

STUDI *ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY* DARI LEMBARAN *POLYVINYL ALCOHOL* DENGAN PENAMBAHAN LiClO_4 SEBAGAI BAHAN ELEKTROLIT BATERAI LI-ION

Indra Gunawan, Wahyudianingsih dan Sudaryanto

Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju - BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15310
E-mail: irgun.IG@gmail.com

Diterima: 5 Februari 2016

Diperbaiki: 24 Juni 2016

Disetujui: 26 September 2016

ABSTRAK

STUDI *ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY* DARI LEMBARAN *POLYVINYLALCOHOL* DENGAN PENAMBAHAN LiClO_4 SEBAGAI BAHAN ELEKTROLIT BATERAI LI-ION. Telah disintesis bahan polimer elektrolit padat untuk baterai Li ion, yaitu *Polyvinyl Alcohol (PVA)* dengan penambahan garam *Lithium Perchlorate* (LiClO_4) dengan berbagai konsentrasi. Studi *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* dari bahan ini dilakukan dengan membuat *plot Nyquist* dari pengukuran dengan *LCR* meter. Bahan elektrolit ini disiapkan dengan cara serbuk *PVA* dilarutkan ke dalam *aquadest* dan ditambahkan garam LiClO_4 yang divariasikan 0 %berat, 5 %berat, 10 %berat, 15 %berat, 20 %berat dan 25 %berat. Setelah proses pengeringan larutan, diperoleh lembaran *PVA* dengan penambahan garam LiClO_4 sebagai bahan elektrolit baterai Li ion. *Plot Nyquist* untuk lembaran *PVA* yang ditambahkan garam LiClO_4 yang divariasikan 0 %berat, 5 %berat, 10 %berat, 15 %berat, 20 %berat dan 25 %berat telah dianalisis. Informasi resistensi elektrolit, ketahanan permukaan film dan resistensi transfer muatan diperoleh dengan pemodelan sirkuit yang setara sesuai dengan *plot Nyquist*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan LiClO_4 didalam *PVA* semakin besar pula difusi ion lithium di dalam lembaran bahan elektrolit.

Kata kunci: Bahan elektrolit, *Polyvinyl Alcohol*, LiClO_4 , Baterai Li-ion

ABSTRACT

ELECTROCHEMICAL IMPEDANCE SPECTROSCOPY STUDY OF POLYVINYLALCOHOL SHEET WITH ADDITION OF LiClO_4 AS ELECTROLYTE MATERIAL OF LI-ION BATTERY. Solid polymer electrolyte materials for Li ion battery have been prepared using polyvinyl alcohol (PVA) added by lithium perchlorate (LiClO_4) salt with various concentration. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) study of the material was done by making a Nyquist plot of the measurement with a LCR meter. These electrolyte materials prepared by using PVA powder which was dissolved into distilled water and added LiClO_4 salt varied in 0, 5, 10, 15, 20 and 25 w/w %. After drying the solution, PVA sheet with various LiClO_4 salt as Li ion battery electrolyte material was obtained. Nyquist plots for sheet of PVA with various LiClO_4 salt which varied 0, 5, 10, 15, 20 and 25 w/w% has been studied using LCR meter. Information of electrolyte resistance, resistance of the film surface and the charge transfer resistance is obtained by modeling the equivalent circuit according to the Nyquist plot. The result shows that the lithium ion diffusion increased with the increasing LiClO_4 content in the PVA film.

Keywords: Electrolyte materials, Polyvinyl Alcohol, LiClO_4 , Li-ion battery

PENDAHULUAN

Aplikasi baterai lithium-ion disamping sebagai sumber daya untuk perangkat elektronik portabel, juga sedang dipertimbangkan sebagai kandidat yang menjanjikan untuk digunakan dalam *Electric Vehicles*

(EVS) di masa depan. Karena itu berbagai studi untuk meningkatkan kinerja baterai banyak dilakukan, baik terhadap komponen elektroda maupun elektrolit.

Diantara contoh penelitian terkait komponen elektroda adalah upaya menggantikan material LiCoO_2 dan LiNiO_2 yang telah banyak dipakai dengan material yang lebih murah, tidak beracun dan memiliki kapasitas dan tegangan lebih tinggi serta *cycleability* yang baik [1-3]. Dalam hal ini hubungan antara struktur dan sifat elektrokimia bahan elektroda menjadi isu yang sangat penting [4]. Dalam beberapa tahun terakhir, banyak peneliti telah menggunakan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk mempelajari karakteristik elektrokimia bahan elektroda [5,6].

Adapun terkait komponen elektrolit fokus penelitian banyak diarahkan pada upaya mendapatkan bahan yang lebih stabil secara mekanik dan elektrokimia diantara elektrolit padat berbasis polimer *Solid Polymer Electrolyte* (SPE) [7,8].

Penelitian tentang polimer elektrolit telah berkembang sejak tahun 1973 ketika Fenton *et. al.* mengembangkan kompleks ion logam alkali dengan Poli Etilen Oksida (PEO) [7]. Sistem polimer elektrolit bisa terjadi karena beda potensial dimana penerapan bahan ini ada dalam berbagai macam perangkat elektrokimia seperti baterai energi tinggi, sel bahan bakar, sensor, dan perangkat elektronik [8-10]. Secara umum, ada tiga jenis polimer elektrolit, yaitu : polimer elektrolit padat (SPE), polimer elektrolit gel (GPE) dan polimer elektrolit komposit [11,12].

Lithium hexafluorophosphate (LiPF_6) banyak digunakan sebagai garam elektrolit untuk baterai lithium-ion (Li-ion). Hal ini terutama disebabkan oleh kelarutan LiPF_6 dalam pelarut organik dipolar, terutama karbonat siklik (misalnya, etilena dan propilena-karbonat) dan karbonat linear (misalnya, dimetil, dietil, dan etil-metil-karbonat), atau campurannya, menunjukkan konduktivitas ionik yang tinggi, stabilitas elektrokimia yang baik. Namun demikian memiliki masalah terkait stabilitas termal dalam lingkungan di atas 55 °C. Dalam hal ini SPE menjadi salah satu alternatif jawabannya. Namun demikian studi elektrokimia bahan elektrolit sangat penting dilakukan terutama terkait dengan perilaku transport atau difusi ion yang dapat dipelajari diantara dengan teknik EIS yang dikombinasikan dengan berbagai pengujian lainnya [13].

Teknik EIS yang dikombinasikan dengan karakterisasi difraksi sinar-X (XRD) telah digunakan untuk mempelajari bahan komponen baterai karena dapat mengungkapkan hubungan antara kisi kristal dengan sifat elektrokimia [14]. Pemanfaatan EIS untuk mempelajari konduktivitas *Poly Vinyl Alcohol* (PVA) dengan aditif asam fosfat (H_3PO_4) untuk aplikasi superkapasitor juga telah dilaporkan [11]. Studi elektrokimia dengan EIS terhadap bahan SPE berbasis bahan campuran (*blending*) PVA and *Poly Vinyl Pyrrolidone* (PVP) untuk aplikasi baterai lithium juga

telah dilaporkan [12]. Namun demikian, sejauh penelusuran belum ada laporan terkait studi menggunakan EIS terhadap PVA dengan variasi konsentrasi aditif garam lithium sebagai bahan SPE untuk baterai Li Ion.

Pada penelitian ini dilakukan studi EIS dari bahan elektrolit baterai Li-ion yang menggunakan PVA dengan penambahan garam *lithium perchlorate* (LiClO_4) dengan konsentrasi yang divariasikan pada 0 %berat, 5 %berat, 10 %berat 15 %berat, 20 %berat dan 25 %berat. LiClO_4 dipilih karena keterlarutannya yang bagus dalam matriks PVA dan kurang reaktif dibandingkan LiPF_6 . Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan bahan SPE untuk baterai Li-ion dari garam LiClO_4 yang dimasukkan ke dalam matriks PVA, melakukan studi elektrokimia dengan teknik EIS terhadap bahan elektrolit padat ini.

METODE PERCOBAAN

Bahan dan Alat

Polyvinyl Alcohol (PVA) (*Aldrich, pro analysis, Germany*), garam lithium klorat LiClO_4 (*Aldrich, pro analysis, Germany*) dan *aquadest* sebagai pelarut.

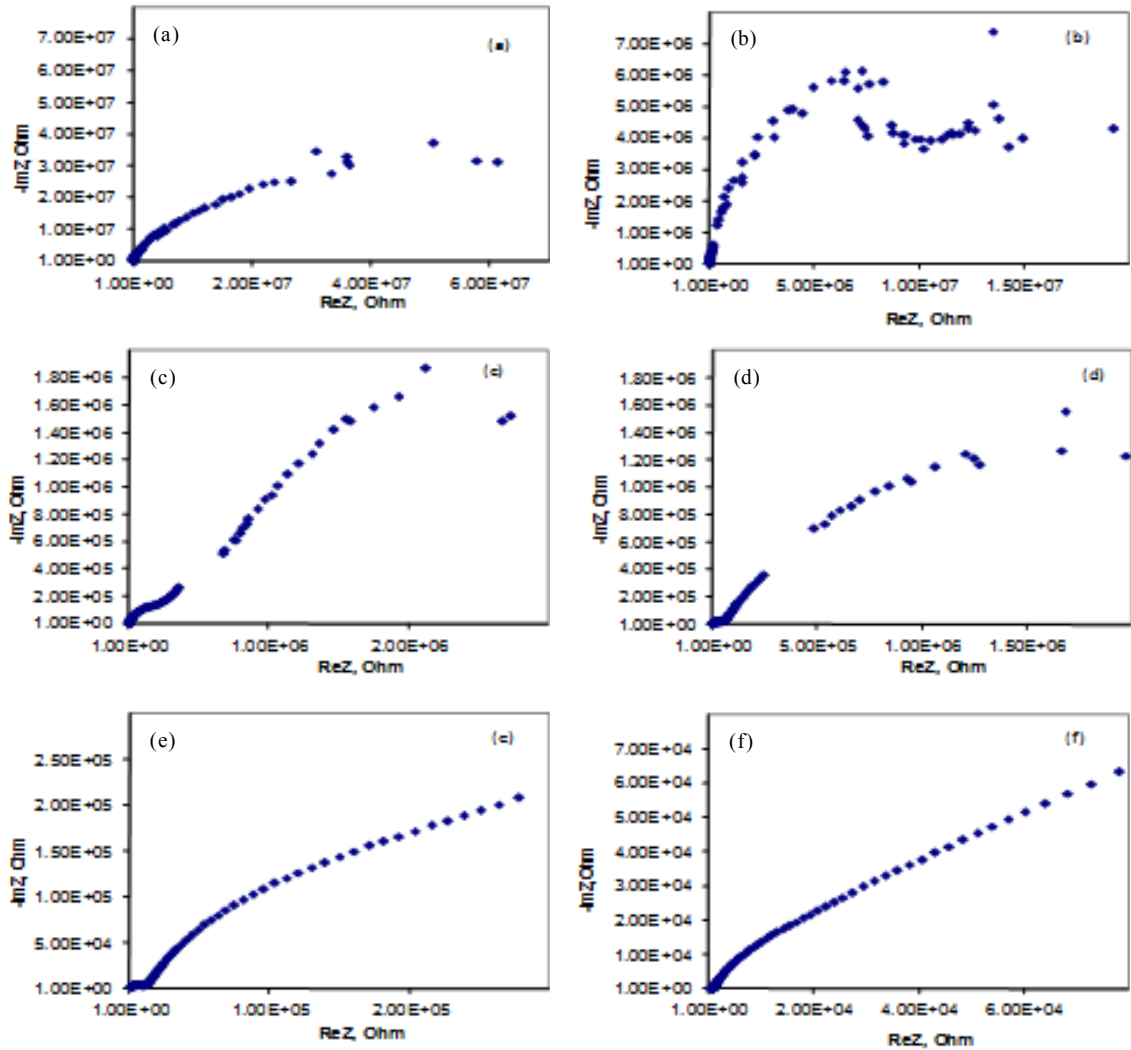
Peralatan yang digunakan dalam makalah ini adalah oven pemanas *Fisher* untuk mengeringkan larutan PVA dengan penambahan LiClO_4 dan LCR meter Hioki 3532-50 untuk mengukur konduktivitas bahan elektrolit yang diperoleh.

Cara Kerja

Serbuk PVA dilarutkan kedalam *aquadest* dan ditambahkan garam LiClO_4 yang divariasikan masing-masing sebanyak 0 %berat, 5 %berat, 10 %berat 15 %berat, 20 %berat dan 25 %berat. Setelah proses pengeringan larutan dalam suhu ruangan selama 1 hari, sampel selanjutnya dimasukkan dalam oven pada suhu 70 °C selama minimal 3 jam sehingga diperoleh lembaran kering PVA dengan penambahan garam LiClO_4 sebagai bahan elektrolit untuk baterai Li ion. Lembaran dengan tebal sekitar 100 μm digunakan sebagai sampel uji. Pengukuran *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dilakukan dengan menggunakan peralatan LCR meter, sehingga diperoleh *plot Nyquist*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 1, *plot Nyquist* untuk *Poly Vinyl Alcohol* (PVA) dengan penambahan LiClO_4 yang divariasikan pada 0 %berat, 5 %berat, 10 %berat 15 %berat, 20 %berat dan 25 %berat berbentuk seperempat lingkaran pada rentang frekuensi rendah di keadaan awal dan seperempat elips dalam rentang frekuensi menengah dan tinggi serta garis lurus pada sudut konstan dengan sumbu nyata dalam rentang frekuensi yang lebih tinggi. Namun, *plot Nyquist* pada

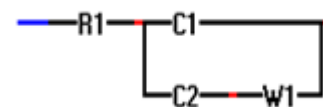


Gambar 1. Plot Nyquist untuk PVA dengan penambahan LiClO_4 yang divariasikan pada (a). 0 %berat, (b). 5 %berat, (c). 10 %berat, (d). 15 %berat, (e). 20 %berat dan (f). 25 %berat.

0% LiClO_4 dan 5 % LiClO_4 berbeda satu sama lain pada frekuensi tinggi. Selain itu, efek lain diperlihatkan adalah perbedaan besar dalam respon impedansi antara Gambar 1 (a) hingga Gambar 1 (f). Perbedaan ini pada dasarnya adalah dalam seperempat lingkaran frekuensi rendah dari dispersi, yang menunjukkan kecenderungan yang meningkat untuk dekat dengan sumbu nyata (Z') sebagai tegangan meningkat. Antarmuka antara arus kolektor dan ion lithium, bagian imajiner dari Z akan cenderung tak terhingga sedangkan frekuensi cenderung nol. Fakta bahwa pola kecenderungan seperempat lingkaran dekat dengan sumbu nyata (Z') dapat dijelaskan oleh perubahan konduktivitas elektronik Li. Asumsi ini didukung oleh beberapa literatur, yang menunjukkan bahwa materi lewat dari isolator, untuk konduktor ketika $\text{Li}_x\text{Cl}_{1-x}\text{O}_4$ dengan mengasumsikan nilai x yang lebih rendah [15,16]. Analisis spektrum impedansi akan dilakukan untuk menjelaskan fenomena ini.

Selain itu, dapat ditemukan bahwa garis linier muncul pada frekuensi tinggi dengan kandungan LiClO_4

meningkat dari 20 %berat dan 25 %berat, yang mengungkapkan bahwa film pasivator stabil. Jari-jari seperempat lingkaran muncul di rentang frekuensi menengah dengan tegangan meningkat, mengungkapkan bahwa terjadi penurunan resistensi transfer. Salah satu penjelasan fenomena ini adalah bahwa konduktivitas ionik bahan elektrolit meningkat dengan meningkatnya kandungan LiClO_4 . Gambar 1(c) hingga Gambar 1(e) menampilkan impedansi spektrum elektrokimia dari lembaran *Poly Vinyl Alcohol (PVA)* dengan penambahan LiClO_4 10, 15 dan 20 %. Pada Gambar tersebut memperlihatkan bentuk *plot Nyquist* yang sama untuk siklus yang berbeda setelah siklus pertama. Artinya, *plot Nyquist* untuk keadaan awal pada siklus yang berbeda



Gambar 2. Model sirkuit yang setara dengan spektrum impedansi.

terdiri dari seperempat lingkaran pada rentang frekuensi rendah dan garis linear di rentang frekuensi yang lebih tinggi.

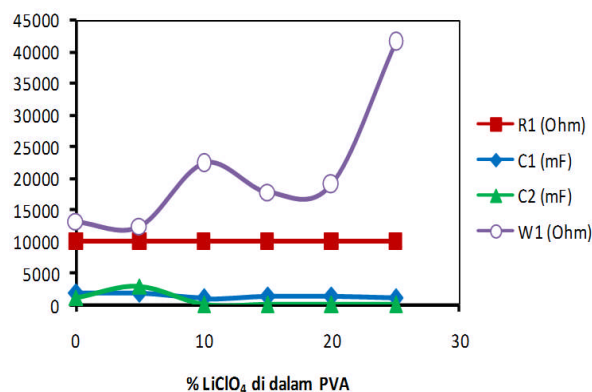
Plot Nyquist pada 25 % LiClO₄ terdiri dari setengah lingkaran di rentang frekuensi rendah dan anomali dengan bentuk terkompresi dalam rentang frekuensi tinggi dan moderat dan garis linear pada rentang frekuensi yang lebih tinggi.

Dalam rangka menyelidiki perubahan dalam spektrum Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) bahan elektrolit Poly Vinyl Alcohol (PVA) dengan penambahan LiClO₄ selama proses pengisian secara detail, kami memodelkan sebuah rangkaian setara yang ditampilkan pada Gambar 2 dan analisis data spektrum impedansi ditunjukkan pada Tabel 1. Lebih jelas nilai parameter sirkuit ditunjukkan dengan Gambar 3. Total impedansi dapat dianggap sebagai resistansi kecepatan transfer R1, dan C1 dan C2 adalah kapasitansi lapisan ganda. W1 adalah impedansi Warburg yang mencerminkan difusi ion lithium di padatan.

Tabel 1. Nilai R1, C1, C2 dan W1 rangkain sirkuit yang setara dengan spektrum impedansi dari lembaran PVA ditambah LiClO₄.

paramter	PVA LiClO ₄ 0%	PVA LiClO ₄ 5%	PVA LiClO ₄ 10%	PVA LiClO ₄ 15%	PVA LiClO ₄ 20%	PVA LiClO ₄ 25%
R1, ohm	10000	10000	9999	9999	9995	9992
C1, F	1,77	1,75	0,982	1,37	1,32	1,15
C2, F	1,21	3,02	2,8 x 10 ⁻⁵	2,3 x 10 ⁻³	3,9 x 10 ⁻⁴	2,8 x 10 ⁻³
W1, ohm	13252	12432	22358	17864	18954	41602

Dari Gambar 3 terlihat nilai R1 relatif tetap pada penambahan LiClO₄ didalam PVA sampai dengan 25 %berat, demikian juga dengan nilai C1 sementara itu nilai C2 mengalami kenaikan pada nilai maksimum di penambahan LiClO₄ 5% kemudian turun terus hingga penambahan LiClO₄ sampai dengan 25%. Impedansi Warburg W1 mula-mula mengalami penurunan kemudian naik mencapai nilai 22358 selanjutnya turun lagi dan naik linear seiring penambahan LiClO₄ ke dalam PVA. Hal ini menunjukkan bahwa impedansi Warburg yang tinggi mencerminkan



Gambar 3. Hubungan antara parameter sirkuit setara dengan kandungan LiClO₄ didalam PVA

difusi ion lithium yang juga tinggi di padatan PVA. Nilai tertinggi impedansi Warburg diperoleh pada penambahan LiClO₄ sebesar 25%.

Selanjutnya akan dipelajari densitas arus dan koefisien difusi ion lithium dengan menggunakan Persamaan (1) dan Persamaan (2) :

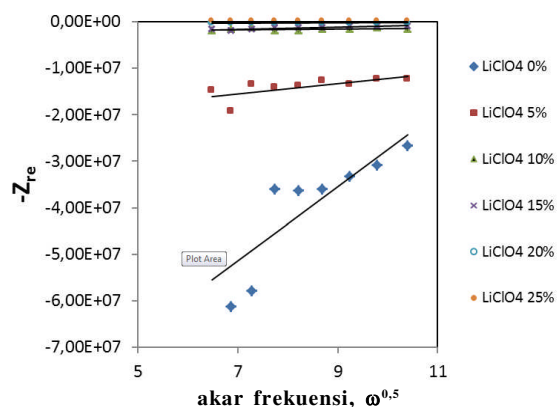
$$j_o = \frac{i_o}{A} = \frac{RT}{nFR_1A} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$D_{Li^+} = R^2 T^2 / 2 A^2 n^4 F^4 C^2 \sigma^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

- j_o = Densitas arus
- D_{Li^+} = Koefisien difusi ion lithium
- R = Konstanta gas universal
- T = Suhu mutlak (298,13)
- n = Jumlah electron per molekul selama oksidasi ($n=1$ untuk reaksi interkalasi/deinterkalasi lithium)
- F = Konstanta Faraday
- A = Area kontak elektroda dengan elektrolit (disini adalah 0,5 cm²). Nilai R1 dihitung dengan permodelan sirkuit dari spektrum impedansi
- C = Konsentrasi ion lithium
- σ = Factor Warburg yang merupakan fungsi dari $Z_{Re} (\omega=2\pi f)$, ditunjukkan pada Persamaan (3):

$$Z_{Re} = R_D + R_L + \sigma \omega^{1/2} \quad \dots\dots\dots (3)$$



Gambar 4. Hubungan antara -Z_{re} dengan akar frekuensi $\omega^{1/2}$

Hubungan antara -Z_{re} dengan akar frekuensi $\omega^{1/2}$ diperlihatkan dengan Gambar 4. Dari Gambar 4. dapat ditentukan nilai σ sehingga Persamaan (2) bisa dihitung.

Nilai densitas arus j_o dan koefisien difusi ion lithium D_{Li^+} didalam sistem PVA dengan penambahan LiClO₄ ditabulasikan di Tabel 2. Konsisten dengan pemodelan nilai impedansi Warburg, koefisien difusi ion lithium ini juga meningkat seiring meningkatnya kandungan LiClO₄ didalam lembaran PVA. Croce et al. [17] telah membuktikan bahwa de-interkalasi lithium-ion dari bahan katoda dapat

Tabel 2. Nilai densitas arus j_0 dan koefisien difusi ion lithium D_{Li^+} dengan penambahan LiClO₄ didalam lembaran PVA.

paramter	PVA LiClO ₄ 0%	PVA LiClO ₄ 5%	PVA LiClO ₄ 10%	PVA LiClO ₄ 15%	PVA LiClO ₄ 20%	PVA LiClO ₄ 25%
j_0, Acm^2	$5,13 \times 10^{-10}$	$5,13 \times 10^{-10}$	$5,14 \times 10^{-10}$	$5,14 \times 10^{-10}$	$5,14 \times 10^{-10}$	$5,13 \times 10^{-10}$
$D_{Li^+}, \text{m}^2\text{S}^{-1}$	$1,77 \times 10^{-36}$	$1,42 \times 10^{-25}$	$1,25 \times 10^{-25}$	$3,52 \times 10^{-25}$	$3,45 \times 10^{-24}$	$1,05 \times 10^{-23}$

mengurangi *shielding* tolakan elektrostatik antara oksigen dari dua lapisan yang berdekatan dan memperluas kisi kristal, sehingga meningkatkan sifat difusi lithium-ion di bahan katoda.

KESIMPULAN

Teknik *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)* telah digunakan untuk memahami kinetika garam ion LiClO₄ di dalam lembaran *Poly Vinyl Alcohol (PVA)*. Analisis menunjukkan bahwa R1 adalah faktor yang paling penting untuk mengontrol kinetika LiClO₄. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa lapisan pasivator dari LiClO₄ dan transfer lithium-ion di LiClO₄ terutama terbentuk dalam rentang frekuensi awal pengukuran. Studi ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan LiClO₄ didalam *PVA* lebih besar pula difusi ion lithium didalam lembaran bahan elektrolit. Hasil analisis ini memberikan panduan arah yang penting untuk melakukan modifikasi pada bahan *SPE*.

DAFTAR ACUAN

- [1]. H. Xu, J. Sun, and L. Gao. "Hydrothermal Synthesis of LiMnO₂ Microcubes for Lithium Ion Battery Application". *Ionics (Kiel)*, vol. 19, no. 1, pp. 63-69, 2013.
- [2]. M. Xie, R. Luo, R. Chen, F. Wu, T. Zhao, Q. Wang, and L. Li. "Template-Assisted Hydrothermal Synthesis of Li₂MnSiO₄ as a Cathode Material for Lithium Ion Batteries". *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 20, pp. 10779-10784, 2015.
- [3]. H. Bi, F. Huang, Y. Tang, Z. Liu, T. Lin, J. Chen, and W. Zhao. "Study of LiFePO₄ Cathode Modified by Graphene Sheets for High-Performance Lithium Ion Batteries". *Electrochim. Acta*, vol. 88, 2013.
- [4]. Y. Zhu, Y. Xu, Y. Liu, C. Luo, and C. Wang. "Comparison of Electrochemical Performances of Olivine NaFePO₄ in Sodium-Ion Batteries and Olivine LiFePO₄ in Lithium-Ion Batteries". *Nanoscale*, vol. 5, no. 2, 2013.
- [5]. Y. Zhang, C. Y. Wang, and X. Tang. "Cycling Degradation of an Automotive LiFePO₄ Lithium-Ion Battery". *J. Power Sources*, vol. 196, no. 3, pp. 1513-1520, 2011.
- [6]. L. Wang, J. Zhao, X. He, J. Gao, J. Li, C. Wan, and C. Jiang. "Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS) Study of LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ for Li-ion Batteries". *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 7, pp. 345-353, 2012.
- [7]. D. E. Fenton, J. M. Parker, and P. V. Wrigh. "Complexes of Alkali Metal Ions With Poly (Ethylene Oxide)". *Polymer*, vol. 14, no.11, pp. 589, 1973.
- [8]. J. Gao, J. Liu, W. Liu, B. Li, Y. Xin, Y. Yin, and Z. Zou. "Proton Exchange Membrane Fuel Cell Working at Elevated Temperature With Ionic Liquid as Electrolyte". *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 6, pp. 6115-6122, 2011.
- [9]. L.C. Xuan, Y.X. An, W. Fang, L.X. Liao, Y.L. Ma, Z.Y. Ren, and G.P. Yin. "Organic Electrolyte Improving The Performance of Ionic Liquid PEO Polymer Electrolyte Based Lithium Ion Batteries". *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 6, pp. 6590-6598, 2011.
- [10]. M.S.M. Eldin, M.A. Abu-Saied, A.A. Elzatahry, K.M. El-Khatib, E.A. Hassan, and K.M. El-Sabbah. "Novel Acid-Base Poly Vinyl Chloride-Doped Ortho Phosphoric Acid Membranes for Fuel Cell Applications". *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 6, pp. 5417-5429, 2011.
- [11]. L. Sa'adu, M. A. Hashim and M. Baharuddin. "A Noble Conductivity Studies and Characterizations of PVA-Orthophosphoric-Filter Paper Electrolytes". *Journal of Materials Science Research*. vol. 3, no. 40, pp.1-12, 2014.
- [12]. N. Rajeswari, S. Selvasekarapandian, J. Kawamura, and S. R. S. Prabaharan. "Emerging Trends in Science, Engineering and Technology". *Springer India*, 2012, pp 571-578.
- [13]. H. B. Han, S. S. Zhou, D. J. Zhang, S. W. Feng, L. F. Li, K. Liu, W.F. Feng, J. Nie, H. Li, X. J. Huang and Z. B. Zhou. "Lithium Bis (Fluorosulfonyl) Imide (LiFSI) as Conducting Salt for Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-ion Batteries: Physicochemical and Electrochemical Properties. *Journal of Power Sources*, vol. 196, no.7, pp. 3623-3632, 2011.
- [14]. J. Zhao, L. Wang, X. He, C. Wan, dan C. Jiang, Kinetic Investigation of LiCoO₂ by Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS). *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 5 no. 4, pp. 478-488, 2010.
- [15]. N. M. Jurado, I. Delgado, and R. A. Vargas. "Ionic Conductivity of (PEO)₁₀(CF₃COONa)_x-⁰% Al₂O₃ Composites". *Universitas scientiarum*, vol. 18, no.2, pp. 173-180, 2013.

- [16]. Y. Yang, G. Zheng, S. Misra, J. Nelson, M. F. Toney and Y. Cui. "High-Capacity Micrometer-Sized Li_2S Particles as Cathode Materials for Advanced Rechargeable Lithium-ion Batteries". *Journal of the American Chemical Society*, vol. 134, no. 37, pp. 15387-15394, 2012.
- [17]. F. Croce, G. B. Appetecchi, L. Persi, and B. Scrosati. "Nanocomposite Polymer Electrolytes for Lithium Batteries". *Nature*, vol. 394, no. 6692, pp. 456-458, 1998.