

Application of Poly(vinyl chloride)-Based Membrane as the Separator in Supercapacitors: Synthesis and Performance Studies

Available in: <http://jips.ippi.ac.ir>

Iran. J. Polym. Sci. Technol.

(Persian),

Vol. 38, No. 4, 285-295

October-November 2025

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2026.35779.2426

F. Koozehgar Kaleji¹, Gh. Bakeri², M. Soleimani³

1. Advanced Membrane Research Lab, Babol Noshirvani University of Technology, P.O. Box: 489, Babol, Iran
2. Fuel Cell Electrochemistry and Advanced Material Research Laboratory, P.O. Box: 489, Babol, Iran
3. Faculty of Engineering Modern Technologies, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, Iran

Received: 20 September 2025, accepted: 20 April 2026

ABSTRACT

Hypothesis: Polyvinyl chloride (PVC)-based membranes have limited hydrophilicity and so far, have not been used as the separator in supercapacitors. Despite their favorable chemical stability and low cost, the inherent limitations of these membranes (including hydrophobicity) could limit their application in supercapacitor-based energy storage systems. This study investigates the utilization of pure PVC membrane in this application and evaluates its performance.

Methods: In this study, 11 wt% pure PVC membrane was fabricated using the phase inversion method and various tests including contact angle measurement, average pore size, porosity and water flux were performed to determine its properties. Then, the electrochemical tests EIS, CV and GCD were performed to determine the ion transport resistance of the membrane and its performance stability as the separator in a supercapacitor.

Findings: The contact angle of 86.17° indicated moderate hydrophobicity of the membrane, while the average pore size (5.7 nm) and high porosity (91.8%) facilitated the ion transport in the membrane structure. In addition, the suitable pure water flux (87.5 L/m²/h) confirmed the proper permeability of the membrane. SEM images of the membrane cross-section showed porosity with fingerlike pores, confirming the proper permeability of the membrane. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) showed low resistance for ionic conductivity of the membrane (0.17 ohms), confirming the suitability of the membrane for application in supercapacitors. Furthermore, the membrane was assembled in a supercapacitor consisting of two copper plates coated with activated carbon and its performance was investigated using cyclic voltammetry (CV) and galvanostatic charge-discharge (GCD) tests, which indicated reversibility and stability in charging and discharging of the supercapacitor. These results demonstrate the high potential of pure PVC membrane as an efficient and cost-effective separator in supercapacitors.

Keywords:

supercapacitor,
poly(vinyl chloride) polymer
ionic conductivity,
hydrophilicity,
membrane separator

(*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bakeri@nit.ac.ir

Please cite this article using:

Koozehgar Kaleji F., Bakeri Gh., and Soleimani M., Application of Poly(vinyl chloride)-Based Membrane as the Separator in Supercapacitors: Synthesis and Performance Studies, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 285-295, 2025.

کاربرد غشای بر پایه پلی (وینیل کلرید) به عنوان جداکننده در ابرخازن‌ها: سنتز و بررسی عملکرد

فائزه کوزه گر کالجی^۱، غلامرضا باکری^{۱،۲}، محمد سلیمانی^۳

۱- بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۴۸۴

۲- بابل، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، آزمایشگاه تحقیقاتی فناوری های نوین غشایی، صندوق پستی ۴۸۴

۳- آمل، دانشگاه تخصصی فناوری های نوین آمل، دانشکده مهندسی فناوری های نوین، آزمایشگاه تحقیقاتی الکتروشیمی

پیل سوختی و مواد پیشرفته، کد پستی ۴۶۱۵۶۶۴۶۱۶

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۳۱

دسترسی پذیر در نشانی: <http://jips.ippi.ac.ir>

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و هشتم، شماره ۴،

صفحه ۲۹۵-۲۸۵، ۱۴۰۴

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2026.35779.2426

چکیده

فرضیه: غشاهای بر پایه پلی (وینیل کلرید) (PVC) آب دوستی محدودی دارند و تاکنون به عنوان جداکننده در ابرخازن‌ها استفاده نشده‌اند. با وجود پایداری شیمیایی مطلوب و قیمت کم، محدودیت‌های ذاتی این غشاها (از جمله آب‌گریزی) می‌تواند کاربرد آن را در سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی بر پایه ابرخازن محدود کند. در این مطالعه استفاده از غشا PVC خالص در این کاربرد و تحلیل عملکردی آن بررسی شده است.

روش‌ها: غشای PVC خالص ۱۱٪ وزنی با استفاده از روش وارونگی فاز ساخته و آزمون‌های مختلفی از جمله اندازه‌گیری زاویه تماس، اندازه متوسط حفره‌ها، تخلخل و شار آب برای تعیین ویژگی‌های آن انجام شد. سپس، آزمون‌های الکتروشیمیایی CV، EIS و GCD برای تعیین مقاومت انتقال یون غشا و پایداری عملکرد آن به عنوان جداکننده در یک ابرخازن انجام شد.

یافته‌ها: زاویه تماس $86/17^\circ$ ، آب‌گریزی متوسط غشا را نشان داد، در حالی که اندازه متوسط حفره‌ها (۵/۷ nm) و تخلخل زیاد (۹۱/۸٪) باعث آسانی انتقال یون در ساختار غشا می‌شود. همچنین شار عبور آب خالص مطلوب ($87/5 \text{ L/m}^2 \cdot \text{h}$) نفوذپذیری مناسب غشا را تأیید کرد. تصاویر SEM از سطح مقطع غشا، تخلخل با حفره‌های انگشتی شکل را نشان داد که تأییدکننده نفوذپذیری مناسب غشاست. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مقاومت رسانایی یونی کم غشا را نشان داد ($0/17 \Omega$) که مؤید مناسب بودن غشا برای کاربرد در ابرخازن‌هاست. همچنین، غشا در یک ابرخازن شامل دو صفحه مسی پوشش‌یافته با کربن فعال نصب شده و عملکرد آن با استفاده از آزمون‌های ولتسنجی چرخه‌ای (CV) و شارژتخلیه گالوانواستاتیکی (GCD) بررسی شد که نتایج حاکی از برگشت‌پذیری و پایداری در پرشدن و تخلیه ابرخازن بود. این نتایج، پتانسیل زیاد غشا PVC خالص را به عنوان جداکننده‌ای مؤثر و مقرون‌به‌صرفه در ابرخازن‌ها نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

ابرخازن،
پلی (وینیل کلرید)،
رسانایی یونی،
آب دوستی،
جداکننده غشایی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

bakeri@nit.ac.ir

مقدمه

افزایش تقاضا برای سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی به‌عنوان یکی از ابزارهای توسعه سامانه‌های تولید انرژی (نظیر انرژی هیدروژن، انرژی باد و سایر انواع انرژی تجدیدپذیر) توسعه مطلوب فناوری‌هایی را ضروری می‌کند که دسترسی به ابرخازن‌هایی با قابلیت توان بیشتر و چرخه عمر بسیار طولانی‌تر را ممکن سازد [۱،۲]. ابرخازن، دستگاه ذخیره‌سازی انرژی نسل مدرن با ظرفیت زیاد است که فاصله عملکردی بین خازن و باتری پرشدنی را پر می‌کند. یک ابرخازن الکتروشیمیایی، ظرفیت ویژه زیادی دارد و از نظر چگالی توان و چرخه عمر عملکرد، مزایای قابل توجهی نسبت به باتری دارد. ساختار ابرخازن از دو الکتروود تشکیل شده است که به‌کمک یک جداکننده با نفوذپذیری یونی و یک الکتروولیت که قابلیت انتقال بار بین دو الکتروود را دارد، جدا شده‌اند. وقتی به الکتروودها ولتاژ اعمال می‌شود، آن‌ها باردار شده و یون‌های موجود در محلول الکتروولیت، لایه‌های دوگانه‌ای در اطراف الکتروودها ایجاد می‌کنند. این لایه‌ها، قطبیتی مخالف قطبیت الکتروودها دارند. اگر یون‌ها از این لایه‌های دوگانه عبور کنند، شبه‌خازن شکل می‌گیرد.

جداکننده برای جداسازی الکتروود مثبت و منفی و جلوگیری از اتصال کوتاه استفاده می‌شود که علت اصلی تخلیه ابرخازن است و با وجود ماهیت عایق الکتریکی، باید ویژگی انتقال یون خوبی داشته باشد. به این معنی که اجازه دهد تا یون‌های الکتروولیت از آن عبور کنند. عملکرد ایمن و مؤثر جداکننده مستلزم برخورداری از ویژگی‌هایی مانند ساختار متخلخل، وزن کم، استحکام مکانیکی خوب، رسانندگی یونی زیاد، ماهیت آب‌دوست، پایداری شیمیایی و عدم اشتعال‌پذیری است [۳]. اگرچه جداکننده در پدیده‌های الکتروشیمیایی، حین ذخیره‌سازی انرژی در ابرخازن شرکت نمی‌کند، اما نقش مهمی در کل فرایند دارد [۴].

رسانندگی یونی جداکننده به مقدار تخلخل و قابلیت جذب الکتروولیت آن بستگی دارد. افزایش جذب الکتروولیت موجب افزایش رسانایی یونی و در نتیجه افزایش چگالی توان و انرژی ابرخازن می‌شود. با وجود این، افزایش بیش از حد تخلخل می‌تواند به کاهش استحکام مکانیکی منجر شود. افزون بر این، جداکننده باید از پایداری ابعادی برخوردار بوده و با الکتروودها واکنش شیمیایی ندهد و در محدوده پتانسیل عملکردی، پایدار باشد. مواد استفاده‌شده برای ساخت جداکننده‌ها معمولاً شامل الیاف‌نیافته (مانند پنبه، نایلون و سلولوز)، پلیمرهای سنتزی (مانند پلی‌پروپیلن (PP)، پلی‌اتیلن (PE)، پلی (تترافلوئورواتیلن) (PTFE)، پلی (وینیلیدن دی‌فلوئورید) (PVDF) و پلی‌ایمید (PI)) و بسترهای طبیعی مانند چوب و لاستیک هستند [۵].

مقاومت داخلی زیاد عملکرد ابرخازن را محدود می‌کند. مقاومت داخلی ابرخازن به مقاومت تماس الکتروولیت و الکتروود، مقاومت الکتروولیت و رسانندگی یون‌ها در جداکننده بستگی دارد. ماده جداکننده یک ماده نیمه‌تراوا است که وظیفه انتقال یون بین الکتروودها را برعهده دارد بنابراین، انتقال یون‌های الکتروولیت در ضخامت جداکننده مهم است [۶]. ترکیب، ساختار و ضخامت جداکننده عوامل مهمی برای دستیابی به عملکرد کارایی ابرخازن هستند. ترشوندگی و رسانندگی یونی جداکننده باید به اندازه کافی زیاد باشد، در غیر این صورت توان خروجی ابرخازن محدود خواهد شد. جداکننده‌های تجاری استفاده‌شده در ابرخازن‌ها عموماً از سلولوز و پلی‌پروپیلن تهیه می‌شوند [۷].

خواص و غلظت الکتروولیت اثر مستقیمی بر عملکرد ابرخازن‌ها از جمله ظرفیت خازنی ویژه و چگالی انرژی سلول‌ها دارد [۸،۹]. مطالعات نشان داده‌اند، افزایش غلظت الکتروولیت معمولاً موجب افزایش ظرفیت خازنی و چگالی انرژی می‌شود. با وجود این بسیاری از جداکننده‌های متداول مبتنی بر سلولوز قابلیت تحمل الکتروولیت‌های غلیظ، مانند H_2SO_4 را ندارند. به همین دلیل، استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی مانند الیاف شیشه، پلی‌پروپیلن و پشم شیشه به‌عنوان جداکننده‌ها در گذشته رایج بوده است [۱۰،۱۱]. این موضوع اهمیت انتخاب ترکیب مناسب جداکننده و الکتروولیت را در طراحی ابرخازن‌ها برجسته می‌کند.

اگرچه مطالعات متعددی درباره جنبه‌های مختلف ابرخازن‌ها انجام شده است. اما تاکنون استفاده از غشاهای جداکننده بر پایه PVC در ابرخازن‌ها بررسی نشده است. Xie و همکاران [۱۲] با استفاده از دو ماده کربنی مختلف، کربن فعال و کربن فعال غنی‌شده با نیتروژن به‌عنوان الکتروود و غشای PVDF به‌عنوان جداکننده، ابرخازن ساختند. غشای PVDF با فرایند وارونگی فاز ساخته شد و با استفاده از پلی (وینیل الکل) (PVA) و گلو تار آلدهید (GA) اصلاح شد. غشا دارای ساختار نامتقارن بود و به‌طور عمده از منافذ لانه زنبوری تشکیل شده بود و یک فضای الکتروولیت کافی و کانال‌هایی برای انتقال یون فراهم می‌کرد. همچنین، کاهش زاویه تماس برای غشای PVDF اصلاح‌شده (از $73/5^\circ$ تا 61°) نشان‌دهنده کاهش انرژی آزاد سطح و افزایش آب‌دوستی است و کاهش تخلخل غشاها (۶۴/۴٪) تا (۷۲/۴٪) پس از اصلاح، به منافذ خالی نسبت داده شد که به‌کمک مولکول‌های PVA و GA متصل شده‌اند.

Winternheimer و همکاران [۱۳] فناوری تولید غشای پلی‌پروپیلن (PP) متخلخل با ساختار دوماحوری را توسعه دادند. این نوع غشا، به‌دلیل خواص مکانیکی مطلوب از جمله مقاومت زیاد در برابر تخریب و

راه را برای اصلاح و افزایش کارایی آن باز کند. هدف اصلی در این پژوهش بررسی عملکرد غشای PVC خالص به عنوان جداکننده در ابرخازن است، ضمن اینکه طبق بررسی های انجام شده، مطالعه ای در این زمینه انجام نشده است. غشا PVC با غلظت ۱۱٪ وزنی با استفاده از روش وارونگی فاز تهیه و خواص ساختاری آن نظیر اندازه متوسط حفره ها، تخلخل و آب دوستی ارزیابی شد. سپس، آزمون های الکتروشیمیایی نظیر تعیین مقاومت انتقال یون، آزمون ولت سنجی چرخه ای و آزمون پرشدن/تخلیه گالوانوستاتیک برای بررسی خواص غشا انجام شد. ساختار سطح مقطع غشا نیز با آزمون SEM ارزیابی شد. با توجه به ویژگی های فیزیکی و شیمیایی (نظیر تخلخل زیاد، پایداری شیمیایی مناسب و قیمت کم) غشای PVC می تواند در کاربری نام برده گزینه ای قابل توجه باشد. ضمن اینکه می توان با اصلاح غشا با نانوذرات، عملکرد آن را بهبود بخشید که در مطالعات آتی بررسی خواهد شد.

تجربی

مواد

در این پژوهش از پلیمر پلی(وینیل کلرید، PVC) نوع (E6834) محصول پتروشیمی اروند و N-متیل-۲-پیرولیدون (NMP) با خلوص ۹۳/۹۹٪ محصول شرکت Eastman چین به عنوان حلال پلیمر استفاده شد.

دستگاه ها و روش ها

تهیه غشا

ابتدا غشاهایی با غلظت های مختلف (۱۱، ۱۳ و ۱۵٪ وزنی PVC) تهیه و ارزیابی شد. از آنجا که هدف، دستیابی به غشایی با ضخامت کمتر و تخلخل و رسانندگی یونی بیشتر بود، غلظت ۱۱٪ وزنی به عنوان گزینه بهینه انتخاب شد. به منظور ساخت غشا، محلول پلیمری پلی(وینیل کلرید) در حلال NMP تهیه شد. بدین منظور پلیمر و حلال در ظرف شیشه ای در بسته به مدت ۲۴ h تحت گرمای ملایم و با همزن مغناطیسی مخلوط شد تا انحلال کامل پلیمر حاصل شود. پس از آماده سازی محلول پلیمری در دمای ۵۰ °C، محلول پیش از قالب ریزی تا دمای محیط سرد شد تا در شرایط هم دما با حمام انعقاد استفاده شود. در ادامه و به منظور حذف حباب های هوا، به مدت ۳۰ min در حمام فراصوت گاززدایی شد. در ادامه، غشا با فرایند قالب ریزی و سپس تغییر فاز و با استفاده از آب به عنوان عامل

کشش، عملکرد قابل توجهی به عنوان جداکننده در باتری ها و خازن های الکتروشیمیایی نشان می دهد. همچنین، این جداکننده ها از پایداری عملکردی بلندمدت در شرایط عملیاتی برخوردارند. از محدودیت های غشاهای پلی پروپیلن می توان به ترشوندگی کم و حفظ رطوبت اشاره کرد که می تواند نفوذ یون ها و جریان الکترولیت را کاهش دهد و در نتیجه، عملکرد و ظرفیت خازنی سلول را تحت تأثیر قرار دهد. این مشکلات در غشاهای PP بیشتر دیده می شود و اهمیت انتخاب مواد و طراحی مناسب غشا را نشان می دهد. Szubzda و همکاران [۱۴] راه حلی ارائه دادند که در آن از فناوری پلاσμα با انرژی کم برای اصلاح سطحی پارچه های نافته پلیمری مانند پلی آمید (PA) و پلی پروپیلن (PP) استفاده شد. نتایج آزمون ها نشان داد، این اصلاح سطحی، افزون بر پاکسازی مؤثر سطوح، باعث بهبود ترشوندگی جداکننده ها با الکترولیت می شود. این بهبود در ترشوندگی به کاهش مقاومت داخلی در ابرخازن ها و در نهایت افزایش چشمگیر توان دستگاه های ذخیره انرژی منجر شد. Karabelli و همکاران [۱۵] جداکننده درشت متخلخل بر پایه هوموپلیمر وینیلیدن فلوئورید (VDF) را با روش وارونگی فاز و بهره گیری از سامانه حلال-ناحلال ارائه کردند. نتایج نشان داد، در میان پلیمرهای فلوئوردار، هوموپلیمر PVDF مناسب ترین گزینه برای کاربرد در ابرخازن ها به شمار می آید. این جداکننده، رسانندگی یونی بیشتری (18 mS cm^{-1}) نسبت به نمونه های تجاری بر پایه سلولوز و به ویژه نسبت به Celgard نشان داد. همچنین، پژوهشگران اشاره کردند، با کاهش مقدار تخلخل برای بهبود استحکام مکانیکی جداکننده و سازگاری با الکترولیت مایع، می توان بدون کاهش محسوس در رسانندگی، به خواص مکانیکی مطلوب دست یافت. Yu و همکاران [۱۶] نشان دادند، غشای درشت متخلخل پوسته تخم مرغی می تواند به عنوان جداکننده مؤثر در ابرخازن ها عمل کند. این غشا دارای ساختار متخلخل مطلوب، دمای تجزیه زیاد (بیش از ۲۰۰ °C)، مقدار تورم کم و استحکام مکانیکی مناسب است. همچنین، وجود درشت تخلخل هایی با اندازه منافذ بین $1 \mu\text{m}$ تا $3 \mu\text{m}$ به وضوح قابل مشاهده است. این ساختار متخلخل، مسیریابی با مقاومت کم برای انتشار سریع یون ها فراهم می کند که در نهایت، موجب بهبود عملکرد الکتروشیمیایی ابرخازن می شود.

در مطالعات انجام شده درباره کاربرد غشا به عنوان جداکننده در ابرخازن، تمرکز روی غشاهای کامپوزیتی یا اصلاح شده بوده است. از آنجا که اصلاح یا کامپوزیت کردن غشا هزینه های تولید را افزایش می دهد، بسیار مناسب خواهد بود که غشای خالص را بتوان در این کاربری استفاده کرد. همچنین PVC، پلیمری ارزان و در دسترس است، ضمن اینکه عملکرد مطلوب غشای PVC در ابرخازن می تواند

محاسبه شد:

$$r_m = \sqrt{\frac{8\eta l Q (2.9 - 1.75\varepsilon)}{\varepsilon A \Delta P}} \quad (3)$$

در این معادله، η ، گرانروی آب ($Pa \cdot s$)؛ $(\lambda/9 \times 10^{-1})$ ؛ Q ، سرعت آب عبوری از غشا (m^3/s)؛ ε ، تخلخل غشا؛ l ، ضخامت غشا (m)؛ A ، سطح غشا (m^2) و ΔP ، اختلاف فشار اعمال شده روی غشا (Pa) است [۱۸، ۱۹].

زاویه تماس آب: برای اندازه‌گیری زاویه تماس بین قطره آب و سطح غشا، از دستگاه آزمون زاویه تماس Sharif Solar, CA-500 M ساخت ایران استفاده شد. در این آزمایش، ابتدا غشا به یک صفحه شیشه‌ای چسبانده شد. سپس، قطره‌ای از مایع مرجع (آب) روی سطح غشا قرار داده شد. زاویه تماس بین مایع و سطح غشا با زاویه‌سنج اندازه‌گیری شد. برای افزایش دقت و صحت نتایج، از حداقل پنج نقطه مختلف روی سطح غشا استفاده شد.

رسانندگی یونی غشا: این مشخصه غشا با روش طیف‌سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) در ولتاژ مدار باز به کمک دستگاه ZIVE SP1, Wonatech ساخت کره جنوبی اندازه‌گیری شد. ابتدا غشا به شکل دایره‌هایی با قطر $3/5$ cm برش داده شده و در محلول ۶ مولار KOH به مدت ۲۴ h در دمای اتاق غوطه‌ور شد تا حفره‌های غشا از محلول پر شود. سپس، مقاومت غشا با استفاده از سلول دو الکترودی از جنس فولاد زنگ‌نزن اندازه‌گیری شد. بدین صورت که غشا بین دو الکترودی سلول قرار داده شده، سلول نصب می‌شود. در پیکربندی آزمون دو الکترودی، اتصالات مربوط به الکترودی مرجع و کمکی به یک سمت الکترودی و اتصالات مربوط به الکترودی کار به سمت دیگر الکترودی متصل شد. ابتدا دستگاه الکتروشیمیایی به رایانه وصل شده و در نرم‌افزار EC lab تنظیمات اولیه برای آزمون EIS انجام شد و مقاومت در بازه بسامدی ۱ Hz تا ۱۰۰ kHz اندازه‌گیری شد. داده‌های امپدانس، ثبت شده و نرم‌افزار نمودار نایکویست را رسم کرد. نتایج حاصل از امپدانس با مدار معادل نرم‌افزار EC Lab برازش شده و داده‌های R_m از این برازش استخراج شد. در ادامه، مقدار R_m در معادله (۴) قرار داده شده و مقدار رسانندگی (رسانندگی یونی غشا) محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{1}{R_m A} \quad (4)$$

که σ ، رسانندگی یونی (S/cm)؛ l ، ضخامت غشا (cm)؛ R_m ، مقاومت غشا (Ω) و A ، سطح غشا (cm^2) است [۲۰، ۲۱].

منعقدکننده تهیه شد. پس از گذشت ۲۴ h، غشای تشکیل شده از حمام آب خارج و خشک شد.

مشخصه‌یابی غشا

پس از ساخت غشا و به منظور بررسی ویژگی‌های آن، آزمون‌های متعددی برای ارزیابی خواص فیزیکی و عملکردی انجام شد که در ادامه شرح داده شده‌اند.

ضخامت غشا: برای دستیابی به نتیجه مقبول، ضخامت غشا در حداقل پنج نقطه اندازه‌گیری و متوسط نتایج گزارش شد. این آزمون با میکرومتر مدل Insize precision 3109-25A انجام شد. ضخامت غشا در تعیین اندازه متوسط حفره‌ها و رسانش یونی غشا استفاده می‌شود. تخلخل غشا: تخلخل غشا (ε) معیاری از فضای خالی در ساختار غشا و قابلیت آن در جذب آب است که به طور طبیعی روی مقاومت انتقال یون در ساختار غشا اثر مستقیم دارد. برای اندازه‌گیری تخلخل، غشاها پس از مرطوب شدن در آب به صورت نوارهای باریک برش داده شده وزن غشای مرطوب (w_1) اندازه‌گیری شد. در ادامه و پس از خشک کردن غشا در دمای $60^\circ C$ ، وزن غشا خشک (w_2) اندازه‌گیری شد. تخلخل غشا با استفاده از معادله (۱) [۱۷] و با در نظر گرفتن چگالی آب خالص ($\rho_w: 0.998 g/cm^3$) و چگالی پلیمر ($\rho_p: 1.25 g/cm^3$) محاسبه شد:

$$\varepsilon = \frac{w_1 - w_2}{\frac{\rho_w}{w_1 - w_2} + \frac{w_2}{\rho_p}} \quad (1)$$

تعیین اندازه حفره‌های غشا: از آزمون عبور آب خالص برای تعیین اندازه متوسط حفره‌های غشا استفاده شد. در این آزمون، ابتدا نمونه‌های غشا به شکل دایره با قطر 5 cm برش و در مدول غشایی قرار داده شدند. سپس، جریان آب خالص با فشار ۱ bar بر سطح غشا اعمال و حجم جریان آب عبوری از غشا در مدت زمان مشخص اندازه‌گیری شد. شار جریان آب با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد:

$$J = \frac{V}{1000 t A} \quad (2)$$

در این معادله، J ، شار جریان آب ($m^3/m^2/h$)؛ V ، حجم آب عبوری (L)؛ A ، مساحت غشا (m^2) و t ، زمان آزمون (h) است. در ادامه و با استفاده از نتایج آزمون عبور آب خالص، متوسط اندازه حفره‌های غشا (r_m) با استفاده از معادله Guerout-Elford-Ferry (معادله ۳)

آزمون‌های ارزیابی غشا ارائه شده است.

مقدار تخلخل و اندازه منافذ از عوامل مؤثر بر عملکرد جداکننده‌های ابرخازن به‌شمار می‌روند. براساس مطالعات پیشین، تخلخل بیش از ۵۵٪ برای فراهم‌سازی جذب مناسب الکترولیت و رسانندگی یونی زیاد ضروری است [۲۴]. اندازه منافذ جداکننده نیز باید کوچک‌تر از اندازه ذرات فعال الکتروود باشد (کمتر از $1 \mu m$) تا از عبور ناخواسته آن‌ها و تماس مستقیم بین الکترودهای مثبت و منفی جلوگیری کند [۲۵]. همچنین، منافذ بسیار ریز می‌توانند به افزایش مقاومت انتقال یون منجر شوند. بنابراین دستیابی به تعادل بین این دو عامل ضروری است [۲۶]. مطابق با نتایج جدول ۱، زاویه تماس $86/17^\circ$ نشان‌دهنده خاصیت نیمه آب‌دوستی غشاست که ترشدن غشا و نفوذ الکترولیت به منافذ غشا و در ادامه، انتقال یون‌ها از طریق الکترولیت داخل منافذ را آسان می‌کند. شار آب خالص غشا نیز $87/5 L/m^2.h$ بوده که حاکی از ساختار متخلخل و مقاومت کم غشا در برابر عبور جریان است. همچنین تخلخل زیاد غشا ($91/8$) و میانگین اندازه منافذ $5/7 nm$ نیز به افزایش ظرفیت رسانندگی یونی و بهبود عملکرد الکتروشیمیایی کمک می‌کند، زیرا مسیرهای بیشتری را برای انتقال یون از میان ساختار غشا فراهم می‌کند. در مجموع، نتایج ارزیابی‌ها نشان می‌دهد، غشای مطالعه‌شده از نظر ساختاری قابلیت استفاده به‌عنوان جداکننده در ابرخازن را دارد. این مقادیر در مقایسه با محدوده بهینه گزارش‌شده برای جداکننده‌های ابرخازنی در الکترولیت‌های قلیایی (نظیر $6 M KOH$) نشان‌دهنده ساختاری مناسب برای نفوذ و انتقال یکنواخت یون‌ها در راستای سطح مقطع غشاست. برای اطمینان از صحت و تکرارپذیری داده‌ها، هر یک از آزمون‌های ارزیابی حداقل سه مرتبه تکرار شدند.

تصویر SEM سطح مقطع غشای PVC در شکل ۱ ساختار نامتقارنی را نشان می‌دهد که از یک لایه سطحی متراکم و یک لایه زیرین متخلخل تشکیل شده است. چنین ساختاری نقش مهمی در عملکرد غشا ایفا می‌کند. شکل‌گیری این ساختار تحت تأثیر دو عامل مهم در فرایند وارونگی فاز شامل پایداری ترمودینامیکی و گرانروی محلول پلیمری قرار دارد و این عوامل با کنترل سرعت تبادل بین حلال و

آزمون ولت‌سنجی چرخه‌ای: این آزمون روش الکتروشیمیایی پرکاربرد است که به‌منظور ارزیابی عملکرد و پایداری ابرخازن، پاسخ جریان به ولتاژهای (یا پتانسیل‌ها) متفاوت را اندازه‌گیری می‌کند و اطلاعاتی درباره ظرفیت ابرخازن و فرایندهای پرشدن و تخلیه ارائه می‌دهد [۲۲]. در این آزمون و مشابه آزمون EIS، غشا پس از غوطه‌وری در محلول الکترولیت، در یک ابرخازن و بین دو الکتروود از جنس مس پوشش‌یافته با کربن فعال و نیکل/کبالت/منگنز اکسید قرار می‌گیرد و در پنجره پتانسیل $0-1/2 V$ و مقدار روبش $50 mV/s$ به‌صورت رفت و برگشت، نمودار CV رسم می‌شود.

آزمون پرشدن/تخلیه گالوانوستاتیک: این آزمون روشی برای ارزیابی عملکرد ابرخازن مانند ظرفیت خازنی، چگالی انرژی، چگالی توان، مقاومت متوالی معادل و پایداری چرخه است [۲۲]. ابرخازن مانند آزمون قبل ساخته شده و در پنجره پتانسیل $0-1/2 V$ ، آزمون به‌صورت چرخه‌ای و هر چرخه شامل دو مرحله روی ابرخازن انجام شد. بدین صورت که ابتدا ابرخازن با یک جریان ثابت پر می‌شود و در ادامه با همان مقدار جریان تخلیه می‌شود. در این آزمون با دانستن وزن ماده بارگذاری و جریان $0/0008 A$ ، چگالی جریان محاسبه می‌شود. در ادامه، ظرفیت ابرخازن را می‌توان با استفاده از معادله (۵) محاسبه کرد [۲۳]:

$$C = \frac{I \times \Delta t}{m \times \Delta V} \quad (5)$$

در این معادله C، ظرفیت ویژه ($F g^{-1}$)؛ I، جریان تخلیه (A)؛ ΔV ، ولتاژ اعمالی روی ابرخازن (V)؛ m، جرم ماده رسانای بارگذاری شده روی صفحات الکتروود ابرخازن (g) و Δt ، زمان تخلیه (s) است [۲۲]. این آزمون همچنین می‌تواند معرف پایداری ابرخازن در چرخه‌های پرشدن و تخلیه باشد که در خصوص این پژوهش، نمایشگری از پایداری غشا در کاربرد ابرخازن خواهد بود.

میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM): این آزمون با میکروسکوپ SEM مدل SNE 4500M ساخت کره برای بررسی ساختار سطح مقطع غشا انجام شد.

نتایج و بحث

غشای صفحه تخت پلی(وینیل کلرید) با روش وارونگی فاز تهیه و خواص آن با آزمون‌های مختلف ارزیابی شد. همچنین، عملکرد آن به‌عنوان جداکننده در ابرخازن بررسی شد. در جدول ۱ نتایج

جدول ۱- نتایج آزمون‌های ارزیابی غشا.

Table 1. The characterization test results of the membrane.

Contact angle ($^\circ$)	Pure water flux ($L/m^2/hr$)	Porosity (%)	Average hole pore (nm)
86.17 ± 4.45	87.5	91.8	5.7

بسامدی ۱ Hz تا ۱۰۰ kHz ارائه شد. ضخامت متوسط غشاها $13/5 \mu\text{m}$ اندازه‌گیری شد و برای سه نمونه غشا مقادیر R_m ، ۰/۱۷۶۲، ۰/۱۷۵۳ و ۰/۱۷۰۲ به دست آمد. بنابراین می‌توان گفت، نتایج هر سه غشا در یک محدوده است. برای تعیین رسانندگی یونی غشا، آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) شش مرتبه تکرار شد و از متوسط نتایج مشابه برای محاسبه رسانش یونی غشا استفاده شد. با توجه به متوسط داده‌ها، رسانندگی یونی غشا $8/07 \text{ mS/cm}$ به دست آمد که تقریباً در یک محدوده ثابت قرار دارد. همچنین تخلخل $91/8\%$ بیانگر فراهم بودن مسیر یونی مؤثر در غشاست. نتایج آزمون EIS برای محاسبه مقاومت یونی غشا و در ادامه، مقدار رسانش غشا (محاسبه شده با معادله ۴) در جدول ۲ آمده است.

پس از ارزیابی خواص غشا و به منظور بررسی عملکرد آن در یک سامانه واقعی، غشا در یک ابرخازن بررسی شده و رفتار الکتروشیمیایی آن ارزیابی شد. بدین منظور آزمون‌های ولت‌سنجی چرخه‌ای (CV) و پرشدن-تخلیه گالوانوستاتیک (GCD) انجام شدند. نتایج آزمون ولت‌سنجی چرخه‌ای برای غشا PVC ۱۱٪ در پنجره پتانسیل $0-1/2 \text{ V}$ و مقدار رویش 50 mV/s در شکل ۳ نشان داده شده که رفتار، با توجه به منحنی CV که پیک اکسایش از خود نشان می‌دهد، نشان‌دهنده رفتار شبه‌خازنی است که با نوع الکتروُد، از جنس مس پوشش‌یافته با کربن فعال و نیکل/کبالت/منگنز اکسید تطابق دارد. محدوده اکسایش در محدوده $0/6-0/2$ قرار دارد و با وجود اکسیدهای فلزی در الکتروُد همخوانی دارد، چون اکسیدهای فلزی، رفتار اکسایشی یا شبه‌خازنی دارند. همچنین با توجه به سطح داخل نمودار، این رفتار نشان‌دهنده این است که غشا عملکرد رسانندگی یونی خود را به خوبی انجام داده است [۳۱، ۳۲].

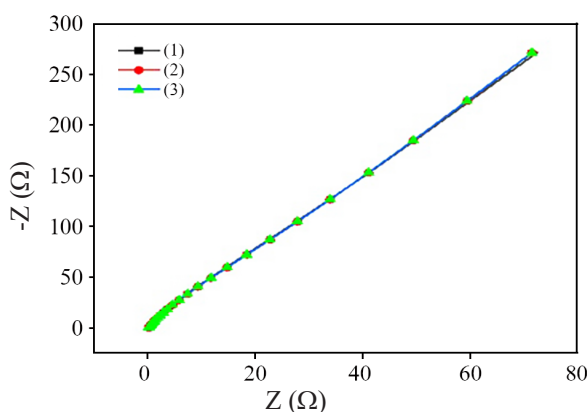
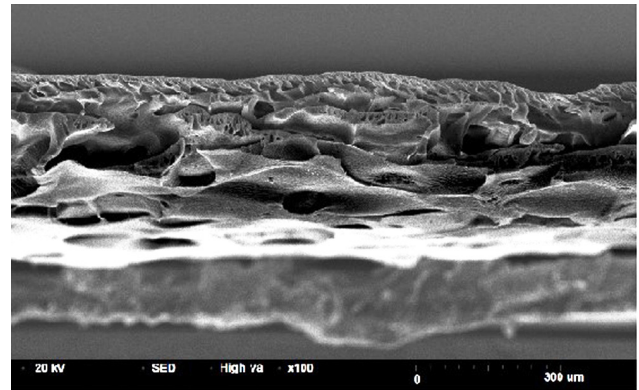


Fig. 2. The Nyquist plot for PVC membranes.



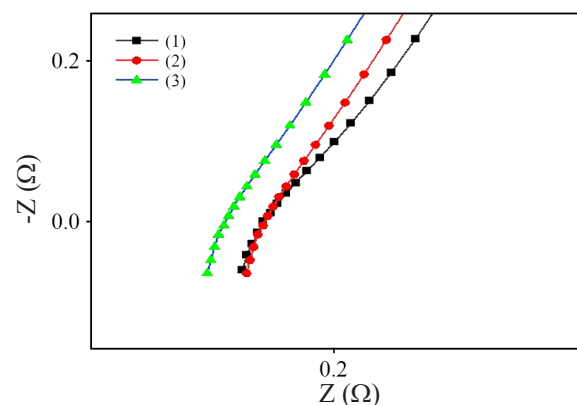
شکل ۱- تصویر SEM سطح مقطع غشا.

Fig. 1. SEM image of the membrane cross-section.

منعقدکننده، فرایند جداسازی فازی را رسانندگی می‌کند [۲۷]. مشاهده حفره‌های انگشتی بیانگر فرایند وارونگی فازی سریع است که می‌توان آن را به غلظت کم محلول پلیمری و گرانروی آن ارتباط داد. چنین ساختاری می‌تواند موجب افزایش شار عبوری و کاهش مقاومت در برابر انتقال یون شود. زیرا مسیر عبور یون از ساختار غشا به صورت مستقیم خواهد بود [۲۸].

برای تعیین مقاومت یونی غشا، آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) شش مرتبه تکرار شد و از متوسط نتایج مشابه برای محاسبه رسانش یونی غشا استفاده شد. در شکل ۲، نمودار نایکویست برای سه نمونه غشا در شرایط یکسان و در بازه بسامدی ۱ Hz تا ۱۰۰ kHz نشان داده شده است [۲۹].

سه منحنی امپدانس، برای سه نمونه مختلف از غشا PVC ۱۱٪ در مجاورت الکترولیت KOH ۶ مولار و در دمای اتاق و در بازه



شکل ۲- نمودار نایکویست غشاهای PVC.

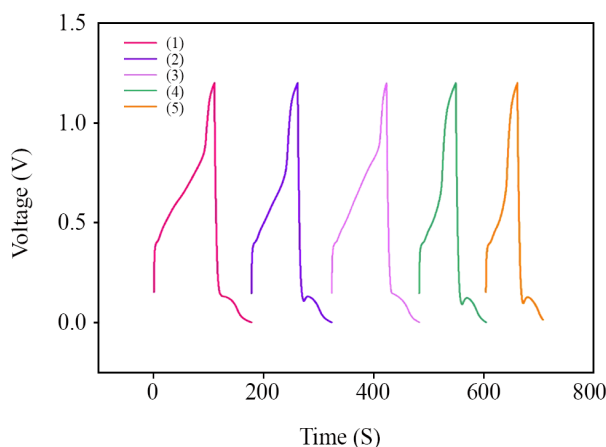
جدول ۳ مقایسه‌ای از رسانش یونی غشای PVC با سایر مطالعات مشابه را ارائه می‌دهد. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد، غشای PVC با رسانندگی یونی $8/07 \text{ mS/cm}$ و ضخامت $13/5 \mu\text{m}$ عملکردی متوسط دارد، اما نسبت به برخی نمونه‌های پلیمری مانند PAES-Q-1.1 با رسانندگی $2/02 \text{ mS/cm}$ و PVDF/PVP با رسانندگی $1/80 \text{ mS/cm}$ بهتری نشان داده است. این مسئله حاکی از آن است که استفاده از الکترولیت قوی مانند 6 M KOH در ترکیب با PVC می‌تواند به افزایش قابل توجه انتقال یونی در غشا منجر شود. درباره جداکننده‌های پلیمری بر پایه PLA، نتایج نشان داد، اصلاح سطح با پلاسما هوا موجب افزایش ترشوندگی، جذب آب و کاهش زاویه تماس شده است. این تغییرات به افزایش رسانندگی یونی در محیط $1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ منجر شد، به گونه‌ای که رسانایی غشای RF-PLA در این الکترولیت به 110 mS/cm رسید که بسیار بیشتر از مقدار آن در الکترولیت $1 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$ (معادل 6 mS/cm) است. این اختلاف عملکرد نشان می‌دهد، اصلاح پلاسما به تنهایی کافی نیست و تنها در ترکیب با الکترولیت مناسب می‌تواند حداکثر کارایی را فراهم کند. بنابراین، نوع الکترولیت نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد انتقال یونی ایفا می‌کند [۲۱]. مقایسه بین غشای PVC در محیط آبی و غشای PVDF در محیط غیرآبی نیز مؤید همین موضوع است. نمونه PVDF با ضخامت بیشتر ($0/03 \text{ mm}$) و استفاده از ترکیب TEABF₄/AN به عنوان الکترولیت، رسانندگی یونی بیشتری (18 mS/cm) نسبت به نمونه PVC (با ضخامت $0/135 \text{ mm}$) رسانندگی $8/07 \text{ mS/cm}$ ارائه داد. این بهبود را می‌توان به سازگاری

جدول ۳- نتایج آزمون EIS غشا.

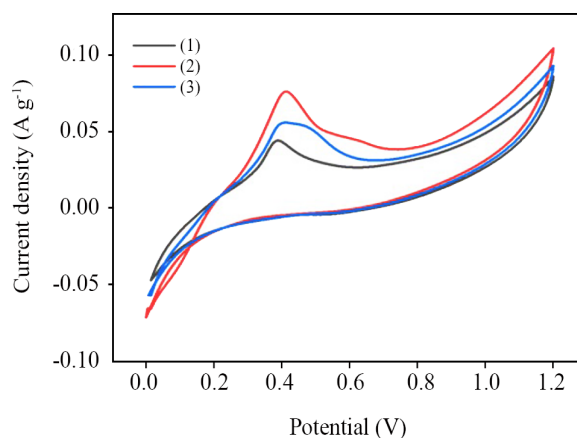
Table 2. The EIS test results of the membrane.

Electrolyte	Volume resistance (Ω) [30]	Membrane thickness (μm)	Ion conductivity (mS/cm)
6 M KOH	0.1739	13.5	8.07

نتایج آزمون پرشدن-تخلیه گالوانوستاتیکی (GCD) ابرخازن برای غشا PVC ۱۱٪ در محدوده ولتاژ $0-1/2 \text{ V}$ و چگالی جریان پرشدن-تخلیه از حالت ایده آل نشان دهنده ترکیبی از رفتار شبه خازنی و سهم کوچکی از رفتار خازن دولایه الکتریکی است. مدت زمان تخلیه در حدود $60/96 \text{ s}$ اندازه‌گیری شد و با استفاده از این مقدار و معادله (۵)، ظرفیت خازنی معادل $46/22 \text{ F/g}$ (فاراد بر گرم) محاسبه شد. با توجه به نتایج رسانندگی یونی به دست آمده برای غشا و نیز عملکرد این غشا به عنوان جداکننده در ابرخازن سکه‌ای ساخته شده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد، ساختار پیشنهادی می‌تواند گزینه مناسبی برای استفاده در ابرخازن‌ها به عنوان جداکننده باشد [۳۲،۳۳]. در مجموع، منحنی GCD نشان‌دهنده رفتار پرشدن-تخلیه پایدار ابرخازن است و آن را برای کاربردهایی نظیر ذخیره‌سازی انرژی مناسب می‌سازد؛ جایی که ظرفیت متوسط همراه با ساختار مکانیکی پایدار اهمیت دارد.



شکل ۴- نتایج آزمون GCD ابرخازن دارای غشا PVC به عنوان جداکننده. Fig. 4. The GCD test results for the supercapacitor with PVC membrane as the separator.



شکل ۳- نتایج آزمون CV ابرخازن دارای غشا PVC به عنوان جداکننده. Fig. 3. The CV test results for the supercapacitor with PVC membrane as the separator.

جدول ۳- مقایسه رسانندگی یونی غشای PVC با پژوهش‌های مشابه.

Table 3. The comparison of ionic conductivity of PVC membrane with similar studies.

Sample	Temperature (°C)	Electrolyte	Thickness (mm)	Ionic conductivity (mS cm ⁻¹)	Ref.
Pure PVC	RT ^a	6 M KOH	0.0135	8.07	This work
PVDF	25	(TEABF ₄) ^b + (AN) ^c	0.03	18	[15]
PAES-Q-1.1	RT	6 M KOH	-	2.02	[34]
PVDF/PVP	25	-	0.15	1.8	[35]
NWs-PVB	RT	1 M Na ₂ SO ₄	0.025	13.5	[36]
RF-PLA	RT	1 M H ₂ SO ₄	0.022	110	[21]
RF-PLA	RT	1 M Na ₂ SO ₄	0.022	6	[21]

(a) RT: room temperature, (b) TEABF₄: tetraethylammonium tetrafluoroborate, (c) AN: acetonitrile.

غشا برای بهبود آب‌دوستی و رسانایی یونی می‌تواند به بهینه‌سازی عملکرد جداکننده کمک کند. این مطالعات برای تکمیل امکان‌سنجی استفاده از غشای PVC در مقیاس تجاری ضروری است.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، غشای صفحه تخت پلی(وینیل کلرید) (PVC) با استفاده از روش وارونگی فاز تهیه و به‌عنوان جداکننده در ابرخازن ارزیابی شد. نتایج آزمون‌های مشخصه‌یابی نشان داد، غشای تهیه‌شده دارای زاویه تماس ۸۶/۱۷° بوده که نشان‌دهنده آب‌دوستی نسبی آن است. همچنین غشا از تخلخل بیشتری برخوردار (۹۱/۸٪) بود و متوسط اندازه حفره‌های آن ۵/۷ nm اندازه‌گیری شد. مقدار شار آب خالص غشا ۸۷/۵ L/m².h بود که مؤید نفوذپذیری مناسب غشاست. بررسی سطح مقطع غشا با میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM)، ساختار متخلخل و یکنواخت آن را تأیید کرد.

رسانش یونی غشا با آزمون امپدانس الکتروشیمیایی معادل ۸/۰۷ mS/cm اندازه‌گیری شد. همچنین، ارزیابی عملکرد الکتروشیمیایی غشا به‌عنوان جداکننده با استفاده از آزمون ولت‌سنجی چرخه‌ای (CV) و پرشدن-تخلیه گالوانوستاتیکی (GCD) انجام شد. نمودار CV در بازه پتانسیلی ۰ V تا ۱/۲ V و مقدار روبش ۵۰ mV/s، رفتار شبه‌خازنی با پیک‌های اکسایش در محدوده ۰/۶-۰/۲ را نشان داد. ظرفیت ویژه به‌دست‌آمده ۵۰/۶۶ F/g (فاراد بر گرم) بود که اگرچه در مقایسه با برخی از جداکننده‌ها کم است، اما برای یک غشا ختنی از جنس PVC قابل قبول تلقی می‌شود.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد، غشای PVC خالص، به‌دلیل ویژگی‌های ساختاری از جمله تخلخل زیاد، توزیع مناسب اندازه

ساختاری PVDF با الکترولیت غیرآبی نسبت داد [۱۵]. افزون بر این، نمونه NWs-PVB نیز با استفاده از الکترولیت ۱ M Na₂SO₄ رسانندگی یونی بیشتری (۱۳/۵ mS/cm) نسبت به نمونه PVC نشان داد. این مقایسه حاکی از آن است که انتخاب دقیق نوع الکترولیت حتی در سامانه‌های آبی، می‌تواند اثر چشمگیری بر افزایش رسانندگی یونی و بهبود عملکرد جداکننده داشته باشد [۳۶].

غلظت محلول پلیمری از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر شکل‌شناسی و خواص غشا در فرایند تهیه غشا با روش وارونگی فاز است. با افزایش درصد وزنی پلیمر، گرانروی محلول افزایش یافته و جابه‌جایی حلال و ناحلال حین انعقاد کندتر صورت می‌گیرد که به تشکیل ساختار متراکم‌تر با تخلخل کمتر منجر می‌شود. در مقابل، غلظت‌های کمتر (مانند ۱۱٪ وزنی) موجب تسریع فرایند جدایی فاز و تشکیل منافذ بازتر می‌شود. در این پژوهش، ابتدا غشاهای با غلظت‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵٪ وزنی تهیه و بررسی اولیه شد. نتایج نشان داد، افزایش غلظت پلیمر در محلول باعث کاهش تخلخل و افزایش ضخامت غشا می‌شود. همچنین، غشای ۱۱٪ به‌دلیل تخلخل زیاد و ضخامت کم، رسانندگی یونی بیشتری در تماس با الکترولیت ۶ M KOH و در آزمون‌های مرتبط با ابرخازن، ظرفیت ویژه بیشتر و مقاومت داخلی کمتری نشان داد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، کاهش غلظت پلیمر در محدوده بررسی‌شده، ساختار غشا را به سمت نفوذپذیری بیشتر سوق داده و در نهایت عملکرد الکتروشیمیایی بهتری در ابرخازن فراهم کرده است.

با توجه به نتایج مطلوب کاربرد غشای PVC به‌عنوان جداکننده در ابرخازن، می‌توان در پژوهش‌های آینده عملکرد غشای PVC را در شرایط متنوع عملکردی نظیر دماهای مختلف، محلول‌های الکترولیت با ترکیبات متفاوت و در شرایط عملکردی واقعی و نیز انجام آزمون‌های پایداری مکانیکی بلندمدت بررسی کرد. همچنین، اصلاح

توسعه جداکننده‌های تجاری برای نسل‌های آینده ابرخازن‌ها باشد.

قدردانی

نویسندگان مقاله قدردانی خود را از حمایت مالی دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/40040115026/1400 اعلام می‌دارند.

مراجع

- Shao Y., El-Kady M.F., Sun J., Li Y., Zhang Q., Zhu M., Wang H., Dunn B., and Kaner R.B., Design and Mechanisms of Asymmetric Supercapacitors, *Chem. Rev.*, **118**, 9233-9280, 2018.
- Wu H., Huang H., Xu Y., Xu F., and Zhang X., Ultrathin Separator with Efficient Ion Transport and Superior Stability Prepared from Cotton Cellulose for Advanced Supercapacitors, *Chem. Eng. J.*, **470**, 144089, 2023.
- Banerjee S. and Kar K.K., Superior Water Retention, Ionic Conductivity and Thermal Stability of Sulfonated Polyether Ether Ketone/Polypyrrole/Aluminum Phosphate Nanocomposite Based Polymer Electrolyte Membrane, *J. Env. Chem. Eng.*, **4**, 299-310, 2016.
- Tahalyani J., Akhtar M.J., Cherusseri J., Kar K.K., Banerjee S., Sinha P., Verma, K.D., Pal T., and De B., *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials*, I Characteristics, 2020.
- Banerjee S. and Kar K.K., Synergistic Effect of Aluminium Phosphate and Tungstophosphoric Acid on the Physicochemical Properties of Sulfonated Polyether Ether Ketone Nanocomposite Membrane, *J. Appl. Polym. Sci.*, **133**, 2016.
- Liivand K., Thomberg T., Jänes A., and Lust E., Separator Materials Influence on Supercapacitors Performance in Viscous Electrolytes, *ECS Transactions*, **64**, 41, 2015.
- Kar K.K., Sharma S.D., Behera S.K., and Kumar P., Development of Rubber Pressure Molding Technique Using Silicone Rubber to Fabricate Fiber-Reinforced Plastic Components Based on Glass Fiber and Epoxy Resin, *J. Elas. Plast.*, **39**, 117-131, 2007.
- Inagaki M., Konno H., and Tanaike O., Carbon Materials for Electrochemical capacitors, *J. Pow. Sourc.*, **195**, 7880-7903, 2010.
- Soneda Y., Toyoda M., Tani Y., Yamashita J., Kodama, M., Hatori H., and Inagaki M., Electrochemical Behavior of Exfoliated Carbon Fibers in H₂SO₄ Electrolyte with Different Concentrations, *J. Physic. Chem. Solids*, **65**, 219-222, 2004.
- Noorden Z.B.A., Sugawara S., and Matsumoto S., Glass Wool Material as Alternative Separator for Higher Rating Electric Double Layer Capacitor, *ECS Transactions*, **53**, 43, 2013.
- Noorden Z.A., Sugawara S., and Matsumoto S., Noncorrosive Separator Materials For Electric Double Layer Capacitor, *IEEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **9**, 235-240, 2014.
- Xie Q., Huang X., Zhang Y., Wu Sh., and Zhao P., High Performance Aqueous Symmetric Supercapacitors Based on Advanced Carbon Electrodes and Hydrophilic Poly(vinylidene fluoride) Porous Separator, *Appl. Surf. Sci.*, **443**, 412-420, 2018.
- Fischle H., Busch D., Schmitz B., Herrmann H., and Winterheimer S., New Separator Material for Supercapacitors, in *Proc. of 3rd European Symposium on Scs. and Apps. (ESSCAP)*, 2008.
- Szubzda B., Szmaja A., Ozimek M., and Mazurkiewicz S., Polymer Membranes as Separators for Supercapacitors, *Appl. Phys. A*, **117**, 1801-1809, 2014.
- Karabelli D., Leprêtre J.C., Alloin F., and Sanchez J.Y., Poly(vinylidene fluoride)-based Macroporous Separators for SCS, *Electrochimica Acta*, **57**, 98-103, 2011.
- Yu H., Tang Q., Wu J., Lin Y., Fan L., Huang M., Lin J., Li Y., and Yu F., Using Eggshell Membrane as a Separator in Supercapacitor, *J. Power Sources*, **206**, 463-468, 2012.
- Salarizadeh P., Javanbakht M., Pourmahdian S., Hazer M.S.A., Hooshyari K., and Askari M.B., Novel Proton Exchange Membranes Based on Proton Conductive Sulfonated PAMPS/PSSA-TiO₂ Hybrid Nanoparticles and Sulfonated Poly(ether ether ketone) for PEMFC, *Int. J. Hydrogen Energy*, **44**, 3099-3114, 2019.

18. Bakeri G., Rezaei-DashtArzhandi M., Ismail A.F., Matsuura T., Abdullah M.S., and Cheer Ng Be., Porous Polyethersulfone Hollow Fiber Membrane in CO₂ Separation Process via Membrane Contactor-The Effect of Nonsolvent Additives, *Korean J. Chem. Eng.*, **34**, 160-169, 2017.
19. Mohammadi R., Hezarjaribi M., Ramasamy D.L., Sillanpää M., and Pihlajamäki A., Application of a Novel Biochar Adsorbent and Membrane to the Selective Separation of Phosphate from Phosphate-Rich Wastewaters, *Chem. Eng. J.*, **407**, 126494, 2021.
20. Hashim M., Sa'adu L., Bin Baharuddin B., and Dasuki A.K., Using PVA, Methacrylate and Lauroyl Chitosan as Separator in Supercapacitors, *J. Mater. Sci. Res.*, **3**, 25, 2014.
21. Vargun E., Ozaltin, K., Fei H., Harea E., Vilčáková J., Kazantseva N., and Saha P., Biodegradable Porous Polylactic Acid Film as a Separator for SCS, *J. Appl. Polym. Sci.*, **137**, 49270, 2020.
22. Yazdani S., Lashkenari M.S., and Mehri F., Design a Novel Mixed-Ligand Ni-MOF/MWCNT Nanocomposite to Enhance the Electrochemical Performance of Supercapacitors, *Synthetic Metals*, **307**, 117702, 2024.
23. Islam M.A., Ong H.L., Villagracia A.R., Halim K.A.A., Ganganboina A.B., and Doong R., Biomass-Derived Cellulose Nanofibrils Membrane from Rice Straw as Sustainable Separator for High Performance Supercapacitor, *Indust. Crops Products*, **170**, 113694, 2021.
24. Lin K., Chen X., and Liu W., Preparation of Supercapacitor Separator and the Effect of Its Porosity on Electrochemical Performance, *China Pulp and Paper*, **38**, 14-19, 2019.
25. Li J., Jia H., Ma S., Xie L., Wei X., Dai L., Wang H., Su F., and Chen C.M., Separator Design for High-Performance Supercapacitors: Requirements, Challenges, Strategies, and Prospects, *ACS Energy Lett.*, **8**, 56-78, 2022.
26. Sun X.Z., Zhang X., Huang, B., and Ma Y.W., Effects Of Separator on the Electrochemical Performance of Electrical Double-Layer Capacitor and Hybrid Battery-Supercapacitor, *Acta Physico-Chimica Sinica*, **30**, 485-491, 2014.
27. Aerts P., Van Hoof, E., Leysen, R., Vankelecom, I.F.J., and Jacobs, P.A., Polysulfone-Aerosil Composite Membranes: Part 1. The Influence of the Addition of Aerosil on the Formation Process and Membrane Morphology, *J. Membr. Sci.*, **176**, 3-73, 2000.
28. Mathur V., Bremananth R., and Arya P.K., Image Analysis of PVC/TiO₂ Nanocomposites SEM Micrographs, *Micron*, **139**, 102952, 2020.
29. Sánchez-Romate X.F., Del Bosque A., Artigas-Arnaldas J., Muñoz B.K., Sánchez, M., and Ureña A., A Proof of Concept of a Structural Supercapacitor Made of Graphene Coated Woven Carbon Fibers: EIS Study And Mechanical Performance, *Electrochimica Acta*, **370**, 137746, 2021.
30. Verma K.D., Sinha P., Banerjee S., Kar K.K., and Ghorai M.K., Characteristics of Electrode Materials for Supercapacitors, In *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials I: Characteristics*, Springer, 269-285, 2020.
31. Chatterjee D.P. and Nandi A.K., A Review on the Recent Advances in Hybrid Supercapacitors, *J. Mater. Chem. A*, **9**, 15880-15918, 2021.
32. Hoseinzadeh E., Wei C., Farzadkia M., and Rezaee A., Effects of Low Frequency-Low Voltage Alternating Electric Current on Apoptosis Progression in Bioelectrical Reactor Biofilm, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, **8**, 2, 2020.
33. Shabeeba P., Thayyil M., Pillai M.P., Soufeena P.P., Niveditha C.V., Electrochemical Investigation of Activated Carbon Electrode Supercapacitors, *Russian J. Electrochem.*, **54**, 302-308, 2018.
34. Huo P., Zhang S., Zhang X., Geng Z., Luan J., and Wang, G., Quaternary Ammonium Functionalized Poly(Aryl Ether Sulfone) S as Separators for Supercapacitors Based on Activated Carbon Electrodes, *J. Membr. Sci.*, **475**, 562-570, 2015.
35. He T., Jia R., Lang X., Wu X., and Wang, Y., Preparation and Electrochemical Performance of PVDF Ultrafine Porous Fiber Separator-Cum-Electrolyte for Supercapacitor, *J. Electrochem. Soc.*, **164**, E379, 2017.
36. Liu M., Turcheniuk K., Fu W., Yang Y., Liu M., and Yushin G., Scalable, Safe, High-Rate Supercapacitor Separators Based on the Al₂O₃ Nanowire Polyvinyl Butyral Nonwoven Membranes, *Nano Energy*, **71**, 104627, 2020.