

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

Faezeh Koozehgar Kaleji¹, Gholamreza Bakeri^{1,2*}, and Mohammad Soleimani³

1. Chemical Engineering Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 484, Iran

2. Advanced Membrane Research Lab, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, 489, Iran

3. Fuel Cell Electrochemistry and Advanced Material Research Laboratory, Faculty of Engineering Modern Technologies, Amol University of Special Modern Technologies, Amol, 4615664616, Iran

Received: 20 September 2025, accepted: 20 April 2026

ABSTRACT

Hypothesis: poly(vinyl 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: Pure PVC membrane at 11% (by wt) 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 electrochemical impedance spectroscopy (EIS), cyclic voltammetry (CV) and galvanostatic charge-discharge (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 Ω), 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),
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**, 315-325, 2025.

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

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

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

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

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

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

پیل سوختی و مواد پیشرفته، کد پستی ۴۶۱۵۶۶۴۶۱۶

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر،

سال سی و هشتم، شماره ۴،

صفحه ۳۲۵-۳۱۵، ۱۴۰۴

ISSN: 1016-3255

Online ISSN: 2008-0883

DOI: 10.22063/JIPST.2026.35779.2426

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۲۹، پذیرش: ۱۴۰۵/۱/۳۱

چکیده

فرضیه: غشاهای بر پایه پلی (وینیل کلرید) (PVC) آب‌دوستی 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 غشای 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 منافذها، تخلخل و شار آب برای تعیین ویژگی‌های آن انجام شد. سپس، آزمون‌های الکتروشیمیایی، ولت‌سنجی چرخه‌ای (CV)، امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) و پرشدن-تخلیه گالوانوستاتیکی 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 منافذها (۵/۷ nm) و تخلخل زیاد (۹۱/۸٪) باعث آسانی انتقال یون در ساختار غشا می‌شود. همچنین شار عبور آب خالص مطلوب (۸۷/۵ L/m².h) تراوایی مناسب غشا را تأیید کرد. تصاویر SEM از سطح مقطع غشا، تخلخل با منافذهای انگشتی شکل را نشان داد که تأییدکننده تراوایی مناسب غشا است. آزمون امپدانس الکتروشیمیایی (EIS) مقاومت رسانندگی یونی کم غشا را نشان داد (۰/۱۷ Ω) که مؤید مناسب بودن غشا برای کاربرد در ابرخازن‌هاست. همچنین، غشا درون یک ابرخازن شامل دو صفحه مسی پوشش‌یافته با کربن فعال نصب شده و کارایی آن با استفاده از آزمون‌های ولت‌سنجی چرخه‌ای (CV) و پرشدن-تخلیه گالوانوستاتیکی (GCD) بررسی شد که نتایج حاکی از برگشت‌پذیری و پایداری در پرشدن و تخلیه ابرخازن بود. این نتایج، قابلیت زیاد غشای PVC خالص را به عنوان جداکننده‌ای مؤثر و مقرون به صرفه در ابرخازن‌ها نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

ابرخازن،
پلی (وینیل کلرید)،
رسانندگی یونی،
آب‌دوستی،
جداکننده غشایی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

bakeri@nit.ac.ir

مقدمه

افزایش تقاضا برای سامانه های ذخیره سازی انرژی به عنوان یکی از ابزارهای توسعه سامانه های تولید انرژی (نظیر انرژی هیدروژن، انرژی باد و سایر انواع انرژی تجدیدپذیر) توسعه مطلوب فناوری هایی را ضروری می کند که دسترسی به ابرخازن هایی با قابلیت توان بیشتر و چرخه عمر بسیار طولانی تر را ممکن سازد [۱،۲]. ابرخازن، دستگاه ذخیره سازی انرژی نسل نوین با ظرفیت زیاد است که فاصله عملکردی بین خازن و باتری پرشدنی را پر می کند. یک ابرخازن الکتروشیمیایی، ظرفیت ویژه زیادی داشته و از نظر چگالی توان و چرخه عمر کارایی، مزایای قابل توجهی نسبت به باتری دارد. ساختار ابرخازن از دو الکترود تشکیل شده است که به کمک یک جداکننده با تراوایی یونی و یک الکترولیت که قابلیت انتقال بار بین دو الکترود را دارد، جدا شده اند. وقتی به الکترودها ولتاژ اعمال می شود، آن ها باردار شده و یون های موجود در محلول الکترولیت، لایه های دوگانه ای را در اطراف الکترودها ایجاد می کنند. این لایه ها، قطبیتی مخالف قطبیت الکترودها دارند. اگر یون ها از این لایه های دوگانه عبور کنند، شبه خازن شکل می گیرد.

جداکننده برای جداسازی الکترود مثبت و منفی و جلوگیری از اتصال کوتاه استفاده می شود 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 یون های الکترولیت از آن عبور کنند. عملکرد ایمن و مؤثر جداکننده مستلزم برخورداری از ویژگی هایی مانند ساختار متخلخل، وزن کم، استحکام مکانیکی خوب، رسانندگی یونی زیاد، ماهیت آب دوست، پایداری شیمیایی و اشتعال ناپذیری است [۳]. اگرچه جداکننده در پدیده های الکتروشیمیایی، حین ذخیره سازی انرژی در ابرخازن شرکت نمی کند، اما نقش مهمی در کل فرایند دارد [۴].

رسانندگی یونی جداکننده به مقدار تخلخل و قابلیت جذب الکترولیت آن بستگی دارد. افزایش جذب الکترولیت موجب افزایش رسانندگی یونی و در نتیجه افزایش چگالی توان و انرژی ابرخازن می شود. با وجود این، افزایش بیش از حد تخلخل می تواند به کاهش استحکام مکانیکی منجر شود. افزون بر این، جداکننده باید از پایداری ابعادی برخوردار بوده و با الکترودها واکنش شیمیایی ندهد و در محدوده پتانسیل عملکردی، پایدار باشد. مواد استفاده شده برای ساخت جداکننده ها معمولاً شامل الیاف نیافته (مانند پنبه، نایلون و سلولوز)، پلیمرهای سنتزی (مانند پلی پروپیلن (PP)، پلی اتیلن (PE)، پلی (تترافلوئورو اتیلن) (PTFE)، پلی (وینیلیدن دی فلوئورید) (PVDF) و پلی ایمید (PI)) و بسترهای طبیعی مانند چوب و لاستیک هستند [۵].

مقاومت داخلی زیاد کارایی ابرخازن را محدود می کند. مقاومت داخلی ابرخازن به مقاومت تماس الکترولیت و الکترود، مقاومت الکترولیت و رسانندگی یون ها در جداکننده بستگی دارد. ماده جداکننده یک ماده نیمه تراواست که وظیفه انتقال یون بین الکترودها را برعهده دارد. بنابراین، انتقال یون های الکترولیت 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. جداکننده های تجاری استفاده شده در ابرخازن ها عموماً از سلولوز و پلی پروپیلن تهیه می شوند [۷].

خواص و غلظت الکترولیت اثر مستقیمی بر کارایی ابرخازن ها از جمله ظرفیت خازنی ویژه و چگالی انرژی سلول ها دارد [۸،۹]. مطالعات نشان داده اند، افزایش غلظت الکترولیت معمولاً موجب افزایش ظرفیت خازنی و چگالی انرژی می شود. با وجود این بسیاری از جداکننده های متداول مبتنی بر سلولوز قابلیت تحمل الکترولیت های غلیظ، مانند H_2SO_4 را ندارند. به همین دلیل، استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی مانند الیاف شیشه، پلی پروپیلن و پشم شیشه به عنوان جداکننده ها در گذشته رایج بوده است [۱۰،۱۱]. این موضوع اهمیت انتخاب ترکیب مناسب جداکننده و الکترولیت را در طراحی ابرخازن ها برجسته می کند.

اگرچه مطالعات متعددی درباره جنبه های مختلف ابرخازن ها انجام شده است. اما تاکنون استفاده از غشاهای جداکننده بر پایه PVC در ابرخازن ها بررسی نشده است. Xie و همکاران [۱۲] با استفاده از دو ماده کربنی مختلف، کربن فعال و کربن فعال غنی شده با نیتروژن به عنوان الکترود و غشای PVDF به عنوان 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 به طور عمده از منافذ لانه زنبوری تشکیل شده بود و یک فضای الکترولیت کافی و کانال هایی برای انتقال یون فراهم می کرد. همچنین، کاهش زاویه تماس برای غشای PVDF اصلاح شده (از $73/5^\circ$ تا 61°) نشان دهنده کاهش انرژی آزاد سطح و افزایش آب دوستی است و کاهش تخلخل غشاها (۶۴/۴٪) تا (۷۲/۴٪) پس از اصلاح، به منافذ خالی نسبت داده شد که به کمک مولکول های PVA و GA متصل شده اند.

Winterheimer و همکاران [۱۳] فناوری تولید غشای پلی پروپیلن (PP) متخلخل با ساختار دوماحوری را توسعه دادند. این نوع غشا، به دلیل 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 کارایی غشای PVC خالص به عنوان جداکننده در ابرخازن است، ضمن اینکه طبق بررسی های انجام شده، مطالعه ای در این زمینه انجام نشده است. غشای PVC با غلظت ۱۱٪ وزنی با استفاده از روش وارونگی فاز تهیه و خواص ساختاری آن نظیر اندازه متوسط منفذها، 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 به کمک نانوذرات، کارایی آن را بهبود بخشید که در مطالعات آتی بررسی خواهد شد.

تجربی

مواد

در این پژوهش از 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 منعقدکننده تهیه شد. پس از گذشت ۲۴ h، غشای تشکیل شده از

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، کارایی 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. Szbzda و همکاران [۱۴] راه حلی ارائه دادند که در آن از فناوری پلازما 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، مسیریایی با مقاومت کم برای انتشار سریع یون ها فراهم می کند که در نهایت، موجب بهبود کارایی 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

حمام آب خارج و خشک شد.

مشخصه یابی غشا

پس از ساخت غشا و به منظور بررسی ویژگی های آن، آزمون های متعددی برای ارزیابی خواص فیزیکی و عملکردی انجام شد که در ادامه شرح داده شده اند.

ضخامت غشا: برای دستیابی به نتیجه قابل قبول، ضخامت غشا در حداقل پنج نقطه اندازه گیری و متوسط نتایج گزارش شد. این آزمون با میکرومتر مدل Insize precision 3109-25A انجام شد. ضخامت غشا در تعیین اندازه متوسط منفذها و رسانندگی یونی غشا استفاده می شود. 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 اندازه گیری تخلخل، غشاها پس از مرطوب شدن در آب به صورت نوارهای باریک برش داده شده و وزن غشای مرطوب (w_1) اندازه گیری شد. در ادامه و پس از خشک کردن غشا در دمای 60°C ، وزن غشای خشک (w_2) اندازه گیری شد. تخلخل غشا با استفاده از معادله (۱) [۱۷] و با در نظر گرفتن چگالی آب خالص ($\rho_w: 0.998 \text{ g/cm}^3$) و چگالی پلیمر ($\rho_p: 1.25 \text{ g/cm}^3$) محاسبه شد:

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

تعیین اندازه منفذهای غشا: از آزمون عبور آب خالص برای تعیین اندازه متوسط منفذهای غشا استفاده شد. در این آزمون، ابتدا نمونه های غشا به شکل دایره با قطر 5 cm برش و در مدول غشایی قرار داده شدند. سپس، جریان آب خالص با فشار 1 bar بر سطح غشا اعمال و حجم جریان آب عبوری از غشا در مدت زمان مشخص اندازه گیری شد. شار جریان آب با استفاده از معادله (۲) محاسبه شد:

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

در این معادله، J ، شار جریان آب ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)، 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 منفذهای غشا (r_m) با استفاده از معادله Guerout-Elford-Ferry (معادله ۳) محاسبه شد:

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

در این معادله، η ، گرانروی آب (10^{-4} Pa.s)؛ 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 اندازه گیری 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 شیشه ای چسبانده شد. سپس، قطره ای از مایع مرجع (آب) روی سطح غشا قرار داده شد. زاویه تماس بین مایع و سطح غشا با زاویه سنج اندازه گیری 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 طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی (electrochemical impedance spectroscopy, EIS) در ولتاژ مدار باز به کمک دستگاه ZIVE SP1, Wonatech ساخت کره جنوبی اندازه گیری شد. ابتدا، غشا به شکل دایره هایی با قطر 3.5 cm برش داده شده و در محلول 6 M KOH به مدت 24 h در دمای اتاق غوطه ور شد تا منفذهای غشا از محلول پر شود. سپس، مقاومت غشا با استفاده از سلول دو الکترودی از جنس فولاد زنگ نزن اندازه گیری شد. بدین صورت که غشا بین دو الکترود سلول قرار داده شده، سلول نصب می شود. در پیکربندی آزمون دو الکترودی، اتصالات مربوط به الکترود مرجع و کمکی به یک سمت الکترود و اتصالات مربوط به الکترود کار به سمت دیگر الکترود متصل شد. ابتدا دستگاه الکتروشیمیایی به رایانه وصل شده و در نرم افزار EC lab تنظیمات اولیه برای آزمون EIS انجام شد و مقاومت در بازه بسامدی 1 Hz تا 100 kHz اندازه گیری شد. داده های امپدانس، ثبت شده و نرم افزار نمودار نایکویست را رسم کرد. نتایج حاصل از امپدانس با مدار معادل نرم افزار EC Lab برازش شده و داده های R_m از این برازش استخراج شد. در ادامه، مقدار R_m در معادله (۴) قرار داده شده و مقدار رسانندگی یونی غشا محاسبه می شود:

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

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

آزمون ولت سنجی چرخه ای: این آزمون روش الکتروشیمیایی پر کاربرد است که به منظور ارزیابی عملکرد و پایداری ابرخازن، پاسخ

ابرخازن به شمار می‌روند. براساس مطالعات پیشین، تخلخل بیش از ۵۵٪ برای فراهم سازی جذب مناسب الکترولیت و رسانندگی یونی زیاد ضروری است [۲۴]. اندازه منافذ جداکننده نیز باید کوچک تر از اندازه ذرات فعال الکتروود باشد (کمتر از ۱ μm) 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 ۸۶/۱۷° 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 ۸۷/۵ L/m².h بوده که حاکی از ساختار متخلخل و مقاومت کم غشا در برابر عبور جریان است. همچنین تخلخل زیاد غشا (۹۱/۸) و میانگین اندازه منافذ ۵/۷ nm 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 به عنوان جداکننده در ابرخازن را دارد. این مقادیر در مقایسه با محدوده بهینه گزارش‌شده برای جداکننده‌های ابرخازنی در الکترولیت‌های قلیایی (نظیر ۶ 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 منعقدکننده، فرایند جداسازی فازی را رسانندگی می‌کنند [۲۷]. مشاهده منته‌های انگشتی بیانگر فرایند وارونگی فازی سریع است

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 ۰-۱/۲ V و مقدار روبش ۵۰ mV/s به صورت 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 ۰-۱/۲ V، آزمون به صورت چرخه‌ای و هر چرخه شامل دومرحله 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 ۰/۰۰۰۸ 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 صفحه‌تخت پلی (وینیل کلرید) با روش وارونگی فاز تهیه و خواص آن با آزمون‌های مختلف ارزیابی شد. همچنین، کارایی آن به عنوان جداکننده در ابرخازن بررسی شد. در جدول ۱ نتایج آزمون‌های ارزیابی غشا ارائه شده است.

مقدار تخلخل و اندازه منافذ از عوامل مؤثر بر عملکرد جداکننده‌های

جدول ۱- نتایج آزمون‌های ارزیابی غشا.

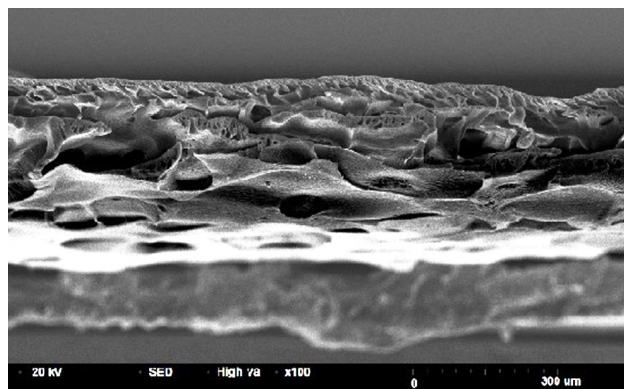
Table 1. The characterization test results of the membrane.

Contact angle (°)	Pure water flux (L/m².h)	Porosity (%)	Average hole pore (nm)
86.17 ± 4.45	87.5	91.8	5.7

۰/۱۷۵۳ و ۰/۱۷۰۲ به دست آمد. بنابراین می توان 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 رسانندگی یونی غشا استفاده شد. با توجه به متوسط داده ها، 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 رسانندگی 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 آزمون های ولت سنجی چرخه ای (CV) و پرشدن-تخلیه گالوانوستاتیک (GCD) انجام شدند. نتایج آزمون ولت سنجی چرخه ای برای غشا PVC 11% در پنجره پتانسیل $0-1/2 \text{ V}$ و مقدار روبش 50 mV/s در شکل ۳ نشان داده شده که رفتار، با توجه به منحنی CV که پیک اکسایش از خود نشان می دهد، نشان دهنده رفتار شبه خازنی است که با نوع الکترو، از جنس مس پوشش یافته با کربن فعال و نیکل/کبالت/منگنز اکسید تطابق دارد. محدوده اکسایش در محدوده $0/2-0/6$ قرار دارد و با وجود اکسیدهای فلزی در الکترو، همچنان با توجه به سطح فلزی، رفتار اکسایشی یا شبه خازنی دارند. همچنین با توجه به سطح داخل نمودار، این رفتار نشان دهنده این است که غشا عملکرد رسانندگی یونی خود را به خوبی انجام داده است [۳۱، ۳۲].

نتایج آزمون پرشدن-تخلیه گالوانوستاتیک (GCD) ابرخازن برای غشای PVC 11% در محدوده ولتاژ $0-1/2 \text{ V}$ و چگالی جریان



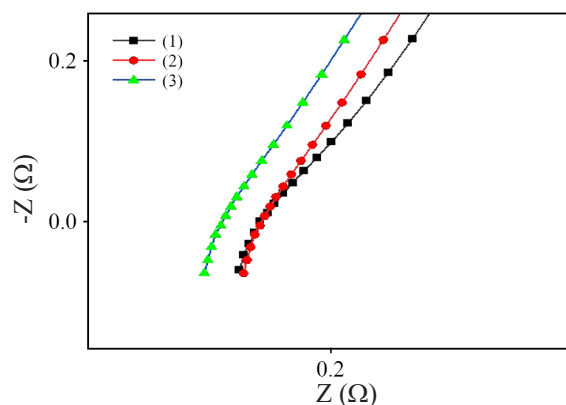
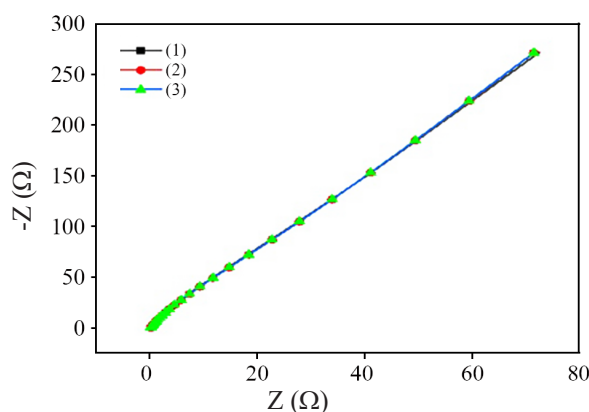
شکل ۱- تصویر SEM سطح مقطع غشا.

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

که می توان آن را به غلظت کم محلول پلیمری و گرانروی آن ارتباط داد. چنین ساختاری می تواند 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 رسانندگی یونی غشا استفاده شد. در شکل ۲، نمودار نایکویست برای سه نمونه غشا در شرایط یکسان و در بازه بسامدی 1 Hz تا 100 kHz نشان داده شده است [۲۹].

سه منحنی امپدانس، برای سه نمونه مختلف از غشا PVC 11% در مجاورت الکترولیت KOH 6 M و در دمای اتاق و در بازه بسامدی 1 Hz تا 100 kHz ارائه شد. ضخامت متوسط غشاها $13/5 \mu\text{m}$ اندازه گیری شد و برای سه نمونه غشا مقادیر R_m $0/1762$ ،



شکل ۲- نمودار نایکویست غشاهای PVC.

Fig. 2. The Nyquist plot for PVC membranes.

جدول ۲- نتایج آزمون EIS غشا.

Table 2. The EIS test results of the membrane.

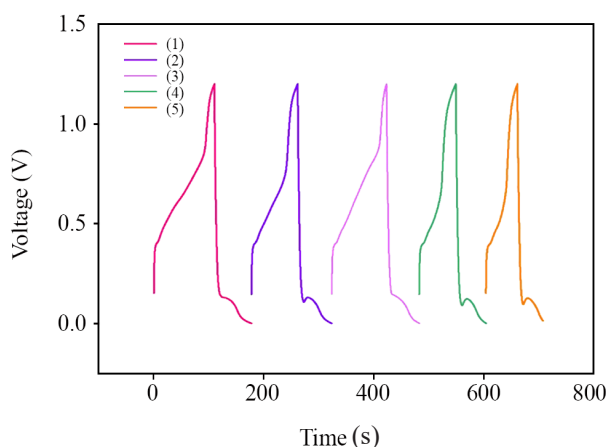
Electrolyte	Volume resistance (Ω) [30]	Membrane thickness (μm)	Ion conductivity (mS/cm)
6 M KOH	0.1739	13.5	8.07

0.91 A/g (آمپر بر گرم) در شکل ۴ نشان داده شده که انحراف منحنی 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 $60/96 \text{ s}$ اندازه گیری 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 سکه ای ساخته شده، می توان نتیجه گیری کرد، ساختار پیشنهادی می تواند گزینه مناسبی برای استفاده در ابرخازن ها به عنوان جداکننده باشد [۳۲،۳۳].

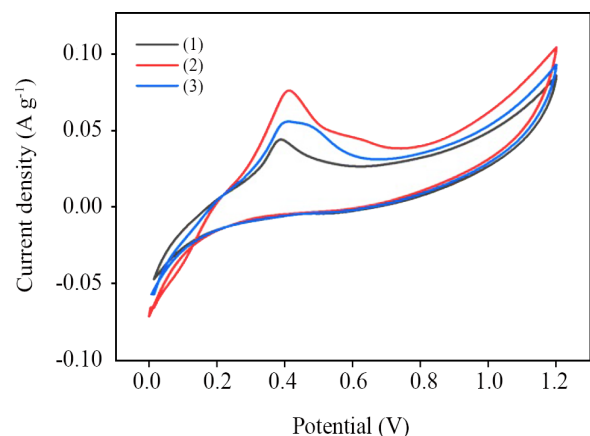
در مجموع، منحنی GCD نشان دهنده رفتار پرشدن-تخلیه پایدار ابرخازن است و آن را برای کاربردهایی نظیر ذخیره سازی انرژی مناسب می سازد؛ جایی که ظرفیت متوسط همراه با ساختار مکانیکی پایدار اهمیت دارد.

جدول ۳ مقایسه ای از رسانندگی یونی غشای PVC با سایر مطالعات مشابه را ارائه می دهد. نتایج جدول ۳ نشان می دهد، غشای PVC

۱۱٪ با رسانندگی یونی $8/07 \text{ mS/cm}$ و ضخامت $13/5 \mu\text{m}$ عملکردی متوسط دارد، اما نسبت به برخی نمونه های پلیمری مانند PAES-Q-1.1 با رسانندگی $2/02 \text{ mS/cm}$ و PVDF/PVP با رسانندگی $1/80 \text{ mS/cm}$ عملکرد بهتری نشان داده است. این مسئله حاکی از آن است که استفاده از الکترولیت قوی مانند 6 M KOH در ترکیب با PVC می تواند به افزایش قابل توجه انتقال یونی در غشا منجر شود. درباره جداکننده های پلیمری بر پایه PLA، نتایج نشان داد، اصلاح سطح با پلاسمای 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 گونه ای 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 می دهد، اصلاح پلازما به تنهایی کافی نیست و تنها در ترکیب با الکترولیت مناسب می تواند حداکثر کارایی را فراهم کند. بنابراین، نوع الکترولیت نقش کلیدی در بهینه سازی عملکرد انتقال یونی ایفا می کند [۲۱]. مقایسه بین غشای PVC در محیط آبی و غشای PVDF در محیط غیرآبی نیز مؤید همین موضوع است. نمونه PVDF با ضخامت بیشتر ($0/3 \text{ mm}$) 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 می توان به سازگاری ساختاری PVDF با الکترولیت غیرآبی نسبت داد [۱۵]. افزون بر این، نمونه NWS-PVB نیز با استفاده از الکترولیت $1 \text{ M Na}_2\text{SO}_4$



شکل ۴- نتایج آزمون GCD ابرخازن دارای غشای 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 غشای 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 پژوهش های 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.

استفاده از غشای PVC در مقیاس تجاری ضروری است.

نتیجه گیری

در این مطالعه، غشای صفحه تخت پلی (وینیل کلرید) (PVC) با استفاده از روش وارونگی فاز تهیه و به عنوان جداکننده در ابرخازن ارزیابی شد. نتایج آزمون های مشخصه یابی نشان داد، غشای تهیه شده دارای زاویه تماس ۸۶/۱۷° بوده که نشان دهنده آب دوستی نسبی آن است. همچنین غشا از تخلخل بیشتری برخوردار (۹۱/۸٪) بود و متوسط اندازه منفذهای آن ۵/۷ nm اندازه گیری شد. مقدار شار آب خالص غشا ۸۷/۵ L/m².h بود که مؤید تراوایی مناسب غشاست. بررسی سطح مقطع غشا با میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM)، ساختار متخلخل و یکنواخت آن را تأیید کرد.

رسانندگی یونی غشا با آزمون امپدانس الکتروشیمیایی معادل ۸/۰۷ mS/cm اندازه گیری شد. همچنین، ارزیابی عملکرد الکتروشیمیایی غشا به عنوان جداکننده با استفاده از آزمون ولت سنجی چرخه ای (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 شبه خازنی با پیک های اکسایش در محدوده ۰/۲-۰/۶ را نشان داد. ظرفیت ویژه به دست آمده ۵۰/۶۶ F/g (فاراد بر گرم) بود که اگرچه در مقایسه با برخی از جداکننده ها کم است، اما برای یک غشا خنثی از جنس PVC قابل قبول تلقی می شود.

یافته های این پژوهش نشان می دهد، غشای PVC خالص، به دلیل ویژگی های ساختاری از جمله تخلخل زیاد، توزیع مناسب اندازه منفذها و خواص الکترولیتی پایدار، می تواند به عنوان جداکننده مؤثری در ابرخازن ها استفاده شود. در عین حال، کارایی الکتروشیمیایی

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 سامانه های آبی، می تواند اثر چشمگیری بر افزایش رسانندگی یونی و بهبود عملکرد جداکننده داشته باشد [۳۶].

غلظت محلول پلیمری از مهم ترین پارامترهای مؤثر بر شکل شناسی و خواص غشا در فرایند تهیه غشا با روش وارونگی فاز است. با افزایش درصد وزنی پلیمر، گرانروی محلول افزایش یافته و جابه جایی حلال و ناحلال حین انعقاد کندتر صورت می گیرد که به تشکیل ساختار متراکم تر با تخلخل کمتر منجر می شود. در مقابل، غلظت های کمتر (مانند ۱۱٪ وزنی) موجب تسریع فرایند جدایی فاز و تشکیل منافذ بازتر می شود. در این پژوهش، ابتدا غشاهای با غلظت های 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 می شود. همچنین، غشای ۱۱٪ به دلیل تخلخل زیاد و ضخامت کم، رسانندگی یونی بیشتری در تماس با الکترولیت ۶ M KOH و در آزمون های مرتبط با ابرخازن، ظرفیت ویژه بیشتر و مقاومت داخلی کمتری نشان داد. بنابراین می توان نتیجه گرفت، کاهش غلظت پلیمر در محدوده بررسی شده، ساختار غشا را به سمت تراوایی بیشتر جابه جا کرده و در نهایت عملکرد الکتروشیمیایی بهتری در ابرخازن فراهم کرده است.

با توجه به نتایج مطلوب کاربرد غشای PVC به عنوان جداکننده در ابرخازن، می توان در پژوهش های آینده کارایی غشای PVC را در شرایط متنوع عملکردی نظیر دماهای مختلف، محلول های الکترولیت با ترکیبات متفاوت و در شرایط عملکردی واقعی و نیز انجام آزمون های پایداری مکانیکی بلندمدت بررسی کرد. همچنین، اصلاح غشا برای بهبود آب دوستی و رسانندگی یونی می تواند به بهینه سازی عملکرد جداکننده کمک کند. این مطالعات برای تکمیل امکان سنجی

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.
- Verma K.D., Sinha P., Banerjee S., Kar K.K., and Ghorai M.K., Characteristics of Separator Materials for Supercapacitors, *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials, I Characteristics*, Springer, 315-326, 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. Elast. Plast.*, **39**, 117-131, 2007.
- Inagaki M., Konno H., and Tanaiki O., Carbon Materials for Electrochemical capacitors, *J. Power Sources*, **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. Phys. 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, *IEEE Trans. Electr. Electron. Eng.*, **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 Winternheimer S., New Separator Material for Supercapacitors, In *Proc. of 3rd European Symposium on Supercapacitors and Applications, (ESSCAP)*, Rome, Italy, 6-7 November, 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.
- Salarzadeh 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.
- 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, *Synth. Met.*, **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-Arnaud 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, *Front. Bioeng. Biotechnol.*, **8**, 2, 2020.
33. Shabeeba P., Thayyil M., Pillai M.P., Soufeena P.P., and 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(arylether 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.