

Univerzita Pardubice

Využití dopředné osmózy pro zahušťování vodných roztoků
Diplomová práce

2025

Stefan Krivokapa

Univerzita Pardubice
Fakulta chemicko-technologická
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Stefan Krivokapa**
Osobní číslo: **C22310**
Studijní program: **N0711A130013 Chemické a procesní inženýrství**
Specializace: **Chemické inženýrství**
Téma práce: **Využití dopředné osmózy pro zahušťování vodných roztoků**
Zadávací katedra: **Ústav environmentálního a chemického inženýrství**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte literární rešerši dané problematiky. Stručně popište princip dopředné osmózy a dále se zaměřte na možnosti jejího využití, především v potravinářství.
2. Sestavte laboratorní zařízení s FO modulem s dutými vlákny. Otestujte funkci zařízení pro modelové vodné systémy a zvolené tažné roztoky. Studujte vliv koncentrace tažného roztoku na výkonnostní parametry procesu.
3. Získané výsledky vhodným způsobem zpracujte, proveďte jejich diskuzi.
4. Diplomovou práci zpracujte v souladu se Směrnicí UPa č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací v platném znění.

Rozsah pracovní zprávy:
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Cuhorka, Ph.D.**
Ústav environmentálního a chemického inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **26. ledna 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

L.S.

prof. Ing. Petr Němec, Ph.D.
děkan

prof. Ing. Liběna Tetřevová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 26. ledna 2024

Prohlašuji:

Práci s názvem „*Využití dopředné osmózy pro zahušťování vodných roztoků*“ jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 9.5.2025

Stefan Krivokapa v. r.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Jiřímu Cuhorkovi, Ph.D. za vedení práce, pomoc při sepisování práce, ochotu a trpělivost. Dále bych rád poděkoval paní Ing. Haně Jiráňkové, Dr. za její pomoc, věcné připomínky, vstřícnost a čas, který mi v průběhu zpracování práce věnovala. Také bych rád poděkoval Ing. Karolíně Jastřembské, Ph.D. za cenné rady, připomínky a věcné diskuze, kterými přispěla k vypracování této diplomové práce.

ANOTACE

Práce se zabývá zkoncentrováním vodných roztoků sacharidů a jablečného moštu pomocí dopředné osmózy. Pro realizaci experimentální části práce byl využíván modul s biomimetickou membránou. Jako tažné roztoky byly používány vodné roztoky chloridu sodného a síranu sodného. Byl studován vliv koncentrace, způsobu zapojení tažného roztoku a typ soli použité pro jeho přípravu na výkonnostní parametry procesu. Součástí práce jsou také standardní solné testy, které slouží pro průběžné sledování stavu membrány pro dopřednou osmózu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Dopředná osmóza, biomimetické membrány, tažné roztoky, roztoky sacharidů, jablečný mošt, zkoncentrování

TITLE

Utilization of forward osmosis for the concentration of aqueous solutions

ANNOTATION

The thesis deals with the concentration of aqueous solutions of saccharides and apple juice using forward osmosis. A module with a biomimetic membrane was used to implement the experimental part of the thesis. Aqueous solutions of sodium chloride and sodium sulfate were used as draw solutions. The influence of the concentration, the mode of operation of the draw solution and the type of salt used for its preparation on the performance parameters of the process was studied. The thesis also includes standard salt tests, which are used for continuous monitoring of the condition of the forward osmosis membrane.

KEYWORDS

Forward osmosis, biomimetic membranes, draw solutions, saccharide solutions, apple juice, concentrating

Obsah

| | |
|--|----|
| SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK..... | 10 |
| SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK | 15 |
| ÚVOD..... | 17 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST..... | 18 |
| 1.1 Membránové separační procesy..... | 18 |
| 1.2 Osmóza | 19 |
| 1.3 Dopředná (přímá) osmóza | 21 |
| 1.4 Důležité parametry popisující dopřednou osmózu | 23 |
| 1.4.1 Koncentrační polarizace | 24 |
| 1.5 Membrány pro dopřednou osmózu..... | 26 |
| 1.5.1 Integrální asymetrické membrány vyrobené pomocí inverze fází..... | 26 |
| 1.5.2 Tenkovrstvé kompozitní membrány (TFC) | 27 |
| 1.5.3 Sendvičové membrány, Layer by layer (LbL)..... | 28 |
| 1.5.4 Biomimetické membrány..... | 29 |
| 1.6 Tažný roztok | 31 |
| 1.7 Zařízení pro dopřednou osmózu | 33 |
| 1.8 Historický vývoj technologie dopředné osmózy | 34 |
| 1.9 Aplikace dopředné osmózy..... | 34 |
| 1.9.1 Aplikace v průmyslu, zemědělství a ochraně životního prostředí | 35 |
| 1.9.2 Aplikace v potravinářství..... | 36 |
| 2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST..... | 40 |
| 2.1 Použité chemikálie..... | 40 |
| 2.2 Experimentální zařízení | 40 |
| 2.2.1 Váhy..... | 42 |
| 2.2.2 Konduktometr | 42 |
| 2.2.3 Refraktometr | 42 |
| 2.2.4 Čerpadla | 42 |
| 2.2.5 Ostatní pomůcky | 42 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.3 | Kalibrační křivky– určování koncentrace solí | 42 |
| 2.4 | Určování koncentrace a hodnoty Brix sacharidů | 43 |
| 2.5 | Solné testy | 44 |
| 2.6 | Experimenty se sacharidy | 45 |
| 3 | VÝSLEDKY A DISKUZE..... | 47 |
| 3.1 | Konduktometrie – Kalibrační roztoky solí | 47 |
| 3.2 | Solné testy..... | 51 |
| 3.2.1 | NaCl – test 1 | 52 |
| 3.2.2 | NaCl – test 2 | 53 |
| 3.2.3 | NaCl – test 3 | 55 |
| 3.2.4 | NaCl – test 4 | 56 |
| 3.2.5 | NaCl – test 5 | 57 |
| 3.2.6 | NaCl – test 6 | 58 |
| 3.2.7 | NaCl – test 7 | 59 |
| 3.2.8 | NaCl – test 8 | 60 |
| 3.2.9 | NaCl – test 9 | 61 |
| 3.2.10 | Na ₂ SO ₄ – test 10 | 63 |
| 3.3 | Porovnání solných testů | 64 |
| 3.4 | Zahušťování roztoků jednotlivých sacharidů..... | 67 |
| 3.4.1 | Glukóza – 0,5M NaCl..... | 67 |
| 3.4.2 | Glukóza – 1M NaCl..... | 70 |
| 3.4.3 | Glukóza – 1,5M NaCl..... | 72 |
| 3.4.4 | Glukóza – 3M NaCl..... | 74 |
| 3.4.5 | Glukóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 76 |
| 3.4.6 | Porovnání – vliv koncentrace tažného roztoku..... | 78 |
| 3.4.7 | Glukóza – 1M NaCl batch | 80 |
| 3.4.8 | Glukóza – 1,5M NaCl batch | 82 |
| 3.4.9 | Porovnání – vliv recirkulace tažného roztoku | 84 |
| 3.4.10 | Sacharóza – 3M NaCl..... | 88 |
| 3.4.11 | Sacharóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 90 |
| 3.4.12 | Fruktóza – 1M NaCl | 92 |
| 3.5 | Modelový roztok..... | 94 |

| | | |
|--------------------------|---|-----|
| 3.5.1 | Modelový roztok– 1M NaCl..... | 94 |
| 3.5.2 | Modelový roztok– 3M NaCl..... | 96 |
| 3.5.3 | Modelový roztok– 1M Na ₂ SO ₄ | 98 |
| 3.6 | Jablečný mošt – 3M NaCl..... | 100 |
| 3.7 | Celkové vyhodnocení výsledků experimentů se sacharidy | 102 |
| ZÁVĚR | | 106 |
| POUŽITÁ LITERATURA | | 109 |

SEZNAM ILUSTRACÍ A TABULEK

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Schématické znázornění osmotického tlaku [6]..... | 20 |
| Obrázek 2: Porovnání dopředné osmózy (FO), tlakově zpomalené osmózy (PRO) a reverzní osmózy (RO) [10] | 22 |
| Obrázek 3: Vztah mezi RO, PRO a FO pro ideální polopropustnou membránu [11] | 22 |
| Obrázek 4: Schématické znázornění toku vody a koncentračního profilu v procesech a) FO a b) PRO. Převzato z [12]. | 26 |
| Obrázek 5: Struktura aquaporinů [41] | 30 |
| Obrázek 6: Snímky biomimetické membrány výrobce Aquaporin A/S pořízené pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu při zvětšení a) 170x, b) 800x, c) 5000x. Převzato z [43]. | 31 |
| Obrázek 7: Zařízení pro dopřednou osmózu (s modulem Aquaporin HFFO 2)..... | 41 |
| Obrázek 8: Závislost koncentrace NaCl na vodivosti roztoku pro nízké koncentrace | 47 |
| Obrázek 9: Závislost koncentrace NaCl na vodivosti roztoku pro střední koncentrace | 48 |
| Obrázek 10: Závislost koncentrace NaCl na vodivosti roztoku pro vysoké koncentrace | 48 |
| Obrázek 11: Závislost koncentrace Na ₂ SO ₄ na vodivosti roztoku pro nízké koncentrace | 49 |
| Obrázek 12: Závislost koncentrace Na ₂ SO ₄ na vodivosti roztoku pro vysoké koncentrace | 50 |
| Obrázek 13: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 1 | 53 |
| Obrázek 14: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 2) a porovnání s testem 1 | 54 |
| Obrázek 15: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 3 | 56 |
| Obrázek 16: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 4 | 57 |
| Obrázek 17: Závislosti hmotnost zpracovávané kapaliny na čase – test 5 | 58 |
| Obrázek 18: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 6 | 59 |
| Obrázek 19: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 7) a porovnání s testem 1 | 60 |
| Obrázek 20: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 8) a porovnání s testem 1 | 61 |
| Obrázek 21: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 9) a porovnání s testem 1 | 62 |
| Obrázek 22: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 10 | 64 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 23: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase, v testech 1–9..... | 65 |
| Obrázek 24: Porovnání hodnot J_S a J_V v testech 1–10..... | 66 |
| Obrázek 25: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 0,5M NaCl | 69 |
| Obrázek 26: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 0,5M NaCl | 69 |
| Obrázek 27: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl | 71 |
| Obrázek 28: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl | 71 |
| Obrázek 29 Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl | 73 |
| Obrázek 30: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl | 74 |
| Obrázek 31: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 3M NaCl | 75 |
| Obrázek 32: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl | 76 |
| Obrázek 33 Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 77 |
| Obrázek 34: Závislost koncentrace Na ₂ SO ₄ ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 78 |
| Obrázek 35: Závislost objemového koncentračního faktoru na čase pro 3 různé tažné roztoky NaCl..... | 79 |
| Obrázek 36: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na VCF pro 3 různé tažné roztoky NaCl..... | 80 |
| Obrázek 37: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl batch..... | 81 |
| Obrázek 38: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl batch..... | 81 |
| Obrázek 39: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl batch..... | 83 |
| Obrázek 40: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl | 83 |

| | |
|---|-----|
| Obrázek 41: Závislost objemového koncentračního faktoru na čase (porovnání různých způsobů zapojení tažného roztoku NaCl) | 85 |
| Obrázek 42: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na VCF (porovnání různých způsobů zapojení tažného roztoku NaCl) Sacharóza – 1M NaCl..... | 85 |
| Obrázek 43: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Sacharóza – 1M NaCl..... | 87 |
| Obrázek 44: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Sacharóza – 1M NaCl | 87 |
| Obrázek 45: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Sacharóza – 3M NaCl..... | 89 |
| Obrázek 46: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Sacharóza – 3M NaCl | 89 |
| Obrázek 47: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Sacharóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 91 |
| Obrázek 48: Závislost koncentrace Na ₂ SO ₄ ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Sacharóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 91 |
| Obrázek 49: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Fruktóza – 1M NaCl..... | 93 |
| Obrázek 50: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Fruktóza – 1M NaCl..... | 93 |
| Obrázek 51: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Modelový roztok – 1M NaCl | 95 |
| Obrázek 52: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase během experimentu Modelový roztok – 1M NaCl | 95 |
| Obrázek 53: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Modelový roztok – 3M NaCl | 97 |
| Obrázek 54: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase během experimentu Modelový roztok – 3M NaCl | 97 |
| Obrázek 55: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Modelový roztok – 1M Na ₂ SO ₄ | 99 |
| Obrázek 56: Závislost koncentrace Na ₂ SO ₄ ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase během experimentu Modelový roztok – 1M Na ₂ SO ₄ | 99 |
| Obrázek 57: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Jablečný mošt – 3M NaCl | 101 |

| | |
|---|-----|
| Obrázek 58: Závislost hodnoty Brix na čase během experimentu Jablečný mošt – 3M NaCl | 101 |
| Obrázek 59: Závislost intenzity objemového toku membránou na čase během experimentů s glukózou..... | 103 |
| Obrázek 60: Závislost intenzity objemového toku membránou na čase během experimentů se sacharózou, fruktózou a modelovým roztokem | 103 |
| Obrázek 61: Porovnání průměrné intenzity objemového toku membránou pro testované zpracovávané kapaliny a tažné roztoky | 104 |
| Obrázek 62: Porovnání specifické intenzity zpětného toku soli pro různé tažné roztoky a zpracovávané kapaliny | 105 |
| | |
| Tabulka 1: Přehled membránových separačních procesů [1] | 19 |
| Tabulka 2: Rovnice použité pro přepočítání indexu lomu (n_D []) na složení (ω [hm. %]) | 43 |
| Tabulka 3: Rovnice použité pro přepočítání složení (ω [hm. %]) na hustotu (ρ [kg/m ³]) | 44 |
| Tabulka 4: Shrnutí provedených experimentů se sacharidy | 46 |
| Tabulka 5: Kalibrační roztoky solí – shrnutí výsledků..... | 51 |
| Tabulka 6: Vyhodnocení NaCl – testu 1 | 52 |
| Tabulka 7: Vyhodnocení NaCl – testu 2..... | 54 |
| Tabulka 8: Vyhodnocení NaCl – testu 3..... | 55 |
| Tabulka 9: Vyhodnocení NaCl – testu 4..... | 56 |
| Tabulka 10: Vyhodnocení NaCl – testu 5..... | 57 |
| Tabulka 11: Vyhodnocení NaCl – testu 6..... | 58 |
| Tabulka 12: Vyhodnocení NaCl – testu 7..... | 59 |
| Tabulka 13: Vyhodnocení NaCl – testu 8..... | 61 |
| Tabulka 14: Vyhodnocení NaCl – testu 9..... | 62 |
| Tabulka 15: Vyhodnocení Na ₂ SO ₄ – testu 10..... | 63 |
| Tabulka 16: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 0,5M NaCl | 68 |
| Tabulka 17: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1M NaCl | 70 |
| Tabulka 18: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1,5M NaCl | 72 |
| Tabulka 19: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 3M NaCl | 75 |
| Tabulka 20: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 77 |
| Tabulka 21: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1M NaCl batch | 80 |
| Tabulka 22: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1,5M NaCl batch | 82 |

| | |
|--|-----|
| Tabulka 23: Vyhodnocení experimentu Sacharóza – 1M NaCl | 86 |
| Tabulka 24: Vyhodnocení experimentu Sacharóza – 3M NaCl | 88 |
| Tabulka 25: Vyhodnocení experimentu Sacharóza – 1M Na ₂ SO ₄ | 90 |
| Tabulka 26: Vyhodnocení experimentu Fruktóza – 1M NaCl | 92 |
| Tabulka 27: Vyhodnocení experimentu Modelový roztok– 1M NaCl..... | 94 |
| Tabulka 28: Vyhodnocení experimentu Modelový roztok– 3M NaCl..... | 96 |
| Tabulka 29: Vyhodnocení experimentu Modelový roztok – 1M Na ₂ SO ₄ | 98 |
| Tabulka 30: Vyhodnocení experimentu Jablečný mošt – 3M NaCl..... | 100 |

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

| | |
|------------------------|---|
| <i>A</i> | plocha membrány [m ²] |
| <i>A_V</i> | koeficient propustnosti pro vodu [l/(m ² hPa)] |
| <i>B</i> | virialní koeficient pro osmotický tlak |
| BSK | biologická spotřeba kyslíku |
| <i>c</i> | koncentrace [mol/l] |
| CA | acetát celulózy |
| CAB | acetát butyrát celulózy |
| CAP | acetát propionát celulózy |
| CHSK | chemická spotřeba kyslíku |
| cECP | koncentrující vnější koncentrační polarizace |
| cICP | koncentrující vnitřní koncentrační polarizace |
| CIP | čištění na místě (clean in place) |
| CTA | triacetát celulózy |
| dECP | ředicí vnější koncentrační polarizace |
| dICP | ředicí vnitřní koncentrační polarizace |
| ECP | vnější koncentrační polarizace |
| ED | elektrodialýza |
| EDI | elektrodeionizace |
| IP | mezifázová polymerizace |
| ICP | vnitřní koncentrační polarizace |
| FO | dopředná osmóza |
| FO-MBR | membránový bioreaktor s dopřednou osmózou |
| HTI | Hydration Technology Innovation |
| <i>J_S</i> | intenzita zpětného toku soli [g/m ² h] |
| <i>J_{S/V}</i> | specifická intenzita zpětného toku soli [g/l] |
| <i>J_V</i> | intenzita objemového toku membránou [l/m ² h] |
| <i>J_{V,p}</i> | průměrná intenzita objemového toku membránou [l/m ² h] |
| LbL | sendvičová membrána (layer by layer) |

| | |
|---------------------|--|
| M | molární hmotnost [g/mol] |
| MBR | membránový bioreaktor |
| MD | membránová destilace |
| MF | mikrofiltrace |
| n | Van't Hoffův korekční faktor [] |
| NF | nanofiltrace |
| OMBR | osmotický membránový bioreaktor |
| PRO | tlakově zpomalená osmóza (pressure retarded osmosis) |
| R | výtěžek vody [] |
| R_g | univerzální plynová konstanta [J/K mol] |
| RO | reverzní osmóza |
| T | teplota [K] |
| t | čas [h] |
| TFC | tenkovrstvá kompozitní membrána (thin film composite) |
| TMP | tlakový membránový procesy |
| UF | ultrafiltrace |
| V_k | objem zpracovávané kapaliny na konci [l] |
| V_{t1} | objem zpracovávané kapaliny v čase t_1 [l] |
| V_{t2} | objem zpracovávané kapaliny v čase t_2 [l] |
| V_z | objem zpracovávané kapaliny na začátku [l] |
| VCF | objemový koncentrační faktor [] |
| ZLD | technologie bez kapalných odpadů (zero liquid discharge) |
| κ | vodivost [S/cm] |
| π | osmotický tlak [Pa] |
| π_{draw} | osmotický tlak tažného roztoku [Pa] |
| π_{feed} | osmotický tlak zpracovávané kapaliny [Pa] |
| σ | koefficient reflexe [] |
| φ | koncentrační korekční faktor |

ÚVOD

Klimatická změna, zhoršování životního prostředí a rostoucí světová populace způsobily růst environmentálního povědomí během posledních desetiletí. Poptávka po nových a efektivnějších separačních technologiích vedla k výraznému zvýšení zájmu o membránové separační procesy. Mezi nimi se dopředná (přímá) osmóza ukazuje jako slibná technologie pro zkoncentrování roztoků, odvodnění látek a získávání čistého rozpouštědla díky své energetické účinnosti, vysoké selektivitě a jednoduchosti provozu. Na rozdíl od tlakových membránových procesů, jako je reverzní osmóza, dopředná osmóza využívá rozdíl osmotických tlaků mezi dvěma roztoky oddělenými polopropustnou membránou, čímž umožňuje separaci bez nutnosti aplikace vysokého hydraulického tlaku.

Možné aplikace dopředné osmózy pokrývají široké spektrum odvětví např. odsolování, čištění odpadních vod, zpracování potravin a nápojů, farmaceutického průmyslu a výroby energie. Mezi její hlavní výhody patří nižší spotřeba energie, menší náchylnost k zanášení membrán a možnost dosažení vysokého stupně zkoncentrování. Díky těmto vlastnostem je dopředná osmóza atraktivní alternativou nebo doplňkem ke stávajícím separačním technologiím. Přesto však existuje řada technických a praktických výzev, které brání jejímu širšímu využití – mezi nejvýznamnější patří vnitřní koncentrační polarizace, regenerace tažného roztoku a omezená dostupnost membrán vhodných pro dopřednou osmózu.

V první části této práce byl popsán základní teoretický princip dopředné osmózy, následně byla pozornost věnována membránám, tažným roztokům a zařízením, která se obecně používají v technologii dopředné osmózy. Dále byly popsány některé možné aplikace dopředné osmózy se zaměřením na její využití v ochraně životního prostředí, průmyslu a potravinářství. V praktické části byl otestován modul s biomimetickou membránou a byly vypočítány jeho výkonnostní parametry pomocí solných testů. Následně bylo vyzkoušeno zkoncentrování binárních vodných roztoků sacharidů, modelového roztoku a reálného jablečného moštu při použití různých tažných roztoků. Na závěr byla provedena diskuze a vyhodnocení získaných výsledků.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Membránové separační procesy

Membránové separační procesy jsou založeny na selektivitě membrány, která umožňuje transport určitých komponent směsi, zatímco jiné nepropouští. V chemickém inženýrství se označují pojmem membrána syntetické membrány (biologické membrány jsou takovou definicí vyřazeny). Membrány mohou být vyrobeny z různých materiálů, jako jsou kovy, keramické materiály a polymery, které mají dominantní postavení v průmyslu. Hnací silou těchto procesů může být tlakový rozdíl, rozdíl koncentrací, rozdíl elektrických potenciálů nebo rozdíl parciálních tlaků složky směsi mezi oběma stranami membrány. Při transportu látek přes membránu se mohou uplatňovat různé separační mechanismy jako: síťový efekt, rozpouštění-difuze a elektrostatické interakce mezi molekulami a membránou. Základní informace o hlavních membránových separačních procesech jsou uvedeny v Tabulce 1 [1].

Mezi v průmyslu nejvíce využívané membránové separační procesy patří tlakové, zvláště reverzní osmóza (RO). RO je dneska jednou z vedoucích technologií pro odsolování mořské vody. Elektromembránové procesy, jako jsou elektrodialýza (ED) a elektrodeionizace (EDI), jsou používány pro odsolování brakických vod, pro přípravu ultračisté vody v elektronickém průmyslu a v potravinářství. Nejdůležitější aplikací dialýzy je v lékařství – hemodialýza, ale tato technika také našla uplatnění v průmyslu (např. regenerace kyselin). Separace plynů a par je používána pro separaci hélia ze zemního plynu, k oddělení oxidu uhličitého, k obohacení vzduchu kyslíkem a podobně. Významnou aplikací pervaporace je dehydratace organických látek. Dopředná osmóza (FO) má uplatnění při zpracování roztoku, kdy hrozí velké nebezpečí zanášení membrán, jako např. součást technologie bez kapalných odpadů (zero liquid discharge, ZLD) a pro zkoncentrování potravinářských roztoků [2][3].

Tabulka 1: Přehled membránových separačních procesů [1]

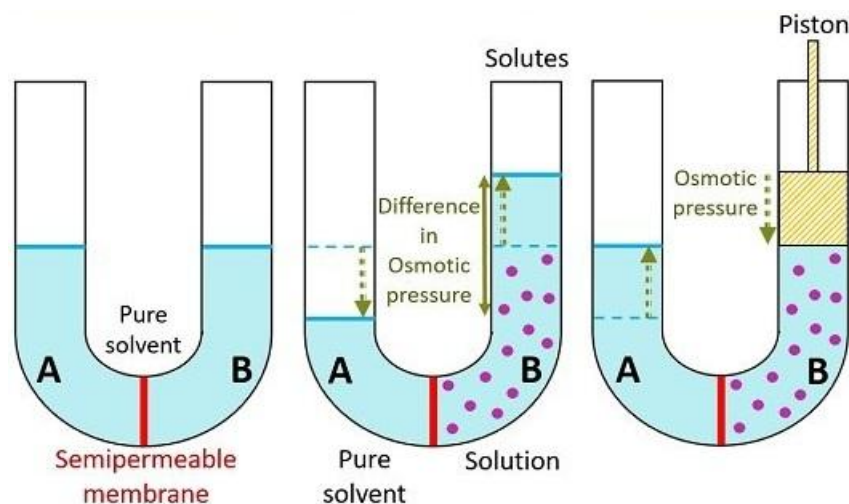
| Membránový proces | Mechanismus dělicího účinku | Hnací síla |
|-------------------------------------|---|--------------------------------|
| Reverzní osmóza (RO) | rozpouštění-difuze | tlakový rozdíl |
| Nanofiltrace (NF) | Kombinace síťového efektu, rozpouštění-difuze, a odpuzování molekul s elektrickým nábojem materiálem membrány | tlakový rozdíl |
| Ultrafiltrace (UF) | síťový efekt | tlakový rozdíl |
| Mikrofiltrace (MF) | síťový efekt | tlakový rozdíl |
| Přímá (dopředná) osmóza (FO) | rozpouštění-difuze | osmotický tlak |
| Dialýza | síťový efekt | rozdíl koncentraci |
| Elektrodialýza (ED) | elektrostatické interakce mezi molekulami a membránou | rozdíl elektrických potenciálů |
| Separace plynů a par | rozpouštění-difuze | tlakový rozdíl |
| Pervaporace | rozpouštění-difuze | rozdíl parciálních tlaků |

1.2 Osmóza

Osmózu lze definovat jako difuzi molekul rozpouštědla přes semipermeabilní membránu, která umožňuje molekulám rozpouštědla procházet, ale pro rozpuštěnou látku je nepropustná. Tento jev, kvůli důležitosti v biologických systémech, byl popsán v roce 1877 německým rostlinným fyziologem Wilhelmem Pfefferem. Termín osmóza byl již zaveden v roce 1854 britským chemikem Thomasem Grahamem [4].

Protože semipermeabilní membrána umožňuje průchod pouze molekulám rozpouštědla, ale ne částicím rozpuštěné látky, molekuly rozpouštědla procházejí membránou, aby se vyrovnaly

koncentrace (aktivity) na obou stranách membrány. Molekuly rozpouštědla se pohybují z prostředí s nižší koncentrací do prostředí s vyšší koncentrací rozpuštěných látek, přičemž dochází ke zvýšení hladiny tekutiny na této straně membrány. Tlak, který je nutné aplikovat na koncentrovanější roztok, aby se zastavilo proudění rozpouštědla přes membránu se jmenuje osmotický tlak [5].



Obrázek 1: Schématické znázornění osmotického tlaku [6]

Pro osmotický tlak ideálního roztoku platí Van't Hoffova rovnice:

$$\pi = n \cdot c \cdot R_g \cdot T \quad (1)$$

Kde π – osmotický tlak [Pa], n – Van't Hoffův korekční faktor [] (udává počet iontů vzniklých při disociaci sloučeniny), c – koncentrace roztoku [mol/l], R_g – univerzální plynová konstanta [J/K mol], T – teplota [K].

V případě reálných roztoků však dochází k odchylce od hodnoty vypočítané pomocí rovnice (1). Osmotický tlak reálných roztoků lépe vystihuje následující rovnice:

$$\pi = \varphi \cdot n \cdot c \cdot R_g \cdot T \quad (2)$$

Kde π – osmotický tlak [Pa], φ – koncentrační korekční faktor, n – Van't Hoffův korekční faktor [] (udává počet iontů vzniklých při disociaci sloučeniny), c – koncentrace roztoku [mol/l], R_g – univerzální plynová konstanta [J/K mol], T – teplota [K]. Koncentrační korekční faktor pro NaCl a Na₂SO₄ lze najít v literatuře a je závislý na koncentraci [7][8].

Pro popis osmotického tlaku koncentrovaných roztoků a roztoků makromolekulárních látek lze použít případně i následující rovnici (virialní rozvoj) [9]:

$$\pi = \frac{RT}{M}c + Bc^2 + \dots \quad (3)$$

Kde π – osmotický tlak [Pa], c – koncentrace roztoku [g/l], R_g – univerzální plynová konstanta [J/Kmol], T – teplota [K], M – molární hmotnost rozpuštěné látky [g/mol], B – viriální koeficient.

1.3 Dopředná (přímá) osmóza

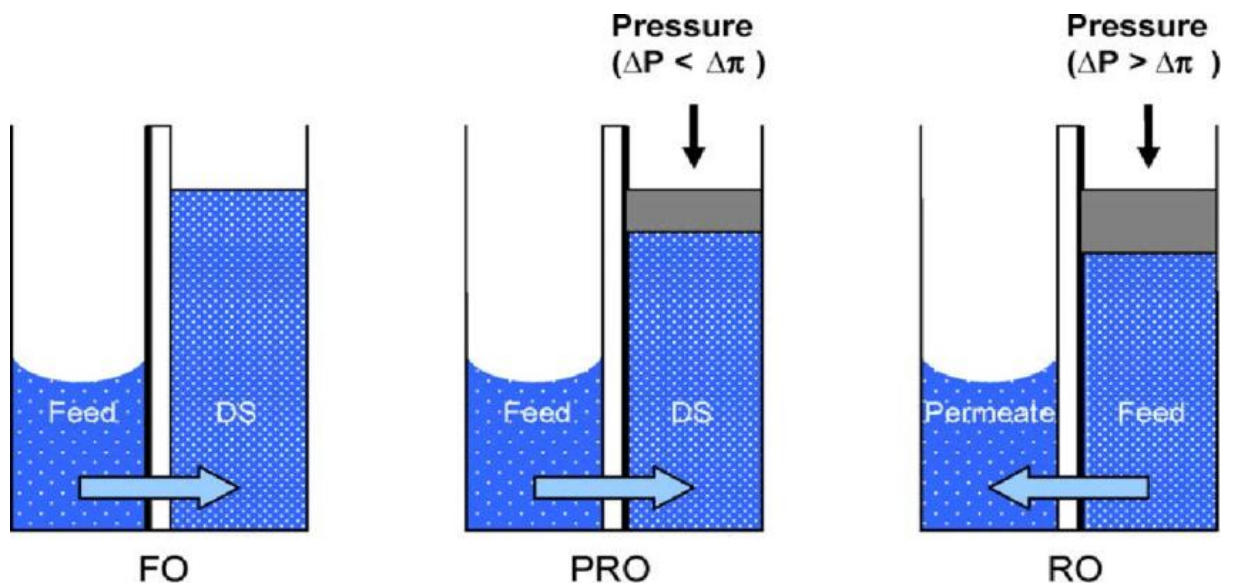
Dopředná osmóza (FO) je membránový separační proces založený na osmóze a použití polopropustných membrán. Mezi zpracovávanou kapalinou (surovinou, feed solution) a tažným roztokem (draw solution) je umístěná membrána, která ideálně propouští pouze molekuly vody (pro rozpuštěné látky je nepropustná). Tažný roztok je roztok o vyšší koncentraci. Bez aplikace vnějšího tlaku, pouze vlivem osmózy, voda (rozpuštědlo) proudí ze zpracovávaného roztoku do tažného roztoku. Výsledkem je, že dochází ke zkoncentrování zpracovávané kapaliny a současně k ředění tažného roztoku.

Dopředná osmóza se od reverzní osmózy (RO) zejména odlišuje v principu hnací síly, a hlavně ve směru proudění vody přes membránu. V RO působením hydraulického (externího, vnějšího) tlaku proudí voda přes membránu směrem z koncentrovanějšího roztoku, čímž se tento roztok stává ještě koncentrovanějším. Aby se tento proces uskutečnil, je nutné aplikovat vnější tlak (použití čerpadel) takové hodnoty, aby minimálně překonal osmotický tlak.

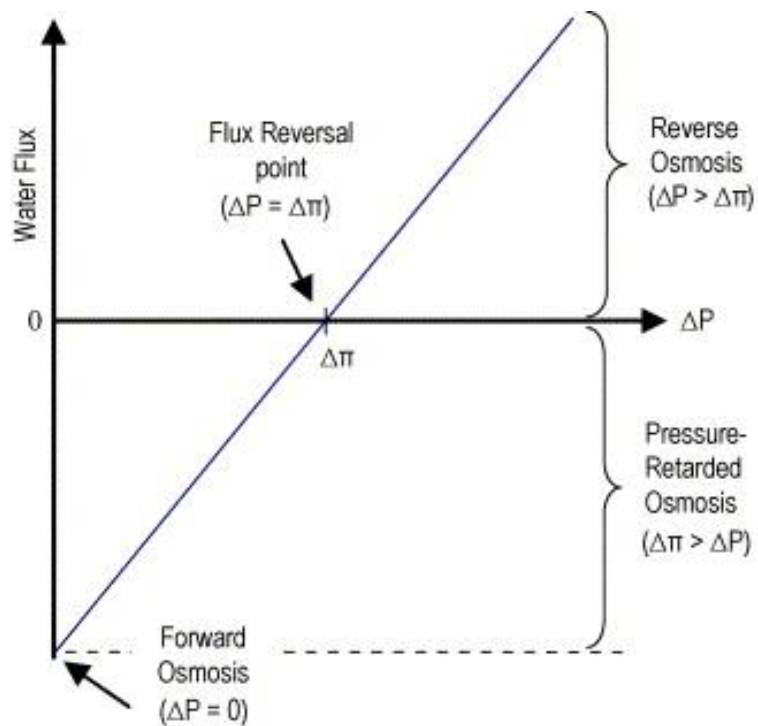
Dalším procesem, který úzce souvisí s procesy FO a RO je tlakově zpomalená osmóza (PRO). V tomto procesu, stejně jako v případě FO, se rozpuštědlo (voda) pohybuje díky osmóze směrem ke koncentrovanějšímu (tažnému) roztoku. Takovým způsobem se zvyšuje množství kapaliny přítomné v prostoru tažného roztoku, což má za následek zvýšení sloupce kapaliny. Tento jev, tj. zvýšení sloupce kapaliny, lze využít, např. instalací turbíny pro výrobu elektrické

energie [10].

[10].



Obrázek 2: Porovnání dopředné osmózy (FO), tlakově zpomalené osmózy (PRO) a reverzní osmózy (RO) [10]



Obrázek 3: Vztah mezi RO, PRO a FO pro ideální polopropustnou membránu [11]

1.4 Důležité parametry popisující dopřednou osmózu

Pro intenzitu objemového toku membránou (J_V) v případě procesů FO a PRO lze zapsat následující rovnici [11]:

$$J_V = A_V(\sigma\Delta\pi - \Delta P) \quad (4)$$

Kde A_V – koeficient propustnosti pro vodu [$l/(m^2hPa)$], σ – koeficient reflexe [], $\Delta\pi$ – rozdíl osmotických tlaků [Pa], ΔP – aplikovaný tlak [Pa].

Pro FO s ideálně selektivní membránou ($\sigma = 1$) a při ideálním promíchávání roztoku na obou stranách membrány bude platit:

$$J_V = A_V(\pi_{draw} - \pi_{feed}) \quad (5)$$

Kde A_V – koeficient propustnosti pro vodu [$l/(m^2hPa)$], π_{draw} – osmotický tlak tažného roztoku [Pa], π_{feed} – osmotický tlak zpracovávané kapaliny [Pa].

Intenzita objemového toku membránou (J_V) je jedním ze základních výkonnostních parametrů procesu FO. Je definovaná jako objem kapaliny prošlý membránou za jednotku času a vztažený na jednotku plochy membrány. Intenzitu objemového toku rozpouštědla membránou je možné vypočítat pomocí následující rovnice:

$$J_V = \frac{V_{t1} - V_{t2}}{A \cdot (t_2 - t_1)} \quad (6)$$

Kde V_{t1} – objem zpracovávané kapaliny v čase t_1 [l], V_{t2} – objem zpracovávané kapaliny v čase t_2 [l], A – plocha membrány [m^2], t_1 , t_2 – čas [h].

Průměrnou hodnotu intenzity objemového toku membránou během celého experimentu je možné vypočítat pomocí následující rovnice:

$$J_{V,p} = \frac{V_z - V_k}{A \cdot t} \quad (7)$$

Kde V_z – objem zpracovávané kapaliny na začátku [l], V_k – objem zpracovávané kapaliny na konci [l], A – plocha membrány [m^2], t – čas [h].

Zpětný tok soli je jev, který se vyskytuje v procesech FO a PRO, kdy část rozpuštěných látek prochází zpět (proti toku rozpouštědla) z tažného roztoku do zpracovávané kapaliny přes neideální membránu. Je to nežádoucí jev, protože snižuje hnací sílu a způsobuje kontaminaci zpracovávané kapaliny. Intenzita zpětného toku soli (J_S) je parametr, kterým lze zpětný tok soli

vyjádřit (kvantifikovat). Je definován jako hmotnost rozpuštěných látek, které projdou jednotkovou plochou membrány z tažného roztoku do zpracovávané kapaliny za jednotku času. Intenzitu zpětného toku soli J_s [g/m²h] lze vypočítat podle rovnice:

$$J_s = \frac{c \cdot V_k}{A \cdot t} \quad (8)$$

Kde c – koncentrace soli [g/l], V_k – objem zpracovávané kapaliny na konci [l], A – plocha membrány [m²], t – čas [h].

Specifická intenzita zpětného toku soli vyjadřuje poměr zpětného toku rozpuštěné látky a dopředného toku vody (rozpuštědla). Je definovaná jako poměr intenzity zpětného toku soli a intenzity objemového toku vody membránou. Specifickou intenzitu zpětného toku soli $J_{s/v}$ [g/l] je možné vypočítat podle rovnice:

$$J_{s/v} = \frac{J_s}{J_v} \quad (9)$$

Kde J_s – intenzita zpětného toku solí [g/m²h], J_v – intenzita objemového toku membránou [l/m²h].

Objemový koncentrační faktor (VCF) vyjadřuje zmenšení objemu zpracovávané kapaliny (tj. odpovídá zvýšení koncentrace) oproti původnímu množství. Je definován jako poměr objemu (v případě FO zpracovávané kapaliny) na začátku experimentu a objemu na konci experimentu. Objemový koncentrační faktor je možné vypočítat podle rovnice:

$$VCF = \frac{V_z}{V_k} \quad (10)$$

Kde V_z – objem zpracovávané kapaliny na začátku procesu, V_k – objem zpracovávané kapaliny na konci procesu.

Výtěžek vody (R), je parametr, který vyjadřuje procentuální část objemu zpracovávané kapaliny, která prošla membránou vztáženou na původní objem. Je definován jako rozdíl čísla 1 a poměru konečného objemu a počátečního objemu zpracovávané kapaliny vynásobený 100 (převedení na procenta). Výtěžek vody R [] je možné vypočítat podle rovnice:

$$R = \left(1 - \frac{V_k}{V_z}\right) \cdot 100 \quad (11)$$

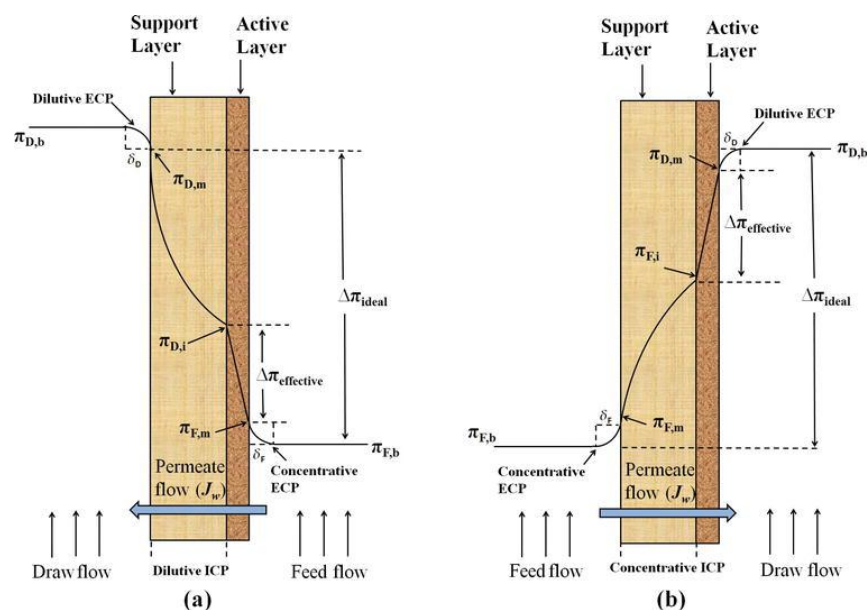
1.4.1 Koncentrační polarizace

Naměřené hodnoty J_v jsou reálně nižší, než hodnoty vypočítané podle rovnice (5). Jedním z hlavních důvodů je jev zvaný jako koncentrační polarizace. Tento jev má významný vliv i na

výkonnostní charakteristiky u jiných membránových separačních procesů. Během procesu FO membrána propouští rozpouštědlo, ale brání průchodu rozpuštěných látek. Kvůli tomu dochází k vytvoření vrstvi, ve které je koncentrace rozpuštěných látek vyšší než v objemu zpracovávaného roztoku. Jde o koncentrující vnější koncentrační polarizaci (cECP). Současně na straně membrány, která je v kontaktu s tažným roztokem, dochází naopak k ochuzování hraniční vrstvy o rozpuštěné látky (tažné soli) zpětným tokem, zejména ale naředěním přitékajícím rozpouštědlem. Toto ochuzování hraniční vrstvy se označuje jako ředící vnější koncentrační polarizace (dECP). Takovým způsobem dochází ke snížení efektivního rozdílu osmotických tlaků zpracovávané kapaliny a tažného roztoku, a následně i k poklesu hnací síly [12][13].

Membrány pro FO se skládají obecně z mikroporézní vrstvy a na ní umístěné tenké selektivní vrstvy. Proto ke koncentrační polarizaci může docházet nejenom vně membrány, ale také uvnitř mikroporézní vrstvi. Při orientaci selektivní vrstvi k tažnému roztoku, zpracovávaná kapalina proudí mikroporézní vrstvou. Selektivní vrstva propouští pouze rozpouštědlo, a proto dochází k akumulaci rozpuštěných látek v mikroporézní vrstvě. Mikroporézní vrstva znesnadňuje difuzi těchto látek zpátky k hlavnímu proudu zpracovávané kapaliny, a tak nastává vnitřní koncentrující polarizace (cICP). Naopak, pokud je orientace membrány taková, že selektivní vrstva čelí zpracovávané kapalině, může docházet k ředící vnitřní koncentrační polarizaci (dICP). Tažný roztok v blízkosti selektivní vrstvy, v mikroporézní vrstvě, má nižší koncentraci tažné soli. Mikroporézní vrstva omezuje difuzi rozpuštěných látek z objemu kapaliny (tažného roztoku) k selektivní vrstvě oproti difuzi ve volném kapalině. V obou případech (cICP a dICP) dochází k dalšímu snížení efektivního rozdílu osmotických tlaků zpracovávané kapaliny a tažného roztoku, tj. hnací síly. ICP obecně představuje závažnější problém v procesu FO než ECP. Jelikož vždy dochází k zpětnému toku soli, cICP se může objevovat i když je zpracováván roztok pouze demineralizovaná voda. V literatuře je popsáno několik možných způsobů eliminace nebo alespoň minimalizace vlivu ECP, jako jsou změna hydraulických podmínek, použití vibrací, ultrazvuku atd. [12][13].

Vliv koncentrační polarizace pro FO je oproti vlivu u RO významnější zejména s ohledem k tomu, že u FO nám snižuje přímo hnací sílu procesu (již tak omezenou).



Obrázek 4: Schématické znázornění toku vody a koncentračního profilu v procesech a) FO a b) PRO. Převzato z [12].

1.5 Membrány pro dopřednou osmózu

Klíčovým elementem každého zařízení pro FO je membrána, která má významný vliv na provozní charakteristiky a ekonomiku procesu. V začátcích technologie FO byly používány membrány vyrobené pro RO, ale výsledky nebyly akceptovatelné. Tyto membrány byly určeny pro použití při vysokých tlacích, a proto musely mít tlustou podpurnou vrstvu. Tato silná vrstva umožňovala vznik ICP, což vedlo k drastickému snížení toku vody přes membránu. Následně začala řada výrobců vyvíjet a vyrábět membrány speciálně optimalizované pro FO, a to přineslo obrovský pokrok v celém odvětví [14].

Membrány pro FO lze klasifikovat dle technologie přípravy na:

- 1) Integrované asymetrické membrány vyrobené pomocí inverze fází
- 2) Tenkovrstvé kompozitní membrány – thin film composite membranes (TFC)
- 3) Sendvičové (Layer-by-layer, LbL) membrány
- 4) Biomimetické membrány

1.5.1 Integrované asymetrické membrány vyrobené pomocí inverze fází

Tenká selektivní vrstva a široká makroporózní podpurná vrstva integrovaných asymetrických membrán jsou vyrobeny v jednom kroku ze stejného materiálu. Nejpoužívanější metoda výroby těchto membrán je inverze fází. Polymer, ze kterého má být vyrobena membrána pro FO, se rozpustí v organickém rozpouštědle a odlije na inertní podložku. Tloušťka odlité vrstvy se

nastavuje pomocí speciálního nože nebo jiné vhodné pomůcky. Polymerní vrstvu je možné nechat krátkou dobu na vzduchu, aby se odpařila část rozpouštědla. Následuje ponoření do koagulační lázně (obvykle voda), kde dochází ke koagulaci polymeru a vytvoření membrány [1][15].

Pro přípravu membrán pro reverzní osmózu metodou inverze fázi získali Loeb a Sourirajan patent v roce 1964 [15]. Tato membrána byla vyrobena z acetátu celulózy (CA). Prvně komerčně dostupnou membránu, která byla optimalizovaná pro použití v FO, začal nabízet výrobce Hydration Technology Innovation (HTI). Šlo o membránu z triacetátu celulózy (CTA) vyrobenou inverzí fázi, jak bylo popsáno v patentu [16]. Výhodou použití CTA místo CA je větší odolnost membrány vůči biodegradaci a hydrolýze. Zlepšení mechanických vlastností, zvýšení J_v , zvýšení selektivity a na druhu stranu jejich hydrofilicita, byly motivací pro další výzkum membrán z esterů celulózy. Například, pro přípravu membrán byly zkoumány acetát propionát celulózy (CAP) a acetát butyrát celulózy (CAB). Ve studii [17] bylo ukázáno, že se zvýšením počtu delších objemnějších skupin roste hydrofobicita, díky čemuž klesá intenzita toku vody (fluxu), ale naopak roste selektivita. S dalším zvyšováním hydrofobicity nastávají defekty v selektivní vrstvě a membrána tím ztrácí selektivitu [17-19].

Dalším materiálem, ze kterého byly připraveny integrální asymetrické membrány pomocí inverze fázi, je polybenzimidazol. Jejich výhody v porovnání s membránami z esterů celulózy jsou větší chemická a teplotní odolnost. Tyto membrány, však nemají dostatečnou selektivitu pro monovalentní ionty (díky čemuž mají vyšší hodnoty zpětného toku soli). Práce [20] a [21] se zabývají modifikací takových membrán s cílem jejich použití v FO. Také byly popsány membrány pro FO vyrobené z polyamid-imidu [22]. Způsobem, jak se někteří autoři snaží vyřešit problém interní koncentrační polarizace, je i příprava membrán s porézní vrstvou mezi dvěma tenkými selektivními vrstvami (tzv. double skin membrány) [20-21][23].

1.5.2 Tenkovrstvé kompozitní membrány (TFC)

Tenkovrstvé kompozitní membrány – thin film composite (TFC) membrány se skládají ze selektivní vrstvy, makroporézní nosné vrstvy, která poskytuje požadované mechanické vlastnosti, a vrstvy umožňující dokonalé propojení selektivní a podpůrné vrstvy. Na rozdíl od integrálních asymetrických membrán, jsou tyto vrstvy vyrobeny z různých materiálů. Výhodou je, že volbou materiálu lze přizpůsobit funkci každé vrstvy. TFC membrány mají tendenci vykazovat ve srovnání s integrálními asymetrickými membránami lepší výkonnostní parametry (vyšší intenzitu objemového toku membránou a nižší intenzitu zpětného toku soli) a větší

odolnost k biodegradaci, a proto jsou v současnosti nejpoužívanějším typem membrán pro FO [24].

Nejběžnějším způsobem výroby TFC membrán je mezifázová polymerizace (IP). Je to technika, ve které k polymerizaci dochází na fázovém rozhraní dvou nemísitelných roztoků obsahujících reaktivní monomery. Nosná vrstva, obsahující vodný roztok jednoho z monomerů, je ponořena do roztoku druhého monomeru. Pro vytvoření selektivní vrstvy z polyamidu se používají vodný roztok aminu a roztok acylchloridu v organickém rozpouštědle. Amin a acylchlorid, kteří jsou na fázovém rozhraní, reagují a vytvářejí tenkou nepropustnou polyamidovou vrstvu. Polyamidové selektivní vrstvy se už běžně používají pro FO a RO membrány, ale výzkum v této oblasti stále trvá. Například, v práci [25] byl zkoumán vliv různých faktorů (čas reakce, přídavek jiných sloučenin) na strukturu výsledné selektivní vrstvy. Dalším směrem výzkumu je přídavek nanomateriálu do selektivní vrstvy, kterým je možné vytvořit vhodné TFC membrány [9][26].

Při prvních FO experimentech byly používané TFC membrány vyvinuté pro RO, což vedlo opět k neakceptovatelně nízkým hodnotám výkonnostních parametrů. TFC membrány původně připravené pro RO se skládají, jak již bylo zmíněno ze selektivní vrstvy, mikroporézní vrstvy a vrstvy netkané textilie. Všechny vrstvy, kromě selektivní vrstvy, jsou poměrně tlusté, hydrofobické a mají relativně malou porozitu (aby vydržely vysoké transmembránové tlaky při RO). Tyto vlastnosti jsou nevhodné kvůli přispívání k interní koncentrační polarizaci. Výzkumníci se tedy nezabývali pouze optimalizací selektivní vrstvy, ale i podpůrných vrstev TFC membrány. Pečlivým výběrem koncentrace roztoku polysulfonu a přizpůsobením procesu odlévání lze vytvořit nosnou vrstvu TFC membrány, která bude mnohem vhodnější pro proces FO [27]. TFC membrány s nosnou vrstvou z triacetátu celulózy mohou mít přijatelné vlastnosti pro FO [28]. Dalšími materiály, z kterých byly připraveny nosné vrstvy TFC membrán pro FO jsou polyvinylidenfluorid, polyakrylonitril, polyethylen, polypropylen. V některých pracích byla také zkoumána možnost použití elektrostatického zvlákňování pro přípravu nosné vrstvy z nanovláken [14; 29-30].

1.5.3 Sendvičové membrány, Layer by layer (LbL)

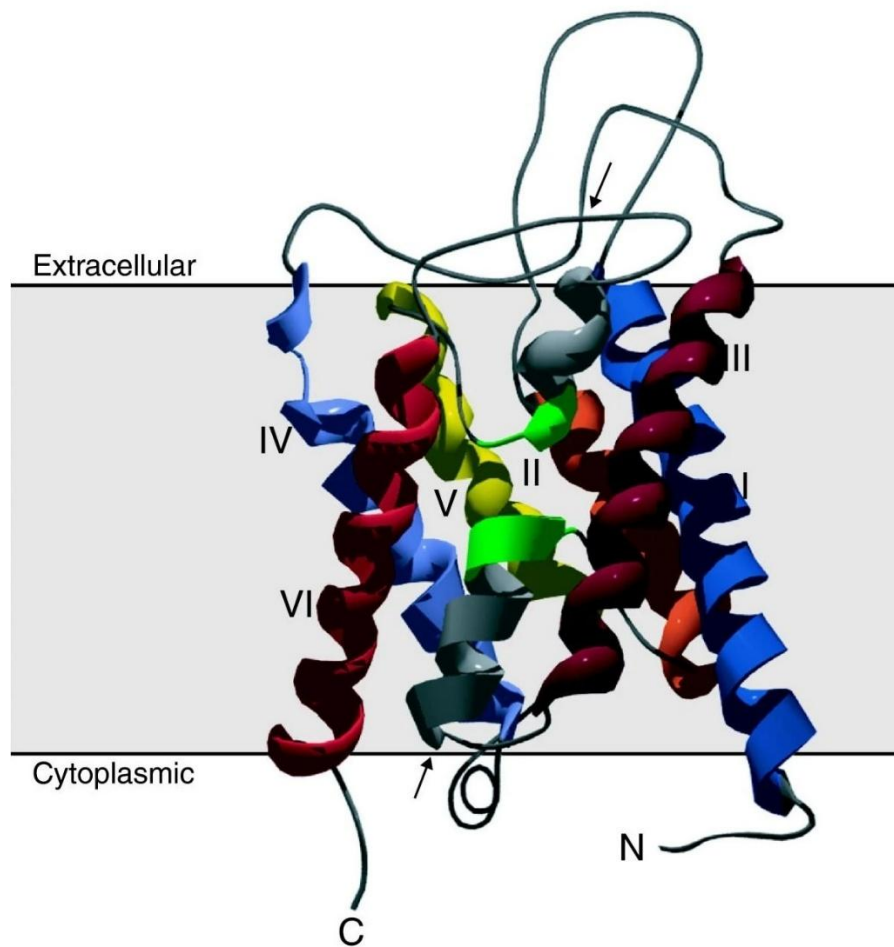
Jiným způsobem (kromě polymerizace na rozhraní fází) vytvoření selektivní vrstvy je postup postupného vrstvení vrstvy (nejčastěji polyelektrolytů) po vrstvě, tzv. layer by layer (LbL). Tady se selektivní vrstva skládá z více střídaných vrstev polyaniontů a polykationtů, nejčastěji vytvořených technikou ponoření, tzv. dip – coating. Tuto techniku je možné popsat jako

cyklickou depozici polyaniontů a polykationtů na nabitou vrstvu membrány případně vytvořené vrstvy opačně nabitého polyiontu. Jako vhodné základní membrány se obvykle používají UF membrány. Charakteristiky výsledné membrány lze měnit změnou podmínek procesu, jako jsou čas, pH nebo iontová síla použitého roztoku polyelektrolytu. Na výsledné charakteristiky membrány má vliv také počet cyklů (tloušťka výsledné vrstvy). Překážkou pro širšího uplatnění sendvičových membrán v FO je jejich špatná selektivita pro monovalentní ionty, což je tématem aktivního výzkumu [31-33]. Této vlastnosti se naopak využívá v NF k dělení monovalentních solí od vícemocných solí.

1.5.4 Biomimetické membrány

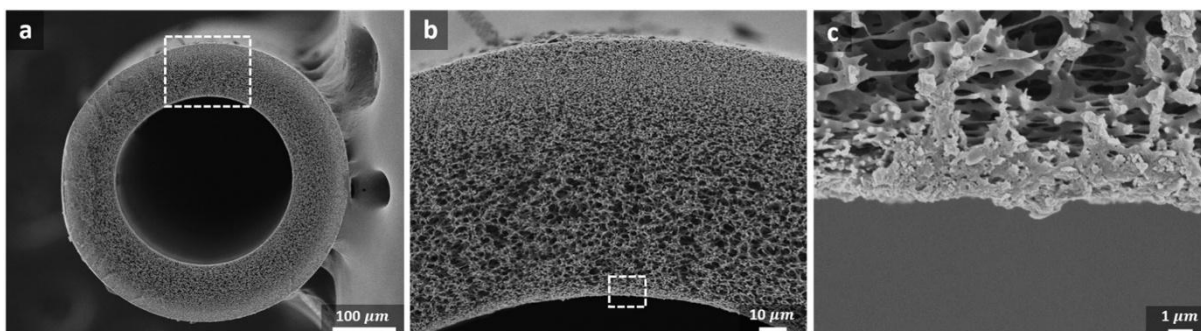
Biomimetika je obor, který se zaměřuje na napodobování přírodních struktur a procesů s cílem vyvinout inovativní řešení světových problémů. Tento obor našel uplatnění také u membránových separačních procesů. V roce 1988 americký lékař a molekulární biolog Peter Agre objevil nový druh integrálního membránového proteinu, který nazval aquaporin. Tento protein umožňuje mnohem rychlejší transport vody přes buněčnou membránu (je odhadováno že 1 g purifikovaného proteinu může propustit 700 l vody za sekundu) než pouze difuzí a osmózou. Každý aquaporin se skládá ze šesti spirálových segmentů s úzkým kanálem, pomocí kterého mohou procházet molekuly vody [34-36].

Aquaporinové biomimetické membrány se skládají z nosné vrstvy a vrstvy, kterou tvoří polymer s včleněnými aquaporiny. Největší překážkou ve vývoji takových membrán bylo vytvoření polymerní vrstvy se začleněnými aquaporiny. Je více způsobů vyřešení tohoto problému. V přímém slučování vezikul, dochází k roztržení vezikul a vytvoření jednotné vrstvy [37]. Druhý způsob výroby je depozice vezikul spolu s opačně nabitými polyelektrolyty (layer by layer). Ve třetím způsobu výroby jeden z roztoků monomerů použitých při interfaciální polymerizaci obsahuje vezikuly s aquaporiny, díky čemuž lze dostat funkční biomimetickou membránu [38]. Čtvrtý způsob výroby je založen na chemickém ukotvení vezikul obsahujících aquaporiny po depozici na nosnou vrstvu [39][40].



Obrázek 5: Struktura aquaporinů [41]

Průkopníkem v oboru se stal výrobce Aquaporin A/S z Dánska, který vyvinul a jako první začal komerčně nabízet biomimetické membrány pro použití v RO, PRO a FO. Vývojový tým získal patent [42] pro uvedený druh membrány již v roce 2006. Selektivní vrstva se skládá z vezikul obsahující aquaporiny včleněných do polyamidové vrstvy. Porézní nosná vrstva je vyrobená z polysulfonu. Výrobce nabízí moduly s dutými vlákny ve dvou velikostech – s celkovou membránovou plochou 2,3 m² a 13,8 m² [43–45].



Obrázek 6: Snímky biomimetické membrány výrobce Aquaporin A/S pořízené pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu při zvětšení a) 170x, b) 800x, c) 5000x. Převzato z [43].

1.6 Tažný roztok

Dalším klíčovým prvkem technologie FO, mimo samotných membrán, je tažný roztok. Na rozdíl od některých jiných membránových procesů, jedním konečným produktem na výstupu z modulu není u FO čistá voda, ale zředěný tažný roztok. Pokud není zředěný tažný roztok už dále použitelný sám o sobě anebo je cílem procesu produkce čisté vody, je nutné přidat druhý separační krok. Regenerační krok vyžaduje další energii, což v některých případech může způsobit, že proces FO přestane být konkurenceschopným. Důležitými požadavky na tažný roztok jsou: vytvoření, co největšího objemového toku vody membránou (vysoký osmotický tlak), co nejnižší zpětný tok soli, že není toxický a jeho nízká cena [46].

Nejběžnějšími tažnými roztoky v FO experimentech jsou vodné roztoky anorganických sloučenin, zvláště anorganických kyselin a solí. Tyto sloučeniny jsou lehce dostupné a umožňují vysoké objemové toky vody membránou. Chlorid sodný je široce používán jako tažný roztok v různých odvětvích, jako jsou potravinářství, odsolování vod a zpracování odpadních vod. Výhody NaCl jsou, že na Zemi existují obrovské zásoby (např. mořská voda), jeho roztoky lze relativně snadno znovu koncentrovat procesem RO a má vysokou rozpustnost ve vodě a díky tomu lze získat roztok s vysokým osmotickým tlakem. Navíc vlastnosti roztoků NaCl jsou velmi dobře prostudované. V práci [47] byl vyvíjen protokol pro výběr optimálního anorganického tažného roztoku. Z více než 500 sloučenin bylo vybráno 14 a následně vyzkoušeno v laboratoři. Bylo ukázáno, že tažné roztoky, které obsahovaly větší hydratované anionty (MgSO_4 , KHCO_3 , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, K_2SO_4) měly nižší hodnoty zpětného toku soli. Také bylo ukázáno, že se zvýšením osmotického tlaku dochází ke zvýšení J_v , ale že se tato hodnota liší mezi jednotlivými roztoky při stejné hodnotě vypočítaného osmotického tlaku. Autoři tento jev vysvětlili vlivem ICP. V práci [48] byla potvrzena možnost využití

koncentrovaných roztoku anorganických hnojiv jako tažného roztoku, který potom může být přímo používán pro hnojení [47][49][50].

Jedním ze způsobů, jak usnadnit regeneraci tažného roztoku je použití těkavých látek. V práci [51] bylo zkoumáno využití roztoku NaHCO_3 jako tažného roztoku. Při zahřátí tohoto roztoku na relativně nízkou teplotu ($60\text{ }^\circ\text{C}$) dochází k rozkladu na amoniak a oxid uhličitý. Odstranění těchto plynů z roztoku potom není složité, a navíc lze tyto plyny použít k regeneraci tažného roztoku. Aby byla technologie konkurenceschopná, musí v blízkosti existovat zdroj levného tepla. Další nevýhodou je poměrně vysoký zpětný tok soli [47]. Pro přípravu tažného roztoku byl také vyzkoušen plyn SO_2 . Batchelder získal patent v roce 1965 pro demineralizaci vody pomocí FO a tažného roztoku na základě SO_2 [52]. Oddělení SO_2 je potom možné provést zahřátím nebo stripováním vzduchem [53].

Dobře rozpustné organické látky mohou být také využité pro přípravu tažných roztoků. Ještě v roce 1975 Kravath a Davis zkoumali použití glukózy pro vytvoření osmotického tlaku v rehydratačních sáčcích v záchranných člunech [54]. V práci [55] bylo ukázáno, že pro stejný účel lze dosáhnout lepších výsledků při použití směsi glukózy a fruktózy. Jako tažné roztoky v některých pracích byly též zkoumány roztoky močoviny a ethylen glykolu [56]. Autoři práce [57] využili modifikovaný postup z práce [47] pro výběr tažného roztoku z organických solí pro použití v osmotickém membránovém bioreaktoru (OMBR). Zjistili, že organické soli s kratším uhlíkovým řetězcem (se stejným kationtem) nabízejí vyšší hnací sílu, ale také vyšší zpětný tok soli. Dalším příkladem použití roztoků organických sloučenin může být tažný roztok skládající se z terciárního aminu a CO_2 rozpuštěného ve vodě. Terciární aminy mají schopnost se změnit z nepolárního stavu v polární v přítomnosti CO_2 . Přídavkem N_2 dochází ke změně z polárního aminu na nepolární amin a k následné separaci nepolárního aminu a vody. Přídavkem CO_2 dochází ke změně nepolárního aminu na polární amin a takovým způsobem je ukončena regenerace tažného roztoku [49][58-59].

V dnešní době probíhá intenzivní výzkum v této oblasti, což vedlo k řadě inovativních způsobů přípravy tažných roztoků. Značná pozornost je věnovaná tažným roztokům na základě magnetických nanočástic, které nabízejí možnost velmi snadné separace pomocí magnetického pole a následně regeneraci tažného roztoku. Vedle velikosti částic má vliv na výslednou hnací sílu (při určité hmotnostní koncentraci) výběr (hydrofilní) látky, kterou je obklopené magnetické jádro částice. Dále byly vyvinuty nanočástice, které podléhají shlukování na vnější stimul, což usnadňuje jejich separaci. Tento stimul může být teplota [60], světlo [61], nebo

přítomnost jiné látky (např. N_2) [62]. Dalšími látkami, jejíž citlivost na vnější stimuly lze využít k usnadnění regenerace tažného roztoku, jsou hydrogely. Změna teploty, aplikace světla, tlaku, nebo změna pH mohou vyvolat změnu hydrofilnosti těchto materiálů. Při přechodu z hydrofilního na hydrofobní stav, hydrogely ztrácejí vodu ze své struktury, při změně struktury zpátky na hydrofilní stav je jich možné opětovně použít jako tažný roztok. Vzhledem k dobrým absorpčním vlastnostem (v ultrafialové, viditelné a infračervené části elektromagnetického spektra) částic černého uhlíku, lze jejich přidáním intenzifikovat ztrátu strukturní vody při vystavení hydrogelu slunečnímu záření [63]. Regenerace tažného roztoku je jednou z klíčových překážek k širšímu uplatnění FO v praxi, a proto lze předpokládat, že bude věnována značná pozornost novým tažným roztokům i v budoucnosti [49][64-65].

1.7 Zařízení pro dopřednou osmózu

Zařízení pro FO se skládá z čerpadel, potrubí, nádrží, FO modulu (membrány) a měřicí a řídicí techniky. Konstrukce modulů pro FO je velmi podobná konstrukcím modulů pro některé jiné membránové procesy. Základní rozdělení membránových modulů vychází z rozdělení membrán na plošné a tubulární. Plošné membrány se používají v deskových a spirálně vinutých modulech. Ponořené deskové moduly se někdy používají v membránových bioreaktorech. Významnou nevýhodou deskových modulů jsou vysoké nároky na prostor. Spirálně vinuté moduly jsou v tomto pohledu úspornější, ale jejich nevýhodou je pak velmi obtížné čištění [1][14][66].

Z tubulárních geometrií se v FO používají trubkové a moduly s dutými vlákny. Hlavní výhodou modulů s dutými vlákny je jejich prostorová úspornost, díky velmi vysoké hodnotě poměru plochy membrány k vlastnímu objemu modulu (20000 až $30000 \text{ m}^2/\text{m}^3$). Nevýhodou těchto modulů je neschopnost práce se znečištěnými kapalinami. V současné době několik výrobců už nabízí moduly s dutými vlákny určené pro dopřednou osmózu. Například výrobce Aquaporin A/S z Dánska vyrábí modul HFFO 2 s celkovou plochou (biomimetické) membrány $2,3 \text{ m}^2$. Modul se skládá z dutých vláken vnitřního průměru $190 \mu\text{m}$ v polymerním pouzdru. Další výrobce, který má v nabídce FO moduly s dutými vlákny je firma Toyobo MC z Japonska. Tyto moduly obsahují vlákna s vnitřním průměrem $105 \mu\text{m}$ a mají celkovou plochu (CTA) membrány $31,5 \text{ m}^2$, 60 m^2 nebo 650 m^2 [1][67-68].

1.8 Historický vývoj technologie dopředné osmózy

Již v roce 1748, při ponoření zvířecího měchýře naplněného vínem pod hladinu vody, abbé Nollet pozoroval, že voda prochází přes stěnu měchýře do alkoholu, ale že alkohol neprochází do vody [69]. Za začátek moderních membránových technologií lze považovat práci Loeba a Sourirajana ze začátku šedesátých let dvacátého století, kdy byla připravena první asymetrická polymerní membrána pro tlakové membránové separační procesy [70]. Protože v té době ještě nebyly membrány speciálně navrženy pro FO, byly v začátcích používány právě membrány pro RO. To však vedlo k nízkým hodnotám J_v . Během sedmdesátých let započalo významnější úsilí o energetické využití osmózy (PRO). První komerčně dostupnou membránu speciálně navrženou pro FO začal nabízet výrobce Hydration Technologies Inc. (HTI) až v devadesátých letech. Tento počín byl významnou událostí pro další rozvoj FO, protože umožnil relativně levný a jednoduchý přístup k technologii FO mnohým vědcům, kterým dal možnost zkoumat možnosti aplikace FO v různých odvětvích. V roce 2008 začala firma Oasys water vyvíjet tenkovrstvou kompozitní membránu (TFC) pro FO se selektivní vrstvou z polyamidu [71]. Následujícím krokem v rozvoji technologie FO bylo uvedení na trh biomimetických membrán výrobcem Aquaporin A/S [14][72][73].

Současně s vývojem membrán byly zkoumány a vyvíjeny nové tažné roztoky. Důraz byl kladen na zjednodušení a zefektivnění procesu regenerace tažného roztoku. Probíhal výzkum a testování tažných roztoků založených na základě těkavých látek, organických látek, hydrogelů, magnetických nanočástic atd. Současné výzkumy se také zaměřují na kombinování FO a jiných membránových separačních technologií a využití v membránových bioreaktorech (MBR). Obecně lze říct, že průmyslové aplikace FO zaostávají za zájmem ve výzkumných institucích. Jedním z prvních komerčních aplikací byly hydratační sáčky nabízené výrobcem HTI a ve větším měřítku desalinizační zařízení v Al Naghdah, Oman (Modern Water). V současnosti přicházejí na trh noví výrobci FO membrán a postupně dochází k uplatnění FO v dalších odvětvích (potravinářství, odsolování vody, zkoncentrování průmyslových roztoků – ZLD technologie) [66][74].

1.9 Aplikace dopředné osmózy

Hlavními výhodami dopředné osmózy jsou její nízká energetická náročnost a nižší náchylnost k zanášení membrán v porovnání s tlakovými membránovými procesy (TMP). Její významnou nevýhodou je nutnost regenerace tažného roztoku, pokud zředěný tažný roztok není přímo

používán (není žádaným produktem). V poslední době, dopředná osmóza našla řadu uplatnění v průmyslu, v ochraně životního prostředí a potravinářství.

1.9.1 Aplikace v průmyslu, zemědělství a ochraně životního prostředí

Jednou z aplikací, ve kterých technologie FO byla vyzkoušena, je zpracování komunálních odpadních vod. Takové vody mohou obsahovat patogeny, organické látky, nutrienty (N a P), těžké kovy atd. V tomto oboru existuje více způsobů uplatnění FO. První je zkoncentrování odpadních vod vpřed vstupem do anaerobního digesce, čímž lze dosáhnout snížení potřebného objemu a snížení spotřeby energie na zahřívání. V práci [75] bylo ukázáno, že použitím ponorných FO modulů lze zkoncentrovat komunální odpadní vody do vysokých hodnot chemické spotřeby kyslíku (CHSK), přes 1200 mg/l. Druhý způsob uplatnění FO je použití jako součást membránového bioreaktoru (FO-MBR), kde se membrány používají pro odvodnění obsahu MBR. V práci [76] bylo zjištěno, že zanášení membrán je mnohem intenzivnější při přímém zpracování komunálních odpadních vod než v případě FO-MBR. Dopředná osmóza také byla úspěšně testovaná pro zpracování skládkového výluhu [77]. Pro tento účel autoři práce [77] využili jako tažný roztok NH_4HCO_3 . Obrovskou výhodou je, že takový zředění roztok lze použít přímo v zemědělství (pro hnojení), a tím pádem odpadla nutnost regenerace tažného roztoku.

Dopřednou osmózu je možné uplatnit v různých odvětvích průmyslu. Odpadní vody ze zušlechťování textilií představují významné nebezpečí pro životní prostředí především kvůli velkému množství takových vod a jejich komplexnímu složení. Tyto vody mají vysoké hodnoty (CHSK), biologické spotřeby kyslíku (BSK) a obsahují značné množství rozpuštěných anorganických solí. V práci [78] byl použit FO modul Aquaporin HFFO 2 pro zkoncentrování roztoku textilních barev na koncentraci dostatečnou pro jejich opětovné použití v procesu barvení. V práci [79] byla provedena ekonomická analýza zpracování odpadních vod z textilového průmyslu, která ukázala že při daných podmínkách (cena elektrické energie, cena vody) FO s regenerací tažného roztoku pomocí RO může být ekonomicky výhodná.

V ropném a plynárenském průmyslu vzniká velké množství odpadních vod, včetně odpadních vod z vrtání a hydraulického štěpení, jejichž zpracování je považováno za velmi obtížné kvůli vysoké koncentraci solí a organických látek. Složení těchto odpadních vod se mění se změnami geologických podmínek a výrobních postupů, což dále zvyšuje obtížnost čištění. Pomocí FO je možné dosáhnout výtěžek vody větší než 80 %, oproti 50 až 60 % v případě tradičních technologií. Zanášení membrán může však významně snížit intenzitu objemového toku vody

membránou. Původní hodnoty lze obnovit relativně jednoduše pouhou občasnou cirkulací demineralizované vody okruhem zpracovávané kapaliny (zanášení není ireverzibilní) [80-81].

V chemickém průmyslu také existuje hodně příležitostí pro uplatnění FO. V práci [82] bylo popsáno použití FO pro odvodnění umělého latexu, což umožnilo snížení spotřeby energie na zkoncentrování této látky. Dosáhnutá koncentrace latexu byla 75 % při použití modelového roztoku, který napodoboval mořskou vodu jako tažného roztoku. Podle autorů, však dosáhnutá optimální koncentrace latexu je 60 až 64 %, protože při pokusech o dosažení vyšších koncentrací dochází k intenzifikaci zanášení membrán. FO je také možné použít pro zkoncentrování fermentačních produktů, čemuž je v současné době věnována značná pozornost. V případě zkoncentrování kyseliny jantarové pomocí FO a 1 mol/l NaCl jako tažným roztokem byly získány hodnoty J_V až 4,8 l/m²h [83]. Ve stejné práci byl zkoumán vliv pH (v rozmezí 2,50 až 8,00) zpracovávané kapaliny (koncentrace roztoku kyseliny jantarové) na parametry procesu. Bylo zjištěno, že se zvýšením pH dochází k poklesu J_V , ale že se všechny hodnoty mezi sebou neliší o víc než 1 l/m²h. V práci [84] byly zjištěny hodnoty J_V až 18 l/m²h při zkoncentrování kyseliny máselné pomocí 5 mol/l roztoku MgCl₂ (při použití CTA FO membrány výrobce HTI). Při stejných podmínkách experimentu, ale při použití membrán určených pro RO, hodnota J_V nepřevyšovala 5 l/m²h, což je důsledkem ICP. Možnosti pro uplatnění FO existují také ve farmaceutickém průmyslu. FO lze využít pro zkoncentrování léčivých látek a současnou recyklaci organického rozpouštědla. V práci [85] byly zkoncentrovány roztoky léčivých látek v ethanolu, isopropanolu a hexanu (v tomto případě přes membránu proudilo organické rozpouštědlo). Dopředná osmóza také byla vyzkoušena pro zkoncentrování bílkovin [86].

1.9.2 Aplikace v potravinářství

Použití dopředné osmózy je velmi výhodné zejména v potravinářství. Pro zkoncentrování potravinářských roztoků se často používají termální metody, což je nežádoucí kvůli náchylnosti některých látek (např. aroma) na vysoké teploty. Membránové separační technologie umožňují zpracování suroviny bez zvýšení (nebo po jen mírném zvýšení) teploty a v důsledku toho zachování chutí, vůně a nutriční hodnoty. Tyto technologie jsou navíc mnohem méně energeticky náročné než termální metody. Dopředná osmóza má další výhody oproti ostatním membránovým technologiím. FO zařízení jsou provozována při mnohem nižších tlacích než TMP, a proto je provoz energeticky úspornější a nebezpečí zanášení membrán je také nižší. Není potřeba vysokotlakých čerpadel, potrubí uzpůsobené pro vysoké tlaky jako u RO.

V posledních letech je zkoncentrování šťáv velmi aktuálním tématem ve výzkumu a v průmyslu. Autoři práce [87] zkoumali zkoncentrování rajčatové šťávy pomocí FO a tažných roztoků různého složení. Bylo zjištěno, že hodnota J_V není závislá jen na hnací síle (rozdílu osm. tlaků na obou stranách membrány), ale že vykazuje silnou závislost na viskozitě tažného roztoku (důvodem je dICP). Také zvýšením teploty (snížením viskozity) rajčatové šťávy docházelo k růstu J_V . Dále byl studován vliv tloušťky podpůrné vrstvy membrány (se stejnou aktivní vrstvou) na J_V a výsledek byl v souladu s poznatkem, že zvýšení tloušťky membrány má negativní vliv na J_V . Průtok rajčatové šťávy podél membrány neměl vliv na J_V .

Antokyany a betalainy jsou látky, které se vyskytují v některých rostlinách a které se používají jako barviva v potravinářství. V práci [88] byl proveden pokus o zkoncentrování betalainů ve šťávě z červené řepy a porovnání vlastnosti FO koncentrátu a koncentrátu, který byl připraven na filmové odparce. Při použití roztoků NaCl 6 mol/l byla koncentrace betalainů pomocí FO zvýšena z počátečních 0,50 g/l (5 °Brix) na 6,17 g/l (61 °Brix). Použitím odparky pro zkoncentrování stejné suroviny, koncentrace betalainů byla zvýšená na 3,70 g/l. Hodnota Brix byla zvýšená na 58 °. Důvodem pro nižší koncentraci betalainů po odpařování, přes přibližně stejnou hodnotou VCF (přibližně 12) u obou experimentů, je termolabilita těchto látek. Po experimentu byla během 9 dnů studována stabilita betalainu v koncentrátu. Byla zjištěna vyšší odolnost betalainů k degradaci v koncentrátu připraveném pomocí FO bez ohledu na podmínky skladování (teplota, přítomnost světla, pH) než získaného odpařením. Výhody FO byly potvrzené také pro případ zkoncentrování antokyanů. V práci [89] byl vyvíjen postup pro zkoncentrování antokyanů v extraktu z ředkvičky červené kombinací odpařování a FO. Byla dosáhnuta koncentrace barviva (betalainu) 800 mg/l (30°Brix). Sensorická analýza ukázala, že tímto postupem lze dosáhnout lepších organoleptických vlastností produktu oproti pouze termickému zpracování. Jiní autoři [90] uskutečnili přibližně 54násobné (z 49 mg/l na 2692 mg/l) zvýšení koncentrace antokyanů v extraktu z garcinie indické pomocí FO a s použitím 6 mol/l NaCl jako tažného roztoku.

Dopředná osmóza byla použita pro zkoncentrování hroznové šťávy v roce 1966, kdy pomocí RO membrány a roztoku NaCl byla zvýšená hodnota Brix z 16° na 60° [91]. V práci [92] byl zkoumán vliv osmotického tlaku tažného roztoku, teploty zpracované šťávy a průtoku zpracovávané kapaliny podél membrány na parametry procesu FO. Největší hodnota VCF (3,78) a nejnižší hodnota J_S (3,19 g/m²h) byla dosáhnuta v experimentu s největším osmotickým tlakem tažného roztoku, teploty 20 °C a největším průtokem, odpovídajícím rychlosti 27,8 cm/s, zpracovávané kapaliny podél membrány (cross flow). Nejvyšší dosažená

hodnota Brix pomocí FO byla (41,7°), následně byla zvýšena hodnota Brix na 65,7° použitím vakuové odparky. Následnými analýzami bylo potvrzeno, že je kombinovaný proces šetrnější k biologicky aktivním látkám než pouze termální zkoncentrování.

V literatuře bylo popsáno použití FO pro zkoncentrování různých ovocných šťáv. V práci [92] bylo popsáno zpracování ananasové šťávy při použití směsi NaCl (12 %) a sacharózy (40 %) jako tažného roztoku. Důvodem pro výběr sacharózy byla snaha o snížení zpětného toku soli, ale na druhou stranu použití pouze sacharózy by vedlo k nižší hnací síle. Šťáva byla zkoncentrována do 60° Brix a obsah kyseliny askorbové byl v koncentrátu ananasové šťávy dobře zachován. Zpracování malinové šťávy pomocí FO je také výhodnější z hlediska zachování aroma než tepelné zpracování [93]. Dopřednou osmózu lze použít pro zpracování dalších šťáv, jako je například pomerančové šťávy [94].

Zkoncentrování ovocných šťáv, jako je jablečná šťáva, nabízí výhody jako je prodloužení možné doby skladování a snížení přepravních nákladů. V práci [95] bylo ukázáno zkoncentrování jablečné šťávy v jednokrokovém procesu do 60°Brix. Pomocí 4 mol/l NaCl jako tažného roztoku byla dosažena počáteční hodnota J_v 15,60 l/m²h. Bylo určeno že obsah pektinu v jablečné šťávě má zásadní negativní vliv na zanášení membrán. Někteří autoři zkoumali kombinaci FO a membránová destilace (MD) pro zpracování jablečné šťávy. V případě práce [96] autoři jako tažný roztok použili sorban draselný, který se v potravinářství používá jako konzervant. Pro regeneraci tažného roztoku byla použita MD. Jablečná šťáva byla zkoncentrována z počátečních 10,6°Brix na 45,1°Brix, což představovalo 4,25násobné zvýšení. Pro porovnání, v práci [97] bylo pomocí RO dosaženo pouze 2,36násobného zvýšení hodnoty Brix jablečné šťávy při použitím tlaku 550 kPa. Obsah sorbanu draselného v koncentrátu po FO byl 0,45 g/l, což nijak neomezovalo další použití džusu v potravinářství.

Dalším možným využitím FO je zkoncentrování čaje. V práci [98] bylo uděláno porovnání FO s CTA membránou (Toyobo) a FO s biomimetickou (Aquaporin) membránou (v obou případech byl použit modul s dutými vlákny). Hodnota J_v byla několikrát větší, při použití stejných tažných roztoků, pro biomimetické membrány (14,81 až 16,89 l/m²h), oproti experimentům s CTA membránou (1,51 až 2,19 l/m²h). Hodnoty J_s při použití biomimetické membrány byly 1,78 až 1,89 g/m²h, a v případě CTA membrány byly 0,21 až 1,65 g/m²h. V experimentech s CTA byly hodnoty $J_{s/v}$ podstatně vyšší (0,31 až 0,75 g/l) než v případě použití membrán výrobce Aquaporin (0,11 až 0,12 g/l). Důvodem pro takové výsledky je větší tloušťka CTA membrány, která snižovala J_v a J_s oproti biomimetické membráně. Díky podstatně vyšším

hodnotám J_V a nižším hodnotám $J_{S/V}$ lze vyhodnotit použití biomimetické membrány jako výhodnější z hlediska výkonu a selektivity procesu. V práci bylo také zjištěno chemickou analýzou, že je produkt získaný FO je výhodnější z hlediska zachování termolabilních látek (katechin, kofein, kyselina gallová a další).

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce spočívala v sestavení zařízení pro dopřednou osmózu, ověření správného fungování (standardizovaný test), a sledování vlivu druhu a koncentrace tažného roztoku na výkonnostní parametry procesu. Jako tažné roztoky byly použity vodné roztoky NaCl a Na₂SO₄, v jednorůchodovém nebo vsádkovém režimu. Mezi zpracovávané vodné roztoky patřily binární roztoky glukózy, sacharózy, fruktózy, a modelový roztok (vodný roztok glukózy, sacharózy, fruktózy v koncentracích, které napodobují reálný jablečný mošt). Zpracovávaná kapalina (surovina) proudila vždy ve vsádkovém režimu, tj. po průchodu FO modulem se vracela zpět do nádrže. Na konci experimentální části byl udělán pokus o zahuštění reálného jablečného moštu.

2.1 Použité chemikálie

- Demineralizovaná voda, vodivost 11,5-20,3 μS/cm
- Chlorid sodný p.a., Penta, ČR
- Síran sodný bezvodý čistý (min. 99,0 %), Penta, ČR
- D-Glukosa bezvodá p.a., Penta, ČR
- Sacharóza čistá, Lachema, ČR
- D-Fruktóza p.a., Penta, ČR
- Jablečný mošt, Fruta Bohemia, ČR

2.2 Experimentální zařízení

Použité zařízení pro dopřednou osmózu se skládá z více prvků jednotlivě připevněných ke stojanu. Zpracovávána kapalina se z nádrže (která se nacházela na váze Kern FCB 8K0.1) čerpala pomocí zubového čerpadla (Heidolph PUMPDRIVE 5130) skrze rotometr (rozsah 0 až 100 l/h) a manometr do FO modulu. Nakonec se vypouštěla zpět do stejné nádrže, ze které byla čerpána (jednorůchodové zapojení). Tažný roztok se čerpal z druhé nádrže pomocí membránového čerpadla (Liquiport NF 1.100 TT.18RC), prochází skrze rotometr (rozsah 0 až 100 l/h) a potom se vypouštěl do odpadu anebo se vrací do původní nádrže (recirkulace tažného roztoku). Zapojení okruhů tažného a zpracovávaného roztoku do FO modulu bylo většinou protiproudé (pouze jeden solný test byl prováděn v souproutém uspořádání).

Membránový modul je klíčový prvek experimentálního zařízení, který ovlivňuje parametry procesu a ekonomiku provozu. V pokusech byl použit membránový modul s dutými vlákny

HFFO 2, jejímž výrobcem je firma Aquaporin A/S z Dánska. Efektivní plocha membrány v tomto modulu je 2,3 m², průměr vláken činí 0,2 mm, a maximální povolený trans membránový tlak jsou 4 bary. Výrobce doporučuje používání modulu při teplotách kapalin od 5 do 30 °C, a při hodnotách pH 3 až 10. Samotná membrána je principiálně tenkovrstvá kompozitní membrána, TFC (Thin Film Composite). Nosná vrstva membrány se skládá z polyesterové (PE) síťoviny a na ni uložený na polysulfonový (PSF) substrát. Aktivní vrstva se nachází na vnitřní straně vláken a je tvořena polyamidovou (PA) selektivní vrstvou s integrovanými aquaporinovými proteiny, což jí umožňuje selektivně propouštět molekuly vody. Modul lze také požívat v režimu tlakově zpomalené osmózy, PRO, obrácením zapojení toků na vstupu. Je nutné dbát na obsah chlóru ve zpracovávané kapalině kvůli náchylnosti membrány k oxidační činnosti. Modul se skladuje ponořený do vody a při nižších teplotách (kolem 4 °C) kvůli minimalizaci biologického zanášení. Použité zařízení je zobrazené na Obrázku 7.



Obrázek 7: Zařízení pro dopřednou osmózu (s modulem Aquaporin HFFO 2)

2.2.1 Váhy

Velmi důležitou pomůckou pro změření výsledků byly váhy. Pro měření hmotností zpracovávané kapaliny byla použita váha FCB 8K0.1, výrobce Kern & Sohn GmbH, Německo, s maximálním rozsahem vážení 36 kg a rozlišením 0,1 g. Pro měření hmotnosti navážky pro přípravu kalibračních roztoků byla použita analytická váha ME204, výrobce Mettler Toledo, Švýcarsko, s maximálním rozsahem vážení 220 g a rozlišením 0,0001 g.

2.2.2 Konduktometr

Další klíčovou pomůckou byl stolní konduktometr, s kterým byly měřeny vodivosti vzorků na jejichž základě byla určována koncentrace solí. Jednalo se o model Cond 7110, výrobce WTW GmbH z Německa, s rozsahem měření 0,001 $\mu\text{S}/\text{cm}$ až 1000 mS.

2.2.3 Refraktometr

Pro měření indexu lomu byl použit Abbeův refraktometr model 98.490 výrobce Novex-Holland, Nizozemsko.

2.2.4 Čerpadla

Pro čerpání kapaliny v okruhu s tažným roztokem (vodný roztok NaCl nebo Na₂SO₄) bylo použito membránové čerpadlo Liquiport NF 1100, výrobce KNF z Německa, s nastavitelným průtokem 0,2 až 1,3 l/min a výkonem 18 W. Pro zajištění cirkulace zpracovávané kapaliny bylo použito zubové čerpadlo Pumpdrive 5130, výrobce Heidolph, Německo s maximální výkonem 125 W.

2.2.5 Ostatní pomůcky

Pro správné fungování experimentálního zařízení a získávání výsledků bylo nutné použití i některých dalších pomůcek. Tlak v okruhu zpracovávané kapaliny byl měřen pomocí digitálního manometru (model SRG 532 A2C D, výrobce Cressto, Česká republika). Pro měření průtoků zpracovávané kapaliny a tažného roztoku byly použity rotometry (model SK 52, výrobce Georg Fischer, Švýcarsko). Pro odpařování vody ze vzorku (měření obsahu sušiny) byla použita laboratorní sušárna (model:UNE 400, výrobce: Memmert, Německo).

2.3 Kalibrační křivky– určování koncentrace solí

Během všech experimentů byla nutnost přesného a rychlého měření koncentrace soli v tažném roztoku (NaCl a Na₂SO₄) a zpracovávané kapalině, což bylo zajištěno pomocí měření vodivosti

konduktometrem. Kvůli tomu byly udělány kalibrační křivky pro NaCl (pro nízké, střední a vysoké koncentrace) a pro Na₂SO₄ (pro nízké a střední koncentrace). Při přípravě kalibračního roztoku byla hmotnost soli změřená na analytických váhách, rozpuštěna v demineralizované vodě, nalita do odměrné baňky a následně byla odměrná baňka doplněna po rysku. Takovým způsobem byly připraveny zásobní roztoky soli o vhodných koncentracích. Po promíchání byly změřeny vodivosti všech roztoků a pomocí počítače byly zpracovány kalibrační křivky.

2.4 Určování koncentrace a hodnoty Brix sacharidů

Na základě naměřeného indexu lomu bylo vypočítáno složení, následně hustota roztoku sacharidu, která potom byla použita pro výpočet dalších veličin. Údaje o závislostech složení na indexu lomu a hustoty na složení binárních roztoků glukózy, sacharózy a fruktózy byly získány z publikace [99]. Pro určení hodnoty Brix modelových roztoků a jablečného moštu byly použity údaje z publikace [100]. V případě jablečného moštu také byl určen obsah sušiny před a po experimentu (jako dodatečná kontrola stanovené hodnoty Brix).

Tabulka 2: Rovnice použité pro přepočítání indexu lomu (n_D []) na složení (ω [hm. %])

| Roztok | Rovnice | R ² |
|-----------|---|----------------|
| glukóza | $\omega = -1136,0882n_D^2 + 3711,7782n_D - 2928,9417$ | 1,000 |
| sacharóza | $\omega = -1112,8058n_D^2 + 3636,4159n_D - 2869,7421$ | 1,000 |
| fruktóza | $\omega = -1067,8700n_D^2 + 3524,2382n_D - 2800,0419$ | 1,000 |

Tabulka 3: Rovnice použité pro přepočítání složení (ω [hm. %]) na hustotu (ρ [kg/m³])

| Roztok | Rovnice | R ² |
|-----------|---|----------------|
| glukóza | $\rho = 0,0155\omega^2 + 3,7381\omega + 998,4940$ | 1,000 |
| sacharóza | $\rho = 0,0173\omega^2 + 3,7562\omega + 998,7403$ | 1,000 |
| fruktóza | $\rho = 0,0158\omega^2 + 3,8284\omega + 998,5520$ | 1,000 |

2.5 Solné testy

Před začátkem experimentů s roztoky solí a potom i mezi některými dalšími experimenty byly vykonány solné testy (FO testy). Stanovení parametrů FO membrány (intenzita objemového toku vody membránou (J_V), zpětný tok soli (J_S), umožnilo určení stavu membrány na začátku a potom sledování eventuálního poškození membrán během používání. Před každým z testů kontroly kvality bylo zařízení pro FO sestaveno, proplachováno demineralizovanou vodou, dokud vodivost kapaliny na výtoku z obou okruhů nebyla pod hodnotou doporučenou výrobcem (20 $\mu\text{S/cm}$). Teploty, při kterých byly prováděny solné testy, se pohybovaly mezi 21 °C a 25 °C. Okruh zpracovávané kapaliny byl provozován ve vsádkovém režimu, tažný roztok byl vypouštěn do odpadu po průchodu zařízením. Jako tažný roztok byl používán pro standardní testy 0,5 mol/l roztok NaCl. Dále byl používán tažný roztok 0,5 mol/l Na₂SO₄ a 1 mol/l NaCl (pro solné testy k posouzení vlivu koncentrace, případně druhu soli). Koncentrace připravených tažných roztoků byly ověřeny konduktometrem a vhodnou kalibrační křivkou. V zásobníku zpracovávané kapaliny byla demineralizovaná voda, jejíž aktuální vodivost byla zkontrolována před zapnutím čerpadel. Tento zásobník se nacházel na vahách, což umožňovalo měření hmotnosti během celého pokusu. Hmotnost byla změřena na začátku a potom vždy v 5minutových intervalech. Ve stejných intervalech byla měřená vodivost zpracovávané kapaliny (demineralizované vody) na výtoku z modulu. Vodivost zpracovávané kapaliny byla také změřena na začátku a na konci experimentu v zásobní nádrži. Průtok zpracovávaného roztoku byl udržován na hodnotě 60 l/h a tažného roztoku na hodnotě 25 l/h. Zapojení obou proudů do modulu bylo protiproudé, s výjimkou experimentu NaCl – testu 2, kdy bylo využito souprouté zapojení. Trvání testu kontroly kvality bylo 30 minut. Po ukončení testu bylo zařízení propláchnuto a byla zkontrolována vodivost obou proudů. Na základě

získaných dat byla vypočítána intenzita objemového toku vody membránou J_v (v l/m²h), zpětný tok soli (v g/m²h) a poměr J_s/J_v (v g/l), což umožnilo vyhodnocení stavu membrány.

2.6 Experimenty se sacharidy

Před každým z experimentů (stejně jako u solných testů) bylo zařízení opětovně sestaveno a následně proplachováno demineralizovanou vodou, dokud nebyla vodivost obou proudů snížena alespoň na 20 μS/cm. Před začátkem byla zkontrolována vodivost tažného roztoku (ověření hodnoty koncentrace namíchaného roztoku). Také byly zaznamenány hodnoty vodivosti a indexu lomu zpracovávaného roztoku, stejně jako jeho hmotnost. Po zapnutí čerpadel a během celého experimentu byl průtok zpracovávaného roztoku udržován na 60 l/h a tažného roztoku na 25 l/h. Každých pět minut byly zaznamenávány hodnoty vodivosti, indexu lomu, teploty výtoku zpracovávané kapaliny (pro zjištění hustoty a přepočet hmotnosti na objem) a hmotnost zpracovávané kapaliny. Délky experimentů se pohybovaly mezi 30 a 90 minutami. Po skončení experimentů následovaly proplach a rozebrání zařízení, a potom uskladnění FO modulu v chladničce. Získána data byla zpracována a zvolené parametry procesu byly zobrazeny pomocí osobního počítače v grafické podobě.

V experimentální části bylo testováno zkoncentrování vodných roztoků glukózy, sacharózy, fruktózy a modelového roztoku. Modelový roztok obsahoval tři sacharidy v poměru, který odpovídá jablečnému moštu. Nakonec byl proveden pokus zkoncentrování reálného jablečného moštu. Jablečný mošt byl v první fázi podroben filtraci (přes kovovou síťkou s velikostí otvorů 0,5 mm) za účelem odstranění pevných nečistot. Jako tažné roztoky byly používány vodné roztoky NaCl a Na₂SO₄, většinou v jednorůchodovém režimu, ale ve některých případech také ve vsádkovém režimu (experimenty označené jako batch). Okruhy zpracovávané kapaliny a tažného roztoku byly do FO modulu zapojené protiproudě.

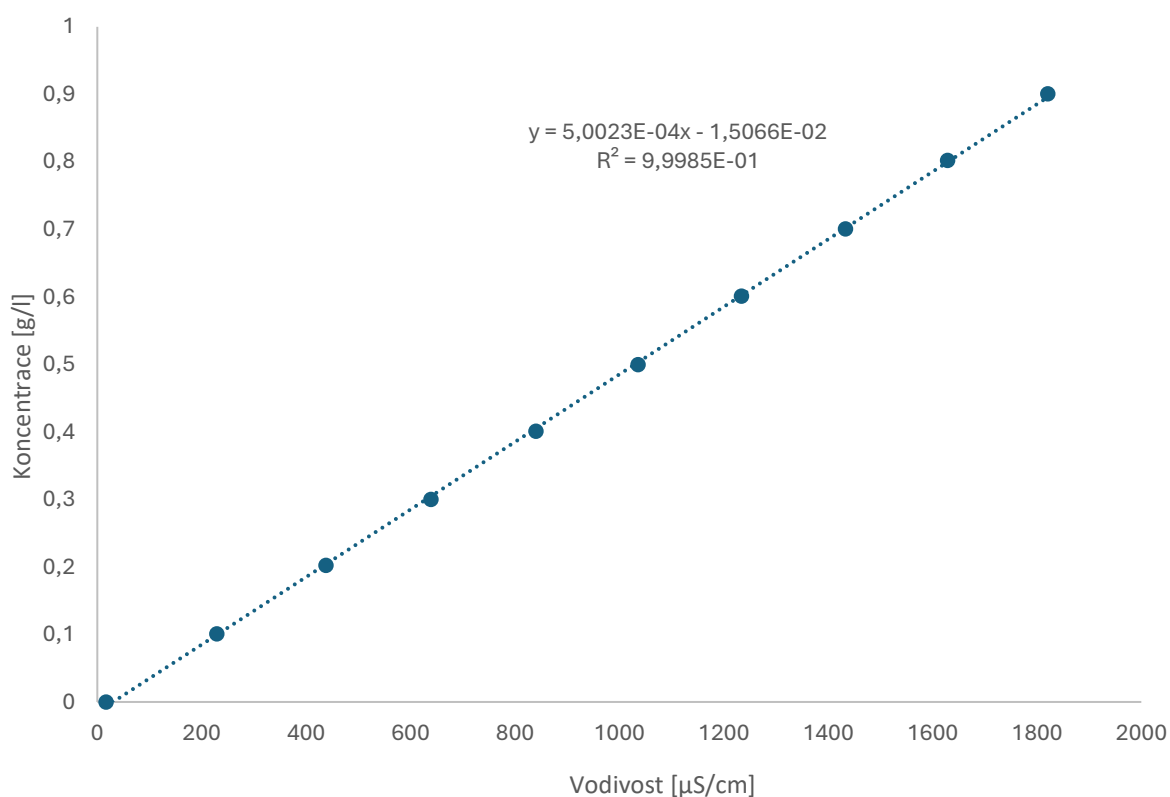
Tabulka 4: Shrnutí provedených experimentů se sacharidy

| Tažný roztok | Glukóza | Sacharóza | Fruktóza | Modelový roztok | Jablečný mošt |
|---|---------|-----------|----------|-----------------|---------------|
| NaCl 0,5 mol/l | ✓ | | | | |
| NaCl 1 mol/l | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |
| NaCl 1,5 mol/l | ✓ | | | | |
| NaCl 3 mol/l | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ |
| NaCl 1 mol/l batch | ✓ | | | | |
| NaCl 1,5 mol/l batch | ✓ | | | | |
| Na ₂ SO ₄ 1 mol/l | ✓ | ✓ | | ✓ | |

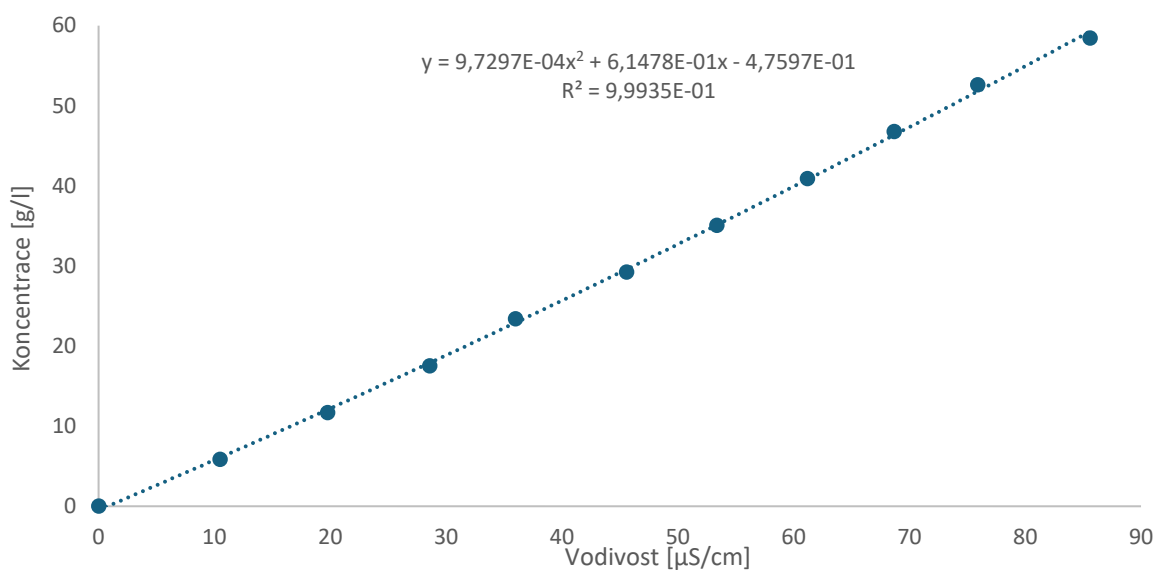
3 VÝSLEDKY A DISKUZE

3.1 Konduktometrie – Kalibrační roztoky solí

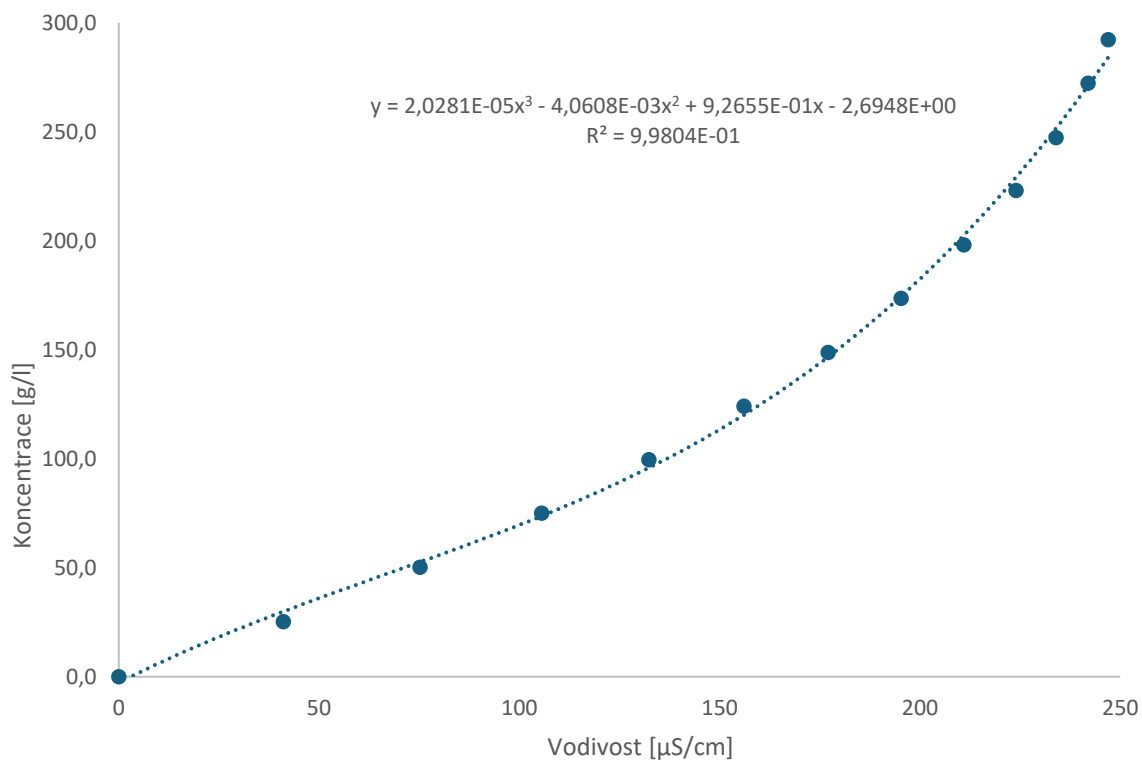
Sledování koncentrace solí v tažné kapalině a kontrola koncentrace připraveného tažného roztoku byly prováděny nepřímým způsobem použitím konduktometru. Hodnoty vodivosti byly přepočítávány na koncentrace pomocí vztahů získaných proložením závislosti naměřených hodnot vodivosti na koncentraci připravených kalibračních roztoků. Bylo předpokládáno, že se naměřené vodivosti tažných roztoků a zpracovávané kapaliny v průběhu experimentů budou významně lišit, a kvůli přesnějšímu přepočtu bylo uděláno více kalibračních křivek (pro různé rozsahy koncentrací) pro každou sůl. Pro NaCl byly změřeny kalibrační křivky pro nízké (0 až 0,02 mol/l), střední (0 až 1 mol/l) a vysoké koncentrace (0 až 5 mol/l). Pro Na₂SO₄ byly udělány kalibrační křivky pro nízké (0 až 0,02 mol/l) a vysoké koncentrace (0 až 1 mol/l). Průběh kalibračních křivek (jako závislost hmotnostní koncentrace na vodivosti) pro NaCl je znázorněn na Obrázcích 8 až 10.



Obrázek 8: Závislost koncentrace NaCl na vodivosti roztoku pro nízké koncentrace

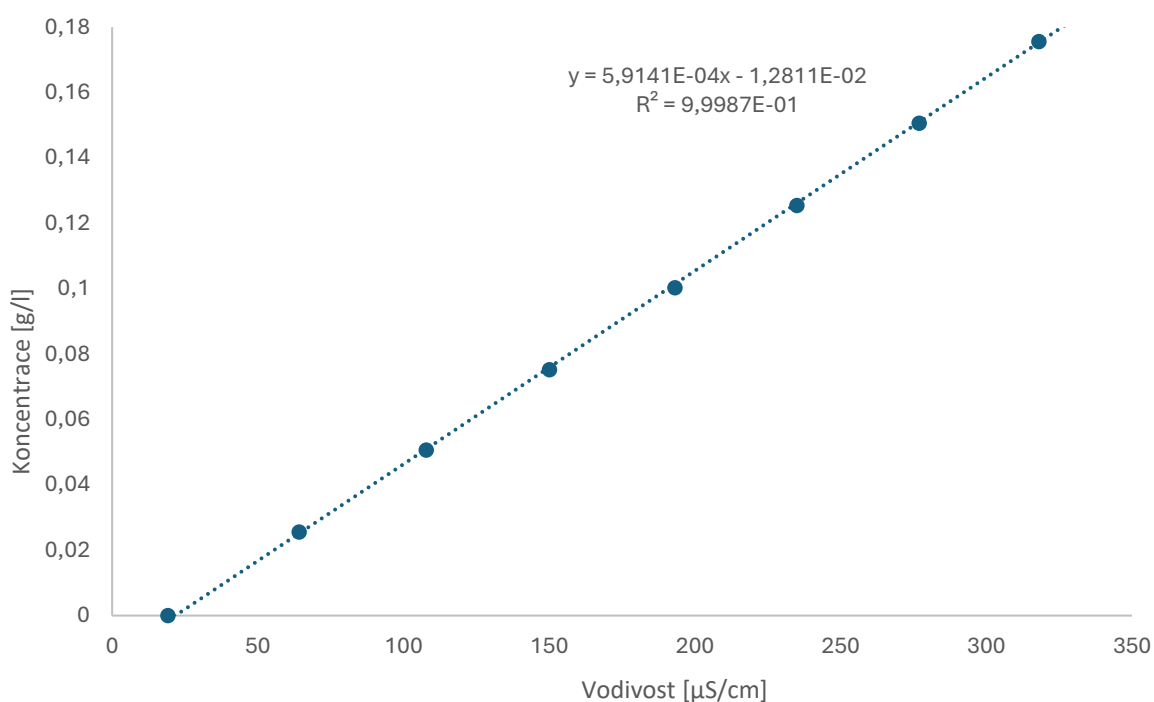


Obrázek 9: Závislost koncentrace NaCl na vodivosti roztoku pro střední koncentrace

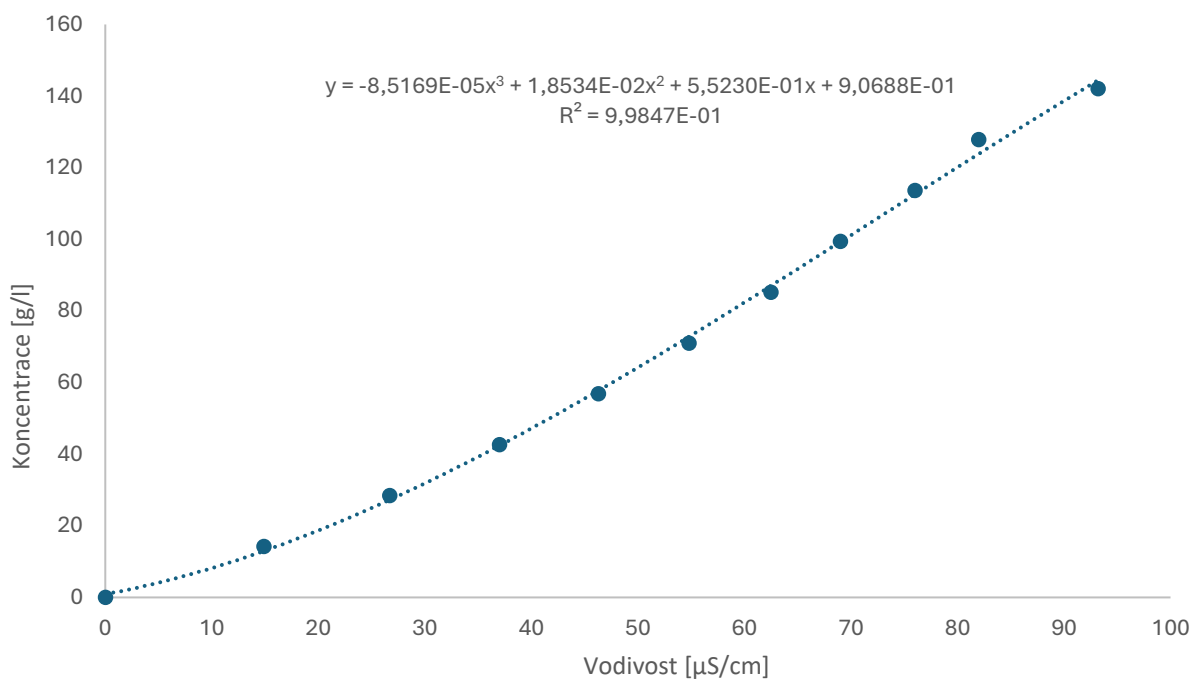


Obrázek 10: Závislost koncentrace NaCl na vodivosti roztoku pro vysoké koncentrace

Je patrné, že je závislost koncentrace NaCl na vodivosti v oblasti nízkých koncentrací lineární, a že se zvýšením koncentrace dochází k značnému odchýlení od lineární závislosti. Na Obrázku 8 byly naměřené hodnoty proloženy přímkou, vhodnost proložení přímkou dokládá dostatečně vysoká hodnota koeficientu spolehlivosti R^2 ($9,9985 \cdot 10^{-1}$). Na Obrázku 9 byly hodnoty proloženy polynomicou spojnicí trendu (druhého stupně) s hodnotou $R^2=9,9935 \cdot 10^{-1}$. Pro matematické vyjádření závislosti koncentrace na měřené vodivosti zobrazené na Obrázku 10 byl použit polynom třetího stupně, hodnota R^2 je $9,9804 \cdot 10^{-1}$. Průběh kalibračních křivek (jako závislost hmotnostní koncentrace na vodivosti) pro Na_2SO_4 je znázorněn na Obrázku 11 a Obrázku 12.



Obrázek 11: Závislost koncentrace Na_2SO_4 na vodivosti roztoku pro nízké koncentrace



Obrázek 12: Závislost koncentrace Na_2SO_4 na vodivosti roztoku pro vysoké koncentrace

Podobně roztokům NaCl , i v případě roztoku Na_2SO_4 je možné závislost vodivosti na koncentraci považovat za lineární pouze v rozsahu nižších koncentrací (stejný trend bude mít i reciproká závislost, tj. zobrazená závislost hmotnostní koncentrace na vodivosti). Na Obrázku 11 byly hodnoty proloženy přímkou, s hodnotou $R^2 = 9,9804 \cdot 10^{-1}$. Na Obrázku 12 byla závislost proložena křivkou popsanou polynomem třetího stupně, s hodnotou spolehlivosti $R^2 = 9,9847 \cdot 10^{-1}$.

Tabulka 5: Kalibrační roztoky soli – shrnutí výsledků

| Roztok | Rovnice popisující kal. řadu | R ² | Interval platnosti |
|--|---|------------------------|--------------------|
| NaCl-nízké koncentrace | $c = 5,0023 \cdot 10^{-4} \kappa - 1,5066 \cdot 10^{-2}$ | $9,9985 \cdot 10^{-1}$ | 0 až 0,02 mol/l |
| NaCl-střední koncentrace | $c = 9,7297 \cdot 10^{-4} \kappa^2 + 6,1478 \cdot 10^{-1} \kappa - 4,7597 \cdot 10^{-1}$ | $9,9935 \cdot 10^{-1}$ | 0,02 až 1 mol/l |
| NaCl-vysoké koncentrace | $c = 2,0281 \cdot 10^{-5} \kappa^3 - 4,0608 \cdot 10^{-3} \kappa^2 + 9,2655 \cdot 10^{-1} \kappa - 2,6948$ | $9,9804 \cdot 10^{-1}$ | 1 až 5 mol/l |
| Na₂SO₄-nízké koncentrace | $c = 5,9141 \cdot 10^{-4} \kappa - 1,2811 \cdot 10^{-2}$ | $9,9987 \cdot 10^{-1}$ | 0 až 0,02 mol/l |
| Na₂SO₄-vysoké koncentrace | $c = -8,5169 \cdot 10^{-5} \kappa^3 + 1,8534 \cdot 10^{-2} \kappa^2 + 5,5230 \cdot 10^{-4} \kappa + 9,0688 \cdot 10^{-1}$ | $9,9847 \cdot 10^{-1}$ | 0,02 až 1 mol/l |

V Tabulce 5 jsou pro jednotlivé soli shrnuty rovnice popisující kalibrační závislosti, odpovídající hodnota R² a interval platnosti dané rovnice.

3.2 Solné testy

Cílem provádění standardních solných testů, tj. prováděných za shodných standardizovaných podmínek (30 minut, protiproudé zapojení, 0,5 mol/l NaCl), bylo získání výkonnostních parametrů FO membrány za stále stejných podmínek. Toto umožnilo kontinuální sledování stavu membrány a včasné zachycení eventuálního poškození membrány. Výjimkou byly solné testy s 0,5 mol/l Na₂SO₄ a 1 mol/l NaCl, jejichž cílem bylo hodnocení možnosti použití roztoků Na₂SO₄ a roztoků s vyššími koncentracemi NaCl jako tažných roztoků. Případně test se souproudým uspořádání, který měl posoudit vliv zapojení obou proudů v modulu. Délka všech solných testů byla vždy 30 minut.

Vyhodnocovány byly základní parametry, jejichž definice je uvedena v teoretické části v odstavci 1.4. Jednalo se o tyto parametry: intenzita objemového toku membránou, intenzita zpětného toku soli, specifická intenzita zpětného toku soli. Pro určování koncentrace NaCl byla využita rovnice pro NaCl a-nízké koncentrace z Tabulky 5.

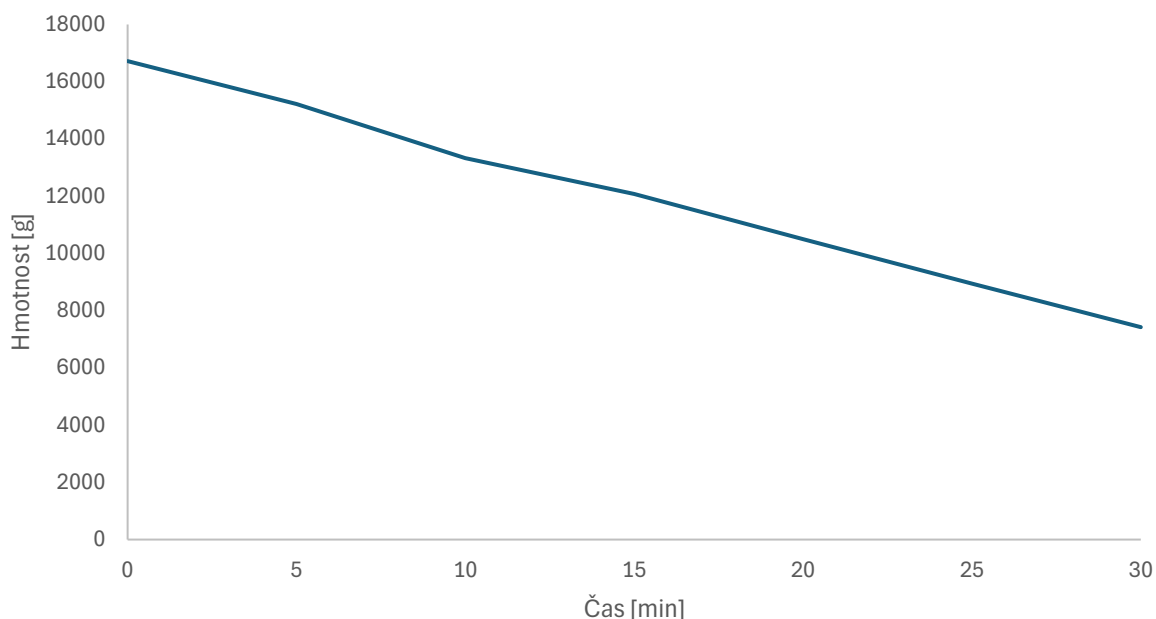
3.2.1 NaCl – test 1

V NaCl – testu 1 bylo do zásobníku zpracovávané kapaliny předloženo 16606 g demineralizované vody. Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl o koncentraci 0,5 mol/l (29,22 g/l), v množství (12,5 l) dostatečném pro provedení testu o délce 30 minut při průtoku 25 l/h (tažného roztoku). Membránový modul byl provozován v protiproudém zapojení. Zpracovávaná kapalina byla recirkulovaná mezi nádrží a membránovým modulem – vsádkový režim (batch). Tažný roztok byl vypouštěn do odpadu po průchodu zařízením (jednoprůchodový kontinuální režim). Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů, osmotického tlaku tažného roztoku, koncentrace NaCl ve zpracovávaném roztoku na konci experimentu (v zásobní nádrži) a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 6.

Tabulka 6: Vyhodnocení NaCl – testu 1

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 16606 | 7112 | 9494 |
| Objem suroviny [ml] | 16639 | 7126 | 9513 |
| Teplota [K] | | 294 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2261,1 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,1435 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,272 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,859 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,1039 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase je znázorněn na Obrázku Obrázek 13.



Obrázek 13: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 1

Při použití roztoku NaCl koncentrace 0,5 mol/l jako tažného roztoku, při průtoku 25 l/h, bylo za čas 30 minut přes FO membránu převedeno 9494 g vody (9513 ml). Lze konstatovat, že objemový tok membránou, odpovídající úbytku hmotnosti zpracovávané kapaliny, byl konstantní, bez významnějších výkyvů. Výsledná koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině, díky zpětnému toku soli, byla 0,1435 g/l. Během tohoto experimentu lze zanedbat vzrůstající osmotický tlak na straně zpracovávané kapaliny (koncentrace NaCl v něm byla na konci experimentu nízká) a tak se neměnila hnací síla procesu, průtok rozpouštědla skrz membránu byl konstantní. To zapříčinilo lineární pokles hmotnosti zpracovávaného roztoku s časem experimentu, a tedy konstantní intenzitu objemového toku rozpouštědla. Intenzita objemového toku membránou J_V byla 8,272 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla při tomto experimentu 0,859 g/m²h, z čehož byla vypočítána hodnota specifické intenzity zpětného toku soli $J_{S/V}$ na hodnotu 0,1039 g/l.

3.2.2 NaCl – test 2

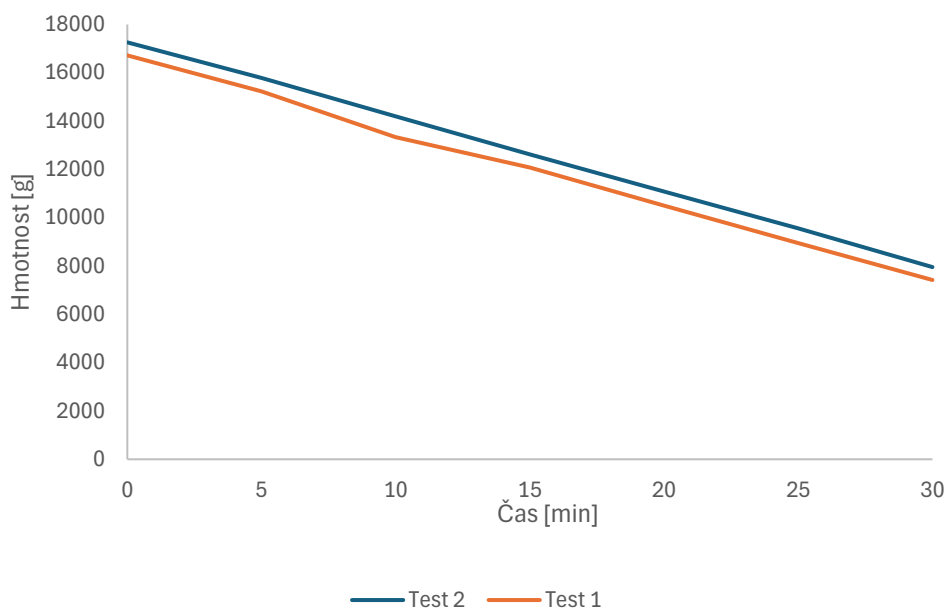
V NaCl – testu 2 byly podobné podmínky předchozímu experimentu (17119,5 g demineralizované vody; 0,5 mol/l NaCl jako tažný roztok). Nejedná se o standardní solný test, protože membránový modul byl provozován v souprůdém zapojení. Opět byla recirkulována zpracovávaná kapalina (vsádkový režim) a proud s tažným roztokem byl v jednorůchodovém režimu. Experiment byl prováděn na membráně ve stejné době jako test 1. Přehled hmotností a objemů zpracovávané kapaliny na začátku a na konci experimentu, osmotického tlaku tažného

roztoku, koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na konci experimentu, a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 7.

Tabulka 7: Vyhodnocení NaCl – testu 2

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 17119,5 | 7822,6 | 9296,9 |
| Objem suroviny [ml] | 17154,2 | 7838,4 | 9315,8 |
| Teplota [K] | | 294 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2261,1 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,1242 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,100 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,8465 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,1045 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase a porovnání s experimentem NaCl-test 1 je znázorněn na Obrázku 14.



Obrázek 14: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 2) a porovnání s testem 1

Během testu 2 bylo přes FO membránu převedeno 9296,9 g vody (9315,8 ml). Lze konstatovat, že objemový tok membránou v čase byl opět konstantní, bez významnějších výkyvů. Výsledná koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině, díky zpětnému toku soli, byla 0,1242 g/l.

Intenzita objemového toku membránou J_V byla 8,100 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 0,8465 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla vypočítaná na 0,1045 g/l. Vliv souproutého zapojení obou proudů v modulu se výrazně neprojevil, jak je vidět z porovnání zobrazeného na Obrázku 14. Na intenzitu toku soli zapojení obou proudů také vliv nemělo.

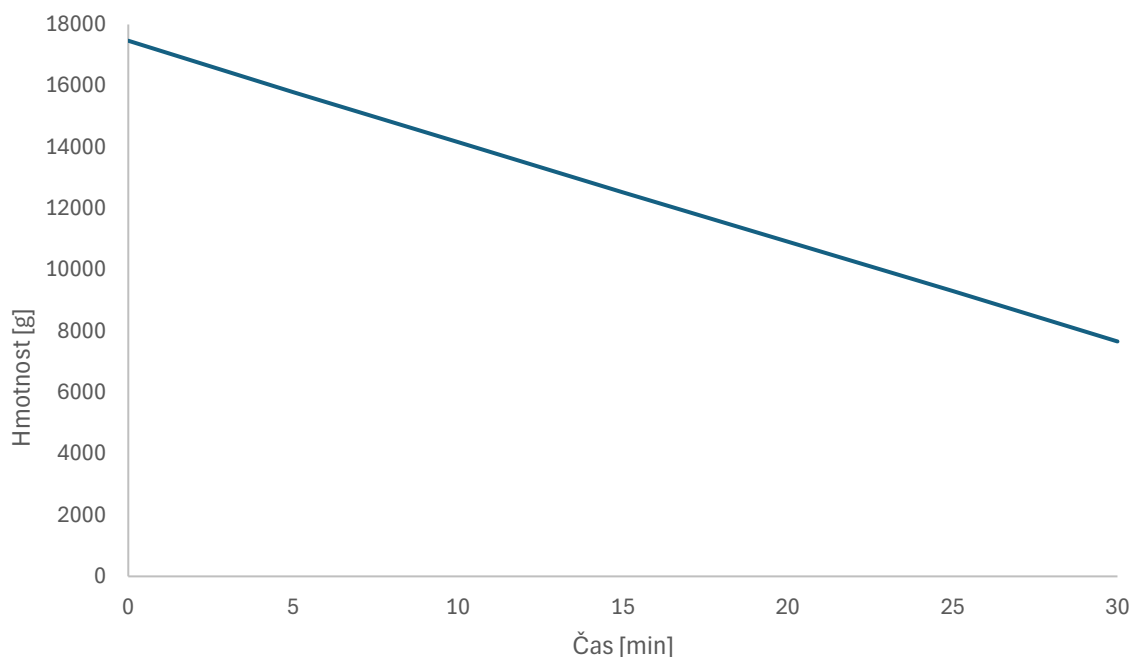
3.2.3 NaCl – test 3

Tento experiment byl zaměřen na vyhodnocení stavu membrány po předchozích experimentech o zahuštění roztoků glukózy pomocí tažných roztoků, kterými byly roztoky NaCl o koncentraci 0,5 až 1,5 mol/l. Bylo použito 17343,6 g zpracovávané kapaliny (demineralizovaná vody; vsádkově), NaCl 0,5 mol/l (jednoprůchodové uspořádání) a zapojení obou proudů roztoků bylo protiproudé. Důležité údaje a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 8. Uvedená koncentrace NaCl odpovídá koncentraci ve zpracovávané kapalině na konci experimentu v zásobní nádrži.

Tabulka 8: Vyhodnocení NaCl – testu 3

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 17343,6 | 7546,2 | 9797,4 |
| Objem suroviny [ml] | 17382,5 | 7563,1 | 9820,4 |
| Teplota [K] | | 295 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2268,8 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,1270 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,538 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,8354 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,0978 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase je znázorněn na Obrázku 15.



Obrázek 15: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 3

Zjištěné závislosti odpovídaly výsledkům testu 1, což umožnilo používat membránu bez nutnosti čištění pro další experimenty, jelikož nedošlo k jejímu zanešení, případně zničení.

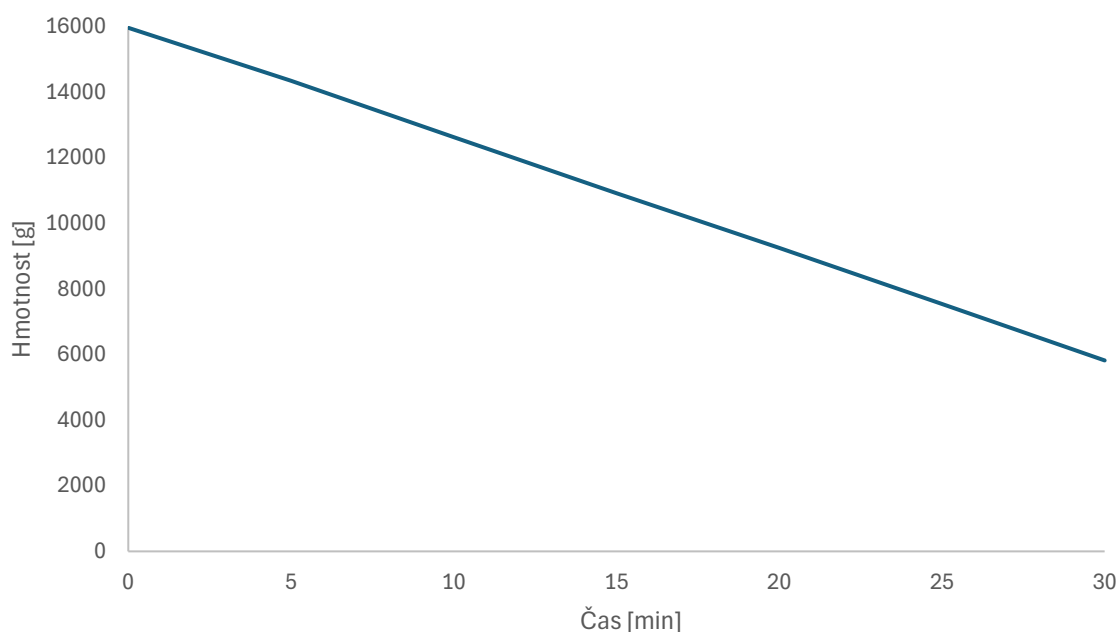
3.2.4 NaCl – test 4

Cílem testu bylo vyhodnocení stavu membrány po předchozím experimentu, kdy byl pro glukózu používán nejvíce koncentrovaný tažný roztok NaCl (3,0 mol/l). Důležité údaje a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 9.

Tabulka 9: Vyhodnocení NaCl – testu 4

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|---------|
| Hmotnost suroviny [g] | 15822,7 | 5678,4 | 10144,3 |
| Objem suroviny [ml] | 15865,5 | 5693,8 | 10171,7 |
| Teplota [K] | | 295 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2268,8 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,1554 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,845 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,7695 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,0869 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase je znázorněn na Obrázku 16.



Obrázek 16: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 4

Průběh a hodnoty zjištěných parametrů se nelišily od původních hodnot a membránu nebylo nutné čistit.

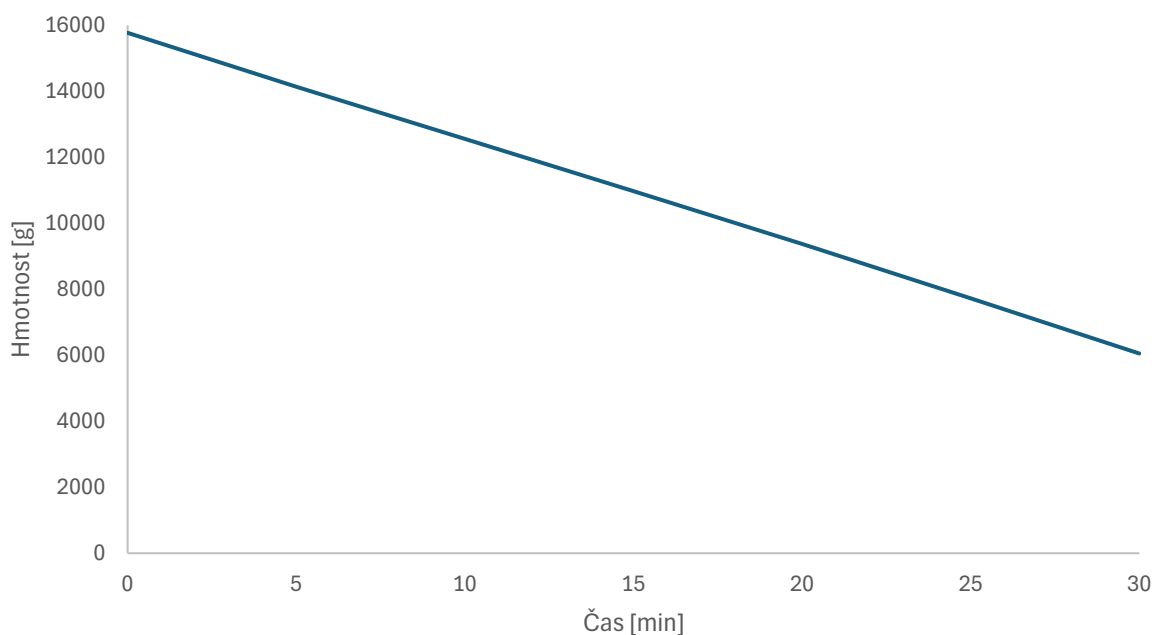
3.2.5 NaCl – test 5

NaCl – test 5 byl proveden s účelem vyhodnocení stavu membrány po experimentu Glukóza – 1M Na₂SO₄ (tento experiment byl posledním, ve kterém byl zahušťován roztok glukózy). Důležité údaje a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 10.

Tabulka 10: Vyhodnocení NaCl – testu 5

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 15657,2 | 5925,1 | 9732,1 |
| Objem suroviny [ml] | 15699,6 | 5941,1 | 9758,5 |
| Teplota [K] | | 297 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2284,2 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,1290 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,485 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,6665 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,0785 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase je znázorněn na Obrázku 17.



Obrázek 17: Závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 5

Opět ani po použití všech testovaných tažných roztoků pro glukózu nedošlo k zanešení membrány a stav membrány byl odpovídající počátečnímu.

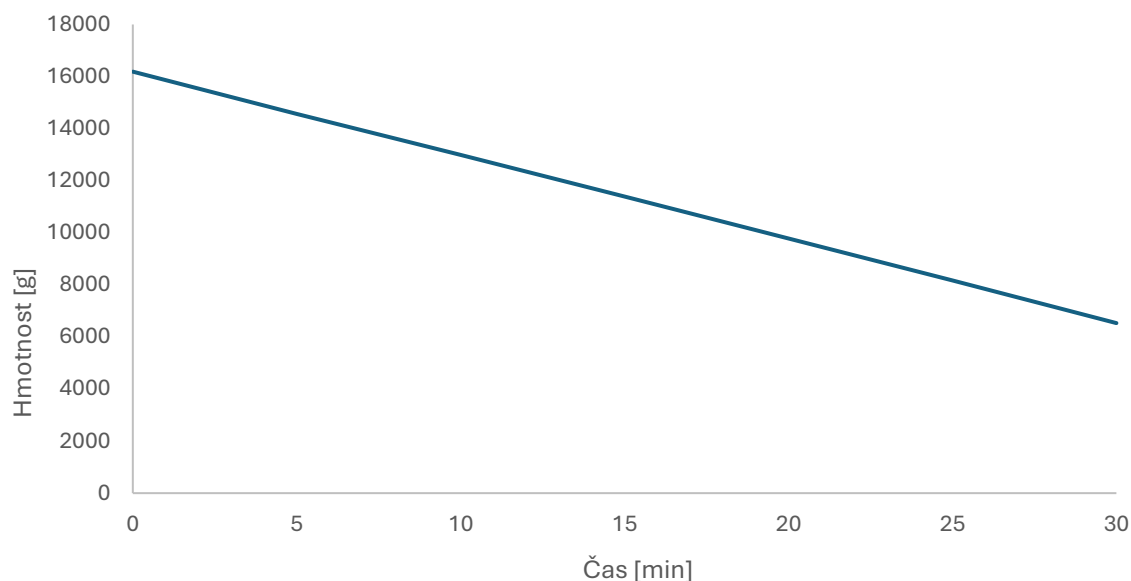
3.2.6 NaCl – test 6

Tento test následoval po experimentech, ve kterým byly zahušťovány roztoky sacharózy. Důležité údaje a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 11.

Tabulka 11: Vyhodnocení NaCl – testu 6

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 16081,2 | 6406,5 | 9674,7 |
| Objem suroviny [ml] | 16124,7 | 6423,8 | 9700,9 |
| Teplota [K] | | 298 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2291,9 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,1305 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,435 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,7289 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,0864 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase je znázorněn na Obrázku 18.



Obrázek 18: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 6

Jako u experimentů s glukózou ani experimenty se sacharózou nezpůsobily zanešení membrány a zjištěné parametry solného testu odpovídají původním hodnotám.

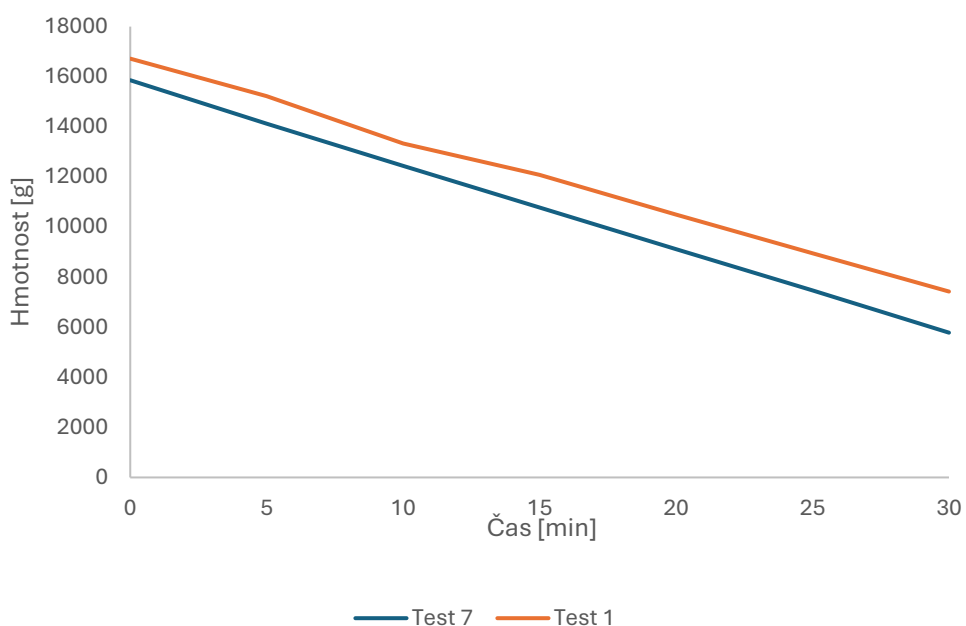
3.2.7 NaCl – test 7

NaCl – test 7 byl udělán po experimentech, ve kterých byly zahušťován roztok fruktózy a modelové roztoky. Cílem tohoto test bylo vyhodnocení stavu membrány před provedení experimentu s jablečným moštem. Důležité údaje a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 12.

Tabulka 12: Vyhodnocení NaCl – testu 7

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|---------|
| Hmotnost suroviny [g] | 15741,0 | 5614,4 | 10126,6 |
| Objem suroviny [ml] | 15783,6 | 5629,6 | 10154,0 |
| Teplota [K] | | 297 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2284,2 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,1379 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,829 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,6754 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,0765 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase a porovnání s experimentem NaCl-test 1 je znázorněn na Obrázku 19.



Obrázek 19: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 7) a porovnání s testem 1

Jak je vidět z porovnání zobrazenému na Obrázku 19, průběh závislosti hmotnosti se oproti původní závislosti (test 1) výrazně nezměnil (směrnice obou přímek vyjadřující intenzitu objemového toku membránou je přibližně stejná a křivky se odlišují pouze množstvím kapaliny na začátku testu). To potvrzuje minimální vliv samotných sacharidů, případně různých tažných roztoků na membránu.

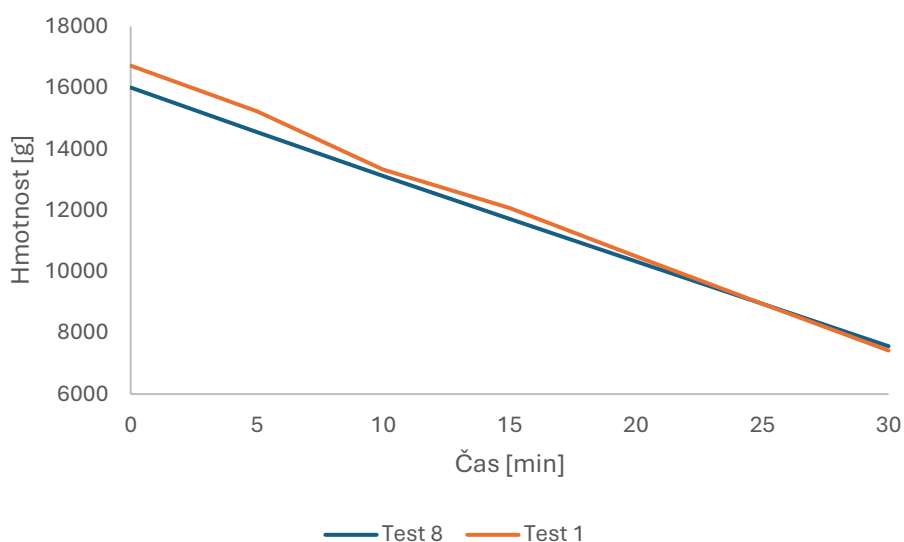
3.2.8 NaCl – test 8

Cílem tohoto testu bylo vyhodnocení stavu membrány (zanášení) po závěrečném experimentu s jablečným moštem. Důležité údaje a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 13.

Tabulka 13: Vyhodnocení NaCl – testu 8

| | začátek | konec | rozdíl |
|--------------------------------|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 15886,3 | 7428,2 | 8458,1 |
| Objem suroviny [ml] | 15933,3 | 7450,2 | 8483,1 |
| Teplota [K] | | 298 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2291,9 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,0835 | |
| $J_{V,p}$ [l/m ² h] | | 7,377 | |
| J_s [g/m ² h] | | 0,5413 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,0734 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase a porovnání s experimentem NaCl-test 1 je znázorněn na Obrázku 20.



Obrázek 20: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 8) a porovnání s testem 1

Vliv zanášení membrány se projevil snížením rychlosti úbytku hmotnosti, jak je vidět z porovnání zobrazeného na Obrázku 20. Z čeho také vyplynul pokles vypočítané hodnoty intenzity objemového toku vody membránou.

3.2.9 NaCl – test 9

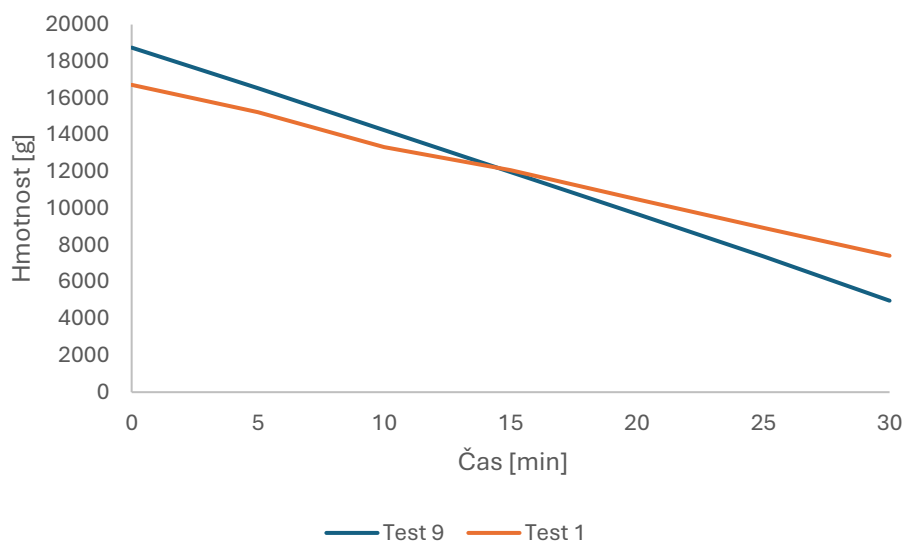
V NaCl – testu 9 do zásobníku zpracovávané kapaliny bylo umístěno 18593,8 g demineralizované vody. Oproti standardnímu testu byl jako tažný roztok použit roztok NaCl o

koncentraci 1,0 mol/l (58,44 g/l). Ostatní parametry byly stejné jako u standardního testu. Důležité údaje a vypočítané hodnoty jsou shrnuty v Tabulce 14.

Tabulka 14: Vyhodnocení NaCl – testu 9

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|---------|
| Hmotnost suroviny [g] | 18593,8 | 4917,0 | 13676,8 |
| Objem suroviny [ml] | 18631,4 | 4926,9 | 13704,5 |
| Teplota [K] | | 294 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4599,4 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,2678 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 11,917 | |
| J_s [g/m²h] | | 1,1475 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,0963 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase a porovnání s experimentem NaCl-test 1 je znázorněn na Obrázku 21.



Obrázek 21: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase (test 9) a porovnání s testem 1

Při použití roztoku NaCl koncentrace 1,0 mol/l jako tažného roztoku bylo za čas 30 minut přes FO membránu převedeno 13676,8 g vody (13704,5 ml). Je patrné (Obrázek 21), že během tohoto testu, tok vody membránou byl mnohem intenzivnější než v předchozích testech, což je důsledkem vyššího osmotického tlaku tažného roztoku (koncentrace 1,0 mol/l oproti 0,5 mol/l).

Lze konstatovat, že objemový tok membránou byl konstantní, bez významnějších výkyvů. Výsledná koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině byla 0,2678 g/l. Intenzita objemového toku membránou J_V byla 11,917 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 1,1475 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla 0,0963 g/l. Je patrné, že díky vyšší koncentraci soli v tažném roztoku byl obdržen vyšší (v porovnání s některými testy i přibližně dvojnásobně) zpětný tok soli oproti předchozím experimentům. Toto je způsobeno zejména difuzí soli skrz membránu, pro kterou je hnací silou koncentrační gradient, který byl v tomto experimentu přibližně dvojnásobný.

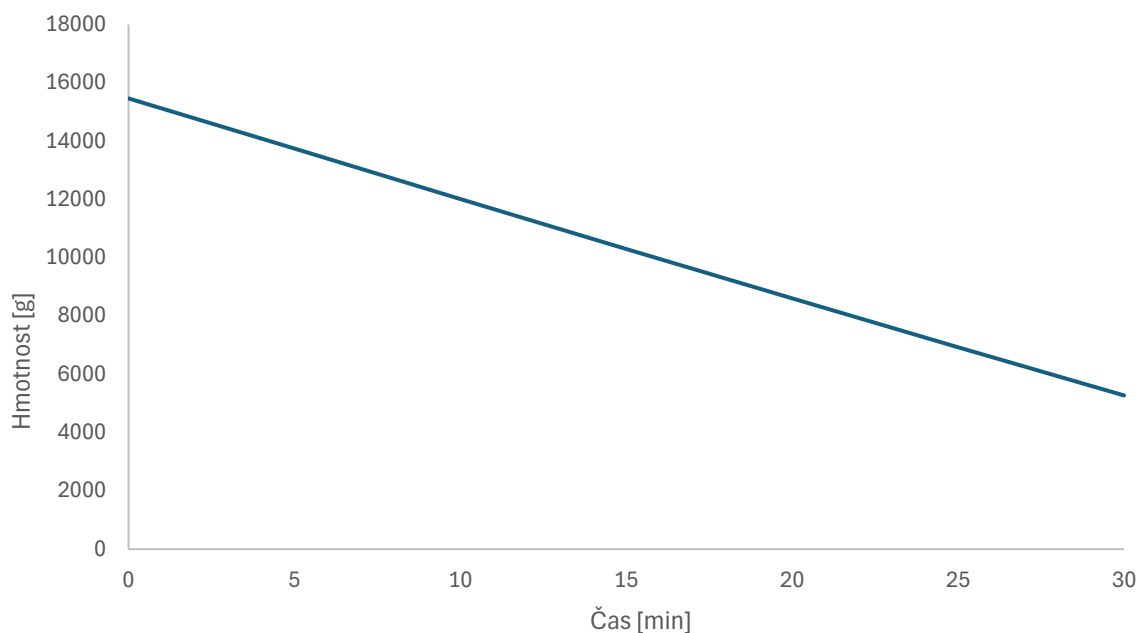
3.2.10 Na₂SO₄ – test 10

V Na₂SO₄ – testu 10 do zásobníku zpracovávané kapaliny bylo vloženo 15463,5 g demineralizované vody. Do nádrže tažného roztoku byl nalit roztok Na₂SO₄ (koncentrace 0,5 mol/l). Ostatní parametry byly stejné jako u předešlých solných testů. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů, osmotického tlaku tažného roztoku, koncentrace Na₂SO₄ ve zpracovávaném roztoku na konci experimentu a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 15.

Tabulka 15: Vyhodnocení Na₂SO₄ – testu 10

| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|---------|
| Hmotnost suroviny [g] | 15463,5 | 5066,1 | 10397,4 |
| Objem suroviny [ml] | 15494,8 | 5076,3 | 10418,5 |
| Teplota [K] | | 294 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2524,8 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,0261 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 9,059 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,1153 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,0127 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase je znázorněn na Obrázku 22.



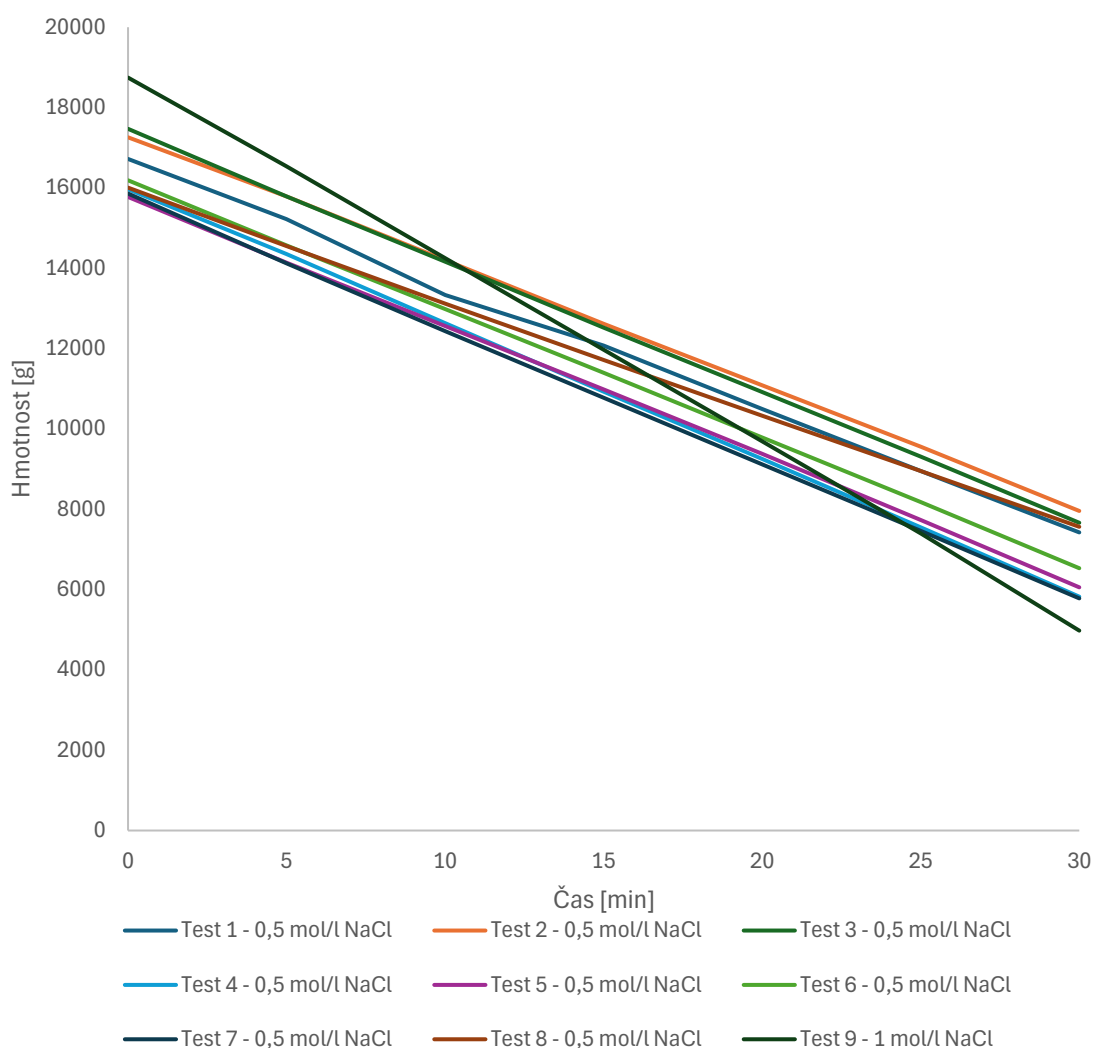
Obrázek 22: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase – test 10

Při použití roztoku Na_2SO_4 o koncentraci 0,5 mol/l jako tažného roztoku bylo přes FO membránu převedeno 10296,5 g vody (10168 ml). Lze konstatovat, že objemový tok membránou byl konstantní. Výsledná koncentrace Na_2SO_4 ve zpracovávané kapalině, díky zpětnému toku soli, byla 0,0261 g/l. Intenzita objemového toku membránou J_V byla 8,842 l/m²h, intenzita zpětného toku solí J_S byla 0,1153 g/m²h, z čehož se získala hodnota specifické intenzity zpětného toku solí $J_{S/V}$ 0,0130 g/l. Oproti experimentům s NaCl byla hodnota zpětného toku soli výrazně nižší, což má souvislost s elektrostatickým odpuzováním dvojmocných aniontů záporně nabitou membránou.

3.3 Porovnání solných testů

Z naměřených výsledků vyplývá, že objemový tok membránou během všech experimentů byl prakticky konstantní. Tažný roztok byl v jednorůchodovém zapojení s průtokem 25 l/h. Jelikož zpracovávaná kapalina byla demineralizovaná voda (průtok 60 l/h), nedocházelo ke zvyšování osmotického tlaku díky zkoncentrování roztoku a vliv zpětného toku soli nebyl také významný. Z tohoto důvodu byla i tažná síla konstantní (rozdíl osmotických tlaků tažného roztoku a zpracovávané kapaliny), důsledkem byla konstantní rychlost převodu vody přes membránu. Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase, v testech 1 až 9 (pro NaCl jako tažný roztok) je znázorněn na Obrázku 23. Z porovnání výsledků (Obrázek 24) je

patrné, že tok vody membránou byl intenzivnější v testu 9, v tomto případě měl tažný roztok vyšší osmoticky tlak (1 mol/l NaCl).



Obrázek 23: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny na čase, v testech 1–9

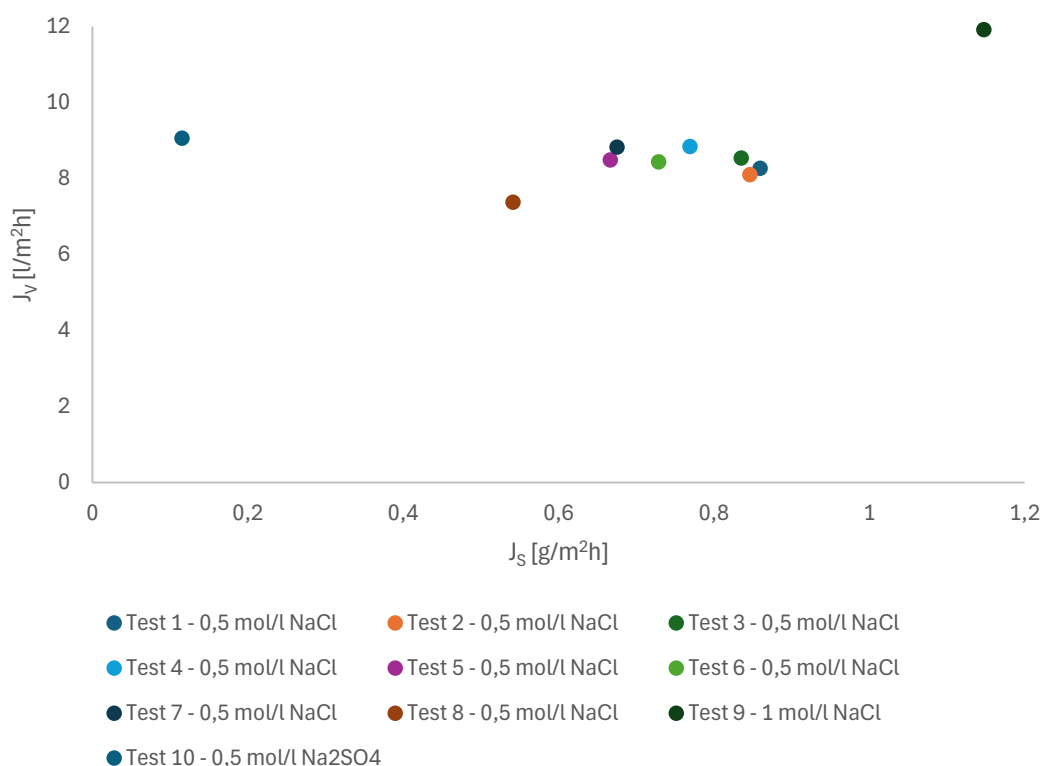
Hlavní výkonnostní parametry FO modulu (J_V , J_S , $J_{S/V}$) byly vypočítány na základě naměřených hodnot hmotností a vodivosti v zásobní nádrži.

V případě standardních solných testů (zařazujeme mezi ně i test 2, který není typicky standardní solný test, jelikož bylo použito souprůdé uspořádání) byla nejnižší intenzita objemového toku membránou (J_V) vypočítaná pro test 8 (7,38 l/m²h), což je podstatně méně než u testu s druhou nejnižší hodnotou J_V (test 2). Nejvyšší hodnota tohoto parametru byla u testu číslo 4 (8,84

l/m²h). U solného testu 9 (1 mol/l NaCl) byl parametr J_V 11,92 l/m²h. Pro test 10 (0,5 mol/l Na₂SO₄) byla získána intenzita toku rozpouštědla 9,06 l/m²h.

Intenzita zpětného toku soli J_S se pohybovala mezi 0,54 g/m²h (test 8) a 0,86 g/m²h (test 1), pro standardní solné testy. U solného testu 9 (1 mol/l NaCl) byl získán parametr J_S s hodnotou 1,15 g/m²h, výrazně nejnižší hodnota byla u testu 10 (0,5M Na₂SO₄), kdy byla získaná hodnota 0,12 g/m²h.

Ze získaných dat vyplývá že specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla pro standardní solné testy v rozmezí 0,073 g/l (test 8) až 0,104 g/l (test 2). U solného testu 9 (1 mol/l NaCl) byla získána hodnota $J_{S/V}$ 0,096 g/l a pro test 10 (0,5 mol/l Na₂SO₄) byla získána hodnota 0,013 g/l. Porovnání hodnot parametrů J_V a J_S v testech 1 až 10 je znázorněno na Obrázku 24.



Obrázek 24: Porovnání hodnot J_S a J_V v testech 1–10

Z grafu je patrná odlišnost obou speciálních experimentů s vyšší koncentrací soli v tažném roztoku (test 9) a testu s dvojmocnou solí (test 10). Od ostatních testů se dále odlišuje test 8, který byl změřen až po experimentu s jablečným moštem, který jak je vidět výrazně ovlivnil membránu (zanášení membrány). To vedlo ke snížení intenzity objemového toku, ale naopak se snížila koncentrace soli ve zpracovávané kapalině na konci experimentu, tj. zvýšila se selektivita membrány.

Z provedených standardních solných testů lze hodnotit stav FO modulu jako vyhovující až do experimentu s jablečným moštem. Výrobce uvádí, že je hodnota parametru (J_V) pro tento typ modulu $11 \pm 1,5$ l/m²h, a že je nutné provést proceduru chemického čištění (CIP), pokud je tato hodnota alespoň o 20 % nižší než hodnota daného nového modulu. Použitý modul vykazoval už na počátku (test 1) tuto hodnotu při dolní hranici akceptovatelných parametrů. Toto lze vysvětlit skutečností, že modul byl předem intenzivně používán společností Aquaporin A/S pro vykonání jiných zkouškových experimentů, a skutečností, že se nikdy nepodařilo odstranit všechny bubliny z modulu, což způsobilo zmenšení aktivní plochy membrány. Nepřípustně nízká hodnota J_V v testu 8 byla způsobena zanášením membrány během experimentu s jablečným moštem. Selektivita membrány (proti zpětnému toku soli) a hodnoty specifické intenzity zpětného toku soli v testech byly značně pod výrobcem deklarovanou hodnotou ($0,15 \pm 0,05$ g/l). Solné testy 9 (1 mol/l NaCl) a 10 (0,5 mol/l Na₂SO₄) byly provedeny s účelem hodnocení možnosti použití tažného roztoku vyšší koncentrace anebo roztoku dvojmocné soli a jejich vliv na výkonnostní parametry. Výsledky ukázaly, že vyšší hnací síla (vyšší koncentrace tažného roztoku) se projevuje ve zvýšení intenzity toku rozpouštědla, tj. parametru J_V . Při použití 1 mol/l NaCl došlo k zvýšení zpětného toku soli (díky vyšší hnací síle pro difuzní tok soli), ale výsledný poměr $J_{S/V}$ byl jen nepatrně větší než v testech s 0,5 mol/l NaCl. Při použití 0,5 mol/l Na₂SO₄ se ukázalo, jak bylo předpokládáno, že je migrace dvojmocných iontů přes membránu z tažného roztoku do zpracovávané kapaliny podstatně nižší než jednomocných iontů. Tímto testem bylo ukázáno, že volbou Na₂SO₄ lze dosáhnout snížení výsledné koncentrace soli ve zpracovávané kapalině, což může být velmi důležité zejména v potravinářství.

3.4 Zahušťování roztoků jednotlivých sacharidů

Postupně byly zahušťovány roztoky glukózy, fruktózy, sacharózy v binární směsi, tj. vždy pouze jeden sacharid ve zpracovávané kapalině. Cílem těchto experimentů bylo zjistit provozní parametry procesů při použití různých tažných roztoků (koncentrace a typ soli), porovnání vsádkového a jednorůchodového uspořádání toku tažného roztoku a porovnání výsledků experimentů pro různé sacharidy.

3.4.1 Glukóza – 0,5M NaCl

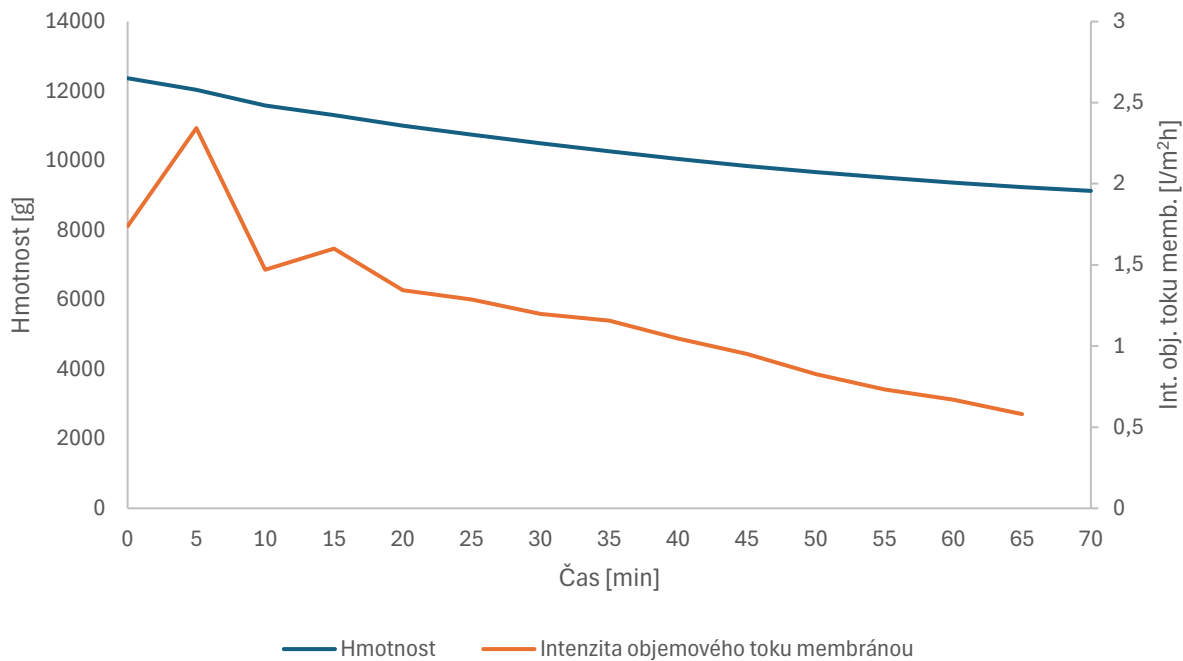
V experimentu Glukóza – 0,5M NaCl bylo do zásobníku zpracovávané kapaliny vloženo 12368,5 g vodného roztoku glukózy s hmotnostním zlomkem $\omega=10$ %. Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl, koncentrace 0,5 mol/l, jehož průtok byl nastaven na 25 l/h.

FO modul (v protiproudém zapojení) byl s ohledem na zpracovávanou kapalinu provozován ve vsádkovém režimu. Tažný roztok byl vypouštěn ze zařízení po průchodu modulem (jednoprůchodový kontinuální režim). Celková doba experimentu byla 70 minut. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů, koncentrace NaCl v zásobní nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 16.

Tabulka 16: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 0,5M NaCl

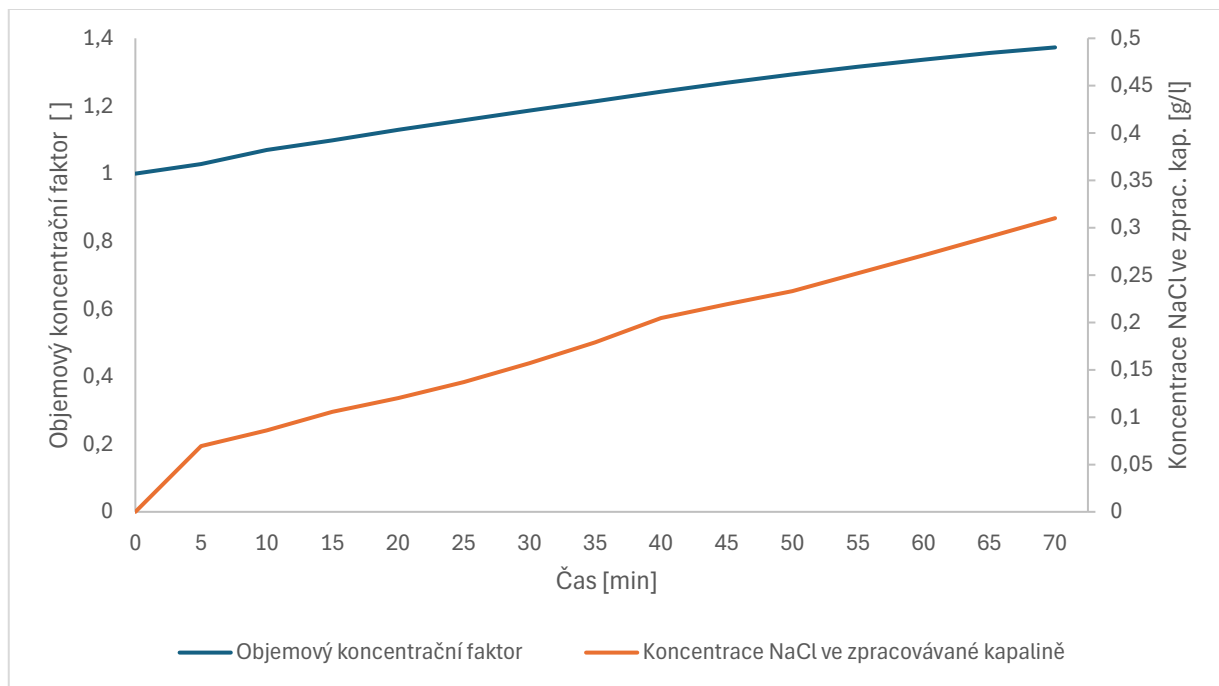
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 12368,5 | 9129,0 | 3239,5 |
| Objem suroviny [ml] | 11922,3 | 8681,9 | 3240,4 |
| Teplota [K] | | 295 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 2268,8 | |
| R [%] | | 27,18 | |
| VCF [] | | 1,37 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,274 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 1,210 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,885 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,731 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu je znázorněn na Obrázku 25.



Obrázek 25: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 0,5M NaCl

Průběh závislosti koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněn na Obrázku 26.



Obrázek 26: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 0,5M NaCl

Při použití roztoku NaCl (koncentrace 0,5 mol/l) jako tažného roztoku bylo za čas 70 minut přes FO membránu převedeno 3239,5 g vody (3240,4 ml). Intenzita objemového toku membránou (J_V) byla nejintenzivnější na začátku experimentu, potom následoval postupný pokles těchto hodnot, jak je zobrazeno na Obrázku 25. Důvodem je, že během experimentu docházelo ke zkoncentrování roztoku glukózy, a následnému snížení tažné síly. Mezi pátou a desátou minutou došlo k dočasnému zvýšení J_V , z důvodu stabilizace proudění a odstranění bublin z modulu. Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině (výtok z modulu) na čase (díky zpětnému toku soli) zobrazeném na Obrázku 26, je možné považovat za lineární. Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,274 g/l. Maximální dosažený objemový koncentrační faktor byl 1,37. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 1,210 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 0,885 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ měla hodnotu 0,731 g/l.

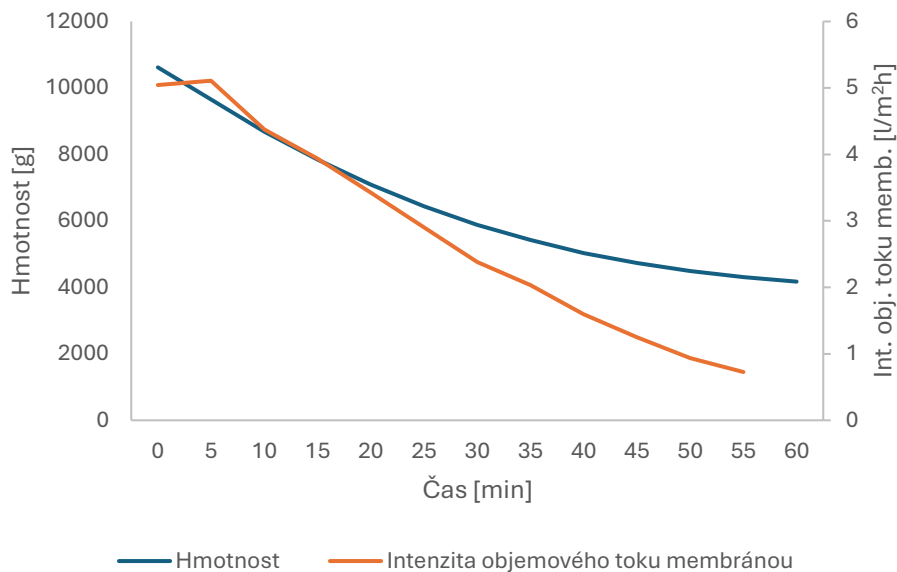
3.4.2 Glukóza – 1M NaCl

V experimentu Glukóza – 1M NaCl bylo do zásobníku zpracovávané kapaliny umístěno 10619,4 g vodného roztoku glukózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl (koncentrace 1,0 mol/l). Celková doba experimentu byla 60 minut. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 17.

Tabulka 17: Výhodnocení experimentu Glukóza – 1M NaCl

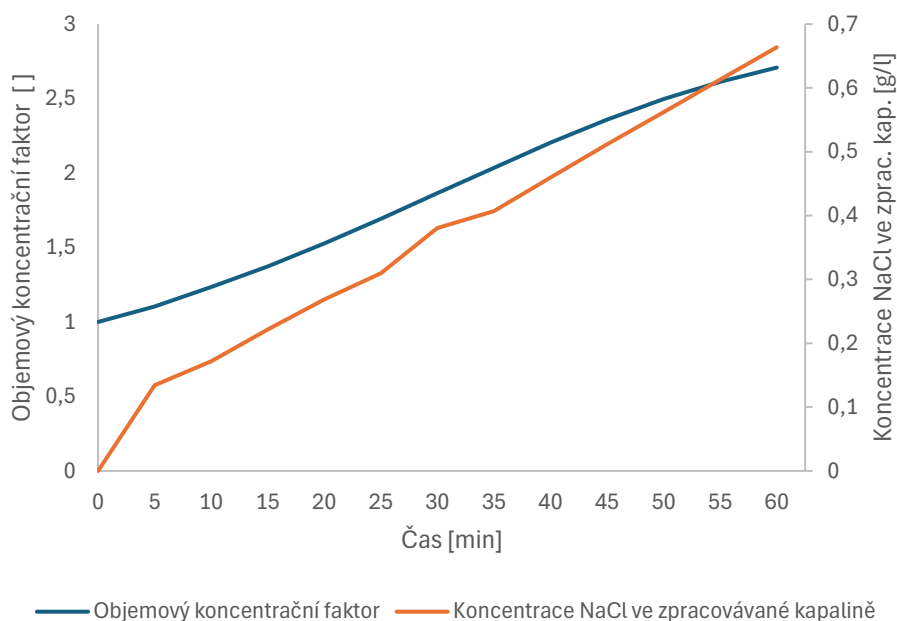
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost [g] | 10619,4 | 4172,1 | 6447,3 |
| Objem [ml] | 10236,3 | 3780,2 | 6456,1 |
| Teplota [K] | | 295 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4615,0 | |
| R [%] | | 63,07 | |
| VCF [] | | 2,71 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,615 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 2,809 | |
| J_s [g/m²h] | | 1,010 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,360 | |

Průběh závislosti hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněn na Obrázku 27.



Obrázek 27: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 28.



Obrázek 28: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl

Při použití roztoku NaCl o koncentraci 1,0 mol/l jako tažného roztoku, bylo za čas 60 minut přes FO membránu převedeno 6447,3 g vody (6456,1 ml). Závislost intenzity objemového toku membránou a závislost koncentrace NaCl na výstupu z modulu vykazovaly obdobný průběh

jako u minulého experimentu. Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,615 g/l. Maximálně dosažený objemový koncentrační faktor byl 2,71. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 2,809 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 1,010 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla vypočítaná na 0,360 g/l.

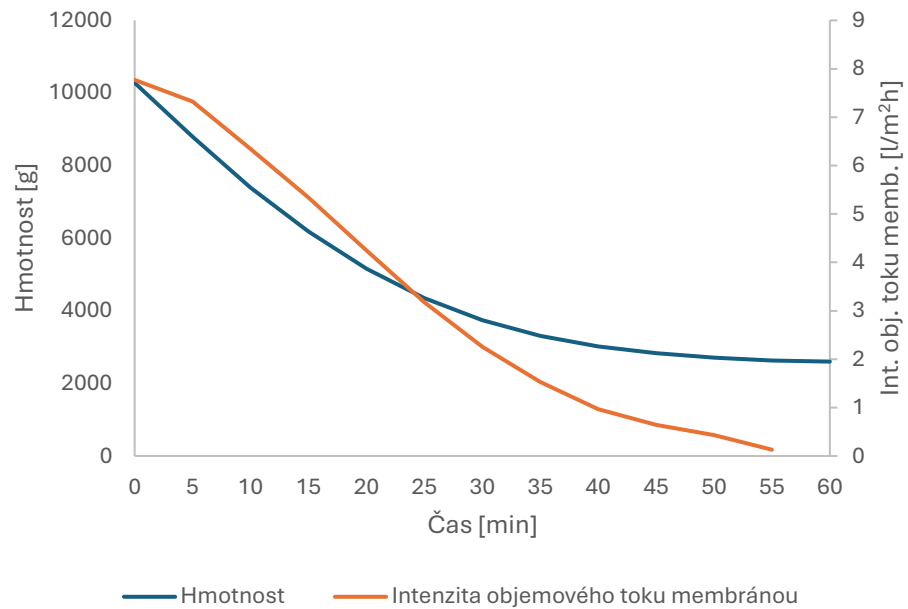
3.4.3 Glukóza – 1,5M NaCl

V experimentu Glukóza – 1,5M NaCl bylo do zásobníku zpracovávané kapaliny umístěno 10280,0 g vodného roztoku glukózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl (koncentrace 1,5 mol/l). Celková doba experimentu byla 60 minut. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 18.

Tabulka 18: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1,5M NaCl

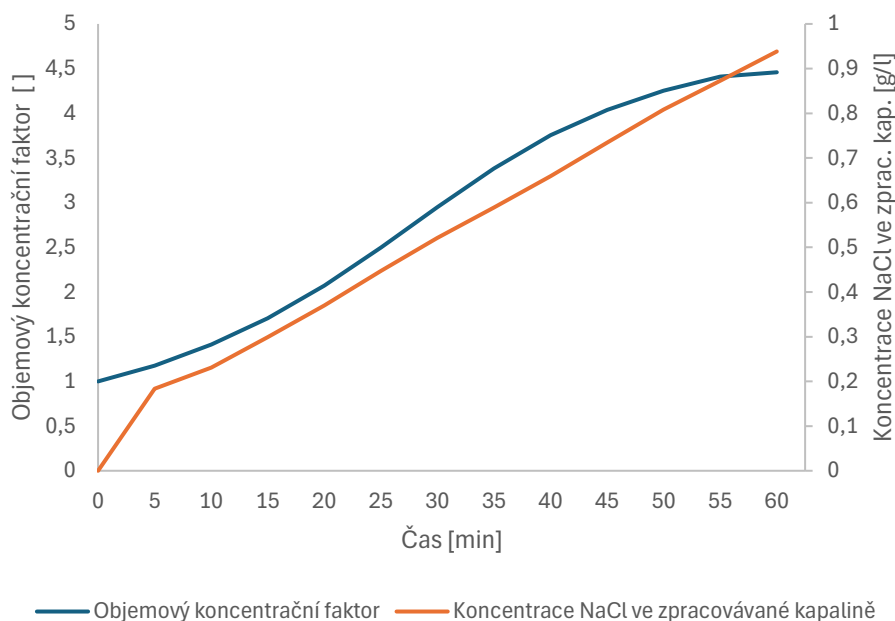
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost [g] | 10280,0 | 2601,0 | 7679,0 |
| Objem [ml] | 9909,2 | 2222,3 | 7686,9 |
| Teplota [K] | | 295 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 7106,5 | |
| R [%] | | 77,57 | |
| VCF [] | | 4,46 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,886 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 3,346 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,856 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,256 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 29.



Obrázek 29 Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 30.



Obrázek 30: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl

Při použití roztoku NaCl o koncentraci 1,5 mol/l bylo za čas 60 minut přes FO membránu převedeno 7679,0 g vody (7686,9 ml). Intenzita objemového toku membránou postupně klesala a po 55. minutě experimentu téměř došlo k zastavení toku vody přes membránu. Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,886 g/l. Maximálně dosažený objemový koncentrační faktor byl 4,46. Průměrná hodnota intenzity objemového toku membránou J_v byla 3,346 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 0,856 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{s/v}$ byla 0,256 g/l.

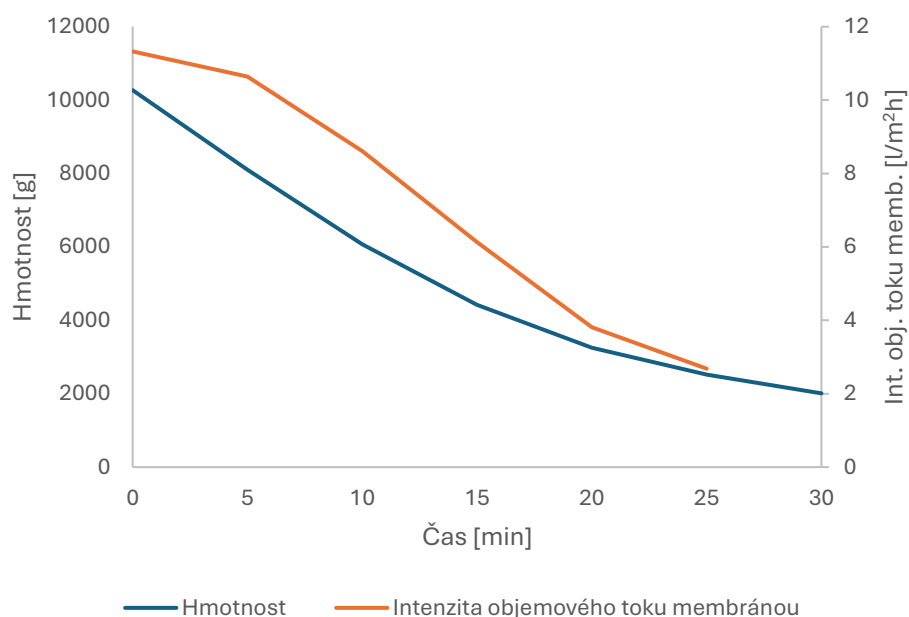
3.4.4 Glukóza – 3M NaCl

V experimentu Glukóza – 3M NaCl bylo použito 10270,4 g vodného roztoku glukózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl vložen roztok NaCl koncentrace 3,0 mol/l. Celková doba experimentu byla 30 minut. Získané výsledky jsou uvedeny v Tabulce 19.

Tabulka 19: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 3M NaCl

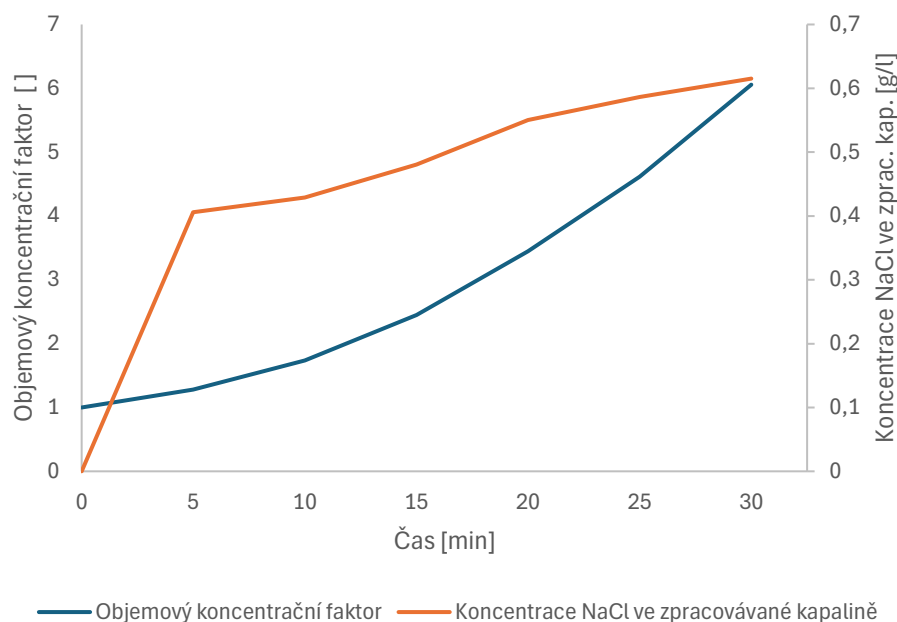
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|---------|--------|
| Hmotnost [g] | 10270,4 | 2010,2 | 8260,2 |
| Objem [ml] | 9899,9 | 1634,4 | 8265,5 |
| Teplota [K] | | 297 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 15694,9 | |
| R [%] | | 83,49 | |
| VCF [] | | 6,06 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,605 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 7,201 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,860 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,119 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 31.



Obrázek 31: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 3M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 32.



Obrázek 32: Závislost koncentrace NaCl ve zpracované kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl

Pro NaCl o koncentraci 3,0 mol/l jako tažného roztoku bylo za čas 30 minut přes FO membránu převedeno 8260,2 g vody (8265,5 ml). Na Obrázku Obrázek 32 je patrné, že koncentrace NaCl ve zpracované kapalině na výtok z modulu během prvních pěti minut rychle vzrostla na přibližně 0,4 g/l a do konce experimentu už vzrostla pouze o dodatečných přibližně 0,2 g/l. Koncentrace NaCl v nádrži zpracované kapaliny na konci experimentu byla 0,605 g/l. Maximální dosažená hodnota objemového koncentračního faktoru byla 6,06. Průměrná hodnota intenzity objemového toku membránou J_V byla 7,201 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 0,860 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla vypočítaná na 0,119 g/l.

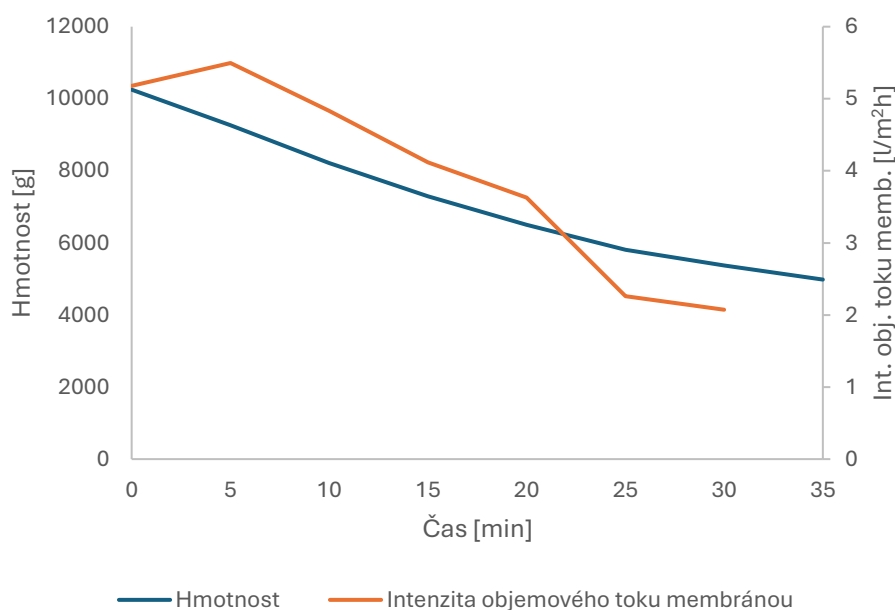
3.4.5 Glukóza – 1M Na₂SO₄

V experimentu Glukóza – 1M Na₂SO₄ bylo použito 10280,0 g vodného roztoku glukózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok Na₂SO₄ (koncentrace 1,0 mol/l). Ostatní parametry experimentu byly shodné s experimenty s NaCl (protiproudé zapojení, vsádkově zpracovaná kapalina a jednorůchodově tažený roztok). Celková doba experimentu byla 35 minut. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 20.

Tabulka 20: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1M Na₂SO₄

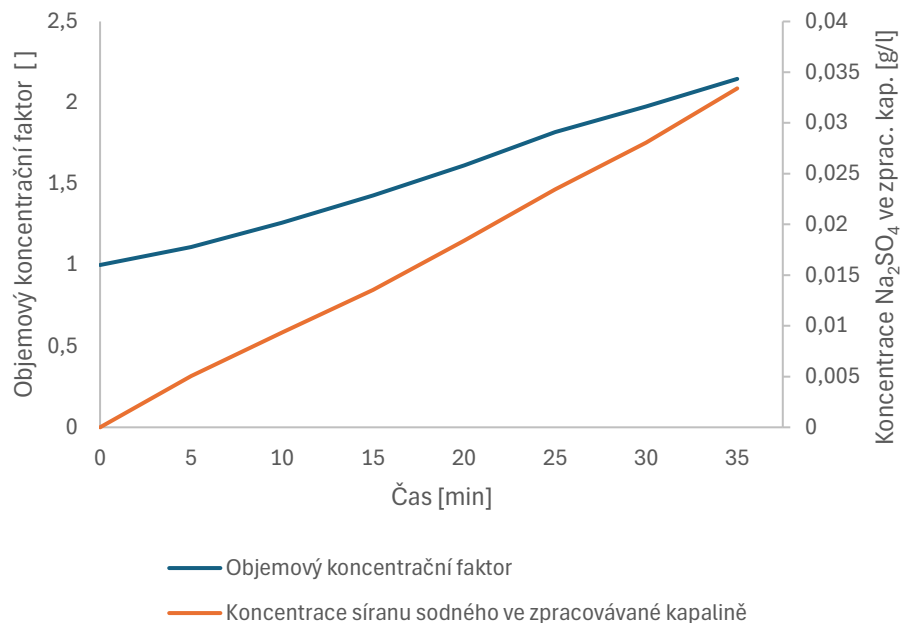
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10252,4 | 4982,0 | 5270,4 |
| Objem suroviny [ml] | 9882,6 | 4604,5 | 5278,1 |
| Teplota [K] | | 297 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4736,6 | |
| R [%] | | 53,41 | |
| VCF [] | | 2,15 | |
| Koncentrace Na₂SO₄ [g/l] | | 0,027 | |
| J_{V,p} [l/m²h] | | 3,941 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,093 | |
| J_{S/V} [g/l] | | 0,024 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 33.



Obrázek 33 Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1M Na₂SO₄

Závislost koncentrace Na₂SO₄ ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 34.



Obrázek 34: Závislost koncentrace Na_2SO_4 ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1M Na_2SO_4

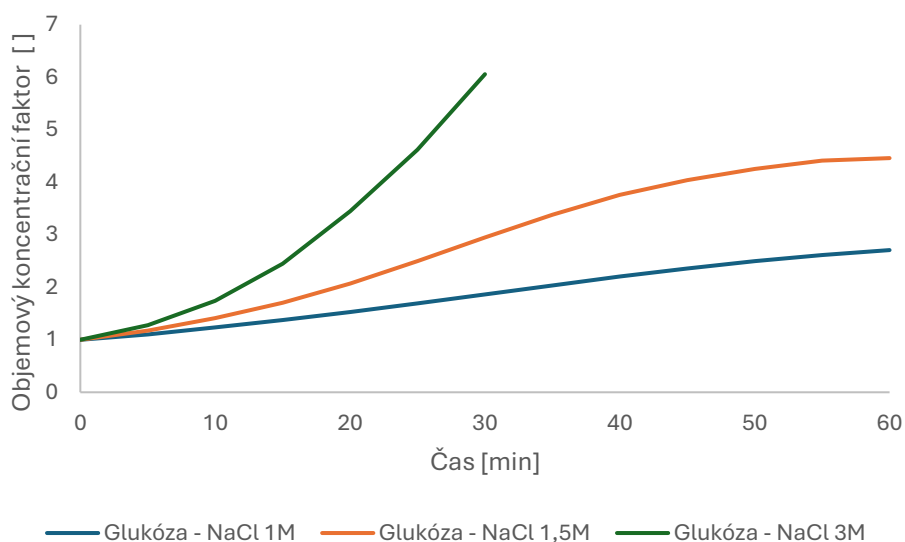
Pomocí roztoku Na_2SO_4 (1,0 mol/l) jako tažného roztoku bylo za 35 minut přes FO membránu převedeno 5270,4 g vody (5278,1 ml). Mezi pátou a desátou minutou došlo k dočasnému zvýšení J_V , z důvodu stabilizace proudění a odstranění bublin z modulu. Koncentrace Na_2SO_4 v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,027 g/l. Maximální dosažený objemový koncentrační faktor byl 2,15. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 3,941 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 0,093 g/m²h, specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla 0,024 g/l. Obdobně jako u solného testu se síranem se i zde aplikace vícemocného aniontu zejména projevila ve snížení zpětného toku soli a tím ve snížení specifického toku soli v porovnání s použitím NaCl jako tažného roztoku.

3.4.6 Porovnání – vliv koncentrace tažného roztoku

V experimentu Glukóza – 1M NaCl za čas 60 minut byl dosažen objemový koncentrační faktor (VCF) 2,71, c_{NaCl} byla 0,615 g/l, v experimentu Glukóza – 1,5M NaCl za stejný čas byl VCF 4,46 a c_{NaCl} byla 0,886 g/l, v experimentu Glukóza – 3M NaCl za čas 30 minut byl VCF dokonce 6,06 a c_{NaCl} byla 0,605 g/l. Je patrné, že použitím tažného roztoku větší koncentrace lze dosáhnout vyšší hodnoty VCF za stejný čas. Například po 30 minutách provozu zařízení při použití 1,0 mol/l NaCl byl VCF 1,86, při použití 1,5 mol/l NaCl byl 2,95 a při použití 3,0 mol/l NaCl byla získána hodnota 6,06. Průběhy závislosti objemového koncentračního

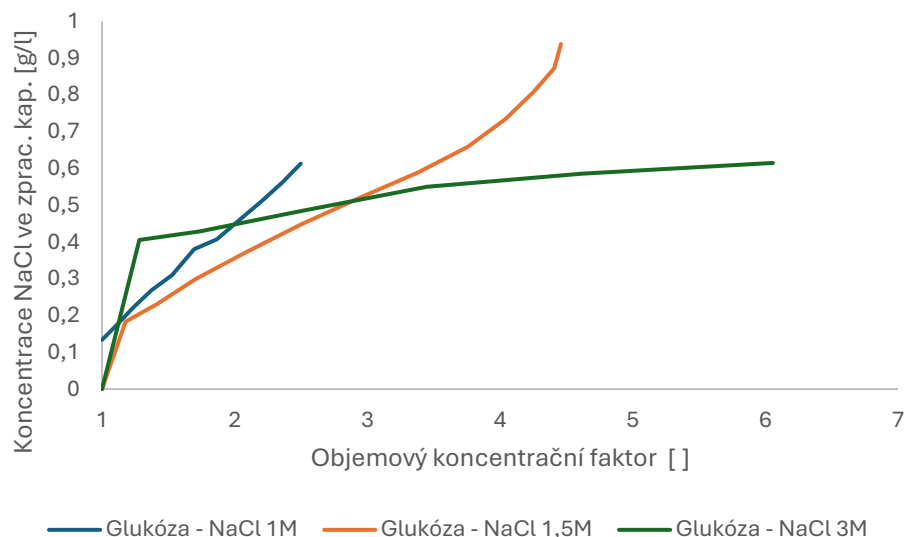
faktoru (VCF) na čase pro 3 rozdílně koncentrované tažné roztoky jsou znázorněny na Obrázku 35.

Ohledně koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině, použití 1,5 mol/l NaCl bylo nejvýhodnější až do hodnoty VCF přibližně 2,9. Při dosažení vyšších hodnot VCF bylo nejvýhodnější použití 3,0 mol/l NaCl. Tento stav je zejména ovlivněn výrazným nárůstem koncentrace soli ve zpracovávané kapalině na začátku experimentu s nejvyšší koncentrací soli v tažném roztoku. V budoucnu by bylo nutné tento vliv blíže prozkoumat. Průběhy závislosti koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na objemovém koncentračním faktoru pro 3 různé tažné roztoky jsou znázorněny na Obrázku 36.



Obrázek 35: Závislost objemového koncentračního faktoru na čase pro 3 různé tažné roztoky NaCl

Průběhy závislosti koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na objemovém koncentračním faktoru pro 3 různé tažné roztoky jsou znázorněny na Obrázku 36.



Obrázek 36: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na VCF pro 3 různé tažné roztoky NaCl

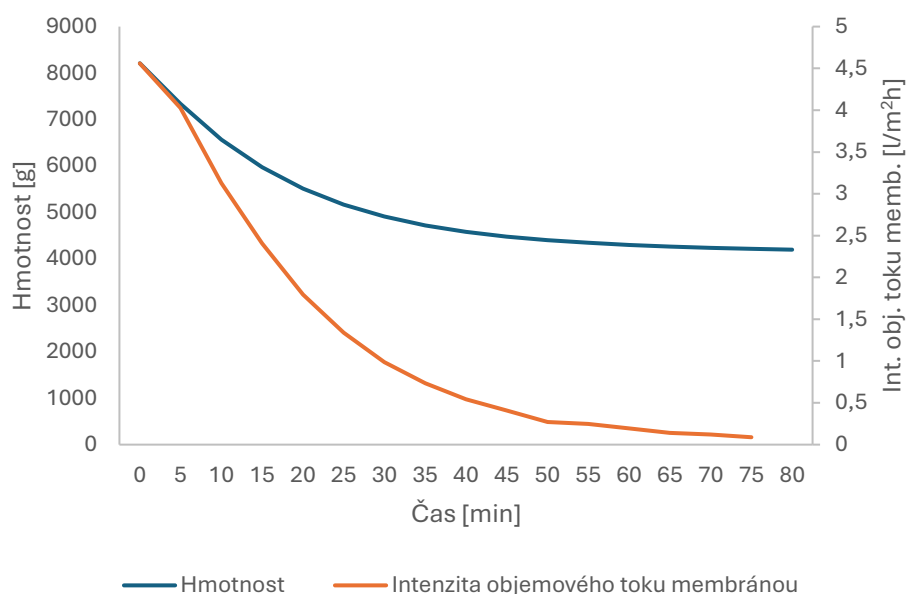
3.4.7 Glukóza – 1M NaCl batch

V experimentu Glukóza – 1M NaCl batch bylo zpracováváno 8210,0 g vodného roztoku glukózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl (koncentrace 1,0 mol/l). Na rozdíl od předchozích experimentů v tomto experimentu byly zpracovávaná kapalina a tažný roztok recirkulovány mezi vlastními nádržemi a membránovým modulem. Celková doba experimentu byla 80 minut. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 21.

Tabulka 21: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1M NaCl batch

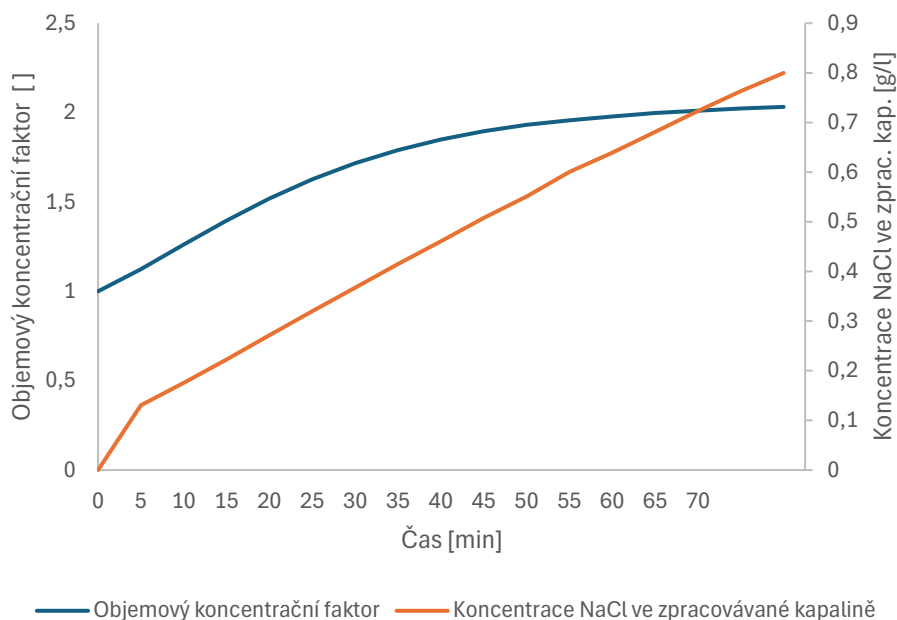
| | začátek | konec | rozdíl |
|---------------------------------------|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 8210,0 | 4197,1 | 4012,9 |
| Objem suroviny [ml] | 7913,8 | 3895,1 | 4018,7 |
| Teplota [K] | | 295 | |
| $\pi_{\text{taž.roz. začátek}}$ [kPa] | | 4615,0 | |
| R [%] | | 50,78 | |
| VCF [] | | 2,03 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,763 | |
| $J_{V,p}$ [l/m ² h] | | 1,311 | |
| J_s [g/m ² h] | | 0,969 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,739 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 37.



Obrázek 37: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl batch

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 38.



Obrázek 38: Závislost koncentrace NaCl ve zpracované kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1M NaCl batch

Při použití roztoku NaCl o koncentraci 1,0 mol/l jako tažného roztoku ve vsádkovém režimu, bylo za čas 80 minut přes FO membránu převedeno 4012,9 g vody (4018,7 ml). Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,763 g/l. Bylo dosaženo maximální hodnoty objemového koncentračního faktoru 2,03. Průměrná hodnota intenzity objemového toku membránou J_V byla 1,311 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 0,969 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{s/V}$ byla vypočítaná na 0,739 g/l.

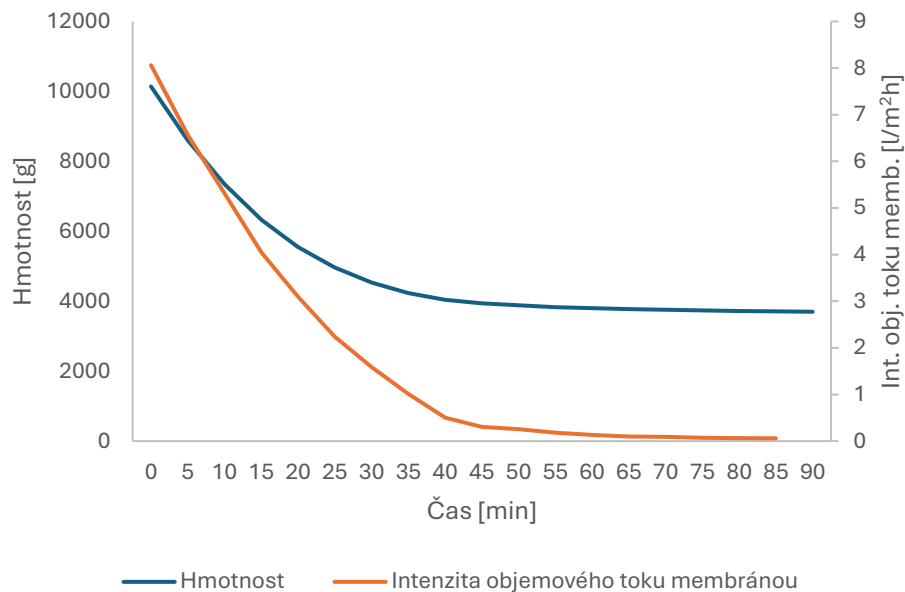
3.4.8 Glukóza – 1,5M NaCl batch

V experimentu Glukóza – 1,5M NaCl batch bylo do zásobníku zpracovávané kapaliny umístěno 10141,6 g vodného roztoku glukózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl o koncentraci 1,5 mol/l, jehož průtok byl nastaven na 25 l/h. Zapojení proudů bylo protiproudé a oba okruhy fungovaly ve vsádkovém režimu (batch). Získané výsledky za 90 minut trvání experimentu jsou uvedeny v Tabulce 22.

Tabulka 22: Vyhodnocení experimentu Glukóza – 1,5M NaCl batch

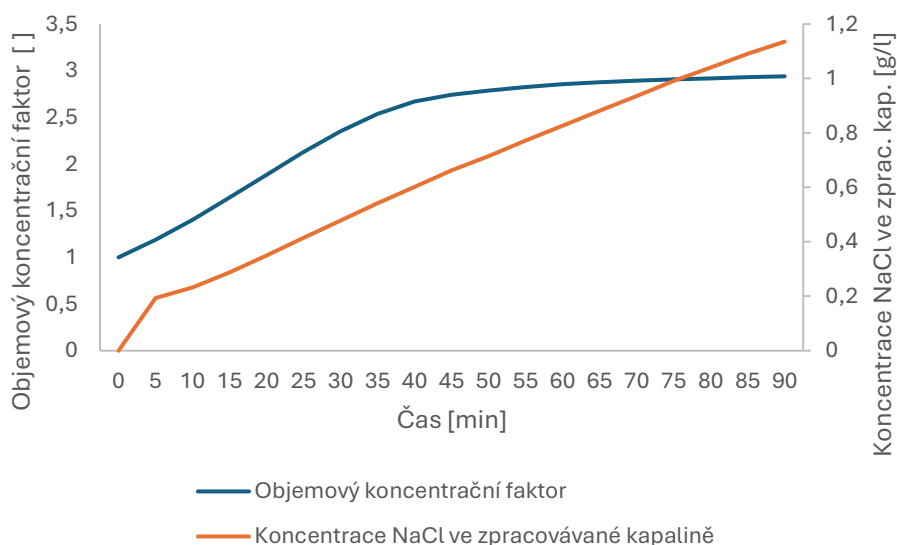
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10141,6 | 3699,4 | 6442,2 |
| Objem suroviny [ml] | 9775,7 | 3325,0 | 6450,7 |
| Teplota [K] | | 295 | |
| $\pi_{\text{taž.roz. začátek}}$ [kPa] | | 7106,5 | |
| R [%] | | 65,99 | |
| VCF [] | | 2,94 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 1,100 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 1,871 | |
| J_s [g/m²h] | | 1,060 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,567 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 39.



Obrázek 39: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl batch

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 40.



Obrázek 40: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Glukóza – 1,5M NaCl

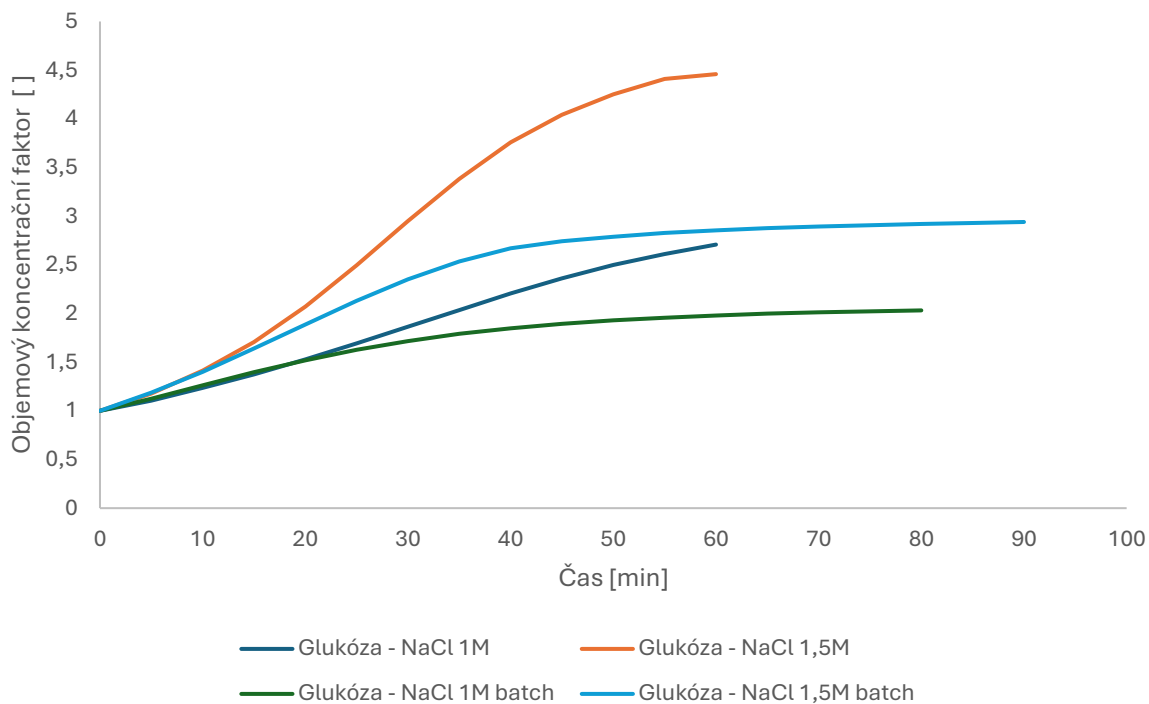
Při použití roztoku NaCl koncentrace 1,5 mol/l jako tažného roztoku ve vsádkovém režimu, bylo za čas 90 minut přes FO membránu převedeno 6442,2 g vody (6450,7 ml). Po 40. minutě došlo k významnému zpomalení dopředné osmózy a ke konci experimentu téměř došlo k zastavení toku vody přes membránu. Tento stav byl opět způsoben vyrovnáním osmotických

tlaků, což je výraznější pro vsádkový režim tažné kapaliny. Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 1,100 g/l. Získaný maximální objemový koncentrační faktor byl 2,94. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 1,871 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 1,060 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{s/V}$ byla vypočítána na 0,567 g/l.

3.4.9 Porovnání – vliv recirkulace tažného roztoku

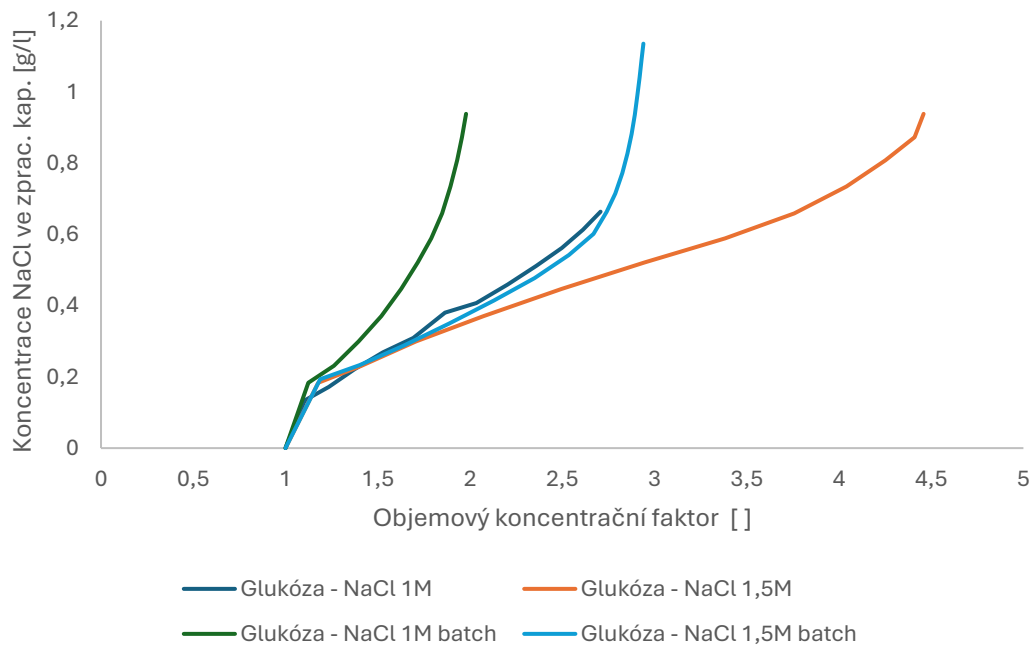
Je možné konstatovat, že použitím tažného roztoku větší koncentrace lze dosáhnout větší hodnoty VCF, a to i v případě vsádkového (batch) zapojení (1,5 mol/l oproti 1,0 mol/l NaCl batch). V případě vsádkového zapojení (recyklace) dochází ke snížení koncentrace tažného roztoku a vyrovnání osmotických tlaků na obou stranách membrány mnohem dříve než v případě jednorůchodového zapojení (ve kterém se pouze zvyšuje osm. tlak zpracovávané kapaliny a nedochází k poklesu osm. tlaku tažného roztoku). Například v případě experimentu Glukóza – 1,5M NaCl batch mezi 30. a 60. minutou došlo k zvýšení VCF o pouze 0,5 (Glukóza – 1,5M NaCl o 1,5). Mezi 60. a 90. minutou v témže experimentu bylo zvýšení VCF pouze 0,09, což znamená, že v této době došlo téměř k zastavení toku vody přes membránu. Podobný průběh je možné vidět i v případě porovnání experimentů Glukóza – 1M NaCl batch a Glukóza – 1M NaCl. Porovnání průběhu závislosti objemového koncentračního faktoru (VCF) na čase pro experimenty s glukózou a okruhu tažného roztoku provozovaného ve vsádkovém a jednorůchodovém režimu jsou znázorněny na Obrázku 41.

Ohledně koncentrace soli ve zpracovávané kapalině, pro téměř všechny hodnoty VCF, se tažný roztok větší koncentrace v jednorůchodovém zapojení ukázal jako nejvýhodnější. Tažný roztok nižší koncentrace ve vsádkovém zapojení se ukázal jako nejméně příznivá volba pro dosažení určité hodnoty VCF jak z hlediska potřebného času, tak z hlediska koncentrace soli ve zpracovávané kapalině.



Obrázek 41: Závislost objemového koncentračního faktoru na čase (porovnání různých způsobů zapojení tažného roztoku NaCl)

Porovnání průběhu závislosti koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na objemovém koncentračním faktoru (VCF) pro roztoky glukózy při různém zapojení tažného roztoku jsou znázorněny na Obrázku 42.



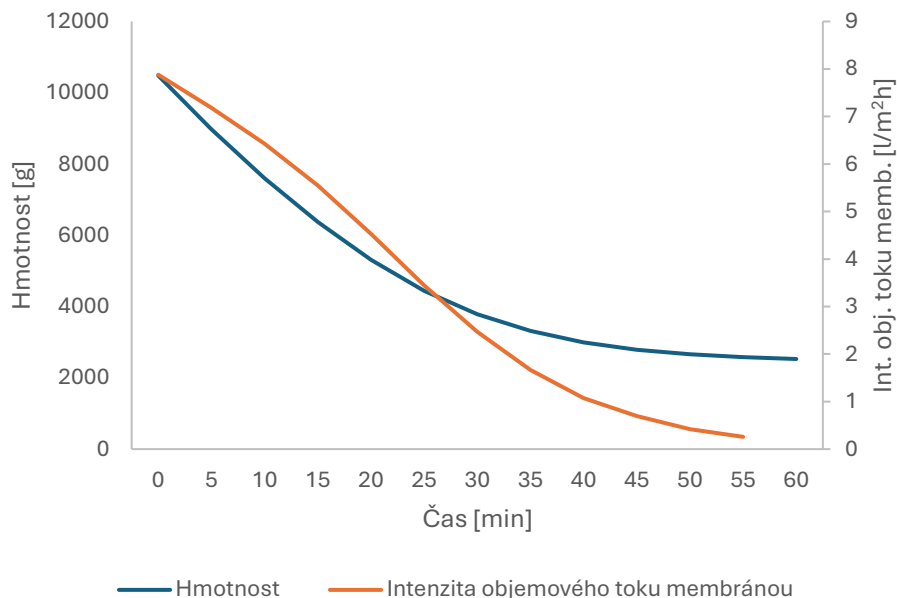
Obrázek 42: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na VCF (porovnání různých způsobů zapojení tažného roztoku NaCl) Sacharóza – 1M NaCl

V experimentu Sacharóza – 1M NaCl do zásobníku zpracovávané kapaliny bylo umístěno 10481,6 g vodního roztoku sacharózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl o koncentraci 1,0 mol/l. Membránový modul byl provozován v protiproudém zapojení. Zpracovávána kapalina proudila ve vsádkovém režimu (batch), tažný roztok byl vypouštěn ze zařízení po průchodu modulem. Celková doba experimentu byla 60 minut. Přehled hodnot na začátku a konečných hodnot hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 23.

Tabulka 23: Vyhodnocení experimentu Sacharóza – 1M NaCl

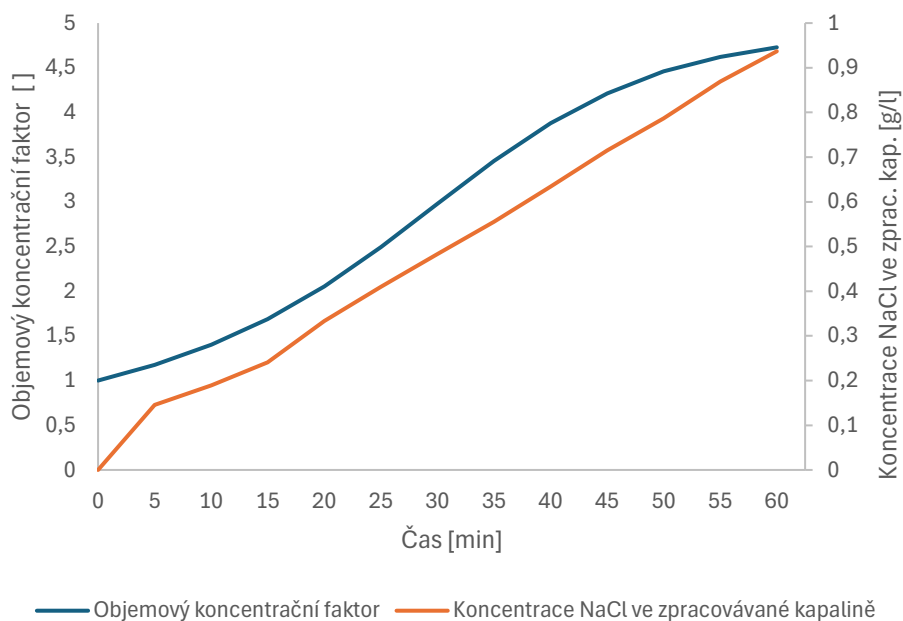
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10481,6 | 2528,6 | 7953,0 |
| Objem suroviny [ml] | 10098,0 | 2135,4 | 7962,6 |
| Teplota [K] | | 296 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4630,7 | |
| R [%] | | 78,85 | |
| VCF [] | | 4,73 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,883 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 3,466 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,820 | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | 0,237 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 43.



Obrázek 43: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Sacharóza – 1M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 44.



Obrázek 44: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Sacharóza – 1M NaCl

Při použití roztoku NaCl (koncentrace 1,0 mol/l) jako tažného roztoku pro experiment se sacharózou bylo po 60 minutách přes FO membránu převedeno 7953,0 g vody (7962,6 ml). Intenzita objemového toku membránou J_v byla intenzivnější během prvních 30 minut, potom

se tok vody přes membránu výrazně zpomalil. Díky přešlému množství soli z tažného roztoku byla koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu 0,883 g/l. Objemový koncentrační faktor na konci experimentu byl 4,73. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V na konci experimentu byla 3,466 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 0,820 g/m²h, z čehož specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla 0,237 g/l.

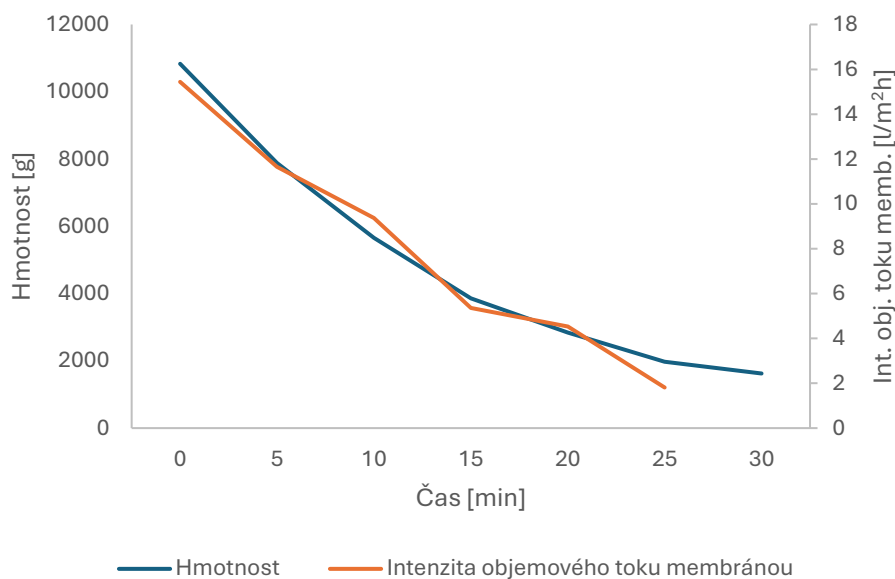
3.4.10 Sacharóza – 3M NaCl

V experimentu sacharóza – 3M NaCl bylo zpracováváno 10831,5 g vodného roztoku sacharózy ($\omega=10\%$). Do nádrže tažného roztoku byl umístěn roztok NaCl koncentrace 3,0 mol/l. Celková doba experimentu byla 30 minut. Ostatní parametry byly shodné s předchozím experimentem. Získané výsledky jsou uvedeny v Tabulce 24.

Tabulka 24: Vyhodnocení experimentu Sacharóza – 3M NaCl

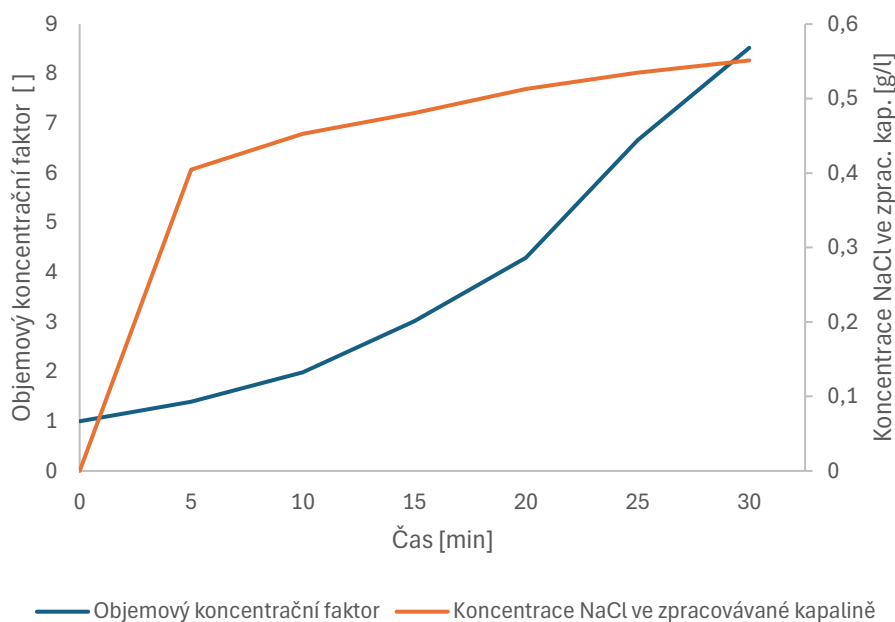
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|---------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10831,5 | 1623,8 | 9207,7 |
| Objem suroviny [ml] | 10434,6 | 1224,4 | 9210,2 |
| Teplota [K] | | 298 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 15747,7 | |
| R [%] | | 88,27 | |
| VCF [] | | 8,52 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,543 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 8,028 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,578 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,072 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 45.



Obrázek 45: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Sacharóza – 3M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 46.



Obrázek 46: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Sacharóza – 3M NaCl

Při použití roztoku NaCl (koncentrace 3,0 mol/l) jako tažného roztoku bylo za čas 30 minut přes FO membránu převedeno 9207,7 g vody (9210,2 ml). Koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině na výtoku z modulu během prvních pěti minut vzrostla na přibližně 0,4 g/l a během

zbývající části experimentu o dodatečných 0,15 g/l. Obdobný průběh, tj. výrazný nárůst koncentrace NaCl byl zpozorován i u glukózy a stejně koncentrovaného tažného roztoku (3 mol/l). Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny, na konci experimentu, byla 0,543 g/l. Dosažený objemový koncentrační faktor na konci experimentu byl 8,52. Průměrná hodnota intenzity objemového toku membránou J_V byla 8,028 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 0,578 g/m²h a specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla 0,072 g/l.

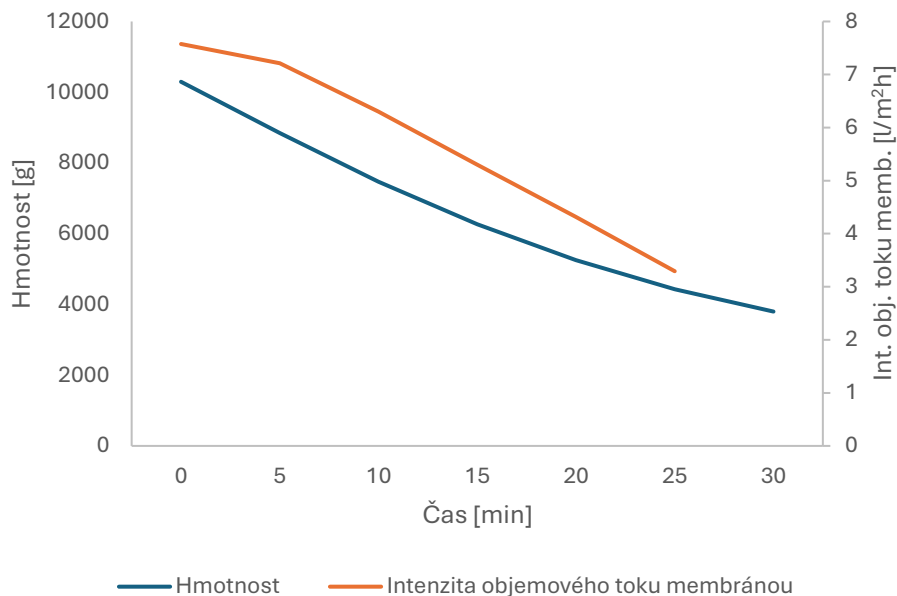
3.4.11 Sacharóza – 1M Na₂SO₄

V experimentu Sacharóza – 1M Na₂SO₄ bylo zpracováváno 10295,7 g vodného roztoku sacharózy ($\omega=10\%$). Tažným roztokem byl roztok Na₂SO₄ o koncentraci 1,0 mol/l. Celková doba experimentu byla 30 minut. Ostatní parametry procesu zůstaly nezměněné. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 25.

Tabulka 25: Vyhodnocení experimentu Sacharóza – 1M Na₂SO₄

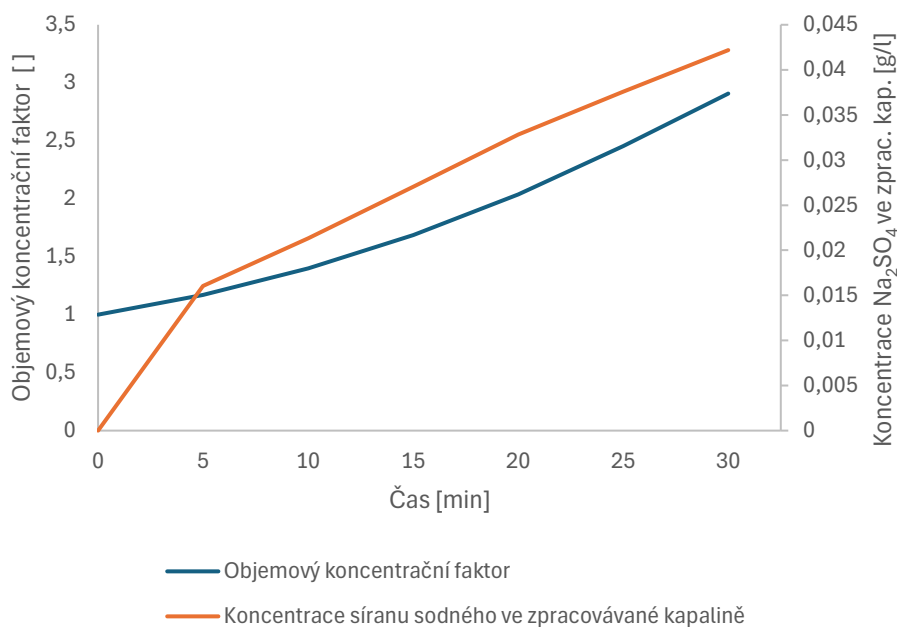
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10295,7 | 3798,8 | 6496,9 |
| Objem suroviny [ml] | 9918,5 | 3412,4 | 6506,1 |
| Teplota [K] | | 298 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4752,6 | |
| R [%] | | 65,60 | |
| VCF [] | | 2,91 | |
| Koncentrace Na₂SO₄ [g/l] | | 0,037 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 5,666 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,109 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,019 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 47.



Obrázek 47: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Sacharóza – 1M Na₂SO₄

Závislost koncentrace Na₂SO₄ ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 48.



Obrázek 48: Závislost koncentrace Na₂SO₄ ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Sacharóza – 1M Na₂SO₄

Pro Na₂SO₄ (1,0 mol/l) bylo za čas 30 minut přes FO membránu převedeno 6496,9 g (6506,1 ml) rozpouštědla z roztoku sacharózy. Koncentrace Na₂SO₄ v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,037 g/l. Na konci experimentu bylo dosaženo objemového koncentračního faktoru 2,91. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_v byla 5,666 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 0,109 g/m²h a specifická intenzita zpětného toku soli $J_{s/v}$ byla 0,019 g/l.

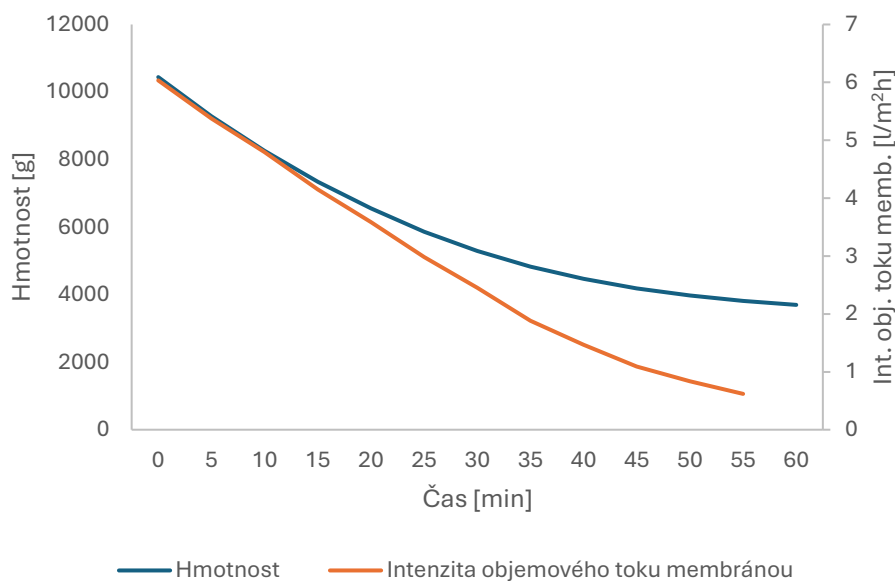
3.4.12 Fruktóza – 1M NaCl

V experimentu Fruktóza – 1M NaCl bylo zpracováváno 10441,7 g vodného roztoku fruktózy ($\omega=10\%$) pomocí tažného roztoku NaCl o koncentraci 1,0 mol/l, jehož průtok byl nastaven na 25 l/h. Zapojení bylo protiproudé a zpracovávána kapalina recirkulována (vsádkový režim, batch) a tažný roztok byl vypouštěn ze zařízení po jeho průchodu modulem. Celková doba experimentu byla 60 minut. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 26.

Tabulka 26: *Výhodnocení experimentu Fruktóza – 1M NaCl*

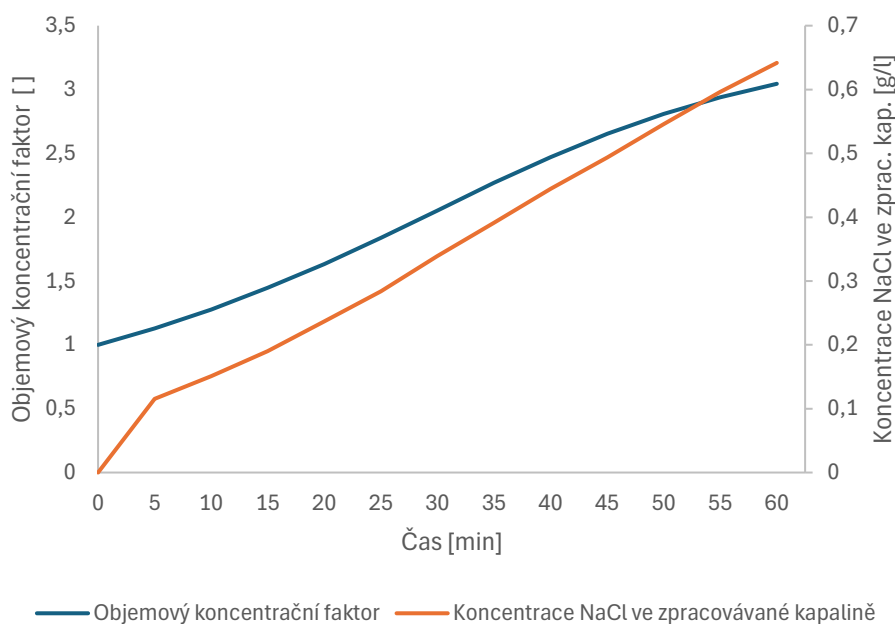
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10441,7 | 3696,7 | 6745,0 |
| Objem suroviny [ml] | 10055,4 | 3302,6 | 6752,8 |
| Teplota [K] | | 296 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4630,7 | |
| R [%] | | 67,16 | |
| VCF [] | | 3,04 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,605 | |
| $J_{v,p}$ [l/m²h] | | 2,940 | |
| J_s [g/m²h] | | 0,868 | |
| $J_{s/v}$ [g/l] | | 0,295 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 49.



Obrázek 49: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Fruktóza – 1M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase je znázorněna na Obrázku 50.



Obrázek 50: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a objemového koncentračního faktoru na čase během experimentu Fruktóza – 1M NaCl

Pro fruktózu a tažný roztok NaCl (1,0 mol/l) bylo za čas 60 minut přes FO membránu převedeno 6745,0 g vody (6752,8 ml). Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,605 g/l. Na konci experimentu byl objemový koncentrační faktor 3,04.

Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 2,940 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 0,868 g/m²h, specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla 0,295 g/l.

3.5 Modelový roztok

Po experimentech s jednotlivými sacharidy byly provedeny experimenty zahuštění modelového roztoku. Tento roztok měl napodobovat reálný jablečný mošt. Údaje o složení jablečného moštu byly získány z článku [102], podle kterého byl namíchan roztok obsahující 18,81 g/l glukózy, 80,88 g/l fruktózy a 29,61 g/l sacharózy. Celková koncentrace sacharidů byla nepatrně vyšší (přibližně 13 hm.%) než koncentrace jednotlivých sacharidů v předchozích experimentech.

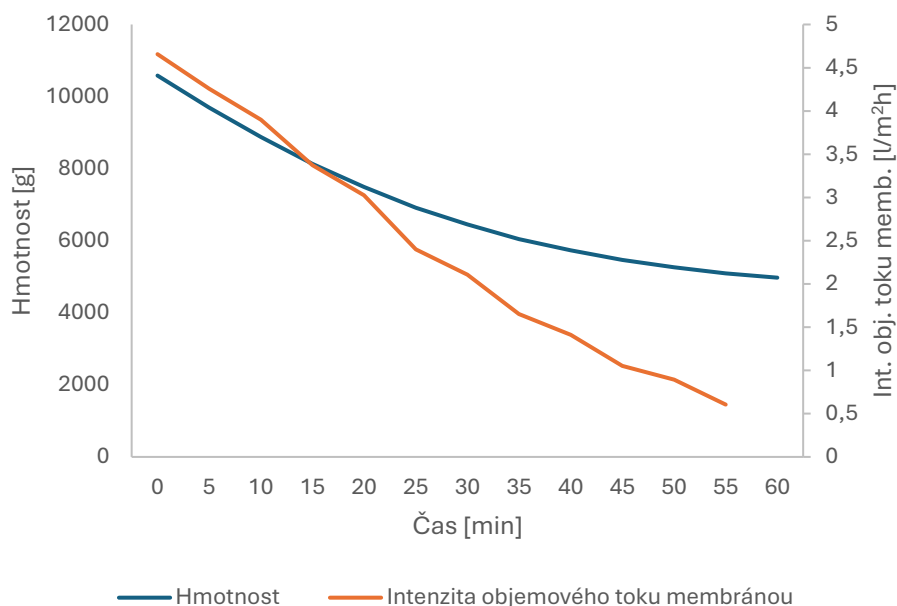
3.5.1 Modelový roztok– 1M NaCl

V experimentu Modelový roztok – 1M NaCl bylo zpracovááno 10582,1 g modelového roztoku, tento proud recirkuloval v systému (vsádkový režim). Jako tažný roztok byl použit roztok NaCl o koncentraci 1,0 mol/l, jehož průtok byl nastaven na 25 l/h a jednalo se o kontinuální jednopřechodové zapojení. Membránový modul fungoval v protiproudém zapojení. Celková doba experimentu byla 60 minut. Přehled počátečních a konečných hmotností, objemů a vypočítané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 27.

Tabulka 27: Výhodnocení experimentu Modelový roztok– 1M NaCl

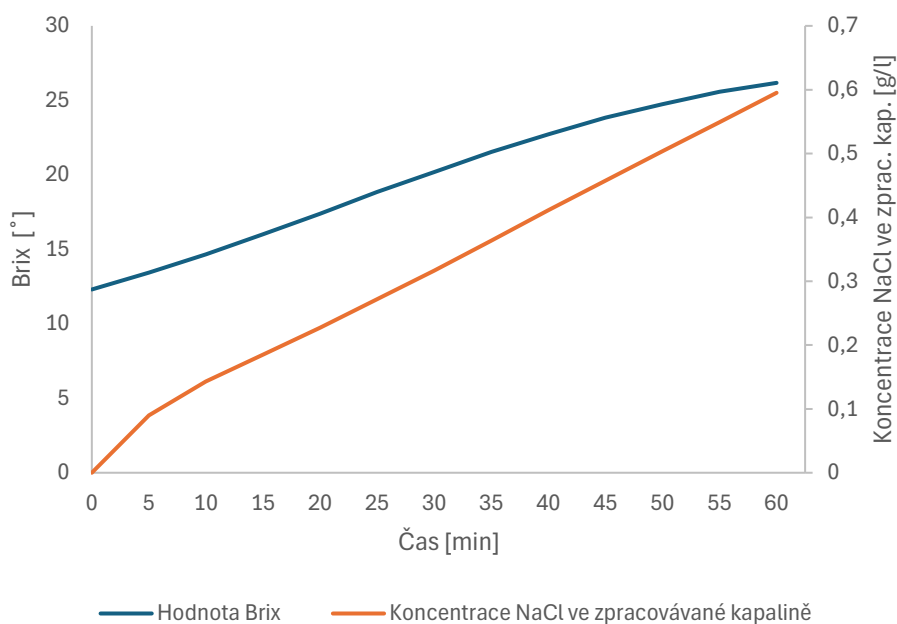
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10582,1 | 4974,3 | 5607,8 |
| Objem suroviny [ml] | 10099,5 | 4484,9 | 5614,6 |
| Teplota [K] | | 298 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4661,9 | |
| R [%] | | 55,59 | |
| Brix [°] | | 26,17 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,539 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 2,445 | |
| J_s [g/m²h] | | 1,051 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,430 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 51.



Obrázek 51: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Modelový roztok – 1M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase je znázorněna na Obrázku 52.



Obrázek 52: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase během experimentu Modelový roztok – 1M NaCl

Při experimentu s modelovým roztokem a NaCl (1 mol/l) bylo za čas 60 minut přes FO membránu převedeno 5607,8 g vody (5614,6 ml). Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,539 g/l. Hodnota Brix byla zvýšena na 26,17 °. Hodnota

Brix je vhodnější pro směs sacharidů imitující ovocnou šťávu, jelikož lépe popisuje zkoncentrování sacharidů jako nejdůležitější složky než parametr VCF. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 2,445 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 1,051 g/m²h a specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla 0,430 g/l.

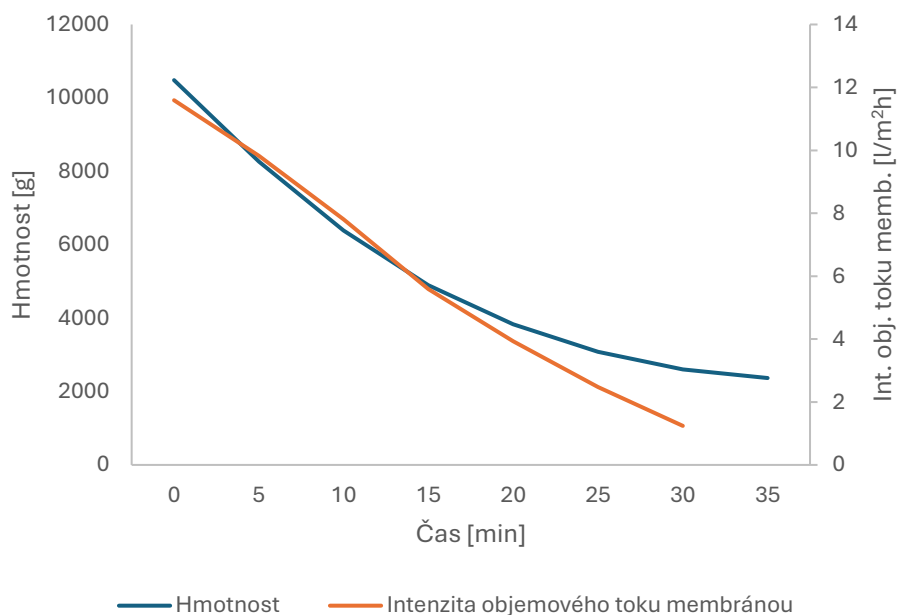
3.5.2 Modelový roztok– 3M NaCl

V experimentu Modelový roztok – 3M NaCl bylo umístěno zpracovááno 10482,8 g modelového roztoku. Jako tažný roztok byl použit roztok NaCl (3,0 mol/l). Celková doba experimentu byla 35 minut. Ostatní parametry procesu zůstaly nezměněné. Získané údaje jsou uvedeny v Tabulce 28.

Tabulka 28: Vyhodnocení experimentu Modelový roztok– 3M NaCl

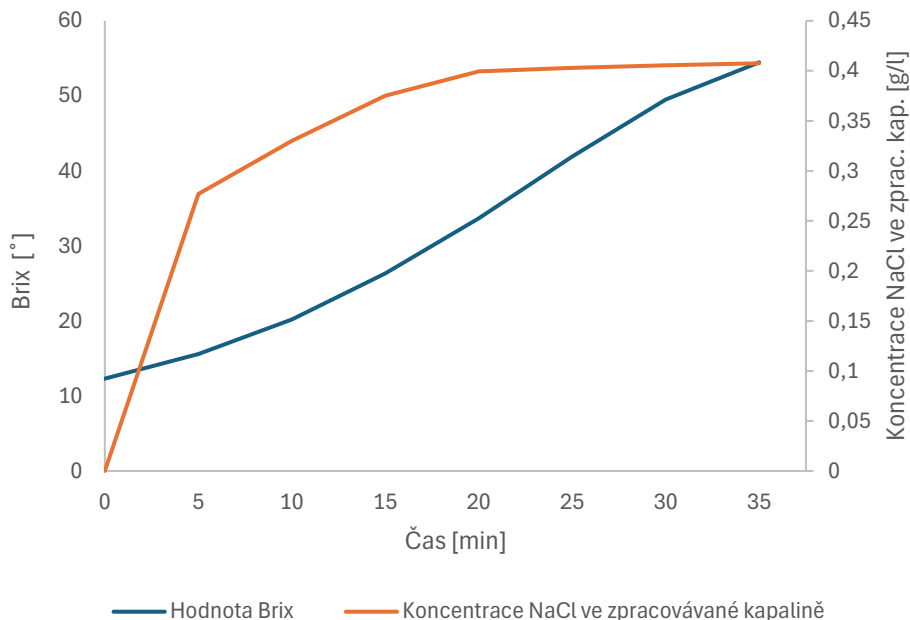
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|---------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10482,8 | 2367,7 | 8115,1 |
| Objem suroviny [ml] | 10004,8 | 1889,1 | 8115,7 |
| Teplota [K] | | 297 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 15694,9 | |
| R [%] | | 81,12 | |
| Brix [°] | | 54,48 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | 0,404 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 6,065 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,568 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,094 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 53.



Obrázek 53: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Modelový roztok – 3M NaCl

Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase je znázorněna na Obrázku 54.



Obrázek 54: Závislost koncentrace NaCl ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase během experimentu Modelový roztok – 3M NaCl

Při použití roztoku NaCl koncentrace 3,0 mol/l jako tažného roztoku, bylo za čas 35 minut přes FO membránu převedeno 8115,1 g vody (8115,7 ml). Koncentrace NaCl v nádrži zpracovávané

kapaliny byla na konci experimentu 0,404 g/l. Hodnota Brix byla zvýšena na 54,48 °. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 6,065 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_S byla 0,568 g/m²h, a specifická intenzita zpětného toku soli $J_{S/V}$ byla 0,094 g/l.

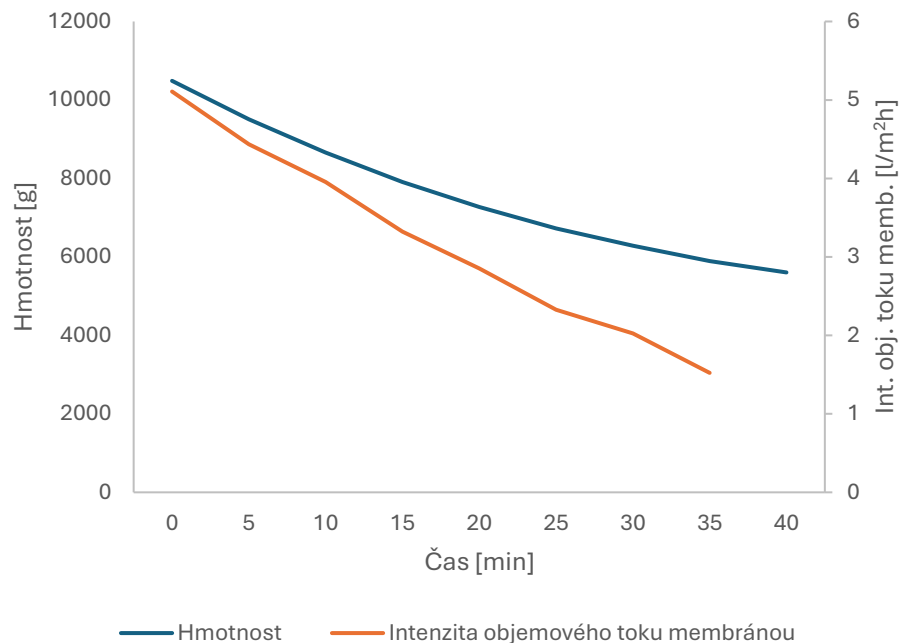
3.5.3 Modelový roztok– 1M Na₂SO₄

V experimentu Modelový roztok – 1M Na₂SO₄ bylo zpracováváno 10487,0 g modelového roztoku. Jako tažný roztok byl použit roztok Na₂SO₄ (1,0 mol/l; průtok 25 l/h). Celková doba experimentu byla 40 minut. Ostatní parametry byly shodné s předchozími experimenty. Shrnutí nejdůležitějších výkonnostních parametrů je uvedeno v Tabulce 29.

Tabulka 29: Vyhodnocení experimentu Modelový roztok – 1M Na₂SO₄

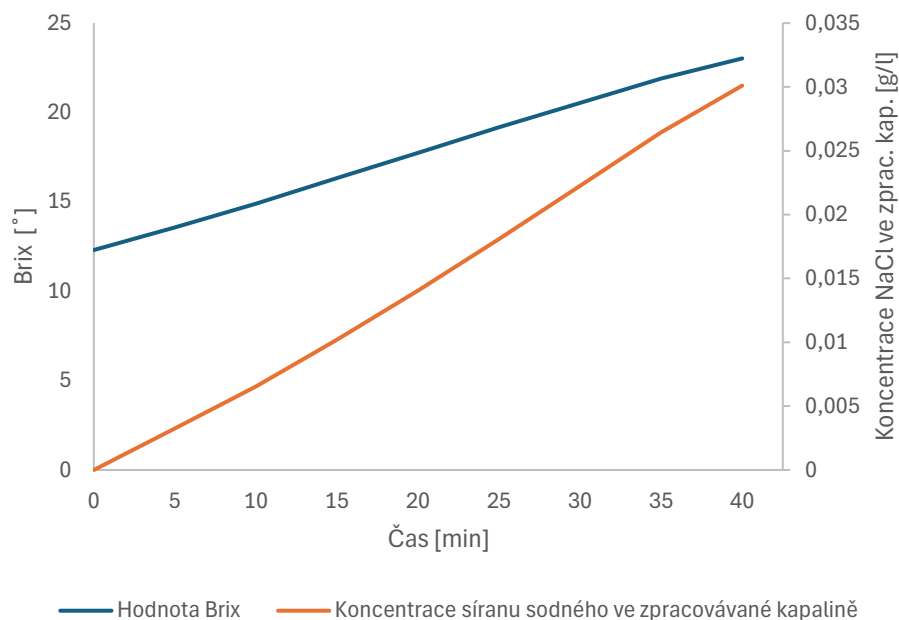
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|--------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10487,0 | 5604,1 | 4882,9 |
| Objem suroviny [ml] | 10008,8 | 5119,5 | 4889,3 |
| Teplota [K] | | 298 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 4752,6 | |
| R [%] | | 48,85 | |
| Brix [°] | | 23,02 | |
| Koncentrace Na₂SO₄ [g/l] | | 0,025 | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 3,194 | |
| J_S [g/m²h] | | 0,083 | |
| $J_{S/V}$ [g/l] | | 0,026 | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 55.



Obrázek 55: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Modelový roztok – 1M Na₂SO₄

Závislost koncentrace Na₂SO₄ ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase je znázorněna na Obrázku 56.



Obrázek 56: Závislost koncentrace Na₂SO₄ ve zpracovávané kapalině a hodnoty Brix na čase během experimentu Modelový roztok – 1M Na₂SO₄

Při použití roztoku Na₂SO₄ koncentrace 1,0 mol/l jako tažného roztoku bylo za čas 40 minut přes FO membránu převedeno 4882,9 g vody (4889,3 ml). Koncentrace Na₂SO₄ v nádrži

zpracovávané kapaliny na konci experimentu byla 0,025 g/l. Hodnota Brix byla zvýšena na 23,02 °. Průměrná intenzita objemového toku membránou J_V byla 3,194 l/m²h, intenzita zpětného toku soli J_s byla 0,083 g/m²h, a specifická intenzita zpětného toku soli $J_{s/V}$ byla 0,026 g/l.

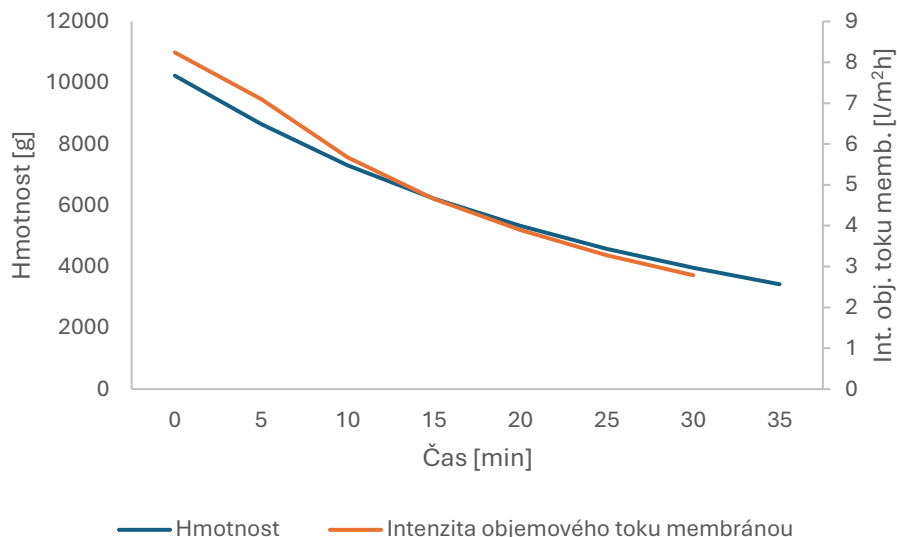
3.6 Jablečný mošt – 3M NaCl

V experimentu Jablečný mošt – 3M NaCl bylo zpracováváno 10230,2 g jablečného moštu. Nejprve byly z moštu filtrováním odstraněny suspendované částice. Jako tažný roztok byl použit roztok NaCl (3,0 mol/l). Celková doba experimentu byla 35 minut. Ostatní parametry experimentu byly shodné s předešlými experimenty, tj. protiproudé zapojení, vsádkově pro mošt a kontinuálně pro NaCl. Navíc byl stanoven obsah sušiny v jablečném moštu před a po zkoncentrování. Získané hodnoty nejdůležitějších výkonnostních parametrů jsou uvedeny v Tabulce 30.

Tabulka 30: Výhodnocení experimentu Jablečný mošt – 3M NaCl

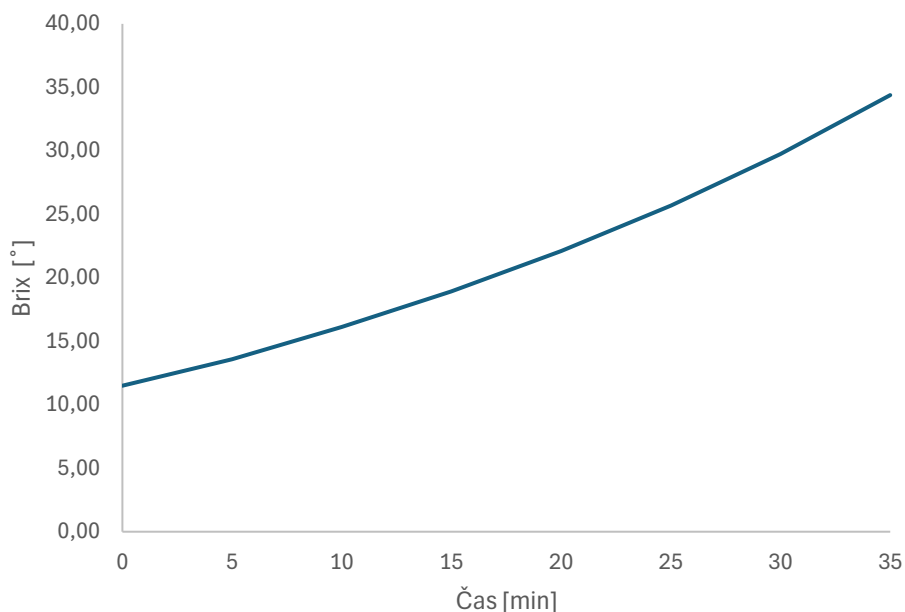
| | začátek | konec | rozdíl |
|---|---------|------------------|--------|
| Hmotnost suroviny [g] | 10230,2 | 3421,3 | 6808,9 |
| Objem suroviny [ml] | 9795,2 | 2979,4 | 6815,8 |
| Teplota [K] | | 298 | |
| $\pi_{\text{taž.roz.}}$ [kPa] | | 15747,7 | |
| R [%] | | 69,58 | |
| Brix [°] | | 34,39 | |
| Koncentrace NaCl [g/l] | | nebylo stanoveno | |
| $J_{V,p}$ [l/m²h] | | 5,089 | |
| J_s [g/m²h] | | nebylo stanoveno | |
| $J_{s/V}$ [g/l] | | nebylo stanoveno | |

Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase je znázorněna na Obrázku 57.



Obrázek 57: Závislost hmotnosti zpracovávané kapaliny a intenzity objemového toku membránou na čase během experimentu Jablečný mošt – 3M NaCl

Závislost hodnoty Brix na čase je znázorněna na Obrázku 58.



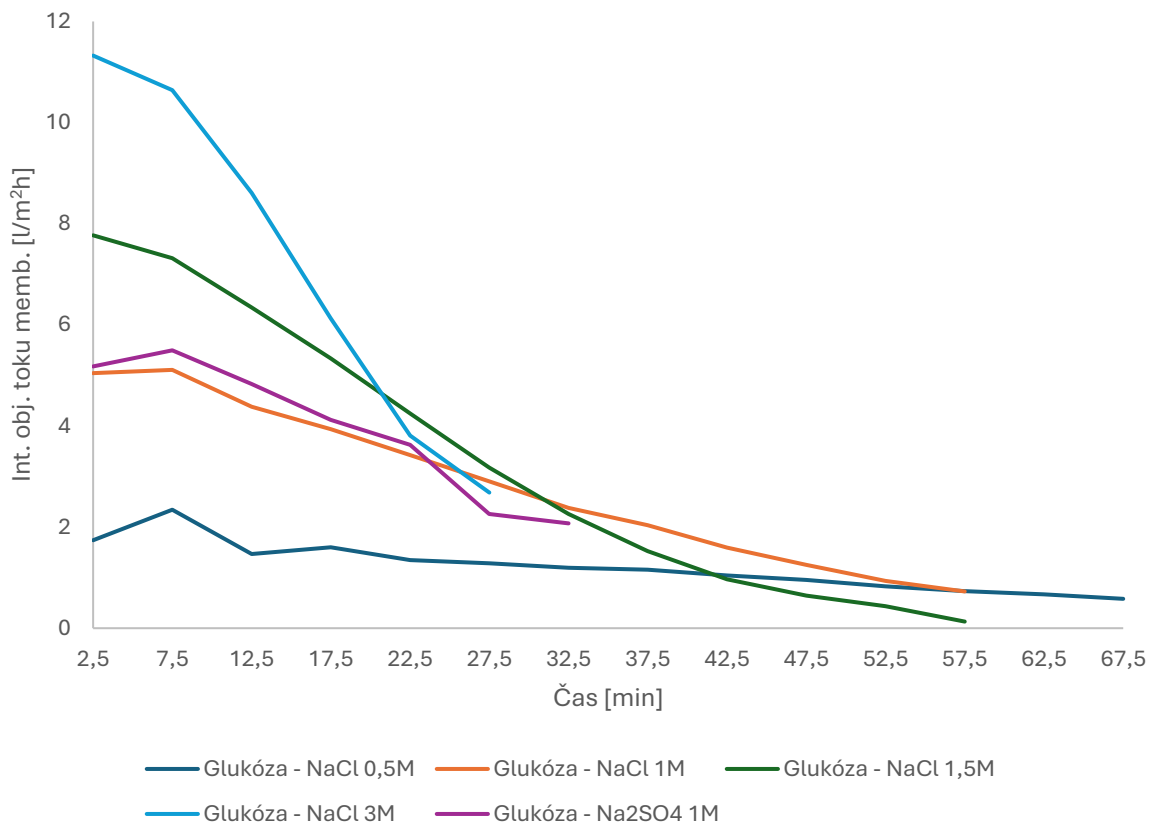
Obrázek 58: Závislost hodnoty Brix na čase během experimentu Jablečný mošt – 3M NaCl

Při použití roztoku NaCl (3,0 mol/l) jako tažného roztoku bylo za čas 35 minut přes FO membránu převedeno 6808,9 g (6815,8 ml). Průměrná intenzita objemového toku membránou J_v byla 5,089 l/m²h. Hodnota Brix jablečného moštu, která před experimentem byla 11,5°, byla zvýšena dopřednou osmózou na 34,4°. Obsah sušiny na začátku byl 11,5 %, a na konci 33,0 %. Koncentrace soli nelze pro jablečný mošt jednoduše stanovit zvolenou technikou

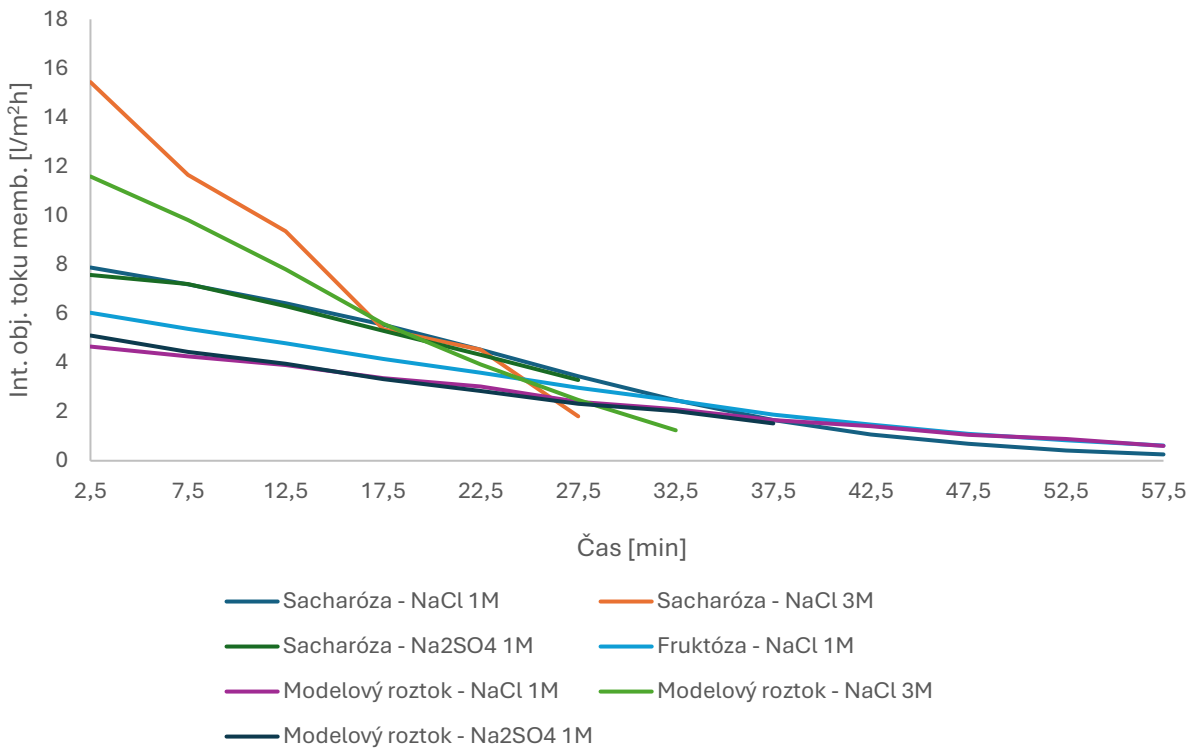
(konduktometricky), jelikož obsahuje látky, které jsou elektricky vodivé a zvyšují vodivost při zkoncentrování, jak je ukázáno v práci [101]. Při pokračování by bylo vhodné použít vhodnější metodu pro měření koncentrace soli.

3.7 Celkové vyhodnocení výsledků experimentů se sacharidy

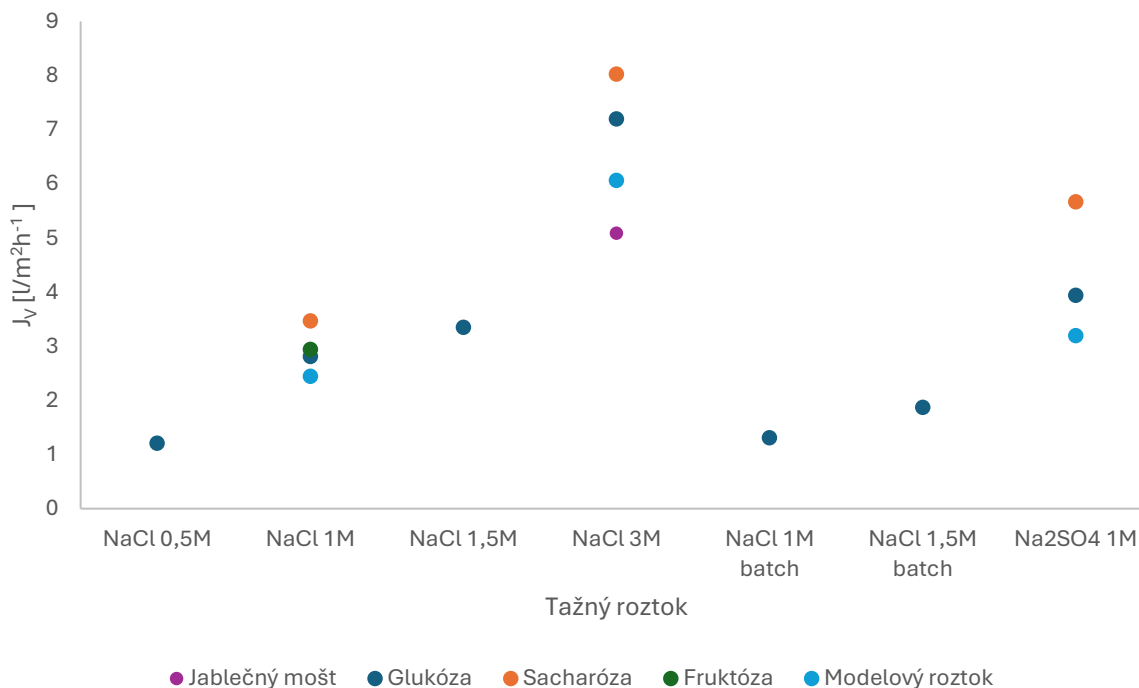
Intenzita objemového toku membránou J_V , jak bylo předpokládáno, vykazovala přímou závislost s tažnou silou. Obecně nejvyšší hodnoty J_V bylo dosaženo při použití roztoku NaCl o koncentraci 3,0 mol/l jako tažného roztoku. Při porovnání závislostí aktuální hodnoty J_V na čase (Obrázek 59 a Obrázek 60) je patrné, že je převod vody přes membránu mnohem intenzivnější na začátku procesu a potom se snížením hnací síly dochází k výraznému zpomalení procesu FO. Při použití tažného roztoku stejného typu a koncentrace byla zaznamenána nejvyšší hodnota J_V v pokusech o zkoncentrování roztoku sacharózy. Důvodem je, že roztok sacharózy vykazuje nižší osmotický tlak než roztoky glukózy nebo fruktózy o stejné hmotnostní koncentraci, což zvyšuje hnací sílu. Při porovnání koncentrace tažného roztoku NaCl o koncentraci 1 mol/l byla průměrná intenzita objemového toku přes membránu pro glukózu 2,289 l/m²h, pro sacharózu 3,467 l/m²h a pro fruktózu 2,940 l/m²h (při stejné délce experimentu 60 min). V případě vsádkového zapojení tažného roztoku byly hodnoty J_V podstatně nižší, protože v průběhu experimentů také docházelo ke snížení koncentrace tažného roztoku. Při použití 1 mol/l Na₂SO₄ jako tažného roztoku, byly hodnoty J_V o něco větší než v případě použití 1 mol/l NaCl, což lze vysvětlit faktem, že síran sodný má větší Van't Hoffův koeficient (3 oproti 2), ale díky nižšímu korekčnímu faktoru φ (při koncentraci 1 mol/l 0,64 oproti 0,94 v případě NaCl) jeho roztok vykazuje ve výsledku jen mírně vyšší osmotický tlak. Průměrná hodnota J_V byla nejnižší při zpracování jablečného moštu při jinak shodných ostatních parametrech. Např. porovnání experimentů, kde byl vybrán roztok NaCl (3 mol/l) jako tažný roztok. V tomto případě mělo značný vliv zanášení membrány, které bylo potvrzeno i výsledkem následného standardního solného test (test 8). Průměrné intenzity objemového toku membránou v experimentech při použití různých tažných roztoků jsou znázorněny na Obrázku 61. Hodnoty intenzity objemového toku membránou pro modelový roztok jsou nižší také z důvodu vyšší koncentrace sacharidů (o 3 % hm.) na začátku experimentu a z toho vyšší hodnoty osmotického tlaku tohoto roztoku (např. v porovnání s glukózou).



Obrázek 59: Závislost intenzity objemového toku membránou na čase během experimentů s glukózou

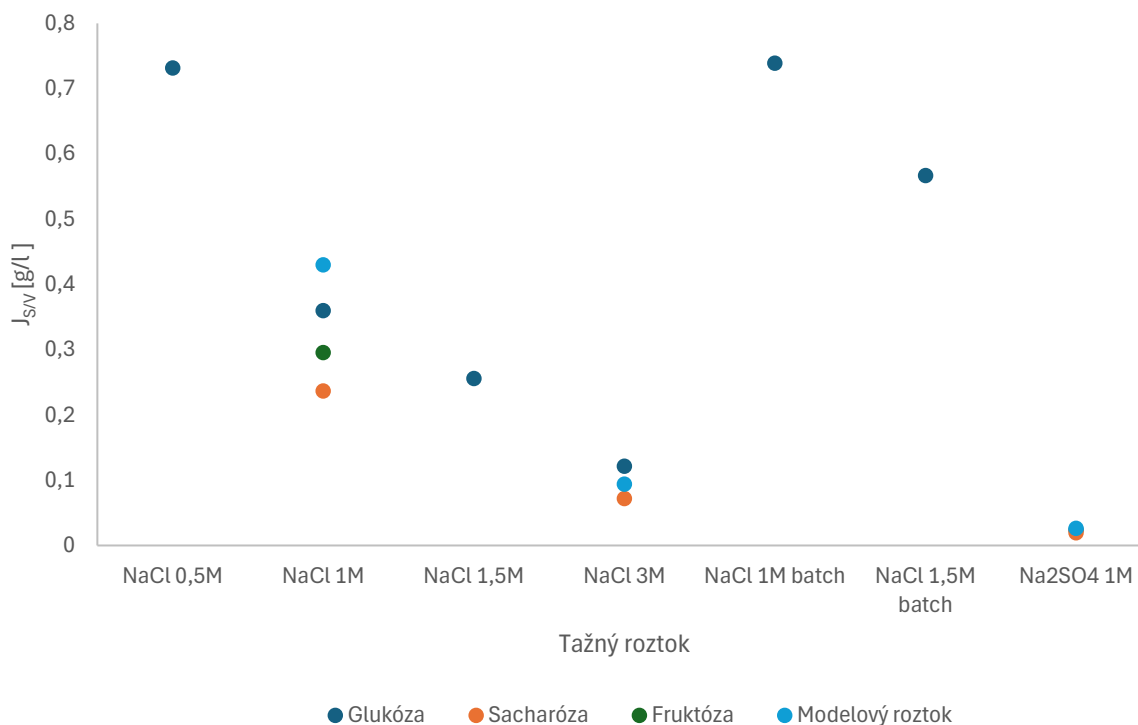


Obrázek 60: Závislost intenzity objemového toku membránou na čase během experimentů se sacharózou, fruktózou a modelovým roztokem



Obrázek 61: Porovnání průměrné intenzity objemového toku membránou pro testované zpracovávané kapaliny a tažné roztoky

Specifická intenzita zpětného toku soli ($J_{s/v}$) ukazuje množství ztracené soli, které bylo převedeno z tažného roztoku do zpracovávané kapaliny, na litr vody převedené v opačném směru přes membránu. Navíc tento poměr úzce souvisí se selektivitou (voda-sůl) membrány. Obecně je zpětný tok soli nežádoucí jev, a proto jsou nižší hodnoty poměru $J_{s/v}$ přijatelnější. Nejedná se primárně o změnu (pokles) hnací síly. Jak již bylo ukázáno u solného testu, tento vliv na hodnoty J_v díky malému množství převedené soli je zanedbatelný, ale zejména o možné sensorické ovlivnění zkoncentrovaného produktu. Je patrné, že nejnižší hodnoty tohoto poměru byly dosaženy při použití Na_2SO_4 jako tažného roztoku. Je to v souladu s poznatkem, že je migrace dvojmocných iontů do zpracovávané kapaliny (zpětný tok soli) znevýhodněná oproti jednomocným iontům. Projevuje se vliv elektrostatického odpuzování na záporně nabitě membráně. Pokud je hlavním požadavkem nízká koncentrace soli v koncentrátu, lze doporučit použití Na_2SO_4 jako tažného roztoku (pro zkoncentrování potravinářských roztoků). Je to zdravotně nezávadná sloučenina a její migrace přes membránu je řádově nižší než migrace iontů NaCl . S ohledem ke koncentraci tažného roztoku lze konstatovat, že v experimentech, ve kterých byly použity roztoky NaCl , byly hodnoty $J_{s/v}$ nižší při vyšších koncentracích tažného roztoku (nejnižší hodnoty byly dosaženy při použití 3 mol/l NaCl). Specifické intenzity zpětného toku soli v experimentech při použití různých tažných roztoků jsou znázorněny na Obrázku 62.



Obrázek 62: Porovnání specifické intenzity zpětného toku soli pro různé tažné roztoky a zpracovávané kapaliny

Na základě naměřených hodnot je možné dospět k závěru, že použití tažného roztoku (NaCl) o vyšší koncentraci a tím potřebné kratší délce experimentu pro dosažení určitého stupně zkoncentrování, může být výhodnější než použití tažného roztoku nižší koncentrace. Hlavními výhodami takového výběru jsou nižší koncentrace soli (díky zpětnému toku soli) v zpracovávané kapalině a zkrácení procesu zkoncentrování (úspora energie a času).

Vsádkové zapojení tažného roztoku se ukázalo jako velmi nevýhodné podle téměř všech parametrů, a proto nebylo více studováno. Pro experimenty v budoucnosti lze doporučit použití tažného roztoku vyšší koncentrace, pro dosažení většího stupně zkoncentrování a nižší koncentrace soli v koncentrátu. Je nutné ale více prozkoumat vliv vysoké koncentrace na zpětný tok soli na začátku experimentu. V laboratoři byla potvrzená možnost bezproblémové přípravy tažného roztoku koncentrace NaCl 5 mol/l (v literatuře i více). Experimenty s tímto roztokem nebyly ale prováděny. Během pokusů o dosažení vysokých koncentrací zpracovávaného roztoku se musí věnovat zvláštní pozornost i k hodnotám tlaku (způsobené zvýšením viskozity roztoku při rostoucí koncentraci), protože hrozí poškození zařízení.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce je zaměřena na využití dopředné osmózy pro zkoncentrování vodných roztoků při použití modulu s dutými vlákny. Zvláštností použitého modulu je, že se jedná o prvně komerčně dostupný FO modul s biomimetickou membránou.

Na základě udělané rešerše byly v teoretické části práce popsány základní principy dopředné osmózy, nejdůležitější prvky zařízení pro FO a následně byly popsány možnosti uplatnění FO. Na začátku práce byly stručně popsány membránové separační procesy, jejich rozdělení a zařazení dopředné osmózy mezi ně. Potom byl popsán princip dopředné osmózy a jevy jako osmotický tlak, vnitřní a vnější koncentrační polarizace. Následně byly uvedeny jednotlivé základní prvky FO jako jsou membrány (a jejich rozdělení), tažné roztoky a ostatní nezbytné prvky zařízení pro FO. Popis byl zaměřen zejména na jednotlivé typy membrán dle jejich přípravy a různé volby tažných roztoků. Byl udělán historický přehled technologie FO, od prvotních experimentů s membránami původně určenými pro RO až po nejnovější biomimetické membrány. V části věnované využití FO byly zmíněny možnosti aplikace v ochraně životního prostředí, v zemědělství, v průmyslovém uplatnění zejména s důrazem na potravinářství.

V praktické části práce byla pozornost věnována především vlivu druhu a koncentraci tažného roztoku na výkonnostní parametry procesu FO. Velmi důležitým úkolem bylo sledování stavu FO modulu. Před začátkem vlastních experimentů s roztoky sacharidů byl proveden standardní solný test (test 1) kvůli ověření funkčnosti a aktuálního stavu modulu. Provedením solného testu 2, ve kterém bylo souproudé zapojení zpracovávané kapaliny (voda) a tažného roztoku, bylo zjištěno, že takové zapojení nemá zásadní vliv na parametry procesu. Další solné testy už byly standardně provedeny v protiproudém zapojení. Standardní solné testy byly prováděny průběžně po ukončení experimentální řady s jednotlivými zpracovávanými roztoky sacharidů a po posledním z experimentu. Téměř ve všech standardních solných testech byly hodnoty výkonnostních parametrů akceptovatelné. Výjimku tvořil test 8, který byl proveden po experimentu s jablečným moštem. Tyto výsledky potvrdily zanešení membrány během experimentu při zkoncentrování jablečného moštu a nutnost následného chemického čištění membrány. Hodnoty J_V při standardních solných testech (kromě testu 8) se pohybovaly od 8,101 l/m²h do 8,845 l/m²h, hodnoty zpětného toku soli J_S od 0,666 g/m²h do 0,860 g/m²h a hodnoty specifické intenzity zpětného toku soli $J_{S/V}$ 0,076 g/l do 0,104 g/l. Zjištěné rozdíly jsou jednak způsobené rozdílnými teplotami, při kterých byly testy prováděny, a navíc přítomností

bulin v modulu, které snižují efektivní plochu membrány. Nejdůležitější byl ale závěr, že během testování jednotlivých sacharidů, případně i jejich směsi ve formě modelového roztoku napodobujícím jablečný mošt, nedocházelo k zanášení membrány. Bude nutné v budoucnu analyzovat složky, které způsobují zanášení membrány při separaci reálného jablečného moštu. Dále byly provedeny solné testy s 1,0 mol/l tažným roztokem NaCl a 0,5 mol/l tažným roztokem Na₂SO₄. Na základě těchto experimentů byl zjištěn vliv použití různých tažných roztoků (vliv koncentrace a druhu soli). Při použití 1,0 mol/l NaCl byla hodnota J_V 11,917 l/m²h. Zvýšení hodnoty J_V pouze o přibližně 50 % při ale dvojnásobné koncentraci (hnačí síle) oproti testu s 0,5 mol/l NaCl lze vysvětlit interní koncentrační polarizací. V případě použití 0,5 mol/l Na₂SO₄ se výrazně změnila (poklesla) hodnota zpětného toku soli (J_S) 0,115 g/m²h oproti použití 0,5 mol/l NaCl (obdobně poklesla i specifická intenzita zpětného toku soli). Tento jev je způsoben elektrostatickým odpuzováním vícemocného aniontu negativně nabitou membránou v porovnání s jednomocným aniontem.

Po solných testech byly prováděny experimenty se sacharidy. V těchto testech byl postupně zahušťován roztok samotného sacharidu, kterými byly glukóza, sacharóza a fruktóza ($\omega=10\%$). Následně byl použit modelový roztok sacharidů, simulující složení jablečného moštu, a na závěr samotný jablečný mošt. K experimentům byly využity různé tažné roztoky. Nejprve byly použity roztoky NaCl s koncentrací (0,5 1,0 1,5 3,0 mol/l) v jednorůchodovém zapojení, roztoky NaCl (1,0 a 1,5 mol/l) zapojené s recirkulací (batch experimenty) a roztok Na₂SO₄ (1,0 mol/l).

Pro glukózu byly v experimentu s 0,5 mol/l NaCl dosaženy nízké hodnoty objemového koncentračního faktoru (VCF) po 70 minutách 1,37, hodnota intenzity objemového toku rozpouštědla byla také nízká (průměrná hodnota během experimentu byla 1,21 l/m²h) a z důvodu nízkého výkonu nebyl tento tažný roztok v dalších experimentech již používán.

Následné experimenty ukázaly, že zvýšení koncentrace tažného roztoku může být výhodné, protože požadovanou hodnotu VCF lze dosáhnout rychleji a výsledný produkt bude mít nižší koncentraci soli. Během experimentů bylo dosaženo hodnot VCF po 30 minutách 1,86 pro 1 mol/l, 2,95 pro 1,5 mol/l a 6,06 pro 3 mol/l.

Vsádkové zapojení tažného roztoku (batch experimenty) se ukázalo jako nevýhodné v porovnání s jednorůchodovým zapojením z hlediska délky procesu a koncentrace soli ve zpracovávané kapalině. Reálné využití FO by samozřejmě bylo s recirkulací tažného roztoku, ale po FO by následovala jeho regenerace a regenerovaný (zpětně zkoncentrovaný

tažný roztok) by se vracel na FO. V této práci nebyla ale regenerace tažného roztoku aplikována a bylo by vhodné v budoucnu propojit vhodnou metodu regenerace tažného roztoku s FO.

Roztok Na_2SO_4 byl vybrán za účelem zjištění vlivu použití vícemocné soli a ověření selektivity biomimetické membrány pro dvojmocné ionty. Bylo zjištěno, že koncentrace soli ve zpracovávané kapalině (produktu) je při stejné hodnotě VCF mnohonásobně nižší. Například při použití 1,0 mol/l NaCl při hodnotě VCF 2,20 byla koncentrace soli na výtoku z modulu 0,460 g/l a při použití 1,0 mol/l Na_2SO_4 (VCF 2,15 zanedbatelný rozdíl od experimentu s NaCl) byla koncentrace soli pouze 0,033 g/l.

Následovaly experimenty s roztoky sacharózy a fruktózy. V experimentech se sacharózou byl použit jako tažný roztok NaCl (1,0 mol/l a 3,0 mol/l) a roztok Na_2SO_4 (1,0 mol/l). V experimentu s fruktózou byl použit pouze roztok NaCl (1,0 mol/l). Roztok sacharózy při stejné hmotnostní koncentraci má nižší osmotický tlak než roztoky glukózy nebo fruktózy, čehož výsledkem je větší hnací síla. Například při použití 3,0 mol/l NaCl byla průměrná hodnota J_v během experimentu 7,201 l/m²h pro glukózu a 8,028 l/m²h pro sacharózu. Vliv volby tažného roztoku na výkonnostní parametry (J_v , J_s) procesu je podobný pro fruktózu jako v experimentech s glukózou.

Následovaly experimenty s modelovým roztokem, jehož složení mělo věrněji napodobovat složení jablečného moštu. V tomto případě také platí, že je koncentrace soli ve zpracovávané kapalině závislá na délce experimentu. Intenzity objemového toku rozpouštědla byly nepatrně nižší v porovnání se samotnými sacharidy, což mohlo být způsobeno celkově vyšší koncentrací sacharidů ve zpracovávané surovině na začátku experimentu.

Obsah NaCl v koncentrátu během experimentu s reálným jablečným moštem metodou, která byla v práci využita (měření vodivosti), nebylo možné spolehlivě určit. Dochází ke změnám koncentrací i ostatních látek, což vede k ovlivnění hodnoty vodivosti. Jelikož je obsah soli v produktu pro možnost použití v potravinářství velmi důležitý, bylo by vhodné v budoucnu provést experimenty, doplněné vhodnější analytickou metodou. Hodnota Brix reálného jablečného moštu byla pomocí 3,0 mol/l NaCl zvýšená z původních 11,50° na 34,39°, což znamená, že bylo dosaženo přibližně trojnásobného zahuštění moštu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] PALATÝ, Zdeněk a Bohumil BERNAUER. *Membránové procesy*. Vyd. 1. V Praze: Vysoká škola chemicko-technologická, 2012, 282 s. ISBN 978-80 7080-808-5.
- [2] NOVÁK, Luboš (ed.). *Elektromembránové procesy*. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2014, 308 s. ISBN 978-80-7080-865 8.
- [3] MIKULÁŠEK, Petr. *Tlakové membránové procesy*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2013, 254 s. ISBN 978-80-7080-862 7.
- [4] *Osmosis*. Online. In: Encyclopedia Britannica. 2025. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/osmosis>.
- [5] *Osmotic pressure*. Online. In: Encyclopedia Britannica. 2025. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/osmotic-pressure>.
- [6] *Difference Between Osmotic Pressure and Osmotic Potential*. Online. In: Biologyreader. 2025. Dostupné z: <https://biologyreader.com/difference-between-osmotic-pressure-and-osmotic-potential.html>.
- [7] PARTANEN, Lauri J. a PARTANEN, Jaakko I. Traceable Values for Activity and Osmotic Coefficients in Aqueous Sodium Chloride Solutions at Temperatures from 273.15 to 373.15 K up to the Saturated Solutions. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2020/11/12, roč. 65, č. 11, s. 5226-5239. ISSN 0021-9568. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.jced.0c00402>.
- [8] GUENDOUZI, M.EL; MOUNIR, A a DINANE, A. Water activity, osmotic and activity coefficients of aqueous solutions of Li₂SO₄, Na₂SO₄, K₂SO₄, (NH₄)₂SO₄, MgSO₄, MnSO₄, NiSO₄, CuSO₄, and ZnSO₄ at T=298.15K. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2003, roč. 35, č. 2, s. 209-220. ISSN 0021-9614. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0021-9614\(02\)00315-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0021-9614(02)00315-4).
- [9] MULDER, Marcel. *Basic principles of membrane technology*. 2. vyd. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. ISBN 0792342488.
- [10] TOUATI, Khaled a AND TADEO, Fernando. Green energy generation by pressure retarded osmosis: State of the art and technical advancement—review: State of the art and technical advancement—review. *International Journal of Green Energy*. 2017/03/16, roč. 14, č. 4, s. 337-360. ISSN 1543-5075. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1255633>.
- [11] LEE, K.L.; BAKER, R.W. a LONSDALE, H.K. Membranes for power generation by pressure-retarded osmosis. *Journal of Membrane Science*. 1981, roč. 8, č. 2, s. 141-171. ISSN 0376-7388. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)82088-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)82088-8).

- [12] SADRZADEH, Mohtada; BHINDER, Amrit a SHABANI, Simin. Effect of Internal and External Concentration Polarizations on the Performance of Forward Osmosis Process. In: Rijeka: IntechOpen, 2017. ISBN 978-953-51-3922-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71343>.
- [13] GRAY, Gordon T.; MCCUTCHEON, Jeffrey R. a ELIMELECH, Menachem. Internal concentration polarization in forward osmosis: role of membrane orientation: role of membrane orientation. *Desalination*. 2006, roč. 197, č. 1, s. 1-8. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.003>.
- [14] CATH, Tzahi Y.; CHILDRESS, Amy E. a ELIMELECH, Menachem. Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science*. 2006, roč. 281, č. 1, s. 70-87. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.048>.
- [15] *High flow porous membranes for separating water from saline solutions* (Spojené státy americké). University of California Berkeley. Přihl.: 1960-11-29. Uděl.: 1964-05-12. US3133132A
- [16] *Asymmetric forward osmosis membranes* (Spojené státy americké). Hydration Technologies. Přihl.: 2006-04-07. Uděl.: 2007-10-25. WO2006110497A3.
- [17] ONG, Rui Chin; CHUNG, Tai-Shung; HELMER, Bradley J. a DE WIT, Jos. S. Novel Cellulose Esters for Forward Osmosis Membranes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012/12/12, roč. 51, č. 49, s. 16135-16145. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ie302654h>.
- [18] ONG, Rui Chin a CHUNG, Tai-Shung. Fabrication and positron annihilation spectroscopy (PAS) characterization of cellulose triacetate membranes for forward osmosis. *Journal of Membrane Science*. 2012, roč. 394-395, s. 230-240. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.12.046>.
- [19] LU, Peng; GAO, Yanshan; UMAR, Ahmad; ZHOU, Tuantuan; ZHANG, Zhang et al. Recent Advances in Cellulose-Based Forward Osmosis Membrane. *Science of Advanced Materials*. 2015/10/01, roč. 7, s. 2182-2192. Dostupné z: <https://doi.org/10.1166/sam.2015.2269>.
- [20] WANG, Kai Yu; CHUNG, Tai-Shung a QIN, Jian-Jun. Polybenzimidazole (PBI) nanofiltration hollow fiber membranes applied in forward osmosis process. *Journal of Membrane Science*. 2007, roč. 300, č. 1, s. 6-12. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.05.035>.
- [21] FLANAGAN, Michael F. a ESCOBAR, Isabel C. Novel charged and hydrophilized polybenzimidazole (PBI) membranes for forward osmosis. *Journal of Membrane Science*. 2013, roč. 434, s. 85-92. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.039>.

- [22] SETIAWAN, Laurentia; WANG, Rong; LI, Kang a FANE, Anthony G. Fabrication of novel poly(amide-imide) forward osmosis hollow fiber membranes with a positively charged nanofiltration-like selective layer. *Journal of Membrane Science*. 2011, roč. 369, č. 1, s. 196-205. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.11.067>.
- [23] WANG, Kai Yu; ONG, Rui Chin a CHUNG, Tai-Shung. Double-Skinned Forward Osmosis Membranes for Reducing Internal Concentration Polarization within the Porous Sublayer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010/05/19, roč. 49, č. 10, s. 4824-4831. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ie901592d>.
- [24] ZHOU, Lan; YU, Hang; YAMIN HOSSAIN, Md; CHEN, Fen; DU, Chunhui et al. Fabrication of high-performance forward osmosis membrane based on asymmetric integrated nanofiber porous support induced by a new controlled photothermal induction method. *Chemical Engineering Journal*. 2023, roč. 470, s. 144366. ISSN 1385-8947. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144366>.
- [25] KADHOM, Aya; AL-FURAIJI, Mustafa a ABUDI, Zaidun. *Evaluation of Thin Film Composite Forward Osmosis Membranes: Effect of Polyamide Preparation Conditions: Effect of Polyamide Preparation Conditions*. 2020/10/15. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/dwes-2020-33>.
- [26] ALMANSOURI, Hamza E.; EDOKALI, Mohamed a ABU SEMAN, Mazrul N. Flat sheet thin film composite forward osmosis membranes for water treatment and purification: A review on modification techniques and concepts: A review on modification techniques and concepts. *Desalination and Water Treatment*. 2024, roč. 320, s. 100815. ISSN 1944-3986. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100815>.
- [27] YIP, Ngai Yin; TIRAFERRI, Alberto; PHILLIP, William A.; SCHIFFMAN, Jessica D. a ELIMELECH, Menachem. High Performance Thin-Film Composite Forward Osmosis Membrane. *Environmental Science & Technology*. 2010/05/15, roč. 44, č. 10, s. 3812-3818. ISSN 0013-936X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/es1002555>.
- [28] HAN, Jian-Chen; XING, Xiao-Yan; WANG, Jiang a WU, Qing-Yun. Preparation and Properties of Thin-Film Composite Forward Osmosis Membranes Supported by Cellulose Triacetate Porous Substrate via a Nonsolvent-Thermally Induced Phase Separation Process. Online. *Membranes*. 2022, roč. 12, č. 4. ISSN 2077-0375. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/membranes12040412>. [cit. 2025-04-16].
- [29] BUI, Nhu-Ngoc; LIND, Mary Laura; HOEK, Eric M.V. a MCCUTCHEON, Jeffrey R. Electrospun nanofiber supported thin film composite membranes for engineered osmosis. *Journal of Membrane Science*. 2011, roč. 385-386, s. 10-19. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.08.002>.
- [30] ZHANG, Qing; ZHOU, Rui; PENG, Xue; LI, Nan a DAI, Zhao. Development of Support Layers and Their Impact on the Performance of Thin Film Composite

- Membranes (TFC) for Water Treatment. Online. *Polymers*. 2023, roč. 15, č. 15. ISSN 2073-4360. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/polym15153290>. [cit. 2025-04-16].
- [31] DUONG, Phuoc H.H.; ZUO, Jian a CHUNG, Tai-Shung. Highly crosslinked layer-by-layer polyelectrolyte FO membranes: Understanding effects of salt concentration and deposition time on FO performance: Understanding effects of salt concentration and deposition time on FO performance. *Journal of Membrane Science*. 2013, roč. 427, s. 411-421. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.10.014>.
- [32] DECHER, Gero. Fuzzy Nanoassemblies: Toward Layered Polymeric Multicomposites: Toward Layered Polymeric Multicomposites. *Science*. 1997, roč. 277, č. 5330, s. 1232. Dostupné z: <http://www.jstor.org/stable/2892480>.
- [33] SAREN, Qi; QIU, Chang Quan a TANG, Chuyang Y. Synthesis and Characterization of Novel Forward Osmosis Membranes based on Layer-by-Layer Assembly. *Environmental Science & Technology*. 2011/06/15, roč. 45, č. 12, s. 5201-5208. ISSN 0013-936X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/es200115w>.
- [34] VINCENT, Julian F V; BOGATYREVA, Olga A; BOGATYREV, Nikolaj R; BOWYER, Adrian a PAHL, Anja-Karina. Biomimetics: its practice and theory: its practice and theory. *J R Soc Interface*. 2006, roč. 3, č. 9, s. 471-482. ISSN 1742-5689. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rsif.2006.0127>.
- [35] Peter Agre. Online. In: . Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Peter-Agre>.
- [36] AGRE, Peter; BONHIVERS, Mélanie a BORGNA, Mario J. The Aquaporins, Blueprints for Cellular Plumbing Systems *. *Journal of Biological Chemistry*. 1998/06/12, roč. 273, č. 24, s. 14659-14662. ISSN 0021-9258. Dostupné z: <https://doi.org/10.1074/jbc.273.24.14659>.
- [37] KAUFMAN, Y.; GRINBERG, S.; LINDER, C.; HELDMAN, E.; GILRON, J. et al. Towards supported bolaamphiphile membranes for water filtration: Roles of lipid and substrate: Roles of lipid and substrate. *Journal of Membrane Science*. 2014, roč. 457, s. 50-61. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2014.01.036>.
- [38] ZHAO, Yang; QIU, Changquan; LI, Xuesong; VARARATTANAVECH, Ardcharaporn; SHEN, Wenming et al. Synthesis of robust and high-performance aquaporin-based biomimetic membranes by interfacial polymerization-membrane preparation and RO performance characterization. *Journal of Membrane Science*. 2012, roč. 423-424, s. 422-428. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.08.039>.
- [39] REDDY, Appanu Sushvanth; KALLA, Sarita a MURTHY, Z.V.P. Biomimetic membranes: Advancements and applications — A minireview: Advancements and applications — A minireview. *Bioresource Technology Reports*. 2022, roč. 18, s.

101047. ISSN 2589-014X. Dostupné z:
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101047>.

- [40] HARDY, Gregory J.; NAYAK, Rahul a ZAUSCHER, Stefan. Model cell membranes: Techniques to form complex biomimetic supported lipid bilayers via vesicle fusion: Techniques to form complex biomimetic supported lipid bilayers via vesicle fusion. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2013, roč. 18, č. 5, s. 448-458. ISSN 1359-0294. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cocis.2013.06.004>.
- [41] KRUSE, Elisabeth; UEHLEIN, Norbert a KALDENHOFF, Ralf. The aquaporins. *Genome Biol.* 2006, roč. 7, č. 2, s. 206. ISSN 1474-760X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/gb-2006-7-2-206>.
- [42] Membrane for filtering of water (Dánsko). Aquaporin A/S. Přihl.: 19.5.2006. Uděl.: 23.11.2006. WO2006122566A2.
- [43] REN, Jian a MCCUTCHEON, Jeffrey R. A new commercial biomimetic hollow fiber membrane for forward osmosis. *Desalination*. 2018, roč. 442, s. 44-50. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.04.015>.
- [44] LI, Zhenyu; VALLADARES LINARES, Rodrigo; BUCS, Szilárd; FORTUNATO, Luca; HÉLIX-NIELSEN, Claus et al. Aquaporin based biomimetic membrane in forward osmosis: Chemical cleaning resistance and practical operation: Chemical cleaning resistance and practical operation. *Desalination*. 2017, roč. 420, s. 208-215. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.015>.
- [45] Aquaporin. Online. Aquaporin. 2025. Dostupné z: <https://aquaporin.com/>.
- [46] GE, Qingchun; LING, Mingming a CHUNG, Tai-Shung. Draw solutions for forward osmosis processes: Developments, challenges, and prospects for the future: Developments, challenges, and prospects for the future. *Journal of Membrane Science*. 2013, roč. 442, s. 225-237. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.03.046>.
- [47] ACHILLI, Andrea; CATH, Tzahi Y. a CHILDRESS, Amy E. Selection of inorganic-based draw solutions for forward osmosis applications. *Journal of Membrane Science*. 2010, roč. 364, č. 1, s. 233-241. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.08.010>.
- [48] PHUNTSO, Sherub; SHON, Ho Kyong; HONG, Seungkwan; LEE, Sangyoup a VIGNESWARAN, Saravanamuthu. A novel low energy fertilizer driven forward osmosis desalination for direct fertigation: Evaluating the performance of fertilizer draw solutions: Evaluating the performance of fertilizer draw solutions. *Journal of Membrane Science*. 2011, roč. 375, č. 1, s. 172-181. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.038>.

- [49] GE, Qingchun; LING, Mingming a CHUNG, Tai-Shung. Draw solutions for forward osmosis processes: Developments, challenges, and prospects for the future: Developments, challenges, and prospects for the future. *Journal of Membrane Science*. 2013, roč. 442, s. 225-237. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.03.046>.
- [50] GARCIA-CASTELLO, Esperanza M.; MCCUTCHEON, Jeffrey R. a ELIMELECH, Menachem. Performance evaluation of sucrose concentration using forward osmosis. *Journal of Membrane Science*. 2009, roč. 338, č. 1, s. 61-66. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2009.04.011>.
- [51] MCCUTCHEON, Jeffrey R.; MCGINNIS, Robert L. a ELIMELECH, Menachem. Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance. *Journal of Membrane Science*. 2006, roč. 278, č. 1, s. 114-123. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.10.048>.
- [52] Process for the demineralization of water (Spojené státy americké). Individual. Přihl.: 28.8.1962. Uděl.: 2.3.1965. US3171799A.
- [53] CHEKLI, Laura; PHUNTSO, Sherub; SHON, Ho Kyong; VIGNESWARAN, Saravanamuthu; KANDASAMY, Jaya et al. A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications. *Desalination and Water Treatment*. 2012/04/01, roč. 43, č. 1-3, s. 167-184. ISSN 1944-3994. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.672168>.
- [54] KRAVATH, Richard E. a DAVIS, Joanna A. Desalination of sea water by direct osmosis. *Desalination*. 1975, roč. 16, č. 2, s. 151-155. ISSN 0011-9164. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)82089-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)82089-5).
- [55] KESSLER, J.O. a MOODY, C.D. Drinking water from sea water by forward osmosis. *Desalination*. 1976, roč. 18, č. 3, s. 297-306. ISSN 0011-9164. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)84119-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)84119-3).
- [56] YONG, Jui Shan; PHILLIP, William A. a ELIMELECH, Menachem. Coupled reverse draw solute permeation and water flux in forward osmosis with neutral draw solutes. *Journal of Membrane Science*. 2012, roč. 392-393, s. 9-17. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2011.11.020>.
- [57] BOWDEN, Katie S.; ACHILLI, Andrea a CHILDRESS, Amy E. Organic ionic salt draw solutions for osmotic membrane bioreactors. *Bioresource Technology*. 2012, roč. 122, s. 207-216. ISSN 0960-8524. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.06.026>.
- [58] STONE, Mark L.; RAE, Cathy; STEWART, Frederick F. a WILSON, Aaron D. Switchable polarity solvents as draw solutes for forward osmosis. *Desalination*. 2013,

roč. 312, s. 124-129. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.034>.

- [59] JESSOP, Philip G.; KOZYCZ, Lisa; RAHAMI, Zahra Ghoshouni; SCHOENMAKERS, Dylan; BOYD, Alaina R. et al. Tertiary amine solvents having switchable hydrophilicity. *Green Chemistry*. 2011, roč. 13, č. 3, s. 619-623. ISSN 1463-9262. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C0GC00806K>.
- [60] LING, Ming Ming; CHUNG, Tai-Shung a LU, Xianmao. Facile synthesis of thermosensitive magnetic nanoparticles as “smart” draw solutes in forward osmosis. *Chemical Communications*. 2011, roč. 47, č. 38, s. 10788-10790. ISSN 1359-7345. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C1CC13944D>.
- [61] HAN, Hui; LEE, Jim Yang a LU, Xianmao. Thermoresponsive nanoparticles + plasmonic nanoparticles = photoresponsive heterodimers: facile synthesis and sunlight-induced reversible clustering: facile synthesis and sunlight-induced reversible clustering. *Chemical Communications*. 2013, roč. 49, č. 55, s. 6122-6124. ISSN 1359-7345. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C3CC42273A>.
- [62] CHEN, Shucheng; GUO, Chun; ZHAO, Qipeng a LU, Xianmao. One-Pot Synthesis of CO₂-Responsive Magnetic Nanoparticles with Switchable Hydrophilicity. *Chemistry - A European Journal*. 2014/10/20, roč. 20. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/chem.201403411>.
- [63] LI, Dan; ZHANG, Xinyi; YAO, Jianfeng; ZENG, Yao; SIMON, George P. et al. Composite polymer hydrogels as draw agents in forward osmosis and solar dewatering. *Soft Matter*. 2011, roč. 7, č. 21, s. 10048-10056. ISSN 1744-683X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C1SM06043K>.
- [64] LING, Ming Ming; WANG, Kai Yu a CHUNG, Tai-Shung. Highly Water-Soluble Magnetic Nanoparticles as Novel Draw Solute in Forward Osmosis for Water Reuse. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010/06/16, roč. 49, č. 12, s. 5869-5876. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ie100438x>.
- [65] LI, Dan; ZHANG, Xinyi; YAO, Jianfeng; SIMON, George P. a WANG, Huanting. Stimuli-responsive polymer hydrogels as a new class of draw agent for forward osmosis desalination. *Chemical Communications*. 2011, roč. 47, č. 6, s. 1710-1712. ISSN 1359-7345. Dostupné z: <https://doi.org/10.1039/C0CC04701E>.
- [66] SUWAILEH, Wafa; PATHAK, Nirenkumar; SHON, Hokyong a HILAL, Nidal. Forward osmosis membranes and processes: A comprehensive review of research trends and future outlook: A comprehensive review of research trends and future outlook. *Desalination*. 2020, roč. 485, s. 114455. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114455>.
- [67] VOGEL, Jörg; GAD, Esben a HELIX-NIELSEN, Claus. Manuscript - Versatility of Aquaporin Based Membranes for Water Treatment. *Proceedings of the Water*

- Environment Federation*. 2017/01/01, roč. 2017, s. 4228-4235. Dostupné z: <https://doi.org/10.2175/193864717822156064>.
- [68] *Toyobo MC Membrane Module for Forward Osmosis*. Online. In: Toyobo-mc. 2025. Dostupné z: https://www.toyobo-mc.jp/wordpress/wp-content/uploads/2023/10/Brochure_TMC_FO.pdf.
- [69] NOLLET; DELATOUR, Louis François a GUÉRIN, Hippolyte-Louis. *Leçons de physique expérimentale*. Paris: Chez Hippolyte-Louis Guérin, & Louis-François Delatour, rue S. Jacques, à S. Thomas d'Aquin, 1764. Dostupné z: <https://hdl.handle.net/2027/gri.ark:/13960/t3034z64c> (v.6).
- [70] LOEB, SIDNEY. The Loeb-Sourirajan Membrane: How It Came About: ACS Symposium Series. In: *Synthetic Membranes*. 153. AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1981, s. 1-9. ISBN 9780841206229. Dostupné z: <https://doi.org/doi:10.1021/bk-1981-0153.ch001>.
- [71] PENDERGAST, MaryTheresa M.; NOWOSIELSKI-SLEPOWRON, Marek S. a TRACY, John. Going big with forward osmosis. *Desalination and Water Treatment*. 2016, roč. 57, č. 55, s. 26529-26538. ISSN 1944-3986. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/19443994.2016.1168581>.
- [72] AWAD, Abdelrahman M.; JALAB, Rem; MINIER-MATAR, Joel; ADHAM, Samer; NASSER, Mustafa S. et al. The status of forward osmosis technology implementation. *Desalination*. 2019, roč. 461, s. 10-21. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.03.013>.
- [73] REN, Jian a MCCUTCHEON, Jeffrey R. A new commercial thin film composite membrane for forward osmosis. *Desalination*. 2014, roč. 343, s. 187-193. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.11.026>.
- [74] AWAD, Abdelrahman M.; JALAB, Rem; MINIER-MATAR, Joel; ADHAM, Samer; NASSER, Mustafa S. et al. The status of forward osmosis technology implementation. *Desalination*. 2019, roč. 461, s. 10-21. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.03.013>.
- [75] FERRARI, Federico; PIJUAN, Maite; RODRIGUEZ-RODA, Ignasi a BLANDIN, Gaetan. Exploring Submerged Forward Osmosis for Water Recovery and Pre-Concentration of Wastewater before Anaerobic Digestion: A Pilot Scale Study: A Pilot Scale Study. Online. *Membranes*. 2019, roč. 9, č. 8. ISSN 2077-0375. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/membranes9080097>.
- [76] SUN, Yan; TIAN, Jiayu; ZHAO, Zhiwei; SHI, Wenxin; LIU, Dongmei et al. Membrane fouling of forward osmosis (FO) membrane for municipal wastewater treatment: A comparison between direct FO and OMBR: A comparison between direct FO and OMBR. *Water Research*. 2016, roč. 104, s. 330-339. ISSN 0043-1354. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.039>.

- [77] LI, Jing; NIU, Aping; LU, Chun-Jiao; ZHANG, Jing-Hui; JUNAID, Muhammad et al. A novel forward osmosis system in landfill leachate treatment for removing polycyclic aromatic hydrocarbons and for direct fertigation. *Chemosphere*. 2017, roč. 168, s. 112-121. ISSN 0045-6535. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.10.048>.
- [78] SÁNCHEZ-ARÉVALO, Carmen M.; GARCÍA-SUAREZ, Laura; CAMILLERI-RUMBAU, Maria Salud; VOGEL, Jorg; ÁLVAREZ-BLANCO, Silvia et al. Treatment of industrial textile wastewater by means of forward osmosis aiming to recover dyes and clean water. *Heliyon*. 2024, roč. 10, č. 23, s. e40742. ISSN 2405-8440. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40742>.
- [79] KORENAK, Jasmina; HÉLIX-NIELSEN, Claus; BUKŠEK, Hermina a PETRINIĆ, Irena. Efficiency and economic feasibility of forward osmosis in textile wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*. 2019, roč. 210, s. 1483-1495. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.130>.
- [80] CODAY, Bryan D.; ALMARAZ, Nohemi a CATH, Tzahi Y. Forward osmosis desalination of oil and gas wastewater: Impacts of membrane selection and operating conditions on process performance: Impacts of membrane selection and operating conditions on process performance. *Journal of Membrane Science*. 2015, roč. 488, s. 40-55. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.059>.
- [81] HICKENBOTTOM, Kerri L.; HANCOCK, Nathan T.; HUTCHINGS, Nathan R.; APPLETON, Eric W.; BEAUDRY, Edward G. et al. Forward osmosis treatment of drilling mud and fracturing wastewater from oil and gas operations. *Desalination*. 2013, roč. 312, s. 60-66. ISSN 0011-9164. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.05.037>.
- [82] TAKAHASHI, Tomoki; YASUKAWA, Masahiro a MATSUYAMA, Hideto. Highly condensed polyvinyl chloride latex production by forward osmosis: Performance and characteristics: Performance and characteristics. *Journal of Membrane Science*. 2016, roč. 514, s. 547-555. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.04.012>.
- [83] LAW, Jeng Yih a MOHAMMAD, Abdul Wahab. Osmotic concentration of succinic acid by forward osmosis: Influence of feed solution pH and evaluation of seawater as draw solution: Influence of feed solution pH and evaluation of seawater as draw solution. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2018, roč. 26, č. 5, s. 976-983. ISSN 1004-9541. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.10.003>.
- [84] CHO, Young Hoon; LEE, Hee Dae a PARK, Ho Bum. Integrated Membrane Processes for Separation and Purification of Organic Acid from a Biomass Fermentation Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2012/08/01, roč. 51, č. 30, s. 10207-10219. ISSN 0888-5885. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/ie301023r>.

- [85] CUI, Yue a CHUNG, Tai-Shung. Pharmaceutical concentration using organic solvent forward osmosis for solvent recovery. *Nature Communications*. 2018, roč. 9, č. 1, s. 1426. ISSN 2041-1723. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03612-2>.
- [86] WANG, Kai Yu; TEOH, May May; NUGROHO, Adrian a CHUNG, Tai-Shung. Integrated forward osmosis–membrane distillation (FO–MD) hybrid system for the concentration of protein solutions. *Chemical Engineering Science*. 2011, roč. 66, č. 11, s. 2421-2430. ISSN 0009-2509. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.03.001>.
- [87] PETROTOS, Konstantinos B.; QUANTICK, Peter a PETROPAKIS, Heracles. A study of the direct osmotic concentration of tomato juice in tubular membrane – module configuration. I. The effect of certain basic process parameters on the process performance. *Journal of Membrane Science*. 1998, roč. 150, č. 1, s. 99-110. ISSN 0376-7388. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(98\)00216-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388(98)00216-6).
- [88] TRISHITMAN, Das; NEGI, Pradeep Singh a RASTOGI, Navin Kumar. Concentration of beetroot juice colorant (betalains) by forward osmosis and its comparison with thermal processing. *LWT*. 2021, roč. 145, s. 111522. ISSN 0023-6438. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111522>.
- [89] RODRIGUEZ-SAONA, LUIS E.; GIUSTI, M. MÓNICA; DURST, ROBERT W. a WROLSTAD, RONALD E. DEVELOPMENT AND PROCESS OPTIMIZATION OF RED RADISH CONCENTRATE EXTRACT AS POTENTIAL NATURAL RED COLORANT. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2001/07/01, roč. 25, č. 3, s. 165-182. ISSN 0145-8892. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.2001.tb00452.x>.
- [90] NAYAK, Chetan A. a RASTOGI, Navin K. Forward osmosis for the concentration of anthocyanin from *Garcinia indica* Choisy. *Separation and Purification Technology*. 2010, roč. 71, č. 2, s. 144-151. ISSN 1383-5866. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2009.11.013>.
- [91] POPPER, K; CAMIRAND, WM; NURY, F a STANLEY, WL. Dialyzer concentrates beverages. *Food Eng.* 1966, roč. 38, č. 4, s. 102-104.
- [92] BABU, B. Ravindra; RASTOGI, N.K. a RAGHAVARAO, K.S.M.S. Effect of process parameters on transmembrane flux during direct osmosis. *Journal of Membrane Science*. 2006, roč. 280, č. 1, s. 185-194. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.01.018>.
- [93] WROLSTAD, RONALD E.; MCDANIEL, MINA R.; DURST, ROBERT W.; MICHEALS, NANCY; LAMPI, KEITH A. et al. Composition and Sensory Characterization of Red Raspberry Juice Concentrated by Direct-Osmosis or Evaporation. *Journal of Food Science*. 1993/05/01, roč. 58, č. 3, s. 633-637. ISSN 0022-1147. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1993.tb04344.x>.

- [94] HAMEED, Khalid. Concentration of Orange Juice Using Forward Osmosis Membrane Process. *Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering*. 2013/12/30, roč. 14, s. 71-79. Dostupné z: <https://doi.org/10.31699/IJCPE.2013.4.8>.
- [95] WANG, Haihua; ZHANG, Yi; REN, Songping; PEI, Jianfei a LI, Zhenyu. Athermal concentration of apple juice by forward osmosis: Process performance and membrane fouling propensity: Process performance and membrane fouling propensity. *Chemical Engineering Research and Design*. 2022, roč. 177, s. 569-577. ISSN 0263-8762. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.11.023>.
- [96] AN, Xiaochan; HU, Yunxia; WANG, Ning; ZHOU, Zongyao a LIU, Zhongyun. Continuous juice concentration by integrating forward osmosis with membrane distillation using potassium sorbate preservative as a draw solute. *Journal of Membrane Science*. 2019, roč. 573, s. 192-199. ISSN 0376-7388. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.010>.
- [97] ALVAREZ, V.; ALVAREZ, S.; RIERA, F.A. a ALVAREZ, R. Permeate flux prediction in apple juice concentration by reverse osmosis. *Journal of Membrane Science*. 1997, roč. 127, č. 1, s. 25-34. ISSN 0376-7388. Dostupné z: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(96\)00285-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0376-7388(96)00285-2).
- [98] BARDHAN, Ananya; SUBBIAH, Senthilmurugan a MOHANTY, Kaustubha. Optimisation of multi-component inorganic salt composition as draw solute for preparation of concentrated tea extract using forward osmosis process. *Food and Bioproducts Processing*. 2023, roč. 138, s. 126-138. ISSN 0960-3085. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.01.007>.
- [99] DAUČÍK, Karol. *Chemické laboratorne tabuľky*. Bratislava: ALFA, 1984. ISBN 63-302 84.
- [100] Technical procedures manual: Brix Measurement. In: . United States Department of Agriculture, 2011.
- [101] TIKHONOV, N.V.; POPOV, A.M. a TIKHONOV, V.V. Investigation of Changes in Conductivity of Juice during the Evaporation Process. *Procedia Chemistry*. 2014, roč. 10, s. 414-418. ISSN 1876-6196. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.069>.
- [102] KARADENIZ, Feryal a EKŞI, Aziz. Sugar composition of apple juices. *European Food Research and Technology*. 2002, roč. 215, č. 2, s. 145-148. ISSN 1438-2385. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00217-002-0505-2>.