



Elektrolit Polimer Padat dari Pencampuran PVDF-HFP dan PEO serta Modifikasi Filler Sebagai Bahan Dasar Baterai Lithium-Ion

Reyhan Fikri Mushaddaq^{1*}, Akhmad Aminuddin Bama², Ramlan³, Titik Lestariningsih⁴ 

^{1,2,3} Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Palembang, Indonesia

⁴ Pusat Riset Fisika Badan Riset dan Inovasi Nasional, Kawasan PUSPITEK, Tangerang, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received March 18, 2022

Revised March 19, 2022

Accepted December 14, 2022

Available online April 25, 2023

Kata Kunci:

Elektrolit, Polimer, Poly Vinylidene Fluoride- Hexafluoropropylene, Poly(Ethylene Oxide), Konduktivitas

Keywords:

Electrolyte, Polymer, Poly Vinylidene Fluoride- Hexafluoropropylene, Poly (Ethylene Oxide), Conductivity



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

ABSTRAK

Baterai lithium-ion sering mengalami masalah keamanan terkait dengan penggunaan elektrolit cair yang mudah terbakar. Untuk mengatasi masalah ini, elektrolit polimer padat digunakan sebagai pengganti elektrolit cair ; namun sampai saat ini pengembangannya dari segi konduktivitas ionik masih kurang maksimal. Untuk meningkatkan kualitas elektrolit polimer padat, banyak peneliti menggunakan polimer inang yang memiliki sifat dan keunggulan yang baik, salah satunya adalah PEO. Satu kelemahan elektrolit polimer padat yang berbasis PEO adalah kristalinitas tinggi yang menyebabkan konduktivitas ioniknya menjadi rendah. Kelemahan ini dapat dihilangkan dengan menggabungkan PEO dengan polimer lain yaitu PVDF-HFP. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan lembaran polimer elektrolit yang berisi kombinasi PEO dan PVDF-HFP sebagai polimer, TiO₂ yang direndam di 2% asam sulfat sebagai filler, LiBOB sebagai garam lithium dan menganalisis sifat-sifat baik morfologi, kristalinitas dan konduktivitas ioniknya. Karakterisasi lembaran elektrolit dilakukan menggunakan SEM, XRD, dan EIS. Lembaran elektrolit polimer padat yang dihasilkan menunjukkan bahwa morfologi permukaan pada lembar elektrolit polimer padat berpori dengan porositas sebesar 43,27 %, kemudian Kristalinitas dari lembar sebesar 28,254 % dan konduktivitas ioniknya sebesar 5,626 x 10⁻⁸ S/cm.

ABSTRACT

Lithium-ion batteries often suffer from safety issues due to the use of liquid electrolyte that are flammable. To solve this problem, solid electrolyte polymer is used instead of liquid electrolyte; however, until now its development in terms of ionic conductivity is still not optimal. To improve the quality of solid polymer electrolyte, many researchers use a host polymer which has good properties and advantages, one of which is PEO. One disadvantage of PEO-based solid polymer electrolyte is its high crystallinity that can cause a low ionic conductivity. This weakness can be eliminated by combining PEO with another polymer, that is PVDF-HFP. This study aims to produce an electrolyte polymer sheet containing a combination of PEO and PVDF-HFP as polymers, TiO₂ immersed in 2% sulfuric acid as filler, LiBOB as lithium salt and to analyze the good properties of its morphology, crystallinity and ionic conductivity. The electrolytic sheet characterization was carried out using SEM, XRD, and EIS. The resulting solid polymer electrolyte sheet showed that the surface morphology of the electrolyte solid polymer sheet was porous with a porosity of 43.27%, then the crystallinity of the sheet was 28.254% and the ionic conductivity was 5,626 x 10⁻⁸ S/cm.

1. PENDAHULUAN

Baterai lithium ion merupakan salah satu jenis baterai yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi seperti alat-alat listrik portabel, kendaraan listrik dan sebagainya (Banitaba, Semnani, Soureshjani, Rezaei, & Ensafi, 2020). Namun, masalah keamanan terkait cairan elektrolit yang mudah terbakar dan juga pembentukan dendrit yang akhirnya mengarah ke korsleting internal di baterai telah menjadi kendala utama dalam pengembangan baterai lithium ion (Banitaba et al., 2020; Didwal et al., 2021; Gao, Grundish, Zhao, Zhou, & Goodenough, 2021; Karabelli, Birke, & Weeber, 2021; Sun et al., 2021). Dalam beberapa dekade terakhir, elektrolit polimer padat telah menarik banyak perhatian karena dapat meningkatkan stabilitas dan keamanan elektrokimia dari Baterai lithium ion. Tetapi, konduktivitas ion yang buruk dari elektrolit polimer padat tetap menjadi masalah yang belum terselesaikan yang membatasi aplikasinya (Banitaba et al., 2020). Untuk meningkatkan konduktivitas ioniknya, banyak peneliti

*Corresponding author.

E-mail addresses: reyhanfikri13@gmail.com (Reyhan Fikri Mushaddaq)

memodifikasi elektrolit polimer padat dengan menggabungkan dua jenis polimer (Li et al., 2020; Ruan et al., 2022). Poly (ethylene oxide) (PEO) merupakan polimer yang memiliki elektron yang berlebih dalam gugus fungsi yang mengandung oksigen pada segmen, sedangkan orbital elektron ion litium mengandung orbital kosong, ion lithium dapat dengan mudah berkoordinasi dengan gugus fungsi oksigen eter PEO karena struktur khusus ini. Oleh karena itu, elektrolit berbasis PEO memiliki kemampuan yang kuat untuk memisahkan garam lithium dan memiliki stabilitas yang sangat baik untuk lithium (Johari, Tajuddin, Hanibah, & Deraman, 2021; Li et al., 2020). Namun, PEO adalah polimer kristal, dan kristalisasi pada suhu kamar akan memperlambat gerakan rantai segmen, yang merugikan transportasi ion lithium, yang mengarah ke konduktivitas ionik yang lebih rendah. Tidak hanya itu, ketidakstabilan antarmuka dan kemampuan lemah untuk menekan dendrit lithium benar-benar membatasi pengembangan elektrolit polimer padat berbasis PEO (Han et al., 2020; Kim, Choi, Ahn, Kim, & Park, 2021; Li et al., 2019, 2020).

Kekurangan tersebut dapat ditutupi dengan menambahkan jumlah yang tepat dari mikrokristalin poly (vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) ke elektrolit polimer padat berbasis PEO (Li et al., 2020). Gabungan dari PVDF dan HFP adalah kandidat yang baik untuk matriks polimer karena kristalinitasnya yang rendah, konstanta dielektrik yang tinggi, yang membantu untuk melarutkan garam lithium ke tingkat yang lebih besar, dan stabilitas mekanik yang baik di berbagai kisaran suhu (Gohel, Kanchan, Machhi, Soni, & Maheshwaran, 2020; Li et al., 2019; Mouraliraman et al., 2022; Sangeetha et al., 2021; Xu, Chen, Zhou, & Xiang, 2021; Yadav et al., 2022; Zhang et al., 2021). PVDF-HFP terbentuk dalam bentuk amorf dan fase kristal pada suhu kamar dimana fase amorfnya meningkatkan gerakan ionik dalam polimer matriks, sedangkan fase kristalnya menawarkan penguatan dan stabilitas mekanik (Karpagavel et al., 2021). Karena ada juga kristal dan daerah amorf dalam struktur mikro mikrokristalin PVDF-HFP, penambahan PVDF-HFP yang tepat dapat mengganggu wilayah kristalisasi PEO, mengurangi proporsi wilayah kristalisasi dan meningkatkan proporsi daerah amorf (Li et al., 2020).

Penambahan *filler* anorganik seperti titanium oksida (TiO_2) pada elektrolit polimer padat juga dapat lebih meningkatkan konduktivitas ioniknya. Alasan peningkatan konduktivitas ionik adalah: (1) penambahan *filler* anorganik menurunkan kristalinitas dari fase polimer, meningkatkan daerah amorf konduktif dan mempercepat gerakan segmental; (2) garam lithium lebih mudah untuk dipisahkan dan lebih mudah melepaskan lebih banyak ion lithium bebas karena efek asam-basa Lewis yang disebabkan oleh *filler* anorganik (Fu, Li, Zhou, & Guo, 2022; Sasikumar et al., 2021). Menggabungkan *filler* anorganik ke polimer tidak hanya meningkatkan konduktivitas ionik tanpa mengorbankan sifat mekanik tetapi juga memperluas peluang elektrokimia dan meningkatkan kinerja siklus baterai penuh (Wen et al., 2021). Untuk lebih meningkatkan sifat asam-basa Lewis agar garam lithium lebih mudah terdisosiasi, *filler* TiO_2 dimodifikasi dengan merendamnya dengan asam anorganik seperti H_2SO_4 . TiO_2 yang dimodifikasi dengan H_2SO_4 menunjukkan kepadatan distribusi pori-pori terbuka yang lebih tinggi yang akhirnya membentuk konduktivitas listrik yang lebih tinggi (S. K. Cheung & Joyce Lok YinKwan, 2021).

Berdasarkan latar belakang sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggabungan PEO dengan PVDF-HFP dan penambahan *filler* TiO_2 yang sudah di modifikasi dengan perendaman asam sulfat di elektrolit polimer padat. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan elektrolit polimer padat yang memiliki konduktivitas ionik tinggi dengan menggunakan PEO sebagai polimer inang karena stabilitasnya yang baik untuk ion lithium dan mencampurnya dengan PVDF-HFP untuk menurunkan kristalinitas dari PEO agar konduktivitas ioniknya tidak menurun serta menambahkan *filler* TiO_2 yang sudah di modifikasi dengan perendaman asam sulfat untuk lebih meningkatkan konduktivitas ioniknya.

2. METODE

Jenis penelitian yang dilakukan merupakan penelitian kuantitatif metode eksperimen. Eksperimen dilakukan di laboratorium fisika LIPI. Pembuatan *filler* yang dimodifikasi dilakukan terlebih dahulu. Setelah itu, *filler* kemudian di campur dengan polimer dan garam lithium untuk pembuatan *slurry* dari elektrolit polimer padat. Penelitian ini difokuskan pada pengembangan elektrolit polimer padat berupa lembaran. Proses pembuatan larutan yang nanti akan menjadi lembaran harus diketahui terlebih dahulu. Bahan yang digunakan yaitu PVDF-HFP dan PEO sebagai polimer inang. TiO_2 yang direndam di 2% H_2SO_4 digunakan sebagai *filler* dan garam lithium yang digunakan berupa LiBOB. Metode pengumpulan data pada penelitian ini merupakan metode observasi tidak berstruktur. Proses pembuatan elektrolit polimer padat dilakukan dan diamati. Selama proses pembuatan, larutan di observasi apakah nanti menjadi *slurry* dari elektrolit polimer padat atau gagal menjadi *slurry* karena kurangnya jumlah bahan yang di campur atau karena kesalahan proses pembuatan. Kemudian *slurry* dituangkan di cetakan dan dikeringkan selama beberapa hari. *Slurry* yang sudah kering kemudian di amati apakah berhasil membentuk lembaran tipis atau gagal. Sampel kemudian di analisis dengan menggunakan 3 karakterisasi. Hal yang perlu dianalisis dari sampel

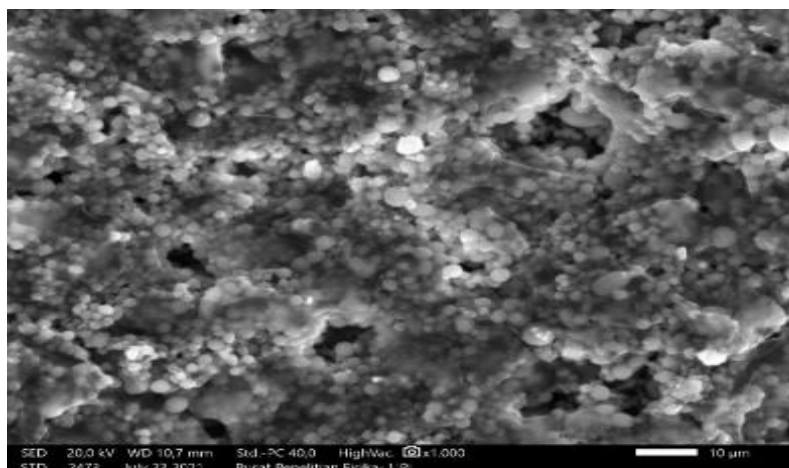
adalah morfologi sampel, kristalinitas sampel, dan nilai konduktivitas ionik sampel. alat karakterisasi yang digunakan adalah SEM, XRD, dan EIS. SEM digunakan untuk menganalisis morfologi sampel, XRD digunakan untuk menganalisis kristalinitas sampel, dan EIS digunakan untuk menganalisis nilai konduktivitas ionik sampel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Proses pertama yang dilakukan untuk membuat lembaran elektrolit polimer padat adalah membuat TiO_2 yang dimodifikasi dengan perendaman di larutan 2% H_2SO_4 . Total larutan dari 2% H_2SO_4 adalah 20 ml. Untuk membuat larutan 2% H_2SO_4 , 0,4 ml H_2SO_4 dicampur dengan 19,6 ml aquadm yang digunakan untuk melarutkan H_2SO_4 . Kemudian 1,5 g TiO_2 direndam di 2% H_2SO_4 -Aqua DM dan disimpan di lemari asam selama 2 hari. Setelah 2 hari, TiO_2 yang sudah di rendam disaring dengan rangkaian corong Büchner, labu Büchner dan pompa vakum. Sisa saringan TiO_2 diletakkan di wadah dan dimasukkan ke dalam oven kemudian dipanaskan dengan suhu 100°C selama 24 jam. Setelah selesai, proses sintering dilakukan dengan memasukkan wadah ke dalam furnace dengan suhu 500°C selama 24 jam. Setelah proses sintering, tumbuk TiO_2 yang menjadi keras sampai benar-benar halus dan akhirnya terbentuklah bubuk TiO_2 yang dimodifikasi dengan perendaman di 2% H_2SO_4 . Perendaman TiO_2 di 2% H_2SO_4 dapat lebih meningkatkan konduktivitas ionic (K. H. Cheung, Pabbruwe, Chen, Koshy, & Sorrell, 2021). Alasan digunakan 2% H_2SO_4 karena jika digunakan kadar H_2SO_4 yang lebih besar maka akan menurunkan konduktivitas ionik nya alih-alih meningkatkannya (Winie, Hanif, Chan, Arof, & Purawardi, 2014).

Setelah Filler untuk elektrolit polimer padat dibuat, langkah selanjutnya adalah membuat larutan (*slurry*) elektrolit polimer padat. Larutan TiO_2 2% H_2SO_4 0,04 gr + LiBOB 0,56 gr + DMAC 5 ml dimasukkan kedalam gelas kimia pertama dan larutan PVdF-HFP 1,12 gr + PEO 0,28 gr + DMAC (10ml), dimasukkan ke dalam gelas kimia kedua. DMAC berfungsi sebagai pelarut dari bahan-bahan yang digunakan dan total keseluruhan DMAC yang dipakai adalah 20 ml. Kemudian gelas kimia pertama dan kedua dipanaskan di *hot plate* secara bersamaan dengan suhu 80°C dan kecepatan putarnya 240 rpm. Larutan pertama dipanaskan di hotplate selama satu jam dan larutan kedua tetap dipanaskan di *hot plate* bersamaan dengan larutan pertama. Setelah satu jam, kemudian larutan pertama dicampur ke larutan kedua yang masih dipanaskan di hotplate. Lalu suhu hotplate dirubah ke 60°C dan kecepatan putarnya tetap 240 rpm lalu tunggu selama ± 4 jam. Setelah 4 jam, terbentuklah *slurry* (larutan kental). *Slurry* kemudian dituangkan ke cetakan dan di giling dengan penggiling untuk meratakan *slurry* agar terbentuk lembaran di kaca. *Slurry* dikeringkan ditemperatur ruangan sampai terbentuk lembaran *solid polimer electrolyte*. Lembaran tersebut kemudian di karakterisasi dengan SEM, XRD dan EIS. Hasil SEM dari lembaran elektrolit polimer padat PVdF-HFP; PEO; TiO_2 ; LiBOB dapat dilihat pada Gambar 1.



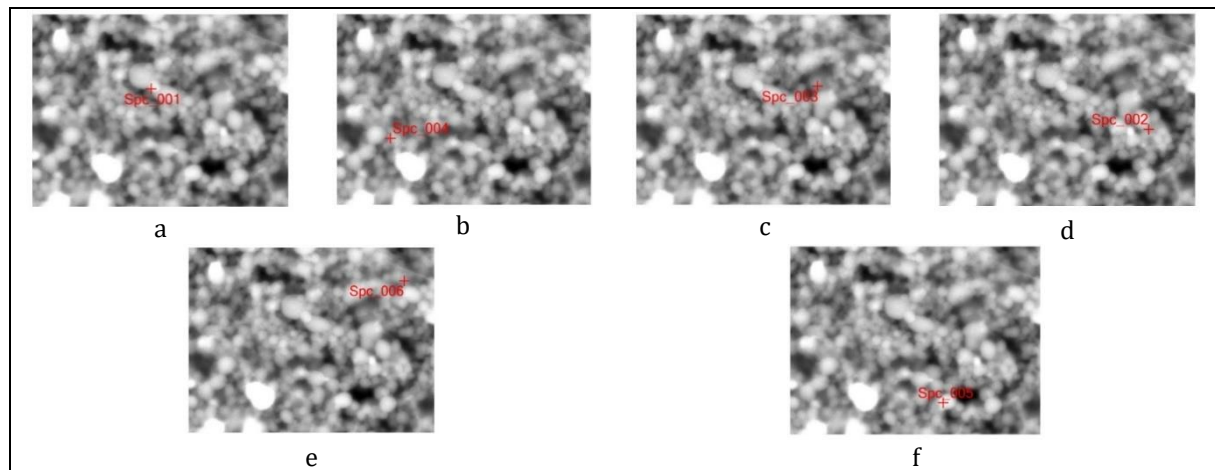
Gambar 1. SEM Image dari Sampel

Untuk mengetahui porositas dari gambar hasil SEM, Aplikasi Origin digunakan. Parameter-parameter untuk mengetahui porositas sampel adalah nilai H max, H min, X, Y, volume integral, volume total, volume solid, volume dibawah kurva, volume pori, porositas dan persentase porositas. Nilai-nilai dari semua parameter tersebut dapat dilihat di Tabel 1.

Tabel 1. Parameter Porositas Sampel Elektrolit Polimer Padat PVDF-HFP-PEO-LiBOB-TiO₂ 2% H₂SO₄

parameter	Nilai
	PVDF-HFP-PEO-LiBOB-TiO ₂ 2% H ₂ SO ₄
H max	65600
H min	0
X	2559
Y	1919
Volume total	$3,221 \times 10^{11}$
Volume solid	$1,827 \times 10^{11}$
Volume integral	$1,827 \times 10^{11}$
Volume dibawah kurva	0
Volume pori	$1,394 \times 10^{11}$
Porositas	0,432
Presentasi porositas	43,275

SEM juga dilengkapi dengan EDX (*energy dispersive x-ray*) yang digunakan untuk mengetahui campuran jumlah polimer apakah sudah tercampur merata dan sudah bereaksi berdasarkan keberadaan berbagai macam komposisi elemen dari tiap spektrum yang ditembakkan ke tiap titik di permukaan sampel. Dari hasil EDX terdapat 6 spektrum dari tiap titik di permukaan elektrolit polimer padat, dapat dilihat di Gambar 2 a-f.



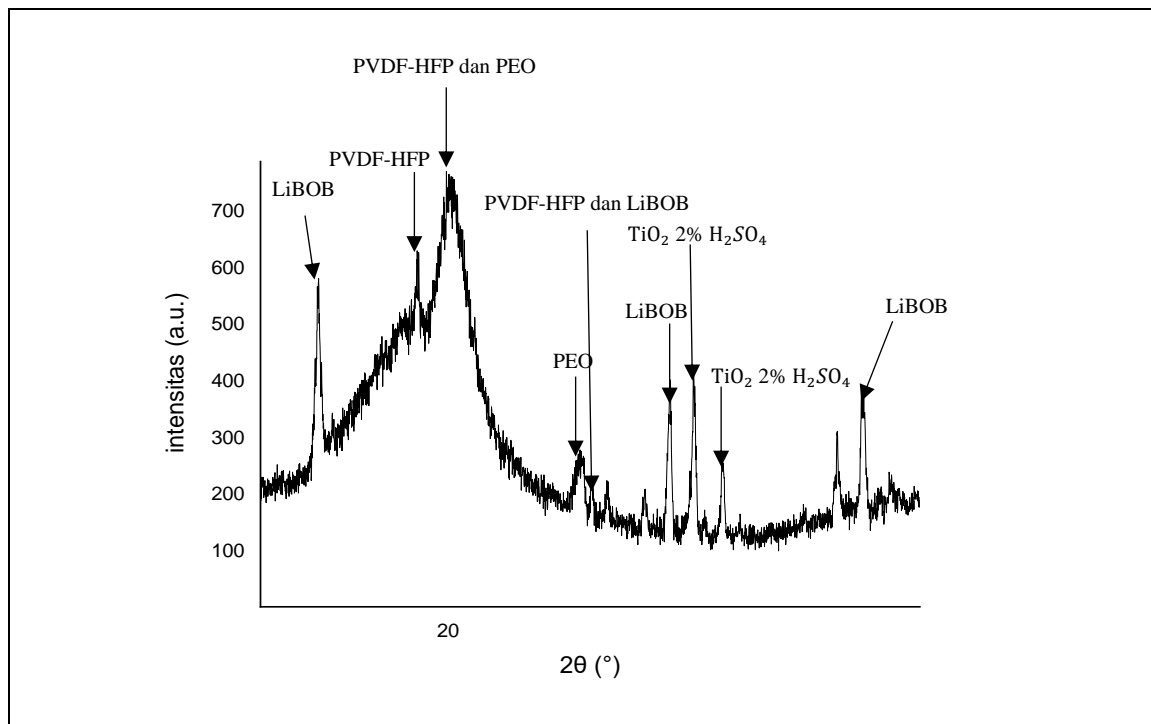
Gambar 2. Titik-Titik Tiap Spektrum dari Elektrolit Polimer Padat PVDF-HFP; PEO; TiO₂; LiBOB, (a) Spektrum 1, (b) Spektrum 2, (c) Spektrum 3, (d) Spektrum 4, (e) Spektrum 5, (f) Spektrum 6

Berdasarkan hasil EDX yang sudah dilakukan, didapatkan nilai-nilai persen massa tiap elemen di tiap spektrum yang dapat dilihat di Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Elemen dari Sampel

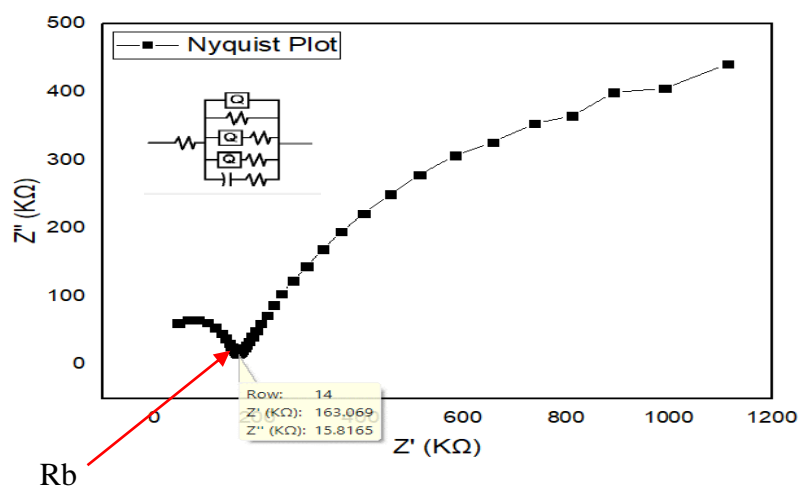
Spektrum	Elemen (% Massa)		
	C	F	Ti
Spektrum 1	$60,55 \pm 0,16$	$37,48 \pm 0,24$	$1,81 \pm 0,04$
Spektrum 2	$60,45 \pm 0,19$	$38,01 \pm 0,27$	$0,64 \pm 0,03$
Spektrum 3	$59,23 \pm 0,24$	$39,06 \pm 0,36$	$1,71 \pm 0,07$
Spektrum 4	$61,41 \pm 0,19$	$36,00 \pm 0,27$	$1,97 \pm 0,05$
Spektrum 5	$59,47 \pm 0,16$	$39,82 \pm 0,23$	$0,49 \pm 0,02$
Spektrum 6	$57,31 \pm 0,21$	$40,38 \pm 0,31$	$2,16 \pm 0,06$

Dari hasil karakterisasi XRD, didapat puncak-puncak 2θ terhadap intensitas dari setiap bahan elektrolit polimer padat seperti yang dapat dilihat di Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Kristalinitas XRD Sampel.

Dari hasil Karakterisasi EIS didapat kurva Nyquist dan nilai hambatannya yang akan diggunakan untuk mencari nilai konduktivitas ionik dari sampel, dapat dilihat di Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Kurva Nyquist Sampel dan Nilai Hambatannya

Pembahasan

Pada campuran larutan pembentuk elektrolit polimer padat, polimer PVdF-HFP dan PEO berfungsi sebagai polimer inang untuk baterai dan digunakan untuk menolong pengumbaran garam lithium LiBOB. Adapun fungsi dari garam lthium LiBOB adalah menyediakan jalur untuk migrasi ion di elektrolit polimer padat. Setelah larutan di tuangkan di substrat kaca dan dikeringkan, lembaran elektrolit polimer padat terbentuk. Lembaran kemudian di potong sesuai dengan ukuran baterai dan dikarakterisasi. Dapat dilihat di Gambar 1 bahwa lembaran elektrolit polimer padat memiliki pori-pori. Struktur membrane berpori menjadi penting untuk kinerja polimer elektrolit yang baik. Dengan banyaknya pori akan memungkinkan lebih banyak pergerakan ion Li. TiO₂ yang direndam dengan 2% asam sulfat menyebabkan terbentuknya formasi berpori pada morfologi membran elektrolit polimer padat. Walaupun pada gambar SEM terlihat bahwa lembaran elektrolit polimer padat memiliki pori-pori, tetapi alat SEM tidak bisa mengetahui secara rinci berapa persentase porositas yang ada di lembaran, maka digunakan aplikasi software Origin pada

penelitian ini untuk lebih mengetahui porositas dari gambar hasil SEM. Aplikasi Origin juga digunakan untuk mengetahui ukuran rata-rata kristal dari hasil XRD sampel. Aplikasi Origin menggunakan konsep rumus fisika untuk mengetahui presentase porositas dan ukuran rata-rata sampel. Nilai-nilai yang didapat di aplikasi origin untuk sampel elektrolit polimer padat adalah nilai H max, H min, X, Y dan volume integral, setelah itu nilai-nilai tersebut dapat digunakan untuk mencari volume total, volume solid, volume dibawah kurva, volume pori, kemudian didapat porositas dan persentase porositasnya dengan menggunakan persamaan 1 untuk mencari volume solid,

$$V_{\text{solid}} = \int_{x_{\text{min}}}^{x_{\text{max}}} \int_{y_{\text{min}}}^{y_{\text{max}}} f(x,y) dx dy \quad (1)$$

Dengan x_{max} , x_{min} , y_{max} , y_{min} adalah batas permukaan pada koordinat x dan y (batas permukaan ketika diproyeksikan pada bidang dasar), persamaan 2 untuk mencari volume total,

$$V_{\text{total}} = f_{\text{max}} (x_{\text{max}} - x_{\text{min}}) (y_{\text{max}} - y_{\text{min}}) \quad (2)$$

Selisih dari volume total dan volume solid untuk mencari volume pori, kemudian persamaan 3 untuk mencari porositas dan persentasenya,

$$\phi = \frac{V_p}{V_{\text{tot}}} \times 100 \quad (3)$$

Dimana ϕ adalah porositas, V_p adalah volume pori, dan V_{tot} adalah volume total. Berdasarkan [Tabel 1](#) didapatkan persentase sampel elektrolit polimer padat PVDF-HFP; PEO; TiO₂; LiBOB dengan bantuan aplikasi origin sebesar 43,27 %.

Dari hasil EDX SEM tiap titik di [Gambar 2 a-f](#) terdapat kandungan-kandungan komposisi elemen dengan nilai persen massa dan persen atom. Sampel dapat dikatakan sudah tercampur merata dan bereaksi jika nilai persen massa atau persen atom dari tiap elemen di titik-titik spektrum hampir sama. Dapat dilihat di [Tabel 2](#), nilai-nilai persen massa tiap elemen di tiap spektrum hampir sama, yang menandakan bahwa sampel tercampur merata.

Saat sampel di Analisis dengan XRD, hasil dari alatnya kemudian di masukkan ke software origin untuk melihat grafik XRD dari sampel dan untuk mengetahui kristalinitasnya. Derajat kristalinitas dapat mempengaruhi konduktivitas ionik dari elektrolit polimer padat. Semakin kecil derajat kristalinitasnya, semakin besar sifat amorf nya yang menyebabkan konduktivitas yang tinggi pada sampel ([Mahendrakar, Anna, Kumar, & Reddy, 2020](#)). Karakterisasi struktur kristal dari elektrolit polimer padat PVdF-HFP; PEO; TiO₂; LiBOB diobservasi dengan XRD pada sudut $2\theta = 10^\circ - 40^\circ$, dengan Panjang gelombang sinar X (λ) sebesar 0,154 nm. Puncak-puncak yang tajam menunjukkan struktur kristal sedangkan puncak-puncak yang tidak tajam menunjukkan struktur amorf yang sumbu B merupakan intensitasnya dan sumbu A merupakan 2θ . Dengan bantuan *software* origin, derajat kristalinitas dari puncak grafik XRD elektrolit polimer padat dapat ditemukan. Aplikasi software origin dapat digunakan untuk mencari X_c dan penjumlahan dari X_c dan X_a yang nanti akan dimasukkan ke persamaan 4 yaitu :

$$X_{cr} = \frac{X_c}{X_c + X_a} \times 100 \quad (4)$$

Dengan X_{cr} adalah derajat kristalinitas, X_c adalah fraksi kristal, dan X_a adalah fraksi amorf untuk mencari derajat kristalinitasnya.

Berdasarkan aplikasi origin, nilai dari X_c adalah 2726,885 dan nilai penjumlahan dari X_c dan X_a adalah 9651,145. dari nilai-nilai yang sudah di dapat, persamaan 4 menunjukkan bahwa derajat kristalinitas dari sampel adalah sebesar 28,254 %. Dibandingkan dengan nilai hasil sampel elektrolit polimer padat PVDF-HFP-LiBOB- TiO₂ tanpa PEO yang dibuat oleh Lestariningsih, Sabrina, Ratri dan Nuroniah ([Lestariningsih, Sabrina, Ratri, & Nuroniah, 2019](#)), yaitu senilai 8.9 %, hasil dari sampel yang sudah dibuat memiliki derajat kristalinitas yang lebih besar dan oleh karena itu memiliki struktur amorf yang lebih kecil. Hal ini dikarenakan sampel yang sudah dibuat menggunakan PEO dan sampel pembanding yang dibuat oleh Lestariningsih, Sabrina, Ratri dan Nuroniah tidak menggunakan PEO yang memiliki kristalinitas besar dan saat digabungkan ke larutan elektrolit polimer padat PVDF-HFP-LiBOB-TiO₂ 2% H₂SO₄, derajat kristalinitasnya meningkat. Walaupun begitu, PVDF-HFP berhasil menurunkan derajat kristalinitas dari elektrolit polimer padat yang menggunakan PEO walaupun derajat kristalinitas dari elektrolit polimer padat gabungan PVDF-HFP dan PEO lebih besar dibandingkan elektrolit polimer padat yang hanya menggunakan PVDF-HFP. PEO murni memiliki kristalinitas sekitar 60%-80% tergantung berat molekul dan kondisi pemrosesan ([Onge, Cui, Rochon, Daigle, & Claverie, 2021](#)) dan saat PVDF-HFP

digabung ke larutan sampel yang menggunakan PEO, derajat kristalinitas dari sampel menurun menjadi 28.254 %.

Puncak-puncak dari setiap bahan elektrolit polimer padat seperti puncak PVDF-HFP atau puncak PEO dapat diketahui dengan memandangkan grafik puncak setiap bahan dari referensi jurnal. Puncak-puncak dari grafik sampel yang sudah dibuat yang dapat dilihat di [Gambar 3](#) berada pada sudut 2θ yaitu 14.74° , 18.74° , 19.93° , 25.35° , 26.44° , 28.00° , 29.00° , 29.96° , 31.11° , 35.60° , dan 36.78° . Puncak 18.74° , 19.93° , dan 26.44° merupakan puncak dari PVDF-HFP dan Penelitian lain menunjukkan bahwa PVDF-HFP murni berada di sudut 2θ 18.2° , 20.01° , dan 26.6° ([Wilson & Ravi, 2006](#)). Puncak 19.93° dan 25.35° merupakan puncak dari PEO dan berdasarkan referensi jurnal Polu dan Rhee ([Polu & Rhee, 2016](#)), puncak sudut 2θ dari PEO murni adalah 19.1° dan 23.72° . Puncak dari LiBOB berada di sudut 2θ 14.74° , 26.44° , 29.00° , dan 36.78° , dan menurut referensi jurnal Noor, Majid, dan Arof [24], puncak LiBOB murni berada di sudut 2θ 14.7° , 27.9° , 29.1° , 29.8° dan 36.9° . Puncak TiO_2 2% H_2SO_4 adalah 29.96° , dan 31.11° . menurut referensi jurnal referensi jurnal Martinez dan Gonzalez ([Martínez & González, 2016](#)), puncak sudut 2θ dari TiO_2 2% H_2SO_4 adalah 30.2° dan 32° . Semua puncak sudut 2θ bahan bahan yang digunakan di elektrolit polimer padat tidak sesuai dengan puncak sudut 2θ untuk bahan murninya yang berdasarkan referensi jurnal. Kebanyakan puncak sudut 2θ bahan di elektrolit polimer padat hanya mendekati puncak sudut 2θ bahan murni. Hal ini dikarenakan bahan-bahan di elektrolit polimer padat sudah bereaksi satu sama lain, sehingga terjadilah pergeseran sudut 2θ nya. Sebagai contoh sudut 19.93° di grafik merupakan sudut 2θ untuk PVDF-HFP dan PEO. Penggabungan dari dua bahan tersebut menyebabkan sudut PVDF dan PEO bergeser dari sudut murninya.

Walaupun pada Analisa XRD ukuran kristal sampel sudah diketahui, tetapi nilai dari konduktivitas tersebut belum diketahui. Pada hasil Analisa alat EIS, akan didapat data-data mentah dari respon sampel terhadap frekuensi yang diberikan berupa nilai impedansi *real* (Z') dan impedansi imajiner (Z'') dalam bentuk exel. jika nilai frekuensi, Z' , dan Z'' diambil dan di plot, maka akan terbentuk kurva Nyquist seperti yang dapat dilihat di [Gambar 4](#). EIS terdiri dari plot yang disebut plot nyquist yang mewakili bagian negatif dari imajiner versus bagian nyata dari impedansi kompleks elektroda atau sel elektrokimia dari elektrolit polimer padat. Plot nyquist dapat dibuat dengan bantuan aplikasi Zsimp. Dari [Gambar 4](#), pola grafik yang terbentuk berupa setengah lingkaran (*semicircle*) sempurna. Pola *semicircle* merepresentasikan adanya hambatan elektrolit yang terjadi karena reaksi elektrokimia dalam elektrolit tersebut. Sampel elektrolit polimer padat yang bagus ditentukan dari plot nyquist dengan pola *semicircle* yang memiliki nilai hambatan (R_b) yang rendah, karena berdasarkan rumus persamaan 5, yaitu:

$$\sigma_{DC} = \frac{L}{A.R_b} \quad (5)$$

Nilai konduktivitas ionik berbanding terbalik dengan nilai hambatan. Data EIS biasanya dianalisis dengan menyesuaikannya dengan model rangkaian listrik ekuivalen. Sebagian besar sirkuit elemen dalam model adalah elemen listrik umum seperti resistor, kapasitor, dan induktor. Sangat sedikit sel elektrokimia yang dapat dimodelkan menggunakan elemen rangkaian ekuivalen tunggal. Oleh karena itu, model EIS biasanya terdiri dari sejumlah elemen dalam suatu jaringan.

[Gambar 4](#) menunjukkan grafik pola *semicircle* yang diukur berdasarkan plot impedansi *real* (Z') dan impedansi imajiner (Z'') (hitam) dan grafik pola *semicircle* dari model rangkaian listrik ekuivalen (merah). Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa plot yang diukur sesuai dengan plot model rangkaian listriknya. Nilai konduktivitas ionik dari sampel dapat dicari dengan menggunakan persamaan 5. Nilai ketebalan (L) didapat dengan mengukur sampel yang sudah di potong bulat dengan micrometer skrup di empat sisi sampel. Didapat nilai dari empat sisi tersebut yaitu 0,264 mm, 0,277 mm, 0,263 mm, 0,263 mm. Keempat nilai tersebut kemudian di rata-ratakan dan didapat nilai ketebalan sampel yaitu 0,266 mm (0,026 cm). Nilai luas penampang (A) didapat dengan menghitung luas dari sampel. Sampel yang di potong secara lingkaran memiliki diameter sebesar 19 mm atau 1,9 cm. Dengan menggunakan rumus luas lingkaran maka didapat luas penampang sampel sebesar 2,833 cm. Hambatan yang terukur (R_b) dapat ditemukan dengan melihat tabel mentah hasil EIS di bagian kolom Z'' . Dari semua nilai yang ada di kolom Z'' dicarilah nilai minimalnya yaitu 15816.5. Kemudian nilai tersebut dicek di tabel bagian kolom Z'' . Setelah nilai 15816.5 ditemukan di kolom Z'' , lihat nilai Z' disebelah nilai 15816,5 nya maka itu lah nilai dari R_b . Berdasarkan tabel mentah hasil EIS, maka nilai R_b nya adalah 163069. Nilai R_b juga dapat ditemukan dengan menentukan garis *semicircle* yang memotong sumbu x di kurva Nyquist. Dari [Gambar 4](#) terlihat bahwa nilai R_b di kurva Nyquist ($Z'=163.069$, $Z''=15.8165$) sama dengan nilai R_b yang dicari dengan melihat nilai Z' dan Z'' dari tabel mentah hasil EIS. Setelah semua nilai tadi dimasukkan ke persamaan 5, didapatkan nilai konduktivitas ionik dari elektrolit polimer padat sebesar $5,626 \times 10^{-8}$ S/cm. Dibandingkan dengan hasil karakterisasi EIS dari elektrolit polimer padat PVDF-HFP-LIBOB- TiO_2 tanpa PEO yang dibuat oleh Sabrina, Sohib, Lestariningsih, dan Ratri ([Sabrina et al., 2019](#)) yaitu senilai $1,27 \times 10^{-6}$ S/cm, konduktivitas ionik

dari sampel yang sudah dibuat kecil. Hal ini disebabkan oleh volume pori-pori yang dimiliki sampel lebih kecil dibandingkan volume solidnya, seperti yang sudah dibahas di karakterisasi SEM, kemudian dikarenakan derajat kristalinitasnya yang relatif lebih besar dibandingkan sampel yang tidak menggunakan PEO.

Baterai lithium ion merupakan salah satu jenis baterai yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi seperti alat-alat listrik portabel, kendaraan listrik dan sebagainya (Banitaba, Semnani, Soureshjani, Rezaei, & Ensafi, 2020). Namun, masalah keamanan terkait cairan elektrolit yang mudah terbakar dan juga pembentukan dendrit yang akhirnya mengarah ke korsleting internal di baterai telah menjadi kendala utama dalam pengembangan baterai lithium ion (Banitaba et al., 2020; Didwal et al., 2021; Gao, Grundish, Zhao, Zhou, & Goodenough, 2021; Karabelli, Birke, & Weeber, 2021; Sun et al., 2021). Dalam beberapa dekade terakhir, elektrolit polimer padat telah menarik banyak perhatian karena dapat meningkatkan stabilitas dan keamanan elektrokimia dari Baterai lithium ion. Tetapi, konduktivitas ion yang buruk dari elektrolit polimer padat tetap menjadi masalah yang belum terselesaikan yang membatasi aplikasinya (Banitaba et al., 2020).

Untuk meningkatkan konduktivitas ioniknya, banyak peneliti memodifikasi elektrolit polimer padat dengan menggabungkan dua jenis polimer (Li et al., 2020; Ruan et al., 2022). Poly (ethylene oxide) (PEO) merupakan polimer yang memiliki elektron yang berlebih dalam gugus fungsi yang mengandung oksigen pada segmen, sedangkan orbital elektron ion litium mengandung orbital kosong, ion lithium dapat dengan mudah berkoordinasi dengan gugus fungsi oksigen eter PEO karena struktur khusus ini. Oleh karena itu, elektrolit berbasis PEO memiliki kemampuan yang kuat untuk memisahkan garam lithium dan memiliki stabilitas yang sangat baik untuk lithium (Johari, Tajuddin, Hanibah, & Deraman, 2021; Li et al., 2020). Namun, PEO adalah polimer kristal, dan kristalisasi pada suhu kamar akan memperlambat gerakan rantai segmen, yang merugikan transportasi ion lithium, yang mengarah ke konduktivitas ionik yang lebih rendah. Tidak hanya itu, ketidakstabilan antarmuka dan kemampuan lemah untuk menekan dendrit lithium benar-benar membatasi pengembangan elektrolit polimer padat berbasis PEO (Han et al., 2020; Kim, Choi, Ahn, Kim, & Park, 2021; Li et al., 2019, 2020).

Kekurangan tersebut dapat ditutupi dengan menambahkan jumlah yang tepat dari mikrokristalin poly (vinylidene fluoride-hexafluoropropylene) (PVDF-HFP) ke elektrolit polimer padat berbasis PEO (Li et al., 2020). Gabungan dari PVDF dan HFP adalah kandidat yang baik untuk matriks polimer karena kristalinitasnya yang rendah, konstanta dielektrik yang tinggi, yang membantu untuk melarutkan garam lithium ke tingkat yang lebih besar, dan stabilitas mekanik yang baik di berbagai kisaran suhu (Gohel, Kanchan, Machhi, Soni, & Maheshwaran, 2020; Li et al., 2019; Muraliraman et al., 2022; Sangeetha et al., 2021; Xu, Chen, Zhou, & Xiang, 2021; Yadav et al., 2022; Zhang et al., 2021). PVDF-HFP terbentuk dalam bentuk amorf dan fase kristal pada suhu kamar dimana fase amorfnya meningkatkan gerakan ionik dalam polimer matriks, sedangkan fase kristalnya menawarkan penguatan dan stabilitas mekanik (Karpagavel et al., 2021). Karena ada juga kristal dan daerah amorf dalam struktur mikro mikrokristalin PVDF-HFP, penambahan PVDF-HFP yang tepat dapat mengganggu wilayah kristalisasi PEO, mengurangi proporsi wilayah kristalisasi dan meningkatkan proporsi daerah amorf (Li et al., 2020).

Penambahan *filler* anorganik seperti titanium oksida (TiO_2) pada elektrolit polimer padat juga dapat lebih meningkatkan konduktivitas ioniknya. Alasan peningkatan konduktivitas ionik adalah: (1) penambahan *filler* anorganik menurunkan kristalinitas dari fase polimer, meningkatkan daerah amorf konduktif dan mempercepat gerakan segmental; (2) garam lithium lebih mudah untuk dipisahkan dan lebih mudah melepaskan lebih banyak ion lithium bebas karena efek asam-basa Lewis yang disebabkan oleh *filler* anorganik (Fu, Li, Zhou, & Guo, 2022; Sasikumar et al., 2021). Menggabungkan *filler* anorganik ke polimer tidak hanya meningkatkan konduktivitas ionik tanpa mengorbankan sifat mekanik tetapi juga memperluas peluang elektrokimia dan meningkatkan kinerja siklus baterai penuh (Wen et al., 2021). Untuk lebih meningkatkan sifat asam-basa Lewis agar garam lithium lebih mudah terdisosiasi, *filler* TiO_2 dimodifikasi dengan merendamnya dengan asam anorganik seperti H_2SO_4 . TiO_2 yang dimodifikasi dengan H_2SO_4 menunjukkan kepadatan distribusi pori-pori terbuka yang lebih tinggi yang akhirnya membentuk konduktivitas listrik yang lebih tinggi (S. K. Cheung & Joyce Lok YinKwan, 2021).

4. SIMPULAN

Dari hasil pembuatan yang telah dilakukan, lembar elektrolit polimer padat memiliki permukaan pori-pori lebih sedikit dibandingkan permukaan solidnya. Hal ini menyebabkan struktur morfologi dari elektrolit polimer padat yang sudah dibuat pada penelitian ini kurang mendukung untuk pergerakan ion Li karena semakin banyak pori pada permukaan membran akan semakin meningkatkan transfer ion antara elektroda dan karenanya meningkatkan konduktivitas ionik elektrolit. Derajat kristalinitas dari elektrolit polimer padat berbasis PVDF-HFP dan PEO yang sudah dibuat lebih kecil dibandingkan dengan nilai hasil

sampel elektrolit polimer padat tanpa PEO dari referensi jurnal penelitian lain yang sudah dilakukan. Tetapi penggabungan PVDF-HFP ke elektrolit polimer padat berbasis PEO berhasil menurunkan derajat kristalinitasnya jika dibandingkan dengan elektrolit polimer padat yang hanya berbasis PEO murni. Konduktivitas ionik dari elektrolit polimer padat berbasis PVDF-HFP dan PEO yang sudah dibuat juga memiliki nilai yang kecil dibandingkan elektrolit polimer padat tanpa PEO dari referensi jurnal. Oleh karena itu, elektrolit polimer padat dari pencampuran PEO dan PVDF-HFP serta modifikasi filler kurang mendukung untuk digunakan sebagai elektrolit dengan konduktivitas ionik tinggi pada baterai lithium-ion.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Banitaba, S. N., Semnani, D., Soureshjani, E. H., Rezaei, B., & Ensafi, A. A. (2020). Effect of Titanium Dioxide and Zinc Oxide Fillers on Morphology, Electrochemical and Mechanical Properties of the PEO-Based Nanofibers, Applicable as an Electrolyte for Lithium-Ion Batteries., *Materials Research Express*, 6(8), 1. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab25cd>.
- Cheung, K. H., Pabbruwe, M. B., Chen, W. F., Koshy, P., & Sorrell, C. . (2021). Thermodynamic and Microstructural Analyses of Photocatalytic TiO₂ from the Anodization of Biomedical-Grade Ti-6Al₄V in Phosphoric Acid or Sulfuric Acid. *Ceramics International*, 47(2), 1613–1614. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.08.277>.
- Cheung, S. K., & Joyce Lok YinKwan. (2021). Parents' perceived goals for early mathematics learning and their relations with children's motivation to learn mathematics. *Early Childhood Research Quarterly*, 56(3), 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2021.03.003>.
- Didwal, P. N., Singhababu, Y. N., Verma, R., Sung, B. J., Lee, G. H., Lee, J. S., ... Park, C. J. (2021). An Advanced Solid Polymer Electrolyte Composed of Poly (Propylene Carbonate) and Mesoporous Silica Nanoparticles for Use in All-Solid-State Lithium-Ion Batteries. *Energy Storage Materials*, (37), 470. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.02.034>.
- Fu, J., Li, Z., Zhou, X., & Guo, X. (2022). Ion Transport in Composite Polymer Electrolytes. *Materials Advances*, 9(3), 3811. <https://doi.org/10.1039/D2MA00215A>.
- Gao, H., Grundish, N. S., Zhao, Y., Zhou, A., & Goodenough, J. B. (2021). Formation of Stable Interphase of Polymer-in-Salt Electrolyte in All-Solid-State Lithium Batteries. *Energy Material Advances*, (2021), 1. <https://doi.org/10.34133/2021/1932952>.
- Gohel, K., Kanchan, D. K., Machhi, H. K., Soni, S. S., & Maheshwaran, C. (2020). Gel Polymer Electrolyte Based On PVDF-HFP:Pmma Incorporated with Propylene Carbonate (PC) and Diethyl Carbonate (DEC) Plasticizers: Electrical, Morphology, Structural and Electrochemical Properties. *Materials Research Express*, 7(2). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab6c06>.
- Han, L., Wang, J., Mu, X., Wu, T., Liao, C., Wu, N., ... Hu, Y. (2020). Controllable magnetic field aligned sepiolite nanowires for high ionic conductivity and high safety PEO solid polymer electrolytes. *Journal of Colloid and Interface Science*, (585), 3. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.10.039>.
- Johari, S. N. A. M., Tajuddin, N. A., Hanibah, H., & Deraman, S. K. (2021). A Review: Ionic Conductivity of Solid Polymer Electrolyte Based Polyethylene Oxide. *International Journal of Electrochemical Science*, 16(3). <https://doi.org/10.20964/2021.10.53>.
- Karabelli, D., Birke, K. P., & Weeber, M. (2021). A Performance and Cost Overview of Selected Solid-State Electrolytes: Race between Polymer Electrolytes and Inorganic Sulfide Electrolytes. *Batteries*, 1(7), 1. <https://doi.org/10.3390/batteries7010018>.
- Karpagavel, K., Sundaramahalingam, K., Manikandan, A., Vanitha, D., Manohar, A., Nagarajan, E. R., & Nallamuthu, N. (2021). Electrical Properties of Lithium-Ion Conducting Poly (Vinylidene Fluoride-Co- Hexafluoropropylene) (PVDF-HFP)/ Polyvinylpyrrolidone (PVP) Solid Polymer Electrolyte. *Journal of Electronic Materials*, (50), 1. <https://doi.org/10.1007/s11664-021-08967-9>.
- Kim, J. I., Choi, Y. G., Ahn, Y., Kim, D., & Park, J. H. (2021). Optimized ion-conductive pathway in UV-cured solid polymer electrolytes for all-solid lithium/sodium ion batteries. *Journal of Membrane Science*, (619), 1. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118771>.
- Lestariningsih, T., Sabrina, Q., Ratri, C. R., & Nuroniah, I. (2019). Structure, thermal and electrical properties of PVDF-HFP/LiBOB solid polymer electrolyte. *Journal of Physics Conference Series*, (1191), 3. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1191/1/012026/meta>.
- Li, J., Zhu, K., Wang, J., Yan, K., Liu, J., Yao, Z., & Xu, Y. (2019). Optimisation of conductivity of PEO/PVDF-based solid polymer electrolytes in all-solid-state Li-ion batteries. *Materials Technology*, 4(37), 1. <https://doi.org/10.1080/10667857.2020.1827873>.
- Li, J., Zhu, L., Xu, J., Jing, M., Yao, S., Shen, X., ... Tu, F. (2020). Boosting the Performance of Poly (Ethylene Oxide)-Based Solid Polymer Electrolytes by Blending with Poly (Vinylidene Fluoride-Co-Hexafluoropropylene) for Solid-State Lithium-Ion Batteries. *International Journal of Energy*

- Research, 44(9), 2. <https://doi.org/10.1002/er.5476>.
- Mahendrakar, S., Anna, M., Kumar, J. S., & Reddy, J. (2020). Structural, Morphological and Electrical Studies of Plasticized Polymer-Salt Electrolyte membrane and Application to Lithium ion Batteries. *Chemistry, International Journal of Applied*, 3(13), 479-480. Retrieved from https://www.ripublication.com/ijac17/ijacv13n3_08.pdf.
- Martínez, I. A. P., & González, V. R. (2016). Towards the Hydrothermal Growth of Hierarchical Cauliflower-Like TiO₂ Anatase Structures. *J Sol-Gel Sci Technol*, 1(81), 3. <https://doi.org/10.1007/s10971-016-4241-7>.
- Mouraliraman, D., Shaji, N., Praven, S., Nanthagopal, M., Ho, C. W., Karthik, M. V., ... Lee, C. W. (2022). Thermally Stable PVDF-HFP-Based Gel Polymer Electrolytes for High-Performance Lithium-Ion Batteries. *Nanomaterials*, 12(7), 2. <https://doi.org/10.3390/nano12071056>.
- Onge, V. S., Cui, M., Rochon, S., Daigle, J. C., & Claverie, J. P. (2021). Reducing crystallinity in solid polymer electrolytes for lithium-metal batteries via statistical copolymerization. *Communications Materials*, 2(83), 3. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s43246-021-00187-2>.
- Polu, A. R., & Rhee, H. W. (2016). The Effects of LiTDI Salt and POSS-PEG (n = 4) Hybrid Nanoparticles on Crystallinity and Ionic Conductivity of PEO Based Solid Polymer Electrolytes. *Science of Advanced Materials*, 1(8), 933. <https://doi.org/10.1166/sam.2016.2657>.
- Ruan, Z., Du, Y., Pan, H., Zhang, R., Zhang, F., Tang, H., & Zhang, H. (2022). Incorporation of Poly (Ionic Liquid) with PVDF-HFP-Based Polymer Electrolyte for All-Solid-State Lithium-Ion Batteries. *Polymers*, 10(14), 2. <https://doi.org/10.3390/polym14101950>.
- Sangeetha, M., Mallikarjun, A., Aparna, Y., Vikranth, R. M., Siva, K. J., Sreekanth, T., & Jaipal, R. M. (2021). Dielectric Studies and AC Conductivity of PVDF-HFP: LIBF₄: EC Plasticized Polymer Electrolytes. *Materials Today: Proceedings*, 1(4), 2168. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.280>.
- Sasikumar, M., Krishna, R. H., Raja, M., Therese, H. A., Balakrishnan, N. T. M., Raghavan, P., & Sivakumar, P. (2021). Titanium Dioxide Nano-Ceramic Filler in Solid Polymer Electrolytes: Strategy Towards Suppressed Dendrite Formation and Enhanced Electrochemical Performance For Safe Lithium Ion Batteries. *Journal of Alloys and Compounds*, (882), 2. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160709>.
- Sun, C. C., Yusuf, A., Li, S. W., Qi, X. L., Ma, Y., & Wang, D. Y. (2021). Metal organic frameworks enabled rational design of multifunctional PEO-based solid polymer electrolytes. *Chemical Engineering Journal*, 4(4), 1. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128702>.
- Wen, J., Zhao, Q., Jiang, X., Ji, G., Wang, R., Lu, G., ... Xu, C. (2021). Graphene Oxide Enabled Flexible PEO-Based Solid Polymer Electrolyte for All-Solid-State Lithium Metal Battery. *Applied Energy Materials*, 4(4), 3661. <https://doi.org/10.1021/acsaem.1c00090>.
- Wilson, J., & Ravi, G. (2006). Electrochemical Studies on Inert Filler Incorporated Poly (Vinylidene Fluoride - Hexafluoropropylene) (PVDF - HFP) Composite Electrolytes. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 2(16), 89. <https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000200006>.
- Winie, T., Hanif, N. S. M., Chan, C. H., Arof, A. K., & Purawardi, I. (2014). Effect of the Surface Treatment of the TiO₂ Fillers on the Properties of Hexanoyl Chitosan/Polystyrene Blend-Based Composite. *Polymer Electrolytes. Ionics*, 1(20), 352. <https://doi.org/10.1007%2Fs11581-013-0983-1>.
- Xu, P., Chen, H., Zhou, X., & Xiang, H. (2021). Gel Polymer Electrolyte Based on PVDF-HFP Matrix Compositated With RGO-PEG-NH₂ For High-Performance Lithium Ion Battery. *Journal of Membrane Science*, (617), 1. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.118660>.
- Yadav, P., Beheshti, S. H., Kathribail, A. R., P., I., Mierlo, J. V., & M., B. (2022). Improved Performance of Solid Polymer Electrolyte for Lithium-Metal Batteries via Hot Press Rolling. *Polymers*, 3(14), 2. <https://doi.org/10.3390/polym14030363>.
- Zhang, Y., Wang, X., Liang, S., Shi, Y., Chen, X., Liu, J., & Wang, A. (2021). Fermentation optimization, fungistatic effects and tomato growth promotion of four biocontrol bacterial strains. *Agriculture (Switzerland)*, 11(7), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070686>.