

# Polymer Application in Construction of Lithium-ion Batteries: A Review

Amir H. Navarchian\*, Samira Maazi, Mahshid Monsefpour

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Iran

Received: 3 August 2015, Accepted: 30 October 2015

## Abstract

Polymers are commonly applied in construction of rechargeable lithium-ion batteries (LiBs). The role of polymer on LiB electrochemical performance is discussed in detail. Literature reviews show that the use of various polymers in construction of LiBs is growing especially as electrolyte, electrode binder, current collector and separator. The polymer type significantly affects the electrochemical performance of LiBs including the capacity, cycle life, and thermal and mechanical stability of battery components. Our literature research indicates that the polymer electrolytes are going to be widely used in LiBs due to their safety and good electrochemical performance. Recently, the major studies have focused on finding appropriate alternatives amongst hydrophilic polymers as electrode binders in LiBs with aqueous electrolytes to enhance ion diffusion through developed hydrophilic properties.

## Key Words

lithium-ion battery,  
electrolyte,  
binder,  
separator,  
battery performance

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: navarchian@eng.ui.ac.ir

## مروری بر کاربرد پلیمرها در ساخت باتری‌های یون لیتیم

امیرحسین نوارچیان\*، سمیرا معاذی، مهشید منصف‌پور  
اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی

دریافت: ۱۳۹۴/۵/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۸

در این مقاله، انواع پلیمرهای استفاده شده در ساخت باتری‌های پرکردنی یون لیتیم و اثر آن‌ها بر عملکرد باتری معرفی می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهد، کاربرد روزافزون پلیمرها در ساختار این نوع باتری‌ها، به‌ویژه به‌عنوان الکترولیت، پیونده کترود، جمع‌کننده جریان و جداکننده دو الکتروود، اثر ویژه‌ای بر عملکرد الکتروشیمیایی باتری، مانند ظرفیت و طول عمر آن دارد. مواد پلیمری روی پایداری گرمایی و مکانیکی اجزای باتری نیز به‌شدت اثرگذارند. همچنین، کاربرد الکترولیت‌های پلیمری، به‌دلیل ایمنی بیشتر و کارایی الکتروشیمیایی مطلوب‌تر نسبت به الکترولیت‌های آلی، رو به گسترش است. پژوهش‌های اخیر روی جایگزین‌های پلیمری مناسب به‌عنوان پیونده کاتد در باتری‌های یون لیتیم با الکترولیت آبی متمرکز تا بتوان با ویژگی‌های آبدوستی مناسب این ترکیبات بتوان نفوذ یون‌ها را بهبود بخشید.

### چکیده



امیرحسین نوارچیان



سمیرا معاذی



مهشید منصف‌پور

### واژگان کلیدی

باتری یون لیتیم،  
الکترولیت،  
پیونده،  
جداکننده،  
عملکرد باتری

مقدمه

باتری یون لیتیم از خانواده باتری‌های پرشدنی است که برای ذخیره انرژی در وسایل الکترونیکی قابل حمل، مانند تلفن همراه، رایانه قابل حمل و خودروهای هیبریدی استفاده می‌شود. این باتری‌ها مانند سایر انواع باتری، از سه بخش اصلی الکترودهای مثبت و منفی، الکترولیت و جداکننده الکتروود تشکیل شده‌اند. در الکتروود، ممکن است ماده فعال، ماده رسانا مانند کربن و پلیمر پیونده برای ایجاد انسجام میان این دو ماده و اتصال آن‌ها به جمع‌کننده جریان (current collector) به‌کار روند. همچنین، اغلب از پلیمری تراوا برای یون‌های موجود در الکترولیت، به عنوان جداکننده دو الکتروود، استفاده می‌شود [۱].

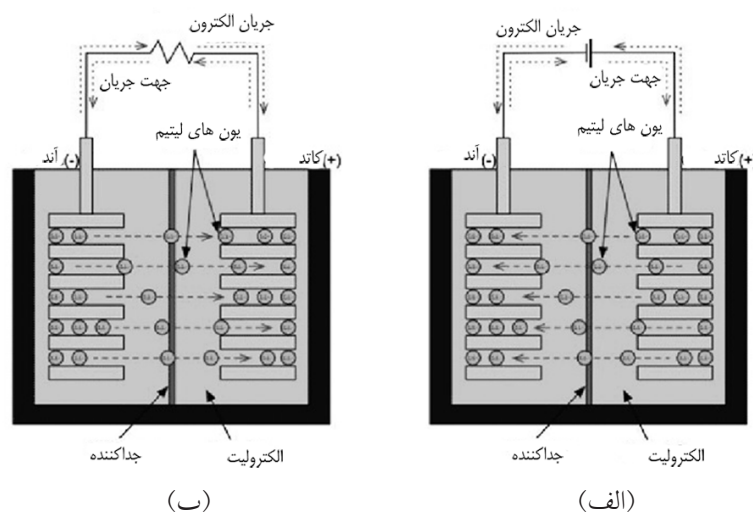
در سال‌های اخیر، باتوجه به پیشرفت صنعت الکترونیک در ایران، فرایند ساخت باتری‌های یون لیتیم هم در دستور کار صنایع پیش‌رو در کشور قرار دارد. مطالعه اثر نوع اجزای ساختاری در الکتروودها می‌تواند به شتاب دستیابی صنایع کشور به فناوری ساخت این باتری‌ها کمک کند. در این میان، شناخت انواع پلیمرهای به‌کار رفته در این نوع باتری به پژوهشگران این حوزه کمک شایانی می‌کند تا بتوانند بهترین پلیمر را برای دستیابی به مطلوب‌ترین عملکرد باتری انتخاب کنند. در این مقاله، پس از ارائه شرح مختصری در باره ساختار باتری‌های یون لیتیم، به‌طور ویژه به اثر نوع مواد پلیمری به‌کار رفته به‌عنوان پیونده اجزای الکتروود، جداکننده الکتروودها، جمع‌کننده جریان و الکترولیت، بر عملکرد باتری پرداخته می‌شود.

سازوکار و ساختار باتری‌های یون لیتیم

در باتری یون لیتیم، یون‌های  $Li^+$  در زمان تخلیه از الکتروود منفی

به‌طرف الکتروود مثبت حرکت می‌کنند و در هنگام پرشدن به الکتروود منفی بازمی‌گردند. به‌عنوان نمونه، در باتری‌های یون لیتیم با آند گرافیتی، که از ساختار لایه‌لایه برای جادادن یون لیتیم برخوردارند، در حالت پرشدن که کاتد از لیتیم تخلیه شده، آند دارای غلظت زیادی از لیتیم میان‌لایه‌ای شده است. در طول فرایند تخلیه، هر یون لیتیم پس از ترک آند، از راه الکترولیت به کاتد مهاجرت می‌کند. درحالی‌که جمع‌کننده جریان، الکترون متناظر با آن را از سمت آند ذخیره می‌کند. این الکترون با حرکت به‌سمت کاتد، به‌عنوان توان دستگاه الکتریکی مصرف می‌شود (شکل ۱) [۱].

مواد آند در باتری‌های یون لیتیم به‌طور معمول فلز لیتیم یا آلیاژهای آن، گرافیت، فلزات واسطه یا سیلیکون هستند. براساس نتایج، لیتیم به‌دلیل ظرفیت، چگالی انرژی و رسانایی الکتریکی زیاد مناسب‌ترین ماده برای آند است [۲]. مواد فعال کاتدی که واکنش اصلی الکتروشیمیایی باتری در آن‌ها انجام می‌شود، به‌طور عمده اکسیدهای فلزات واسطه (مانند منگنز، کبالت و آهن) همراه فلز لیتیم هستند. متداول‌ترین ماده فعال کاتدی در باتری‌های یون لیتیم، منگنز-لیتیم اکسید است که به اختصار LMO نامیده می‌شود [۳،۴]. به‌کار بردن ماده‌ای رسانا مانند انواع کربن فعال، در ترکیب کاتد، به‌منظور ایجاد جریان الکتریکی در سطح آن و انتقال الکترون‌ها از کاتد به جمع‌کننده جریان، ضروری است. از سایر مواد رسانا می‌توان به پلیمرهای رسانای ذاتی، مانند پلی‌انیلین (PANI) و پلی‌پیرول (PPY) نیز اشاره کرد. افزون بر این، نانوالیاف کربن به‌دست آمده از تفکافت پلیمرهای رسانا از جمله پلی‌انیلین هم به‌تازگی به‌کار گرفته شده‌اند [۵،۶]. Li و همکاران این تجربه را در باتری‌های لیتیمی به‌کار برده و شاهد نتایج مناسبی در عملکرد



شکل ۱- سلول الکتروشیمیایی یون لیتیم: درحال (الف) پرشدن و (ب) تخلیه [۱].

باتری بوده‌اند. برای نمونه، استفاده از این پلیمرها سرعت عملکرد باتری و ماندگاری ظرفیت را در باتری افزایش داده است [۵].

### پلیمرهای پیونده در الکترودها

ماده‌های فعال کاتدی و رسانا باید به شکل ماده‌ای منسجم و یک پارچه درآمده و روی جمع‌کننده جریان پوشش یابند. استفاده از ماده پیونده پلیمری، مانند پلی‌وینیلیدین فلوئورید (PVDF) می‌تواند نقش پیونده‌دهی مواد کاتدی را روی جمع‌کننده جریان به خوبی ایفا کند. به طور کلی، پلیمر پیونده مناسب برای کاربرد در الکتروده باتری‌های یون لیتیم باید افزون بر فراهم کردن خواص چسبندگی بسیار مناسب، از شرایط اساسی زیر نیز برخوردار باشد: - از نظر الکتروشیمیایی پایدار و خنثی باشد، یعنی پلیمر نباید در واکنش‌های الکتروشیمیایی کاتد شرکت کند [۷،۸].

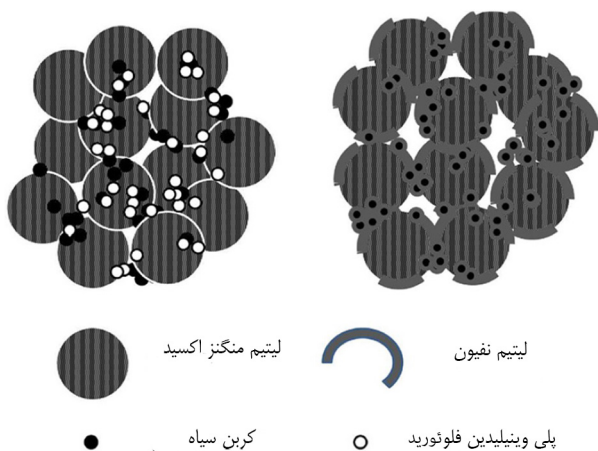
- زیست‌سازگار باشد. برای نمونه، به منظور استفاده از پلیمری مانند PVDF به عنوان پلیمر پیونده، حل کردن آن در حلالی آلی مانند نرمال-متیل-۲-پیرولیدون (NMP) لازم است تا مخلوط به خوبی به حالت دوغاب درآید. ولی، این حلال آلی اشتعال‌پذیر، سمی و ناسازگار با محیط زیست است [۹].

- قیمت و هزینه‌های کاربرد آن‌ها در ساختار باتری به صرفه باشد. افزون بر نکات عمومی یادشده، لازم است تا پلیمر پیونده تمایل به ترشوندگی مطلوب با الکترولیت را داشته باشد. بدین معنی که افزون بر انحلال‌ناپذیری در الکترولیت مایع، از سازگاری لازم با نوع الکترولیت مصرفی (آبی یا آلی) نیز برخوردار باشد، به طوری که سطح کاتد به راحتی در الکترولیت مایع خیس بخورد. سپس، با کاهش مقاومت سطحی میان کاتد و الکترولیت، یون‌های  $Li^+$  به راحتی در مواد فعال کاتدی نفوذ می‌کنند [۱۰-۱۲]. به عنوان نمونه، در باتری دارای الکترولیت آبی، به جای استفاده از PVDF که آلی دوست است، اگر از پلیمر پیونده تا حدودی آبدوست، مانند پلی‌وینیل استات (PVAc) استفاده شود، می‌توان به بهبود عملکرد باتری و افزایش ظرفیت آن کمک کرد. با اندازه‌گیری زاویه تماس قطره مایع با سطح، مقدار ترشوندگی، می‌توان آبدوستی یا آلی دوستی سطح را اندازه‌گیری کرد [۱۳].

به منظور بهبود خواص پلیمر پیونده، از جمله ترشوندگی مناسب با الکترولیت مایع و افزایش خاصیت چسبندگی میان اجزای الکتروده جمع‌کننده جریان، گاهی آلیاز پلیمری به کار برده می‌شود. در اختراعی که به تازگی در آمریکا ثبت شده، از پیونده دوجزئی در ساختار کاتد باتری یون لیتیم استفاده شده است. در این کار، پلیمر اول طبق معمول PVDF (بین ۵۰٪ تا ۹۹٪ وزنی) است که

با PVAc، PVC، پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) و پلی‌اتیلن اکسید (PEO) به عنوان پلیمر دوم (بین ۱٪ تا ۵۰٪ وزنی) به کار رفته است [۱۴]. همچنین، از لاستیک استیرن بوتادی‌ان-کربوکسیل متیل سلولوز (SBR/CMC) به عنوان پیونده در آند استفاده شده است. SBR، به منظور افزایش استحکام اتصال و انعطاف‌پذیری الکتروده، به CMC افزوده می‌شود [۱۷-۱۵]. نکته مهم در استفاده از آلیاز پلیمرهای پیونده در کاتد این است که دو پلیمر باید امتزاج‌پذیری مناسبی با یکدیگر داشته باشند تا از جدایی فاز در آلیاز جلوگیری به عمل آید. این جدایی، نه تنها موجب کاهش عملکرد باتری، بلکه باعث کاهش عمر آن می‌شود [۱۸،۱۹].

مطالعه شکل‌شناسی ریزساختار کامپوزیتی الکترودها در باتری یون لیتیم، به منظور شناسایی سازوکار پیونده‌دهی پلیمر با مواد فعال کاتدی و کربن، اهمیت دارد. درحقیقت، این سازوکار ارتباط مستقیمی با ریزساختار پلیمر پیونده دارد، به گونه‌ای که با به کار بردن پلیمر بی‌شکل به عنوان پیونده، این پلیمر اطراف ذرات ماده فعال کاتدی را احاطه می‌کند و کاملاً سطح آن را می‌پوشاند. اما پلیمر بلوری، مانند تور متخلخل برای ماده فعال عمل می‌کند. شکل ۲ نمایی از آلیاز متشکل از پلیمر نفیون لیتیمی (Li-Nafion) به عنوان پلیمر پیونده بی‌شکل و PVDF به عنوان پلیمر بلوری همراه با LMO و کربن را نشان می‌دهد [۲۰]. حلال مصرف شده برای پخش مواد کاتدی و رسانا، باید حلال مناسبی برای پلیمر پیونده نیز باشد تا مخلوط تعلیقی یکنواختی را برای کشیده شدن روی سطح جمع‌کننده جریان فراهم کند. نوع و مقدار بهینه حلال اثر زیادی بر توزیع مناسب ذرات پس از خشک شدن دارد و به شدت بر بازده عملکرد باتری اثرگذار است. شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM) الکتروده کاتدی و نحوه



شکل ۲- نمایی از سازوکار پیونده‌دهی: (الف) پلیمر بی‌شکل (لیتیم نفیون) و (ب) پلیمر بلوری PVDF [۲۰].

- سازگاری با مواد الکتروود،

- سازگار با محیط زیست (یعنی فرایند تولید آن‌ها غیر آلاینده بوده و هنگام استفاده نیز غیرسمی باشند) و

- ویژگی‌های مکانیکی مناسب [۳۷-۳۹].

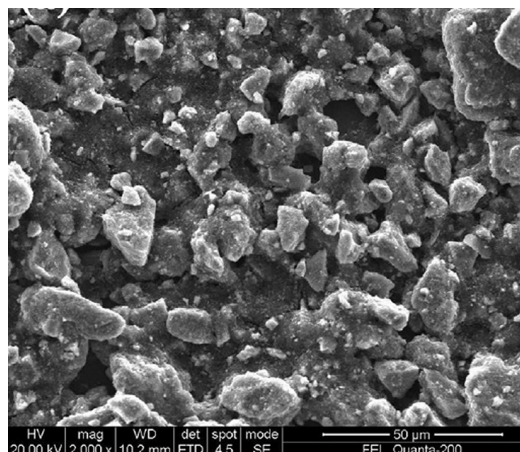
تاکنون، الکترولیت‌های استفاده شده در باتری‌های یون لیتیم اغلب بر پایه الکترولیت‌های مایع و نمک‌های آلی بر پایه  $\text{LiPF}_6$  حل شده در اتیل کربنات-دی‌متیل کربنات-دی‌اتیل کربنات (EC/DMC/DEC) بوده است. مزیت این الکترولیت‌ها مقاومت سطحی کم و سنتز آسان آن‌هاست. از جمله مشکلات و معایب الکترولیت آلی می‌توان اشتعال‌پذیری و ایمنی کم، سمی بودن، سازگار نبودن با محیط زیست، قیمت زیاد و حساسیت به رطوبت و هوا را نام برد. افزون بر این، در سطح مشترک الکترولیت آلی و الکتروود، لایه الکترولیت جامد (SEI) تشکیل می‌شود که کارایی باتری را ضعیف می‌کند. همچنین، مصرف برگشت‌ناپذیر یون‌های الکترولیت، طول عمر باتری را کاهش می‌دهد [۴۰-۴۲].

الکترولیت‌های آبی نوع دیگری از الکترولیت‌های مایع‌اند. مزیت عمده آن‌ها نسبت به الکترولیت آلی، ایمنی بیشتر به دلیل اشتعال‌ناپذیری، سمی نبودن و سازگاری با محیط زیست است. همچنین، فراورش الکترولیت‌های آبی به دلیل عدم حساسیت به رطوبت راحت‌تر و در نتیجه ارزان‌تر است.

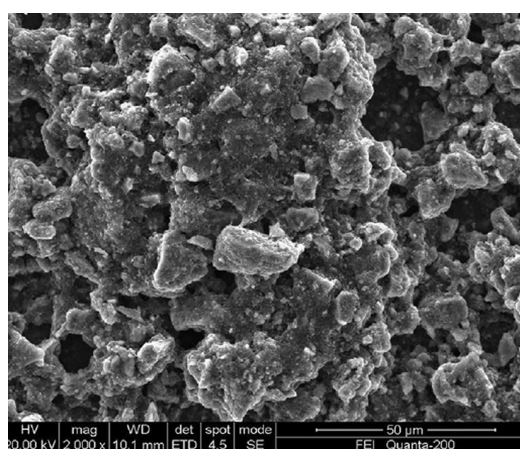
در سال ۲۰۱۲، گروه پژوهشی Chen، نسل جدیدی از باتری‌های لیتیمی را با الکترولیت آبی، به همراه تغییراتی در نوع الکتروود و فرایند الکتروشیمیایی ابداع کرد. از معایب این نوع الکترولیت، می‌توان به کم بودن محدوده پایداری ولتاژ آن‌ها اشاره کرد. به منظور استفاده از الکترولیت‌های آبی، لازم است پلیمرهای متفاوتی را به عنوان پیونده و جمع‌کننده جریان به کار برد [۴۳]. برای نمونه در الکترولیت‌های آبی، بهتر است از پلیمرهای آبدوست (مانند PVAc) استفاده شود که ترشوندگی بهتری را برای اجزای کاتد ایجاد می‌کنند.

معایب و مشکلات الکترولیت‌های مایع موجب شد تا به الکترولیت‌های پلیمری توجه شود. براساس تعریف، الکترولیت پلیمری به پلیمری گفته می‌شود که دارای ویژگی رسانایی یونی در فاز جامد است. پلی‌اتیلن اکسید (PEO) نخستین پلیمری است که رسانندگی یونی قابل قبول در دمای زیاد نشان داده است [۴۴].

الکترولیت‌های پلیمری افزون بر قیمت کم، دارای ویژگی‌های خوبی از جمله بازده، تعداد چرخه و چگالی انرژی بیشتر نسبت به الکترولیت‌های مایع هستند. به‌طور کلی، از مهم‌ترین برتری‌های باتری‌های پلیمری می‌توان به کاهش احتمال تراوش الکترولیت، به بیرون و کاهش تراوش مواد الکتروودها به درون الکترولیت،



(الف)



(ب)

شکل ۳- تصویر SEM پلیمر پیونده PAA تهیه شده در دو نوع حلال مختلف: (الف) NMP و (ب) آب [۲۱].

پیوندهای ذرات کاتد را برای پلی‌آکرلیک اسید (PAA) در حلال NMP یا آب نشان می‌دهد [۲۱]. در جدول ۱، انواع پلیمرهای پیونده به کار رفته در باتری‌های یون لیتیم و ویژگی‌های هر کدام آمده است.

### پلیمرها در الکترولیت

الکترولیت‌هایی که در باتری‌های یون لیتیم استفاده می‌شوند، باید دارای ویژگی‌های خاصی باشند که از جمله می‌توان به این نکات اشاره کرد:

- هدایت یونی زیاد (افزایش نفوذ یون‌های لیتیمی)،
- پایداری الکتروشیمیایی زیاد (جلوگیری از انجام واکنش‌های جانبی میان الکتروودها و الکترولیت)،
- دمای تبخیر (ایمنی کافی) زیاد،
- قیمت مناسب،

جدول ۱- انواع پلیمرهای پیونده در الکتروود باتری‌های یون لیتیم.

مرجع	ویژگی	ماده پیونده
۲۲	بهبود عملکرد چرخه‌ای الکتروشیمیایی و افزایش بازده کولنی اولیه و کلی در اثر پوشش دهی PEI بر CNT	پلی اتیلن ایمین (PEI)
۲۳	تماس بهتر مواد فعال، روی جمع کننده جریان و در نتیجه، ماندگاری بیشتر ظرفیت	هگزاfluوروپروپیلن-پلی وینیلیدن فلئورید (PVDF-HFP)
۲۴	افزایش انعطاف پذیری الکتروود و استحکام پیونددهی در مقایسه با PVDF و در نتیجه بهبود بخشیدن پایداری چرخه‌ای و افزایش سرعت عملکرد در کاتد	لاتکس پلی بوتیل آکریلات (PBA) و PAN (۳:۷)
۲۵	سرعت عملکرد بیشتر، کاهش مقدار $Mn^{2+}$ حل شده در الکتروولیت و بهبود برگشت پذیری و عملکرد چرخه‌ای به دلیل ترشوندگی مناسب با الکتروولیت و پوشش دهی بیشتر سطح ماده فعال در مقایسه با PVDF	PAN
۲۶	افزایش ماندگاری ظرفیت و بهبود سرعت عملکرد به دلیل استحکام پیونددهی بهتر	PAA
۲۷	افزایش عمر چرخه‌ای باتری در اثر پیونددهی مناسب روی آلومینیم (به عنوان جمع کننده جریان)	SBR/P(AN-AM)
۲۸	ماندگاری ظرفیت زیادت و سرعت عملکرد مناسب تر به دلیل رسانایی یونی بیشتر CMC و برگشت پذیری بهتر، افزایش ظرفیت در اثر افزایش مقدار یون لیتیم، سازگاری با محیط زیست به دلیل استفاده از حلال آبی	CMC-Li
۲۹	افزایش انعطاف پذیری الکتروود به سبب افزودن SBR به PAN و در نتیجه بهبود عملکرد چرخه‌ای	PAN/SBR
۳۰	عملکرد چرخه‌ای بهتر در دماهای بیشتر به دلیل پیونددهی بیشتر در دماهای زیاد	PVDF و کوپلی ایمید (PVDF-P84)
۳۱	بازده کولنی بهتر، عملکرد چرخه‌ای مناسب تر و افزایش ماندگاری ظرفیت	PAAX (X=Na, K, Li)
۳۲-۳۴	زیست سازگاری بیشتر با محیط نسبت به PVDF، عملکرد چرخه‌ای به دلیل رسانایی یونی بیشتر	CMC
۳۵	عملکرد الکتروشیمیایی بهتر از نظر بازده کولنی و چرخه پذیری در مقایسه با PVDF، ماندگاری ظرفیت بهتر	کیتوسان
۳۶	رسانایی یونی بیشتر و انعطاف پذیری زیادت نسبت به PVDF که موجب افزایش ظرفیت تخلیه و بهبود عملکرد چرخه‌ای شده است.	پلی اتیلن گلیکول متیل اتر متاکریلات-متیل متاکریلات-ایزوبوتیل وینیل اتر (PEGMA-co-MMA-co-IBVE)

جداکننده را دارد. باید توجه داشت، رسانش PEO نسبت به یون لیتیم تنها در دماهای بیش از  $70^{\circ}\text{C}$  امکان پذیر است. همچنین، رسانش در این پلیمرها اغلب به دلیل حرکت آنیون‌ها بوده و تعداد لیتیم انتقال یافته با کمک این پلیمرها کم است. باتوجه به اینکه نکات یاد شده موجب ایجاد محدودیت در قدرت باتری‌های یون

افزایش مقاومت در برابر اشتعال و در نتیجه، افزایش ایمنی اشاره کرد. همچنین، طراحی و ساخت باتری‌های پلیمری بسیار ساده تر از باتری‌های دارای الکتروولیت مایع است، به گونه‌ای که با استفاده از این الکتروولیت‌ها تولید باتری با فیلم‌های نازک تر امکان پذیر است. زیرا در این حالت، پلیمر هم نقش الکتروولیت و هم نقش

جدول ۲- مزایا، معایب، روش اصلاح و بهبود پلیمرهای به کار رفته در الکترولیت‌های پلیمری.

پلیمر	مزایا	معایب	روش اصلاح خواص
PEO	فرایندپذیری آسان	رسانایی یونی ضعیف به دلیل درجه بلورینگی زیاد [۵۰]	افزایش رسانایی یونی با افزودن نرم‌کننده [۵۰]
PAN	بازدارنده شعله، رسانایی یونی بیشتر از PEO در محدوده $10^{-3}$ - $10^{-5}$ S.cm <sup>-1</sup> [۵۱]	زیادبودن مقاومت سطحی و کم‌بودن رسانایی یونی [۵۲]	موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی، رسانایی یونی و خواص سطحی با استفاده از آلیاژ دو پلیمر PAN و PEO با نسبت EC/BL ۳۸-۴۰ PAN - ۱۲ LiClO <sub>4</sub> - ۱۰ PEO [۵۲]
PMMA	ارزان بودن، سنتز آسان و خواص سطحی مناسب [۵۳]	انعطاف‌پذیری کم [۵۳]	بهبود انعطاف‌پذیری با کوپلیمرکردن با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) [۵۳].
PVDF	افزایش غلظت حامل بار در اثر بزرگ‌تر بودن ثابت دی‌الکتریک [۵۴]	رسانایی یونی ضعیف به دلیل درجه بلورینگی زیاد	کاهش بلورینگی آلیاژ در اثر افزودن PVAc به PVDF و تا حدود زیادی افزایش رسانایی یونی [۵۵،۵۶]

می‌شوند. وظیفه آن جمع کردن و انتقال الکترون به الکترولیت یا مدار جریان است. به‌طور معمول، در سلول‌های یون لیتیم متداول (دارای الکترولیت آلی)، جمع‌کننده جریان از جنس فلزات خالص یا آلیاژ رسانا (مانند آلومینیم، مس، نیکل، طلا، پلاتین، نقره و پالادیم) است که در محدوده ولتاژ باتری بی‌اثرند [۵۷]. هنگام استفاده از الکترولیت پایه آبی، از آنجا که جمع‌کننده جریان فلزی در تماس با الکترولیت آبی دچار خوردگی می‌شود، از جمع‌کننده جریان کامپوزیتی از جنس پلی‌اتیلن-کربن (PE/C) با خاصیت رسانایی استفاده می‌شود [۴۳].

### پلیمرها در جداکننده‌ها

صفحه جداکننده در باتری، دو الکتروود را از یکدیگر جدا کرده و مانع اتصال کوتاه آن‌ها می‌شود. در الکترولیت مایع، جداکننده ماده‌ای اسفنجی و متخلخل است که به الکترولیت آغشته شده و میان دو الکتروود قرار می‌گیرد تا افزون بر ممانعت از تماس فیزیکی دو الکتروود، به‌راحتی امکان عبور و خروج یون‌ها را فراهم کند. بنابراین لازم است، جداکننده دارای ویژگی‌هایی چون عایق الکترونیکی خوب، ترشوندگی مناسب با الکترولیت، پایداری مکانیکی و کمینه مقاومت شیمیایی در برابر الکترولیت و در محیط بسیار فعال الکتروشیمیایی باشد. افزون بر این، جداکننده در دمای زیاد در اثر ذوب یا بسته‌شدن منافذ، بدون از دست دادن پایداری مکانیکی، انتقال یون لیتیم را متوقف می‌کند. این ویژگی ایمنی، خاموش کردن گرمایی (thermal shut down) نامیده می‌شود. موادی

لیتیم می‌شود، استفاده از الکترولیت‌های پلیمری دارای نانوذرات پرکننده سرامیکی مانند  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$  و  $SiO_2$  درون ماتریس پلیمر مطلوب است. درحقیقت، نانوذرات نقش نرم‌کننده را در زنجیر ایفا کرده و افزون بر جلوگیری از ایجاد فاز بلوری، موجب افزایش گستره مفید رسانش الکترولیت می‌شوند. همچنین، پرکننده‌های سرامیکی با برهم‌کنش اسید و باز لوئیس که بین سطح سرامیک و بخش‌های زنجیر پلی‌اتیلن اکسید اتفاق می‌افتد، تعداد یون لیتیم انتقالی را افزایش می‌دهند. در بیشتر مواقع به الکترولیت پلیمری، نمک لیتیم محلول در حلال آلی (مانند حلال‌های الکترولیت مایع) نیز افزوده می‌شود و الکترولیت پلیمری ژل‌مانند به‌دست می‌آید. این عمل موجب افزایش فاز بی‌شکل در الکترولیت و افزایش رسانایی، به‌ویژه در دمای محیط می‌شود [۴۹-۴۵].

به‌جز PEO، می‌توان به پلی‌پروپیلن اکسید (PPO)، پلی‌آکریلونیتریل (PAN)، PMMA، PVC و PVDF به‌عنوان سایر پلیمرهای متداول برای ساخت الکترولیت پلیمری، اشاره کرد [۳۷]. در جدول ۲ معایب و مزایای هر یک از این پلیمرهای پایه در الکترولیت و چگونگی برطرف کردن مشکلات و بهبود خواص آن‌ها آمده است.

### پلیمرها در مواد جمع‌کننده جریان

جمع‌کننده جریان، فیلم (ورقه نازک) یا صفحه مشبک و توری شکل ساخته شده از ماده‌ای بی‌اثر، پایدار و البته رساناست که مواد مختلف سازنده الکتروودها (کاتد یا آند) روی آن پوشش داده

جدول ۳- انواع جداکننده‌های پلیمری استفاده شده در باتری‌های یون لیتیم.

مرجع	ویژگی‌ها	نوع جداکننده
۵۹	مقایسه با PP: عملکرد الکتروشیمیایی (عملکرد چرخه‌ای، سرعت عملکرد، ترشوندگی با الکترولیت) بهتر، ظرفیت جذب و ماندگاری با الکترولیت بیشتر، رسانایی یونی بهتر، قیمت کمتر و سازگاری با محیط زیست	پلی‌وینیل الکل (PVA)
۶۰	دارای پایداری گرمایی تا ۳۰۰°C	کامپوزیت $Al_2O_3$ -پلیمر (کوپلی-ایمید) پوشش‌یافته روی سطح PP کامپوزیت پلی‌ایمید-نانوالیاف
۶۱	نداشتن تجزیه گرمایی تا دمای ۶۰۰°C و کاهش حجم تا دمای ۲۰۰°C، ترشوندگی با الکترولیت، ظرفیت تخلیه و ماندگاری ظرفیت مناسب و پایداری الکتروشیمیایی زیاد	کامپوزیت پلی‌ایمید-نانوالیاف
۶۲	مقایسه با پلی‌اولفین اصلاح نشده: پایداری گرمایی بیشتر، تغییر حجم برای جداکننده اصلاح شده ۴/۶٪ و برای نمونه اصلاح نشده ۳۸/۶٪ و عملکرد الکتروشیمیایی مشابه برای دو نمونه	اصلاح سطح پلی‌اولفین با پیوندزنی Silicon-O <sub>2</sub> روی آن
۶۳	مقایسه با PP: عملکرد چرخه‌ای بهتر، ظرفیت تخلیه، ماندگاری ظرفیت، ایمنی (پایداری گرمایی) و رسانایی یونی بیشتر	PVDF/SiO <sub>2</sub>
۶۴	مقایسه با PVDF اصلاح نشده: افزایش مقدار جذب و نگهداری الکترولیت، افزایش رسانایی یونی و عملکرد الکتروشیمیایی و ظرفیت توانی بهتر	پلی‌دوپامین (PDA) پوشش‌یافته روی PVDF
۶۵	مقایسه با PI بدون پوشش: عملکرد الکتروشیمیایی (عملکرد چرخه‌ای و سرعت عملکرد) بهتر، رسانایی یونی مناسب‌تر و پایداری دمایی بیشتر	SiO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> پوشش‌یافته روی PI
۶۶	مقایسه با PAN: پایداری مکانیکی بیشتر، پایداری دمایی مناسب‌تر، قابلیت نگهداری الکترولیت در حد عالی، پایداری و سازگاری با الکترولیت و عملکرد چرخه‌ای مطلوب	PAN تبدیل شده به PAN-Oxy با الکتروریسی (Oxy=O)
۶۷	مقایسه با پوشش SP: پایداری گرمایی بیشتر، پایداری مکانیکی مناسب‌تر با جذب و ماندگاری الکترولیت بهتر و عملکرد الکتروشیمیایی مشابه با جداکننده PE	سرامیک پوشش‌یافته روی PE
۶۸	مقایسه با PP: پایداری گرمایی بیشتر، ترشوندگی با الکترولیت و کاهش حجم عالی در حد ۲٪ در دمای ۱۷۰°C، عملکرد چرخه‌ای بهتر و ظرفیت تخلیه بیشتر	زنولیت نوع HFP-PVDF-NaA پوشش‌یافته روی PET
۶۹	مقایسه با PMMA: رسانایی و مقدار جذب الکترولیت بیشتر و ظرفیت تخلیه و سرعت عملکرد بهتر	PMMA پوشش‌یافته روی PE

میکروسکوپی، تعیین میزان جمع‌شدگی گرمایی (thermal shrinkage) و آزمایش مقدار جذب و ماندگاری الکترولیت (electrolyte uptake/retention) در جداکننده نیز روی نمونه پلیمری انجام می‌شود [۵۸]. گاهی لازم است، پلیمر معمولی مانند پلی‌اتیلن یا پلی‌پروپیلن، به روش‌های ترکیب با نانوذرات یا اصلاح سطحی از راه پیوندزنی برای دستیابی به خواص مطلوب، اصلاح شود. در جدول ۳ جداکننده‌های متداول استفاده شده در باتری‌های یون لیتیم درج شده‌اند.

مانند الیاف بافته نشده از جنس پنبه، نایلون، پلی‌استر و پشم‌شیشه، فیلم‌های غشایی پلیمری از جنس پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، تفلون و پلی‌وینیل کلرید) یا مواد طبیعی از جمله آذیست، چوب و لاستیک طبیعی، مهم‌ترین جداکننده‌ها هستند [۱].

به‌منظور اطمینان از مطلوب بودن یک جداکننده پلیمری، در کنار انجام آزمون‌های الکتروشیمیایی (مانند آزمایش اندازه‌گیری ظرفیت باتری) آزمون‌های اندازه‌گیری مقدار تخلخل، اندازه‌گیری زاویه تماس با الکترولیت، بررسی شکل‌شناسی به روش‌های



داده است، خواص مهمی از باتری‌ها از جمله پایداری و سرعت عملکرد آن‌ها به مقدار درخور توجهی به خواص ماده پلیمری مصرف شده به‌عنوان پیونده مربوط می‌شود. با انتخاب درست پلیمر پیونده (متناسب با نوع ذرات کاتد و نوع الکترولیت مدنظر)، می‌توان عملکرد باتری را تا حدود زیادی بهبود بخشید. همچنین معلوم شد، نوع پلیمر استفاده شده در جداکننده، افزون بر اثرگذاری روی عملکرد الکتروشیمیایی باتری، مانند ظرفیت و ماندگاری آن، بر پایداری گرمایی و مکانیکی باتری نیز به‌شدت اثرگذار است. این مقاله مروری، می‌تواند راه‌گشای توسعه صنعت تولید باتری‌های یون لیتیم در کشور با کاربرد مناسب پلیمرها در این صنعت باشد.

مرور مقالات نشان داد، در سال‌های اخیر با کاربرد گسترده باتری‌های یون لیتیم، نقش پلیمرها در ساختار این باتری‌ها، به‌ویژه به‌عنوان الکترولیت، پیونده در الکتروود یا در جداکننده افزایش یافته است. الکترولیت‌های آلی با وجود عملکرد به‌نسبت مناسب، به دلایل ایمنی و زیست‌محیطی با الکترولیت‌های آبی یا الکترولیت‌های پلیمری در حال جایگزینی هستند. الکترولیت‌های پلیمری، دارای ویژگی‌های مطلوب‌تری، مانند بازده زیادتر، تعداد بیشتر چرخه پر-خالی شدن و وزن کمتر نسبت به الکترولیت‌های آلی نیز هستند. مطالعات نشان

## مراجع

- Daniel C., Materials and Processing for Lithium-ion Batteries, *JOM*, **9**, 43-48, 2008.
- Amatucci G.G., CoO<sub>2</sub> the End Member of the Li<sub>x</sub>CoO<sub>2</sub> Solid Solution, *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 1110-1114, 1996.
- Fergus J.W., Development in Cathode Materials for LiBs., *J. Power Sources*, **195**, 939-954, 2010.
- Kim J.K., *Advanced Materials for Rechargeable LiBs*, Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2013.
- Li C., Yin X., Chen L., Li Q., and Wang T., Porous Carbon Nanofibers Derived from Conducting Polymer: Synthesis and Application in Lithium-Ion Batteries with High-Rate Capability, *Phys. Chem.*, **304**, 13438-13442, 2009.
- Bakenov Z. and Taniguchi I., Physical and Electrochemical Properties of LiMnPO<sub>4</sub>/C Cathode Prepared with Different Conductive Carbons, *J. Power Sources*, **21**, 7445-7451, 2010.
- Jarvis C.R., Macklin W.J., Macklin A.J., Mattingley N.J., and Kronfli E., Use of Grafted PVdF-Based Polymers in Lithium Batteries, *J. Power Sources*, **97**, 664-666, 2001.
- Cheng D., Wang G., and Bao D., Lithium Iron Phosphate Battery Electrode and Method for Manufacturing the Same, *US. Pat. 9,012,083 B2*, 2015.
- Wu Q., Investigations on High Energy Lithium-ion Batteries with Aqueous Binder, *Electrochim. Acta*, **10**, 1-6, 2013.
- Schmidt G.R., Alkaline Battery, Electrolyte Absorber Therefor, *US. Pat. 4,298,668*, 1981.
- Chagnes A. and Swiatowska J., Electrolyte and Solid-Electrolyte Interphase Layer in Lithium-Ion Batteries, *Intech*, 2012.
- Doberdo I., Löffler N., Laszczynski N., Cericol D., Penazzi N., Bodoardo S., Kim G., and Passerini S., Enabling Aqueous Binders for Lithium Battery Cathodes Carbon Coating of Aluminum Current Collector, *J. Power Sources*, **248**, 1000-1006, 2014.
- Sun J., Guo T., Deng H., Jiao K., and Huang X., Effect of Electrode Variable Contact Angle on the Performance and Transport Characteristics of Passive Direct Methanol Fuel Cells, *Int. J. Hydrogen Energ.*, **40**, 10568-10587, 2015.
- Choi N.S., Roh S.W., Park Y.C., Kim S.S., and Hour S.H., Lithium Battery Having Evenly Coated Negative Electrode and Method of Manufacture Thereof, *US. Pat. 0,123,864 A1*, 2011.
- Yan X., Zhang Y., Zhu K., Gao Y., Zhang D., and Chen G., Enhanced Electrochemical Properties of TiO<sub>2</sub>(B) Nanoribbons Using the Styrene Butadiene Rubber and Sodium Carboxyl Methyl Cellulose Water Binder, *J. Power Sources*, **245**, 95-102, 2014.
- Lim S., Kim S., Ahn K., and Lee S., The Effect of Binders on the Microstructure Formation of Lithium-ion Battery Anode Slurries, *J. Power Sources*, **299**, 221-230, 2014.
- Zhang R., Yang X., Zhang D., Qiu H., Fu Q., and Na H., Water Soluble Styrene Butadiene Rubber and Sodium Carboxyl Methyl Cellulose Binder for ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Anode Electrodes in Lithium Ion Batteries, *J. Power Sources*, **285**, 225-234, 2015.
- Tawansi A., Oraby A.H., and Badr S., Effect of MnCl<sub>2</sub> and

- CoCl<sub>2</sub> Mixed Fillers on the Microcrystallite Formation and Physical Properties of Polyvinyl Acetate/Polyvinylidene Fluoride Blends, *The 8th Arab International Conference on Materials Science*, Egypt, Alexandria, 2004.
19. Ulaganathana M. and Pethaiahe S., Li-ion Conduction in PVAc Based Polymer Blend Electrolytes for Lithium Battery Applications, *Mater. Chem. Phys.*, **129**, 471-476, 2011.
  20. Chiu K.F., Hsuan Sua S., Leu H.J., and Chen Y., Application of Lithiated Perfluorosulfonate Ionomer Binders to Enhance High Rate Capability in LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Cathodes for Lithium Ion Batteries, *Electrochim. Acta*, **117**, 134-138, 2013.
  21. Zhang Z., Zeng T., Lai Y., Jia M., and Li J., A Comparative Study of Different Binders and their Effects on Electrochemical Properties of Cathode in LiB Batteries, *J. Power. Sources*, **247**, 1-8, 2013.
  22. Bae J., Cha S.H., and Park J., A New Polymeric Binder for Silicon-Carbon Nanotube Composites in Lithium-ion Battery, *Macromol. Res.*, **21**, 826-831, 2013.
  23. Baryskov V. and Khomenko V., The Influence of Polymer Binders on the Performance of Cathodes for Lithium-Ion Batteries, *Mater. Sci. Appl. Chem.*, **21**, 67-71, 2010.
  24. Lee J.T., Chu Y.J., Peng X.W., and Wang F.M., Novel and Efficient Water-based Composite Binder for LiCoO<sub>2</sub> Cathodes in Lithium-ion Batteries, *J. Power Sources*, **173**, 985-989, 2007.
  25. Lee S., Effects of Polymeric Binders on Electrochemical Performances of Spinel Lithium Manganese Oxide Cathodes in Lithium Ion Batteries, *J. Power Sources*, **269**, 418-423, 2014.
  26. Magasinski A., Zdyrco B., and Kovalenko I., Toward Efficient Binders for Li-Ion Battery, Si-Based Anodes: Polyacrylic Acid, *Appl. Mater. Interfaces*, **2**, 3004-3010, 2010.
  27. Muthu M.E.J. and Mamary M., Water Soluble Polymer Binder for Lithium Ion Battery, *US. Pat. 8,092,557 B2*, 2012.
  28. Qiu L., Enhanced Electrochemical Properties of LiFePO<sub>4</sub> (LFP) Cathode Using the (CMC-Li) as Novel Binder in Lithium-ion Battery, *Carbohydr. Polym.*, **111**, 588-591, 2014.
  29. Sun X., Application of a Novel Binder for Activated Carbon-based Electrical Double Layer Capacitors with Non Aqueous Electrolytes, *J. Solid State Electr.*, **17**, 2035-2042, 2013.
  30. Choi J., Improved High-temperature Performance of Lithium-ion Batteries through Use of a Thermally Stable Co-polyimide-based Cathode Binder, *J. Power Sources*, **252**, 138-143, 2014.
  31. Chong J., A Comparative Study of Polyacrylic Acid and Poly(vinylidene difluoride) Binders for Spherical Natural Graphite/LiFePO<sub>4</sub> Electrodes and Cells, *J. Power Sources*, **196**, 7707-7714, 2011.
  32. Gao X., *Development of New Electrode Material for Lithium Battery*, Msc Thesis, University of Wologong, Australia, 2011.
  33. Xu J., Chou S., Gu Q., Liu H., and Dou S., The Effect of Different Binders on Electrochemical Properties of LiNi<sub>1/3</sub>Mn<sub>1/3</sub>Co<sub>1/3</sub>O<sub>2</sub> Cathode Material in Lithium Ion Batteries, *J. Power Sources*, **225**, 172-178, 2013.
  34. Gou J. and Wang C., A Polymer Scaffold Binder Structure for High Capacity Silicon Anode for Li-ion Battery, *Chem. Commun.*, **46**, 1428-1430, 2010.
  35. Chai L., Qu Q., and Zhang L., Chitosan, A New and Environmental Benign Electrode Binder for Use with Graphite Anode in Li-ion Batteries, *Electrochim. Acta*, **105**, 378, 2013.
  36. Tran B., Oladeji I.O., Wang Z., Calderon J., and Chai I.G., Adhesive PEG-based Binder for Aqueous Fabrication of Thick Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Electrode, *Electrochim. Acta*, **88**, 536-542, 2013.
  37. Armand M. and Tarascon M., Building Better Batteries, *Nature*, **451**, 652-657, 2008.
  38. Tarascon M. and Armand M., Issues Facing Rechargeable, *Nature*, **414**, 359-367, 2001.
  39. Mortia M., Organic Electrolytes for Rechargeable LiBs, *J. Power Sources*, **80**, 156-180, 1998.
  40. Zhang R., Hashemi N., Ashuri M., and Montazami R., Advanced Gel Polymer Electrolyte for Lithium-ion Polymer Batteries, *ASME 2013, The 7th International Conference on Energy Sustainability*, American Society of Mechanical Engineers, July 2013.
  41. Zhang S., A Review on Electrolyte Additives for Lithium-ion Batteries, *J. Power Sources*, **162**, 1379-1394, 2006.
  42. Lithium Battery Technologies: Electrolytes, *Lithium Process Chemistry*, Chagnes A. and Swiatowska J. (Eds.), Elsevier, The Netherlands, Chap.5, 167-189, 2015.
  43. Armand M., Chanagno M., and Duclot M., Polyethers as Solid Electrolytes, *Proceedings of the International Conference on Fast Ion Transport in Solids: Electrodes and Electrolytes*, North Holland, Amsterdam, 131-136, 1979.
  44. Croce F., Appetecchi G., Persi L., and Scrosati B., Nanocomposite Polymer Electrolytes for Lithium Batteries, *Nature*, **394**, 456-458, 1998.

45. Meyer W., Polymer Electrolytes for Lithium-Ion Batteries, *Adv. Mater.*, **10**, 439-448, 1998.
46. Song J., Wang Y., and Wan C., Review of Gel-type Polymer Electrolytes for Lithium-ion Batteries, *J. Power Sources*, **77**, 183-197, 1999.
47. Bryandal R.J., Cathode-depolarizer Mix Containing A Polyacrylamide Binder, *US. Pat. 4,014,712*, 1977.
48. Manuel Stephan A., Review on Gel Polymer Electrolytes for Lithium Batteries, *Eur. Polym. J.*, **42**, 21-42, 2006.
49. Yan J., Wang J., Liu H., Bakenov Z., Gosselink D., and Chen P., Rechargeable Hybrid Aqueous Batteries, *J. Power Sources*, **216**, 222-226, 2012.
50. Ito Y., Kanehori K., Miyauchi K., and Kudo T., Ionic Conductivity of Electrolytes Formed from PEO-LiCF<sub>3</sub>SO<sub>3</sub> Complex Low Molecular Weight Poly(ethylene glycol), *J. Mater. Sci.*, **22**, 1845-1849, 1987.
51. Feuillade G. and Perche P., Ion-conductive Macromolecular Gels and Membranes for Solid Lithium Cells, *J. Appl. Electrochem.*, **5**, 63-69, 1975.
52. Choi B., Kim Y., and Shin H., Ionic Conduction in PEO-PAN Blend Polymer Electrolytes, *Electrochim. Acta*, **45**, 1371-1374, 2000.
53. Lee H., Yoo J.K., Park J.H., Kim J.H., Kang K., and Jung Y.S., A Stretchable Polymer-Carbon Nanotube Composite Electrode for Flexible Lithium-ion Batteries, *Adv. Energ. Mater.*, **2**, 976-979, 2012.
54. Ji G., Zhu B.K., and Cui Z., PVDF Porous Matrix with Controlled Microstructure Prepared by TIPS Process as Polymer Electrolyte, *Polymer*, **48**, 6415-6425, 2007.
55. Baskaran R. and Selvasekarapandian S., AC Impedance Investigations on (x)PVAc-(1-x)PVdF Blends with LiClO<sub>4</sub>, *Mater. Chem. Phys.*, **98**, 55-61, 2006.
56. Choi N., Lee Y., and Park K., Preparation and Electrochemical Characteristics of Plasticized Polymer Electrolytes Based upon a P(VdF-co-HFP): PVAc, *Electrochim. Acta*, **46**, 1581-1586, 2001.
57. Lee K.T. and Cho J., Roles of Nanosize in Lithium Reactive Nanomaterials for Lithium ion Batteries, *Nano. Today*, **6**, 14-28, 2011.
58. Tanji H., Secondary Batteries-Li-Ion-Separators, *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Elsevier, The Netherlands, 356-367, 2009.
59. Xiao W., Gao Z., Wang Z., Liu J., and Yan C., A Novel NaA-type Zeolite-embedded Composite Separator for Lithium-ion Battery, *Mater. Let.*, **145**, 177-179, 2015.
60. Lee Y., Lee H., and Lee T., Synergistic Thermal Stabilization of Ceramic/co-polyimide Coated Polypropylene Separators for Lithium-ion Batteries, *J. Power Sources*, **294**, 537-544, 2015.
61. Shayapat J., Chung H., and Park J., Electrospun Polyimide-Composite Separator for Lithium-ion Batteries, *Electrochim. Acta*, **170**, 110-121, 2015.
62. Zhao P., Yang J., Shang M., Wang L., Fang M., Wang J., and He X., Surface Modification of Polyolefin Separators for Lithium-ion Batteries to Reduce Thermal Shrinkage without Thickness Increase, *J. Energ. Chem.*, **924**, 138-144, 2015.
63. Zhang F., Poly(vinylidene fluoride)/SiO<sub>2</sub> Composite Membranes Prepared by Electrospinning and Their Excellent Properties for Nonwoven Separators for Lithium-ion Batteries, *J. Power Sources*, **251**, 431-433, 2014.
64. Cao C., Tan L., Liu W., and Ma J., Polydopamine Coated Electrospun Poly(vinylidene fluoride) Membrane as Separator for Lithium-ion Batteries, *J. Power Sources*, **248**, 224-229, 2014.
65. Liang X., Yang Y., and Jine X., The High Performances of SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Coated Polyimide Fibrous Separator for Lithium-ion Battery, *J. Membr. Sci.*, **493**, 1-7, 2015.
66. Lee J.H., Manuel J., Choi H., and Park A., Partially Oxidized Polyacrylonitrile Nanofibrous Membrane as a Thermally Stable Separator for Lithium Ion Batteries, *Polymer*, **68**, 335-343, 2015.
67. Zhang P., Chen L., Shi C., Yang P., and Zhao J., Development and Characterization of Silica Tube-Coated Separator for Lithium Ion Batteries, *J. Power Sources*, **284**, 10-15, 2015.
68. Xiao W., Zhao L., Gong Y., and Liu J., Preparation and Performance of Poly(vinyl alcohol) Porous Separator for Lithium-ion Batteries, *J. Membr. Sci.*, **487**, 221-228, 2015.
69. Park J., Park W., Kim J., Yoo D., Kim H., Jeong Y., Kime D., and Lee S., Close-packed Poly(methyl methacrylate) Nanoparticle Arrays-coated Polyethylene Separators for High-power Lithium-ion Polymer Batteries, *J. Power Sources*, **196**, 7035-7038, 2011.