val történő BDA

esetében).

A mikroszűrő membránok esetében alkalmazott membránmosási eljárás a következő volt: ioncserélt víz 5 percig 25 °C-on; 1 %-os (w/w) nátrium hidroxid oldat 60 percig 60 °C-on; ioncserélt víz 10 percig 25 °C-on; 1 %-os (w/w) hidrogén peroxid oldat 60 percig 25 °C-on; ioncserélt víz 10 percig 25 °C-on; TMP = 0.2 bar, Q = 50 L hr⁻¹.

A reverz ozmózis membránok esetében alkalmazott membránmosási eljárás a következő volt: ioncserélt víz 10 percig 25 °C-on; 0.2 %-os (w/w) nátrium hidroxid oldat 60 percig 25 °C-on; ioncserélt víz 10 percig 25 °C-on; TMP = 6 bar; Q = 240 L hr⁻¹.

Megmértem az alábbi analitikai paramétereit a betáplálási és a permeátum mintáknak: etanoltartalom, extrakttartalom, keserűség, szín, dinamikai viszkozitás, szabad amino-nitrogén (SZAN) tartalom, részecskeméret eloszlás, pH érték, teljes polifenol tartalom (TPC), zavarosság, β -glükán tartalom. Továbbá kiszámoltam a különböző komponensek visszatartását.

Az alábbi hidrodinamikai paramétereit határoztam meg a membránműveleteknek: kezdeti fluxus, állandósult fluxus, fluxus csökkenés együtthatója, kezdeti gélréteg ellenállás, állandósult gélréteg ellenállás, kezdeti etanol fluxus.

A membránmosási hatékonyság ellenőrzése végett, meghatároztam a fluxus értékek visszanyerését.

A WMF és a BMF kísérletek esetében, nonlinearis regresszióval (iteráltam *SPSS Statistics 25.0*, 2017 szoftver segítségével)

meghatároztam a kezdeti fluxust, az állandósult fluxust és fluxus csökkenés együtthatóját

Az RO-val történő BDA kísérletek esetében, lineáris regresszióval (iteráltam *SPSS Statistics 25.0*, 2017 szoftver segítségével) meghatároztam a kezdeti fluxust és a fluxus csökkenés együtthatóját.

Különböző modelleket alkottam a membránműveletek leírására. 2^p típus teljes kísérleti terveket használtam. A faktorok az STP-vel történő BMF kísérletek esetében a következők voltak: statikus keverő (STP), TMP, Q. A faktorok az SG-vel történő BMF kísérletek esetében a következők voltak: szilikagél koncentráció (SGC), TMP, Q. A válaszok a BMF kísérletek esetében az állandósult gélréteg ellenállások (R_{fss}) voltak. A faktorok az RO-vel történő BDA kísérletek esetében a következők voltak: TMP, Q. A válasz a BDA kísérletek esetében a kezdeti etanol fluxus ($J_{EtOH\ 0}$) volt. A kísérletterveket elemeztem, a célfüggvények paramétereit megbecsültem és a szignifikáns paraméterek hatásnagyságait kiszámoltam *R-3.5.1*, 2018 szoftver és *RcmdrPlugin.DoE 0.12-3*, 2014 programcsomag segítségével. A modellek célfüggvényeit optimalizáltam Grid Search optimalizálási módszer segítségével *Scilab 6.1.0*, 2020 szoftverben saját fejlesztésű kódokkal.

A BMF kísérletek esetében, a globális minimumok megtalálása volt a fontos, mivel az alacsonyabb állandósult gélréteg ellenállás (R_{fss}) előnyösebb technológiai szempontból. Az RO-vel történő BDA kísérletek esetében, a globális maximum megtalálása volt a fontos, mivel a magasabb kezdeti etanol fluxus ($J_{EtOH\ 0}$)

előnyösebb technológiai szempontból.

Eredmények

Megállapítottam, hogy a forró seprő és a hideg seprő teljesen eltávolítható WMF-el és hogy az analitikai paraméterek változása megfelelő volt. A keserűség körülbelül 5 egységgel csökkent, a TPC körülbelül 5.6 %-al csökkent, a β -glükán visszatartása 40.17 % volt, a szabad amino-nitrogén tartalom pedig nem változott. A kezdeti sörle fluxus $16.75 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ volt, míg az állandósult sörle fluxus $4.89 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ volt. Ezek az érték az eltömődés miatt ilyen alacsonyak. Magasabb fluxus értékeket, stabilabb fluxusokat és jobb permeátum minőséget el lehet érni a folyamat optimalizálásával és a sörle előkezelésével.

A STP-vel történő BMF esetében a következő volt a modell (Egyenlet 1):

$$\begin{aligned} R_{fss} = & 4.4630 \times 10^{12} - 1.7662 \times 10^{12} \times x_{STP} \\ & + 1.5702 \times 10^{12} \times x_{TMP} \\ & - 1.5166 \times 10^{12} \times x_Q \\ & - 6.9648 \times 10^{11} \times x_{STP} \times x_{TMP} \\ & + 4.6600 \times 10^{11} \times x_{STP} \times x_Q \\ & - 4.3718 \times 10^{11} \times x_{TMP} \times x_Q \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{Egyenlet} \\ 1 \end{array}$$

ahol az $R_{fss} (\text{m}^{-1})$ az állandósult gélréteg ellenállás; az x_{STP} a kódolt faktor a statikus keverőre (STP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1; az x_{TMP} a kódolt faktor a transzmembrán nyomáskülönbségre (TMP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1 és az x_Q a kódolt faktor a retentátum térfogatáramára (Q) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1. Az érvényességi tartomány: STP = nem vagy igen; TMP = 0.4 – 1.2 bar, Q = 50 - 200 L h⁻¹. A modell és a

célfüggvény determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(6;3) = 203.7$; $p < 0.001$; többszörös $R^2 > 0.9$; adjusztált $R^2 > 0.9$). A szignifikáns paraméterek hatásnagyságai a következők voltak: $STP = -0.61$, $TMP = 0.54$, $Q = -0.52$, $STP:TMP = -0.24$, $STP:Q = 0.16$ és $TMP:Q = -0.15$. A hatásnagyság becslés modellje és determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(6;4) = 271.6$; $p < 0.001$; többszörös $R^2 > 0.9$; adjusztált $R^2 > 0.9$). Megtaláltam a célfüggvény optimumát (globális minimum). A faktorok optimális értékei a következők voltak: $STP = \text{igen}$, $TMP = 0.4 \text{ bar}$, $Q = 200 \text{ L h}^{-1}$. A jósolt R_{fss} a fent említett feltételek mellett $1.2097 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ volt. Tehát a legkisebb állandósult gélréteg ellenállást (R_{fss}) statikus keverő használatával (STP), a legalacsonyabb transzmembránnyomáskülönbségen (TMP) és a legmagasabb retentátum térfogatáramon (Q) lehet elérni.

A SG-vel történő BMF esetében a következő volt a modell (*Egyenlet 2*):

$$R_{fss} = 7.2678 \times 10^{12} + 3.3383 \times 10^{12} \times x_{TMP} - 2.0038 \times 10^{12} \times x_Q \quad \text{Egyenlet 2}$$

ahol az $R_{fss}(\text{m}^{-1})$ az állandósult gélréteg ellenállás, az x_{TMP} a kódolt faktor a transzmembrán nyomáskülönbségre (TMP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1 és az x_Q a kódolt faktor a retentátum térfogatáramára (Q) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1. Az érvényességi tartomány: szilikagél koncentráció (SGC) = $0 - 80 \text{ g hL}^{-1}$; $TMP = 0.4 - 1.2 \text{ bar}$, $Q = 50 - 200 \text{ L h}^{-1}$. A modell és a célfüggvény determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(2;6) = 23.22$; $p < 0.01$; többszörös

$R^2 = 0.89$; adjusztált $R^2 = 0.85$). A szignifikáns paraméterek hatásnagyságai a következők voltak: $TMP = 0.81$, $Q = -0.48$. A hatásnagyság becslés modellje és determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(2;7) = 27.09$; $p < 0.001$; többszörös $R^2 = 0.89$; adjusztált $R^2 = 0.85$). Megtaláltam a célfüggvény optimumát (globális minimum). A faktorok optimális értékei a következők voltak: $TMP = 0.4$ bar, $Q = 200$ L h⁻¹. A jósolt R_{fss} a fent említett feltételek mellett 1.9257×10^{12} m⁻¹ volt. Tehát a legkisebb állandósult gélréteg ellenállást (R_{fss}) a legalacsonyabb transzmembránnyomáskülönbségen (TMP) és a legmagasabb retentátum térfogatáramon (Q) lehet elérni. Továbbá fontos megjegyezni, hogy a BMF az szilikagél (SG) nélkül megvalósítható.

Az RO-val történő BDA esetében a következő volt a modell (Egyenlet 3):

$$J_{EtOH\ 0} = 80.871 + 41.094 \times x_{TMP} \quad \text{Egyenlet 3}$$

ahol a $J_{EtOH\ 0}$ (g m⁻² h⁻¹) a kezdeti etanol fluxus és az x_{TMP} a kódolt faktor a transzmembrán nyomáskülönbségre (TMP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1. Az érvényességi tartomány: $TMP = 10 - 30$ bar, $Q = 120 - 240$ L h⁻¹. A modell és a célfüggvény determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(1;5) = 143.1$; $p < 0.001$; többszörös $R^2 = 0.97$; adjusztált $R^2 = 0.96$). A szignifikáns paraméter hatásnagysága a következők voltak: $TMP = 1.20$. A hatásnagyság becslés modellje és determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(1;6) = 171.7$; $p < 0.001$; többszörös $R^2 = 0.97$; adjusztált $R^2 = 0.96$). Megtaláltam a célfüggvény optimumát (globális

maximum). A faktor optimális értéke a következő volt: $TMP = 30$ bar. A jósolt $J_{EtOH\ 0}$ a fent említett feltételek mellett $121.965\text{ g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ volt. Tehát a legnagyobb kezdeti etanol fluxust ($J_{EtOH\ 0}$) a legmagasabb transzmembránnomáskülönbségen (TMP) és a legalacsonyabb retentátum térfogatáramon (Q) lehet elérni.

Ezeken túlmenően, kifejlesztettem olyan újszerű és hatékony membránmosási eljárásokat MF és RO membránokhoz, amelyekkel vissza lehet nyerni a membránok kezdeti ellenállásait. Az MF membránok esetében az átlagos fluxus visszanyerés magasabb volt mint 97 %. Az RO membránok esetében az átlagos fluxus visszanyerés 109 % volt.

Következtetések és javaslatok

A WMF esetében elmondható, hogy az analitikai paraméterek változását lehetne javítani a működési paraméterek optimalizálásával (pl. TMP, áramlási sebesség), vagy permeátum visszaáramoltatás módszerekkel, enzimek és szűrési segédanyagok használatával, az áramlás pulzáltatásával, gáz permetezéssel, statikus keverő (STP) alkalmazásával, vibrációval (VSEP) stb. A fluxusokat is lehetne növelni a fent említett optimalizálással és alkalmazásokkal.

Az STP-vel történő BMF esetében elmondható, hogy a kereskedelmi sörfőzdéknek hangsúlyt kell fektetniük a statikus keverő (STP) használatának és a transzmembránnomáskülönbségnek (TMP), illetve a retentátum térfogatáramának (Q) optimalizálására. Ebben a tanulmányban egy adott geometriájú statikus keverő (STP) volt tesztelve.

Azonban jövőbeli kísérleteknél a működési paraméterek széles tartományát és számos STP-ét lehetne vizsgálni, azzal a céllal, hogy csökkenjenek a gélréteg ellenállások.

Az SG-vel történő BMF esetében elmondható, hogy a kereskedelmi sörfőzdeknek hangsúlyt kell fektetniük a transzmembránnomáskülönbségnek (TMP) és a retentátum térfogatáramának (Q) optimalizálására. Továbbá fontos megjegyezni, hogy a BMF az szilikagél (SG) nélkül megvalósítható. Az szilikagél (SG) mentes BMF környezetvédelmi okok miatt fontos. Azonban az SG-től különböző szűrési segédanyagokat lehetne kifejleszteni és tesztelni a BMF intenzifikálására.

Az RO-val történő BDA esetében elmondható, hogy kereskedelmi sörfőzdeknek a transzmembránnomáskülönbség (TMP) optimalizálására kell hangsúlyt fektetniük. Az RO-val történő BDA a lehető legkisebb retentátum térfogatárammal (Q) megvalósítható, ami kisebb energiafelhasználást eredményez. A kisebb energiafelhasználás környezetvédelmi és gazdasági okok miatt fontos. Jövőbeli kísérletek során különböző alkohol- és extrakttartalmú söröket lehetne alkoholmentesíteni RO-val.

Új tudományos eredmények

1.

Megállapítottam, hogy a forró seprő ($d = 30 - 80 \mu\text{m}$) és a hideg seprő ($d = \sim 0.5 \mu\text{m}$) teljesen eltávolítható világos komlózott sörléből (extrakttartalom = $11.16 \pm 0.01 \text{ w/w } \%$, keserűség = $49 \pm 4 \text{ IBU}$, zavarosság 20°C -on = $106.75 \pm 5.50 \text{ EBC}$) mikroszűréssel Membralox T1-70

kerámia csőmembránnal (Pall, USA; 0.2 μm pórusméret és 7 mm belső átmérő) a következő működési paraméterek mellett: $T = 10 \pm 1$ °C, transzmembrán nyomáskülönbség (TMP) = 0.4 bar, retentátum térfogatáram (Q) = 50 L h⁻¹.

Az analitikai paraméterek eredményei alapján elmondható, hogy az analitikai paraméterek változása megfelelő volt: a keserűség körülbelül 5 egységgel csökkent, a TPC körülbelül 5.6 %-al csökkent, a β -glükán visszatartása 40.17 % volt, a szabad aminos-nitrogén tartalom pedig nem változott.

A kezdeti sörle fluxus 16.75 L m⁻² h⁻¹ volt, míg az állandósult sörle fluxus 4.89 L m⁻² h⁻¹ volt a fent említett körülmények mellett.

2.

Kifejlesztettem egy modellt, ami leírja a szűretlen sör ("2A. International Pale Lager" (BJCP); alkoholtartalom = 4.58 V/V %, végső valódi extrakttartalom = 4.48 w/w %, keserűség = 18 IBU, zavarosság 20 °C-on = 2.50) membránszűrését 10 $\pm$ 1 °C-on statikus keverővel (SPIRAL LD2 STP (Inox, Szerbia)) és Membralox T1-70 kerámia csőmembránnal (Pall, USA; 0.5 μm pórusméret és 7 mm belső átmérő).

A modell (célfüggvény) (*Egyenlet 4*) a következő volt:

$$\begin{aligned}
R_{f_{ss}} = & 4.4630 \times 10^{12} - 1.7662 \times 10^{12} \times x_{STP} \\
& + 1.5702 \times 10^{12} \times x_{TMP} \\
& - 1.5166 \times 10^{12} \times x_Q \\
& - 6.9648 \times 10^{11} \times x_{STP} \times x_{TMP} \\
& + 4.6600 \times 10^{11} \times x_{STP} \times x_Q \\
& - 4.3718 \times 10^{11} \times x_{TMP} \times x_Q
\end{aligned}
\qquad \text{Egyenlet} \qquad 4$$

ahol az $R_{f_{ss}}$ (m^{-1}) az állandósult gélréteg ellenállás; az x_{STP} a kódolt faktor a statikus keverőre (STP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1; az x_{TMP} a kódolt faktor a transzmembrán nyomáskülönbségre (TMP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1 és az x_Q a kódolt faktor a retentátum térfogatáramára (Q) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1. Az érvényességi tartomány: STP = nem vagy igen; TMP = 0.4 – 1.2 bar, Q = 50 - 200 L h⁻¹. A modell és a célfüggvény determinációs együtthatói szignifikánsak voltak (F(6;3) = 203.7; p < 0.001; többszörös R² > 0.9; adjusztált R² > 0.9).

Meghatároztam a szignifikáns paraméterek hatásnagyságait, amik következők voltak: STP = -0.61, TMP = 0.54, Q = -0.52, STP:TMP = -0.24, STP:Q = 0.16 és TMP:Q = -0.15. A hatásnagyság becslés modellje és determinációs együtthatói szignifikánsak voltak (F(6;4) = 271.6; p < 0.001; többszörös R² > 0.9; adjusztált R² > 0.9).

Megtaláltam a célfüggvény optimumát (globális minimum). A faktorok optimális értékei a következők voltak: STP = igen, TMP = 0.4 bar, Q = 200 L h⁻¹. A jósolt $R_{f_{ss}}$ a fent említett

feltételek mellett $1.2097 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ volt.

3.

Kifejlesztettem egy modellt, ami leírja a szűretlen sör ("2A. International Pale Lager" (BJCP); alkoholtartalom = 4.74 V/V %, végső valódi extrakttartalom = 4.10 w/w %, kesrűség = 24 IBU, turbidity at 20 °C = 18.00) membránszűrését 10 ± 1 °C-on szilikagéllel (Stabifix W MF (Stabifix Brauerei-Technik, Németország)) és Membralox T1-70 kerámia csőmembránnal (Pall, USA; 0.5 µm pórusméret és 7 mm belső átmérő).

A modell (célfüggvény) (Egyenlet 5) a következő volt:

$$R_{f_{ss}} = 7.2678 \times 10^{12} + 3.3383 \times 10^{12} \times x_{TMP} - 2.0038 \times 10^{12} \times x_Q \quad \text{Egyenlet 5}$$

ahol az $R_{f_{ss}} (\text{m}^{-1})$ az állandósult gélréteg ellenállás, az x_{TMP} a kódolt faktor a transzmembrán nyomáskülönbségre (TMP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1 és az x_Q a kódolt faktor a retentátum térfogatáramára (Q) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1. Az érvényességi tartomány: szilikagél koncentráció (SGC) = 0 – 80 g hL⁻¹; TMP = 0.4 – 1.2 bar, Q = 50 - 200 L h⁻¹. A modell és a célfüggvény determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(2;6) = 23.22$; $p < 0.01$; többszörös $R^2 = 0.89$; adjusztált $R^2 = 0.85$).

Meghatároztam a szignifikáns paraméterek hatásnagyságait, amik következőek voltak: TMP = 0.81, Q = -0.48. A hatásnagyság becslés modellje és determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(2;7) = 27.09$; $p < 0.001$; többszörös $R^2 = 0.89$; adjusztált

$$R^2 = 0.85$$

Megtaláltam a célfüggvény optimumát (globális minimum). A faktorok optimális értékei a következők voltak: TMP = 0.4 bar, Q = 200 L h⁻¹. A jósolt $R_{f\ ss}$ a fent említett feltételek mellett $1.9257 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ volt.

4.

Kifejlesztettem egy modellt, ami leírja a világos lager típusú szűrt sör (Soproni Klasszikus, (HEINEKEN Hungária, Hungary), alkoholtartalom = 4.34 V/V %, végső valódi extrakttartalom = 3.63 w/w %, keserűség = 12 IBU, zavarosság 20 °C-on = 0.48) reverz ozmózissal történő alkoholmentesítését 15 ± 1 °C-on RO99 poliészter lapmembránnal (Alfa Laval, Sweden; $R_{NaCl} \geq 98 \%$).

A modell (célfüggvény) (Egyenlet 6) a következő volt:

$$J_{EtOH\ 0} = 80.871 + 41.094 \times x_{TMP} \quad \text{Egyenlet 6}$$

ahol a $J_{EtOH\ 0}$ (g m⁻² h⁻¹) a kezdeti etanol fluxus és az x_{TMP} a kódolt faktor a transzmembrán nyomáskülönbségre (TMP) az alábbi faktor értékekkel: -1, +1. Az érvényességi tartomány: TMP = 10 – 30 bar, Q = 120 - 240 L h⁻¹. A modell és a célfüggvény determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(1;5) = 143.1$; $p < 0.001$; többszörös $R^2 = 0.97$; adjusztált $R^2 = 0.96$).

Meghatároztam a szignifikáns paraméter hatásnagyságát, ami a következő volt: TMP = 1.20. A hatásnagyság becslés modellje és determinációs együtthatói szignifikánsak voltak ($F(1;6) = 171.7$;

$p < 0.001$; többszörös $R^2 = 0.97$; adjusztált $R^2 = 0.96$).

Megtaláltam a célfüggvény optimumát (globális maximum). A faktor optimális értéke a következő volt: TMP = 30 bar. A jósolt $J_{EtOH\ 0}$ a fent említett feltételek mellett $121.965\text{ g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ volt.

5.

Kifejlesztettem egy újszerű és hatékony (átlagos fluxus visszanyerés > 97 %) membránmosási eljárást “2A. International Pale Lager” (BJCP) típusú szűretlen sör (alkoholtartalom = 4.58 V/V %, végső valódi extrakttartalom = 4.48 w/w %, keserűség = 18 IBU, zavarosság $20\text{ }^{\circ}\text{C-on} = 2.50$) $10 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C-on}$ Membralox T1-70 kerámia csőmembránnal (Pall, USA; $0.5\text{ }\mu\text{m}$ pórusméret és 7 mm belső átmérő) történő membránszűréséhez.

A kifejlesztett membránmosási eljárás az alábbiakban van részletezve. A membránszűrés után, a használt membránt ioncserélt vízzel mostam 5 percig $25\text{ }^{\circ}\text{C-on}$. Utána 1 %-os (w/w) nátrium hidroxidos (Reanal, Magyarország) oldattal történő mosás következett, amely 60 percig tartott $60\text{ }^{\circ}\text{C-on}$. A lúgos mosást egy 10 perces $25\text{ }^{\circ}\text{C-on}$ történő ioncserélt vizes mosás követte. Ezt egy 60 perces $25\text{ }^{\circ}\text{C-on}$ történő 1 %-os (w/w) hidrogén peroxid (Hungaro Chemicals, Magyarország) oldatos mosás követte. Végül a membrán 10 percig volt mosva $25\text{ }^{\circ}\text{C-on}$ ioncserélt vízzel. Minden esetben a transzmembrán nyomáskülönbség (TMP) 0.2 bar, a retentátum térfogatárama (Q) pedig 50 L h^{-1} volt.

Kifejlesztettem egy újszerű és hatékony (átlagos fluxus

visszanyerés = 109 %) membránmosási eljárást világos lager típusú szűrt sör (Soproni Klasszikus, (HEINEKEN Hungária, Hungary), alkoholtartalom = 4.34 V/V %, végső valódi extrakttartalom = 3.63 w/w %, keserűség = 12 IBU, zavarosság 20 °C-on = 0.48) 15 ± 1 °C-on RO99 poliészter lapmembránnal (Alfa Laval, Sweden; $R_{NaCl} \geq 98$ %) reverz ozmózissal történő alkoholmentesítéséhez.

A kifejlesztett membránmosási eljárás az alábbiakban van részletezve. Az alkoholmentesítési kísérlet után, a használt membránt ioncserélt vízzel mostam 10 percig 25 °C-on. Utána 0.2 %-os (w/w) nátrium hidroxidos (Reanal, Magyarország) oldattal történő mosás következett, amely 60 percig tartott 25 °C-on. A lúgos mosást egy 10 perces 25 °C-on történő ioncserélt vizes mosás követte. Minden esetben a transzmembrán nyomáskülönbség (TMP) 6 bar, a retentátum térfogatárama (Q) pedig 240 L h⁻¹ volt.

A szerző értekezésének a témaköréhez kapcsolódó publikációi

Folyóiratcikkek impakt faktoral

VARGA, Á., GÁSPÁR, I., JUHÁSZ, R., LADÁNYI, M., HEGYES-VECSERI, B., KÓKAI, Z., MÁRKI, E. (2019): Beer microfiltration with static turbulence promoter: Sum of ranking differences comparison. In: *Journal of Food Process Engineering*, 42 (1) e12941. p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2019): Microfiltration: A novel technology for removal of trub from hopped wort. In: *Journal of Food Process Engineering*, 42 (6) e13200. p.

VARGA, Á., LADÁNYI, M., MÁRKI, E. (2020): Modeling of beer membrane filtration. In: *Desalination and Water Treatment*, 192 382-391. p.

Konferenciák

VARGA, Á., MÁRKI, E., VATAI, G. (2016): Membrane Separation Processes in the Brewing Industry. In: VONDERVISZT, F., BOKROSSY-CSIBA, M., TÖRCSVÁRYNÉ-KOVÁCS, Z. (Eds.) *Műszaki Kémiai Napok 2016*, Veszprém, Magyarország, Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar Műszaki Kémiai Kutató Intézet, 164-164. pp., 1 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2016): Improve crossflow microfiltration of rough beer with static mixer. In: SZALKA, É., BALI-PAPP, Á. (Eds.) *XXXVI. Óvári Tudományos Nap 2016*, Hagyomány és innováció az agrár- és élelmiszergazdaságban I-II,

Mosonmagyaróvár, Magyarország, Széchenyi István Egyetem
Mezőgazdaság- és Élelmiszertudományi Kar, pp. 173-173., 1 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2016): Intensification of membrane filtration of rough beer with static mixer - Sör membránszűrésének elősegítése statikus keverővel. In: BERKESNÉ-RODEK, N., BARABÁS, E. (Eds.) III. Soós Ernő Tudományos Konferencia – Víz- és szennyvízkezelés az iparban 2016, Nagykanizsa, Magyarország, Soós Ernő Víztechnológiai Kutató-Fejlesztő Központ, pp. 36-36., 1 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2016): Effect of inserted static mixer on crossflow microfiltration of rough beer. In: Felföldi, József (Eds.), BiosysFoodEng2016, 1st International Conference on Biosystem and Food Engineering. Proceedings, Budapest, Magyarország, Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar, pp. 1-5., 5 p.

VARGA, Á., TÓTH, E., MÁRKI, E. (2016): Effect of usage of Silicagel on Crossflow Membrane Filtration of Rough Beer - Szilikagél használatának a hatása a sör keresztáramú membránszűrésére. In: ABONYI, J., KLEIN, M., BALOGH, A. (Eds.) Műszaki Kémiai Napok 2017, Veszprém, Magyarország, Pannon Egyetem, pp. 1-1., 1 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2017): Studying fouling in crossflow microfiltration of rough beer. In: BRAUER, J. M. (Eds.) 36th Congress of the European Brewery Convention (EBC 2017): Proceedings of a meeting, Ljubljana, Szlovénia, European Brewery Convention, pp. 61-61., 1 p.

VARGA, Á., LADÁNYI, M., MÁRKI, E. (2017): Sör membránszűrése szilikagél alkalmazásával: modellezés. In: FODOR, M., BODOR, P. (Eds.), ITT 2017- Ifjú Tehetségek Találkozója, Budapest, Magyarország, Szent István Egyetem, Budai Karok, pp. 135-138., 4 p.

VARGA, Á., BERTOK, R., HEGYESNÉ-VECSERI, B., MÁRKI, E. (2017): Removal of cold trub from hopped wort by crossflow microfiltration: analytical aspects. In: ALAPI, T., ILISZ, I. (Eds.) Proceedings of the 23rd International Symposium on Analytical and Environmental Problems: October 9-10, 2017, Szeged, Magyarország, Szegedi Tudományegyetem Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék, pp. 70-74., 5 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2018): Membránműveletek alkalmazhatóságának vizsgálata a söriparban – eddigi eredmények, Application of membrane separation processes in the brewing industry – results so far. In: ÁLDORFAI, G., TÓTH, T. (Eds.) "SZIE kiváló tehetségei 2018" conference proceedings, Gödöllő, Magyarország, Szent István Egyetemi Kiadó, pp. 131-131., 1 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2018): Clarification of rough beer by crossflow microfiltration: application of static turbulence promoter. In: DE COOMAN, L. (Eds.) 13th International Trends in Brewing 2018: Opportunities through innovative ingredients & technologies, Gent, Belgium pp. 58-58., 1 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E. (2018): Clarification of hopped wort by crossflow microfiltration. In: DALMADI, I., BARANYAI, L., DUC NGUYEN, Q. (Eds.) Third International Conference on

Food Science and Technology 2018, Budapest, Magyarország, Szent István Egyetem, Élelmiszertudományi Kar, pp. 61-62., 2 p.

VARGA, Á., LADÁNYI, M., MÁRKI, E. (2019): Modelling of beer membrane filtration, In: Hungarian, Chemical Society (Eds.) PERMEA 2019 - Membrane Conference of Visegrád Countries - Program and Book of Abstracts, Budapest, Magyarország, Magyar Kémikusok Egyesülete, pp. 52-52., 1 p.

VARGA, Á., MÁRKI, E., BIHARI-LUCENA, E., LADÁNYI, M., SZABÓ-NÓTIN, B., KORIS, A. (2020): Studying beer dealcoholization by reverse osmosis, In: ALAPI, T., ILISZ, I. (Eds.) Proceedings of the 26th International Symposium on Analytical and Environmental Problems 2020, Szeged, Magyarország, University of Szeged, pp. 59-61., 3 p.