

OPTIMALISASI KONDUKTIVITAS IONIK ELEKTROLIT POLIMER BERBASIS KOMPOSIT KITOSAN-ZIRKONIA/LITIU PERKLORAT DENGAN PENAMBAHAN GLISEROL

Evi Yulianti¹, Dayu Luthfiah², dan Sudaryanto¹

¹Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM)-BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15314

²Departemen Fisika, FMIPA, UIN Syarif Hidayatullah
Jl. Ir. Haji Juanda No. 95, Ciputat, Tangerang Selatan 15412

E-mail : yulianti@batan.go.id

Received: 1 Februari 2017; revised: 13 Maret 2017; accepted: 21 Maret 2017

ABSTRAK

OPTIMALISASI KONDUKTIVITAS IONIK ELEKTROLIT POLIMER BERBASIS KOMPOSIT KITOSAN-ZIRKONIA/LITIU PERKLORAT DENGAN PENAMBAHAN GLISEROL. Untuk meningkatkan nilai konduktivitas ionik elektrolit polimer, telah dilakukan modifikasi terhadap sistem komposit kitosan-ZrO₂/LiClO₄ dengan menambahkan gliserol sebagai *plasticizer*. Pembuatan lembaran elektrolit polimer dilakukan dengan metode casting, setelah seluruh komponen dicampur secara bertahap dan diaduk dengan pengaduk magnet. Penambahan *plasticizer* dilakukan dengan berbagai komposisi yaitu antara 0% (g/g) sampai dengan 80% (b/b). Elektrolit polimer kemudian dikarakterisasi meliputi struktur mikro dengan difraksi sinar-X (XRD), sifat mekanik dengan uji tarik menggunakan UTM, spektrometer impedansi (LCR-meter) dan pengukuran jumlah transferensi ion. Hasil karakterisasi dengan XRD dan uji sifat mekanik menunjukkan bahwa elektrolit polimer menjadi semakin amorf dan elastis dengan penambahan *plasticizer*. Penambahan *plasticizer* yang optimal adalah sebanyak 60% (b/b) dimana pada komposisi tersebut masing-masing diperoleh bilangan transferensi ion tertinggi 0,85 dengan nilai konduktivitas ionik $3,52 \times 10^{-4}$ S/cm.

Kata kunci : Kitosan, ZrO₂, Gliserol, Bilangan transferensi ion

ABSTRACT

OPTIMALIZATION OF IONIC CONDUCTIVITY OF POLYMER ELECTROLYTE BASED ON CHITOSAN-ZIRKONIA/LITHIUM PERCHLORATE COMPOSITES BY GLYCEROL ADDITION. In order to increase the ionic conductivity of polymer electrolyte, modification of chitosan-ZrO₂/LiClO₄ composites has been done by addition of glycerol as a *plasticizer*. Polymer electrolyte films were prepared through a casting method. Before the casting, all components were mixed gradually under a magnetic stirrer. Plasticizer additions were varied in different composition range of 0% (w/w) until 80% (w/w). Characterization of the solid electrolyte film was conducted using X-ray diffractometer (XRD) for the crystal structure, mechanical properties by Universal Testing Machine (UTM), impedance spectrometer (LCR-meters) for conductivity, and determination of ion transference number. X-ray diffraction (XRD) data and mechanical testing show that polymer electrolyte became more amorphous and elastic with plasticizer addition. The optimum composition of plasticizer was at 60% w/w, which was the highest ionic transference number of 0.85 and ionic conductivity of 3.52×10^{-4} S/cm.

Key words : Chitosan, ZrO₂, Glycerol, Ionic transference number

PENDAHULUAN

Bahan elektrolit polimer padat (*Solid Polymer Electrolyte/SPE*) pertama kali ditemukan oleh Fenton dan Wright pada tahun 1973 yang meneliti konduktivitas ionik pada polimer polietilen oksida yang ditambah garam alkali. Penelitian tentang bahan ini banyak menarik perhatian karena prospek penggunaannya yang sangat potensial seperti pada baterai sekunder litium, sensor, *solar cell*, *fuel cell* dan

bahan elektrokromik. Pada sistem baterai litium, bahan elektrolit polimer padat berfungsi sebagai penghantar ion litium antar elektroda sekaligus bertindak sebagai separator. Bahan elektrolit polimer memiliki keunggulan antara lain mudah kontak dengan komponen elektroda, mudah difabrikasi dalam bentuk film tipis dan mempunyai sifat listrik, optik dan mekanik yang baik. Selain itu bahan ini tidak bersifat reaktif

terhadap litium sehingga meningkatkan keamanan pada saat penggunaannya. Elektrolit polimer padat (*SPE*) biasanya dibuat dengan menambahkan bahan anorganik seperti garam litium ke dalam matriks polimer. Bahan elektrolit polimer yang banyak diteliti adalah polietilen oksida, akan tetapi karena derajat kristalinitas bahan ini tinggi menghalangi penggunaannya pada baterai karena hanya dapat digunakan pada temperatur di atas temperatur lelehnya sehingga perlu dicari bahan polimer lainnya (Fonseca dan Neves 2006; Stephan dan Nahm 2006; Rahman *et al.* 2011).

Bahan polimer lain juga telah banyak diteliti untuk dikembangkan menjadi bahan elektrolit padat, antara lain polimetilmetakrilat (*PMMA*), polivinil klorida (*PVC*) dan polivinilidid fluorida (*PVDF*) (Stephan and Nahm 2006; Noor *et al.* 2011; Rahman *et al.* 2011; Kuo *et al.* 2013; Deraman, Mohamed, and Subban 2013). Semua ini merupakan polimer sintesis yang susah terdegradasi di alam dan bersifat tidak ramah lingkungan. Oleh sebab itu perlu dicari jenis polimer lain yang *biodegradable* serta ramah lingkungan untuk dikembangkan menjadi bahan *SPE*. Kitosan merupakan salah satu kandidat yang sesuai sebagai bahan elektrolit padat karena merupakan polimer alam yang bersifat *biodegradable*. Selain itu kitosan harganya relatif murah karena ketersediaannya di alam cukup melimpah, kelarutannya tinggi dan mudah dibuat menjadi film. Pada saat ini kitosan banyak digunakan sebagai bahan pengemas makanan, serat untuk bahan diet dan aplikasi biomedis untuk penghantar obat (*drug delivery*) (Tripathi, Mehrotra, dan Dutta 2008; Schnürch and Dünnhaupt 2012; Anitha *et al.* 2014).

Kitosan sendiri bersifat isolator. Agar bisa dipakai sebagai bahan elektrolit, kitosan harus dimodifikasi sehingga konduktivitasnya meningkat. Salah satu cara untuk meningkatkan konduktivitas ionik kitosan disamping penambahan garam-garam adalah dengan menambahkan *filler* oksida berukuran nano seperti TiO_2 , monmorillonit SiO_2 , Al_2O_3 dan ZrO_2 (Navaratnam, Ramesh, and Basirun 2011; Winie *et al.* 2014; Yulianti *et al.* 2013; Aziz and Abidin 2014). Selain itu teknik implantasi ion juga bisa dikembangkan untuk meningkatkan konduktivitas ionik kitosan (Yulianti, Karo, dan Susita 2012). Akan tetapi konduktivitas yang diperoleh relatif masih rendah sekitar $\sim 10^{-5}$ S/cm. Oleh sebab itu penambahan *plasticizer* seperti etilen karbonat, propilen karbonat, etilen glikol, gliserol diharapkan bisa meningkatkan konduktivitas ionik hingga 2 orde (Harun *et al.* 2011; Noor *et al.* 2011). *Plasticizer* merupakan bahan organik dengan berat molekul rendah dan mempunyai nilai konstanta dielektrik tinggi. Penambahan *plasticizer* ke dalam matriks polimer akan meningkatkan fasa amorf polimer

serta dapat meningkatkan fleksibilitas dan disosiasi garam menjadi pasangan kation dan anion bebas. Dari beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan penambahan asam oleat ke dalam film elektrolit kitosan-litium asetat bisa meningkatkan konduktivitas dari orde 10^{-7} S/cm menjadi 5.5×10^{-6} S/cm. Pada penelitian yang dilakukan Buraidah *et al.* (2009), konduktivitas kitosan- NH_4I juga meningkat dengan penambahan etilen karbonat, begitu juga penambahan *plasticizer* pada sistem kitosan- NH_4SCN bisa meningkatkan konduktivitas kitosan hingga $1,51 \times 10^{-3}$ S/cm (Yahya dan Arof 2003; Buraidah *et al.* 2009; Shukur *et al.* 2013).

Berdasarkan penjelasan di atas pada penelitian ini akan dipelajari pengaruh penambahan gliserol sebagai *plasticizer* pada sistem elektrolit polimer berbasis komposit kitosan- ZrO_2 yang telah ditambah garam LiClO_4 (Yulianti, Ginting, and Sudaryanto 2015; Sudaryanto, Yulianti, and Patimatuzzohrah 2016). Penambahan gliserol diharapkan akan meningkatkan konduktivitas dan jumlah transferensi ion dari film elektrolit berbasis kitosan sehingga bisa diaplikasikan dalam sistem baterai.

BAHAN DAN METODE

Bahan

Penelitian ini menggunakan kitosan yang diisolasi dari kulit udang di laboratorium Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR)-BATAN, disamping itu digunakan asam asetat kemurnian 100% (*Merck*) sebagai pelarut, zirkonia (ZrO_2) sebagai filler, garam litium perklorat kemurnian 95%+ (LiClO_4) (*Aldrich*) sebagai sumber ion Li dan gliserol kemurnian 98% (*Merck*) sebagai *plasticizer* serta aquades.

Metode

Film komposit kitosan ZrO_2 dibuat dengan metode *casting*. Serbuk ZrO_2 dengan komposisi 4% (b/b) ditambahkan ke dalam larutan asam asetat 1% dan diaduk selama ± 30 menit agar terdispersi dengan baik (Sudaryanto, Yulianti, dan Patimatuzzohrah 2016). Kemudian ditambahkan serbuk kitosan secara bertahap hingga diperoleh larutan kitosan 4%. Setelah kitosan larut sempurna, selanjutnya ditambahkan garam litium perklorat sebanyak 40% (b/b) dilanjutkan dengan pengadukan hingga garam larut sempurna. Ke dalam campuran kemudian ditambahkan gliserol variasi konsentrasi 0% (b/b) sampai dengan 80% (b/b) dan diaduk hingga homogen. Kemudian larutan dituang ke dalam cawan petri dan dimasukkan ke dalam oven pengering untuk dikeringkan secara perlahan-lahan pada temperatur 45°C

selama 5 hari sampai terbentuk film komposit elektrolit polimer.

Karakterisasi Sampel

Film komposit elektrolit polimer selanjutnya dikarakterisasi meliputi pola difraksi sinar-X yang diamati dengan *X-ray Diffraction (XRD) Empyrean PANalytical* (45 kV, 40 mA) menggunakan radiasi Cu K ($\lambda = 0.15406$ nm, 0.02 deg/step) dipindai pada sudut 2θ 5°-60°. Konduktivitas ionik serta sifat listrik lainnya diukur menggunakan LCR Hi-tester HIOKI 3532-50. Uji sifat mekanik dilakukan dengan peralatan *Universal Testing Machine (UTM)* yang prosedur pengujiannya mengacu pada ASTM tipe D-1822-L. Bilangan transferensi diukur dengan teknik polarisasi menggunakan tegangan $\sim 1,5$ V yang diberikan terhadap sampel yang dihubungkan dengan multimeter dan *switch*. Teknik pengukuran ini mengacu pada metode pengukuran yang dilakukan oleh Morni dan Arof (1999).

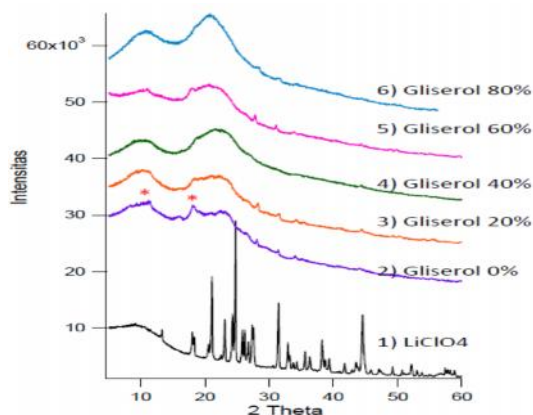
HASIL DAN PEMBAHASAN

Studi pengaruh penambahan gliserol terhadap struktur elektrolit polimer berbasis komposit kitosan-ZrO₂ dilakukan dengan melihat pola difraksi yang terbentuk. Berdasarkan hasil pengamatan XRD diperoleh pola difraksi kitosan-ZrO₂-LiClO₄ seperti pada Gambar 1. Penambahan gliserol kedalam kitosan-ZrO₂-LiClO₄ mempengaruhi kristalinitas sampel. Kitosan-ZrO₂-LiClO₄ tanpa penambahan gliserol memiliki puncak yang agak tajam pada sudut 2θ 11,45° dan 18,53° (tanda bintang) (Gambar 1.2) yang menunjukkan matriks polimer bersifat semikristalin (Yulianti, Karo, dan Susita 2012).

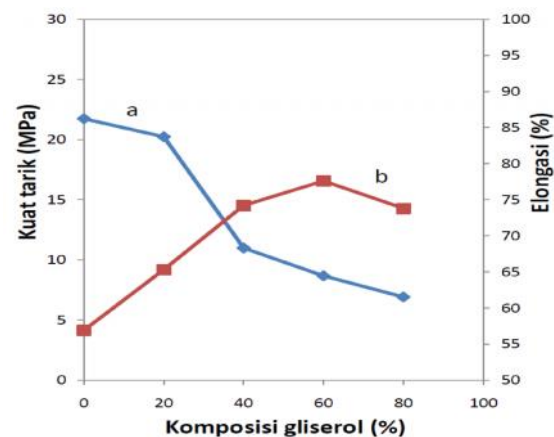
Penambahan gliserol sebagai *plasticizer* mengubah struktur dari sistem komposit kitosan.

Puncak difraksi kitosan pada sudut 2θ 11,45° dan 18,53° tidak lagi terlihat setelah penambahan gliserol. Pelebaran puncak difraksi semakin melebar sebanding dengan kenaikan konsentrasi gliserol. Puncak yang paling lebar dimiliki oleh sampel dengan kandungan gliserol 80% seperti pada Gambar 1.5) artinya pada konsentrasi tersebut sampel berada dalam keadaan yang paling amorf. Di dalam matriks polimer kitosan garam LiClO₄ juga terlarut sempurna, karena dari pola difraksi yang dihasilkan sudah tidak muncul puncak difraksi garam tersebut.

Perubahan sifat mekanis film komposit kitosan ZrO₂ akibat penambahan gliserol dapat diketahui dengan mengukur kekuatan tarik dan perpanjangan putusya seperti terlihat pada Gambar 2. Kekuatan tarik adalah tegangan regangan maksimum sampel sebelum putus. Pada film yang ditambahkan gliserol, nilai kuat tarik menurun seiring dengan peningkatan konsentrasi gliserol. Dari kurva (a) didapatkan informasi bahwa peningkatan konsentrasi gliserol akan menurunkan nilai kuat tarik dari film yang dihasilkan. Fenomena ini seiring dengan menurunnya kristalinitas bahan seperti telah diuraikan di atas. Menurut Sanyang *et al.* (2015), bentuk, jumlah atom karbon dalam rantai dan jumlah gugus hidroksil yang terdapat pada molekul gliserol akan mempengaruhi sifat mekanis (kekuatan tarik dan perpanjangan putus) suatu film. Penambahan gliserol akan mengurangi gaya antar molekul rantai polisakarida sehingga struktur film yang dibentuk menjadi lebih halus dan fleksibel. Dengan meningkatnya fleksibilitas maka kuat tarik dari film yang dibuat akan semakin kecil (Liu *et al.* 2013).



Gambar 1. Pola difraksi sinar X polimer komposit kitosan ZrO₂-LiClO₄-Gliserol

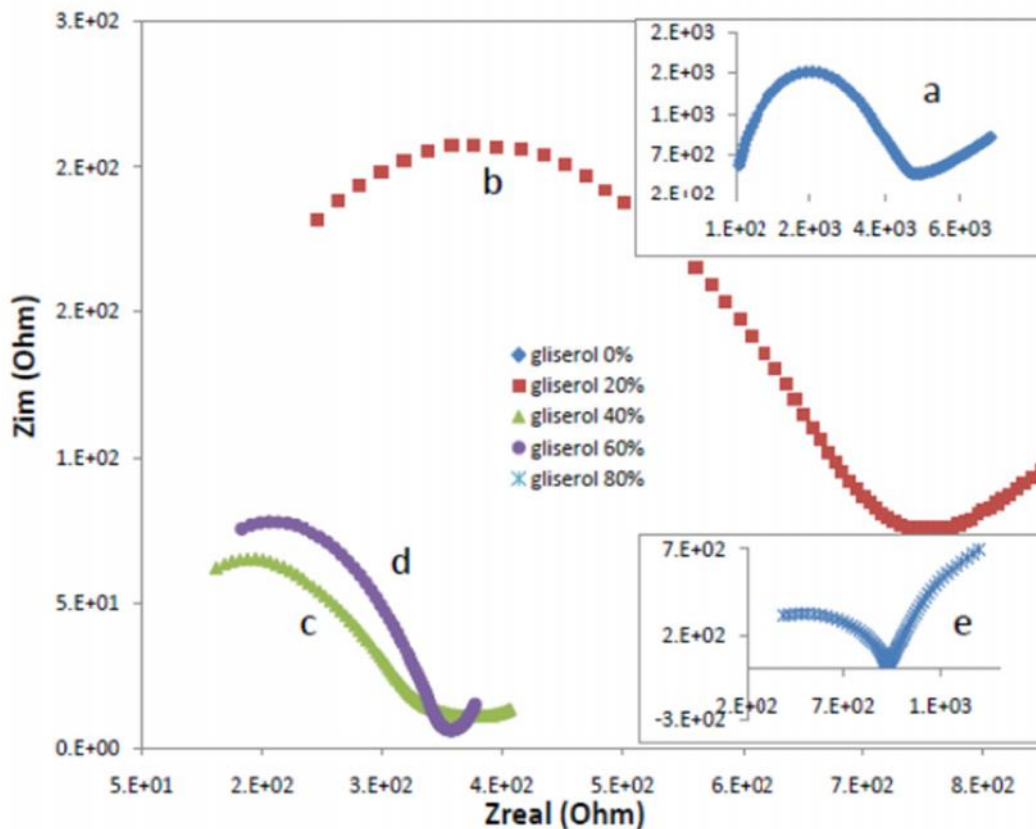


Gambar 2. Sifat mekanis komposit kitosan ZrO₂-LiClO₄-Gliserol (a. Kurva kuat tarik, b.kurva elongasi)

Pengukuran kuat tarik biasanya dilakukan bersamaan dengan pengukuran persentase perpanjangan (elongasi). Data hasil analisis pada Gambar 2 kurva (b), menunjukkan bahwa perpanjangan putus film meningkat dari 56% menjadi 78% dengan bertambahnya konsentrasi gliserol yang diberikan. Hal ini disebabkan oleh peningkatan jumlah gliserol akan menurunkan kekuatan gaya antar molekul sehingga mobilitas antar rantai molekul menurun dan presentasi pemanjangan film pun akan semakin meningkat. Gliserol dalam fungsinya sebagai *plasticizer* dapat menurunkan ikatan kohesi mekanik antara polimer dan dapat merubah sifat rigiditasnya sehingga film yang terbentuk lebih elastis. Penambahan gliserol akan mengurangi gaya intermolekuler sehingga mobilitas antar rantai molekul polimer meningkat. Hal ini yang menyebabkan film menjadi elastis dibandingkan tanpa penambahan gliserol (Sanyang *et al.* 2015). Penambahan gliserol mencapai optimal pada komposisi 60%. Penambahan selanjutnya hingga 80% justru menurunkan elastisitas film komposit. Hal ini disebabkan karena

penambahan gliserol sudah jenuh sehingga membentuk kluster yang mengurangi elastisitas polimer.

Spektroskopi impedansi merupakan salah satu metode yang tepat untuk melakukan karakterisasi sifat-sifat listrik dari bahan-bahan elektrolit dan interaksi antar muka bahan tersebut dengan elektroda penghantar. Dalam penelitian ini spektroskopi impedansi diukur sebagai fungsi frekuensi untuk melakukan analisis nilai konduktivitas ionik dan konstanta dielektrik sampel elektrolit polimer. *Cole-Cole plot* digunakan untuk memperoleh nilai konduktivitas ionik dari sampel kitosan-ZrO₂-LiClO₄ tanpa dan dengan gliserol (20-80)% (b/b) sebagai fungsi frekuensi seperti terlihat pada Gambar 3. Seperti terlihat pada Gambar 3, kurva terdiri dari daerah setengah lingkaran (*depressed semicircle*) pada frekuensi tinggi yang merepresentasikan kapasitor (Cg) yang paralel dengan tahanan (*resistor bulk* (Rb) dari bahan, dan loncatan (*spike*) yang terjadi pada frekuensi lebih rendah yang merepresentasikan *constant phase element* (CPE).



Gambar 3. Kurva impedansi komposit Kitosan-ZrO₂-LiClO₄-Gliserol (a. 0%, b. 20%, c. 40%, d. 60% dan e. 80%)

Resistor merupakan gambaran migrasi ion yang terjadi di dalam volume bebas matriks polimer. Sedangkan kapasitor merepresentasikan rantai-rantai polimer tidak bergerak yang terpolarisasi pada arus AC. Peristiwa migrasi ion dan polarisasi terjadi secara paralel sehingga menghasilkan kurva berbentuk setengah lingkaran. Sedangkan garis miring lurus pada frekuensi rendah terjadi akibat efek antar muka antara elektroda dan elektrolit (Prabu *et al.* 2010; Subramanian and Pandi 2014).

Penambahan gliserol ke dalam sampel elektrolit polimer menyebabkan terjadinya penurunan nilai resistansi bulk (Rb) (Gambar 3(b-d) dan daerah setengah lingkaran (*semicircle*) tetap terbentuk. Nilai *Resistor bulk* elektrolit polimer diperoleh dari intersep daerah setengah lingkaran dengan sumbu *Zreal* pada *Cole-cole* plot. Dengan program *EIS Spectrum analyzer* nilai Rb sampel elektrolit polimer dapat ditentukan. Konduktivitas ionik DC dapat dihitung menggunakan persamaan :

$$\sigma = \frac{l}{R \cdot A} \text{-----(1)}$$

Dimana *l* adalah ketebalan sampel elektrolit polimer dan *A* adalah luas daerah kontak antara elektrolit dan elektroda. Nilai konduktivitas tertinggi yang diperoleh adalah $3,52 \times 10^{-4}$ S/cm dengan penambahan gliserol sebanyak 60%

pada matrik polimer. Peningkatan konduktivitas ionik terjadi karena: 1) transisi fasa kompleks polimer dari fasa semikristalin menjadi amorf 2) kenaikan konsentrasi pembawa muatan 3) *plasticizer* dapat meningkatkan volume dalam sistem elektrolit dan menurunkan viskositas elektrolit sehingga mobilitas ion menjadi semakin mudah. Nilai konduktivitas elektrolit polimer untuk semua komposisi *plasticizer* dapat dilihat pada Tabel 1.

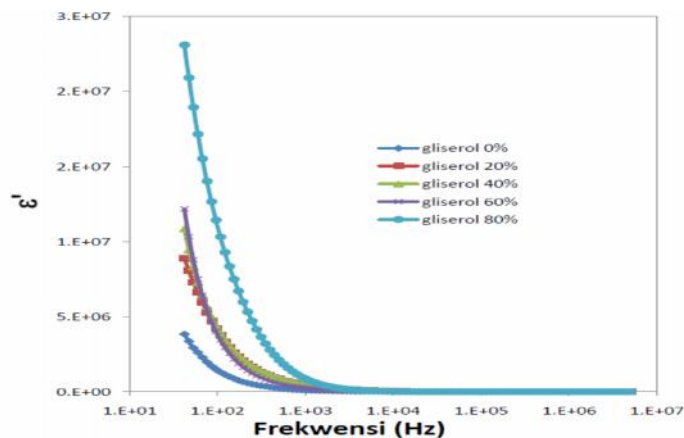
Konstanta dielektrik sebagai fungsi frekuensi mencerminkan respon dinamik dari komponen-komponen yang terkandung dalam material padat. Konstanta dielektrik atau permitivitas sampel elektrolit polimer dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\epsilon' = \frac{Z''}{\epsilon C_0(Z'^2 + Z''^2)} \text{-----(2)}$$

Dimana *Z'* dan *Z''* adalah impedansi real dan imajiner dari bahan, ω adalah frekuensi angular dan *C₀* kapasitansi. Konstanta dielektrik (ϵ') dihasilkan dari polarisasi total dari muatan yang terperangkap sebagaimana halnya dipol-dipol pada suatu material (Shukur *et al.* 2013). Konstanta dielektrik sampel elektrolit polimer komposit kitosan ZrO₂ tanpa dan dengan *plasticizer* diperlihatkan pada Gambar 4.

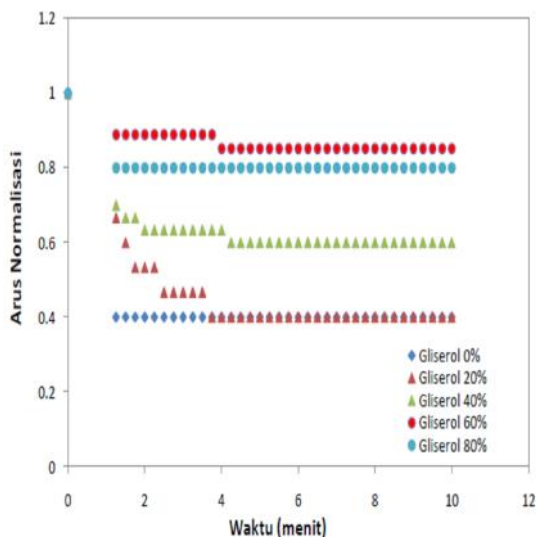
Tabel 1. Perubahan konsentrasi *plasticizer* gliserol terhadap nilai konduktivitas elektrolit polimer kitosan-ZrO₂-LiClO₄

No.	Komposisi gliserol (%)	Konduktivitas ionik σ (S/cm)
1.	0	$6,89 \times 10^{-6}$
2.	20	$1,82 \times 10^{-5}$
3.	40	$2,31 \times 10^{-4}$
4.	60	$3,52 \times 10^{-4}$
5.	80	$7,68 \times 10^{-5}$



Gambar 4. Konstanta dielektrik elektrolit polimer Kitosan-ZrO₂-LiClO₄.gliserol

Dari Gambar 4 terlihat bahwa nilai ϵ' untuk semua sampel terjadi pada frekuensi rendah. Pada daerah frekuensi rendah, nilai awal permitivitas dielektrik untuk material polar biasanya tinggi. Pada penelitian ini nilainya meningkat seiring meningkatnya konsentrasi *plasticizer*. Film elektrolit polimer tanpa *plasticizer* memiliki konstanta dielektrik $2,72 \times 10^6$, mengalami peningkatan menjadi $2,83 \times 10^7$ dengan penambahan *plasticizer* sebanyak 80% (b/b). *Plasticizer* merupakan bahan organik dengan konstanta dielektrik tinggi sehingga penambahan *plasticizer* mengakibatkan sampel elektrolit polimer semakin polar. Dispersi pada frekuensi rendah disebabkan oleh pengaruh muatan ruang yang mengakibatkan terjadi akumulasi pembawa muatan dekat elektroda. Sedangkan pada frekuensi tinggi terjadi pembalikan medan dengan periode tinggi di dekat antar muka (*interface*). Kontribusi pembawa muatan (ion) terhadap konstanta dielektrik akan menurun seiring kenaikan frekuensi. Pada frekuensi tinggi juga terjadi hamburan dipol-dipol sehingga tidak mampu mengikuti perubahan medan serta adanya efek polarisasi (Mohamed *et al.* 2014). Analisis jumlah transferensi ion dilakukan untuk pengukuran arus polarisasi dari ion-ion baik kation maupun anion dalam suatu bahan yang timbul akibat respon ion-ion terhadap beda potensial yang diberikan. Metode yang digunakan untuk mengukur jumlah transferensi ion ini adalah teknik polarisasi DC (Morni dan Arof 1999; Sudaryanto, Yulianti, dan Patimatuzzohrah 2016). Adapun hasil pengukuran nilai bilangan transferensi pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil Pengujian jumlah transferensi ion elektrolit polimer kitosan-ZrO₂-LiClO₄-gliserol

Gambar 5 menunjukkan bahwa semakin tinggi konsentrasi gliserol maka nilai bilangan transferensi meningkat. Penambahan gliserol meningkatkan derajat disosiasi garam, sehingga meningkatkan jumlah ion yang bergerak dalam matriks polimer. Nilai jumlah transferensi ion tertinggi didapatkan dari sampel dengan kandungan gliserol 60% dengan jumlah transferensi ion yang dihasilkan sampel tersebut adalah sebesar 0,85 yang berarti proses konduksi didominasi oleh kationik, yaitu ion Li⁺. Sedangkan konduksi anion yang ukurannya lebih besar terhalangi dengan semakin tinggi kandungan *plasticizer*. Selain itu struktur material juga merupakan faktor penentu dari kemudahan suatu ion untuk bergerak. Semakin amorf suatu material maka semakin mudah ion-ion bergerak dari satu rantai ke rantai polimer lain dalam suatu sistem elektrolit polimer padat. Hal ini didukung dengan hasil pengamatan menggunakan XRD dimana pada konsentrasi 60% gliserol diperoleh sampel dengan struktur amorf.

KESIMPULAN

Elektrolit polimer padat berbasis komposit kitosan-ZrO₂-LiClO₄ yang telah ditambah gliserol sebagai *plasticizer* telah berhasil dibuat dan dipelajari. Penambahan gliserol pada konsentrasi 60% (b/b) telah meningkatkan konduktivitas ionik dari $6,89 \times 10^{-6}$ hingga $3,52 \times 10^{-4}$ S/cm. Penambahan gliserol mempengaruhi sifat intrinsik elektrolit polimer dengan film semakin amorf serta menjadi lebih elastis dan fleksibel. Penambahan gliserol juga meningkatkan jumlah transferensi ion dari 0,4 hingga 0,85, sehingga memungkinkan untuk diaplikasikan pada sistem baterai.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM)-BATAN yang telah mendukung pelaksanaan penelitian ini melalui pendanaan DIPA tahun 2015 dengan mata anggaran no. 4446.007.001.

DAFTAR PUSTAKA

- Anitha, A., S. Sowmya, P. T Sudheesh Kumar, S. Deepthi, K. P. Chennazhi, H. Ehrlich, M. Tsurkan, dan R. Jayakumar. 2014. "Chitin and chitosan in selected biomedical applications." *Progress in Polymer Science* 39 (9). Elsevier Ltd: 1644-67. doi:10.1016/j.progpolymsci.2014.02.008.
- Aziz, S. B., dan Z.H.Z. Abidin. 2014. "Ion-transport study in nanocomposite solid polymer electrolytes based on chitosan: Electrical and dielectric analysis." *Journal*

- of *Applied Polymer Science* 41774: n/a-n/a. doi:10.1002/app.41774.
- Buraidah, M H, L P Teo, S R Majid, dan A K A Arof. 2009. "Ionic conductivity by correlated barrier hopping in NH₄I doped chitosan solid electrolyte" 404: 1373–79. doi:10.1016/j.physb.2008.12.027.
- Deraman, S. K., N. S. Mohamed, dan R. H Y Subban. 2013. "Conductivity and electrochemical studies on polymer electrolytes based on poly vinyl (chloride) - ammonium triflate-ionic liquid for proton battery." *International Journal of Electrochemical Science* 8 (1): 1459–68.
- Fonseca, C.P., dan S. Neves. 2006. "Electrochemical properties of a biodegradable polymer electrolyte applied to a rechargeable lithium battery." *Journal of Power Sources* 159 (1 SPEC. ISS.): 712–16. doi:10.1016/j.jpowsour.2005.10.095.
- Harun, N.I., A.M. Ali, A.M.M. Ali, dan M.Z.A. Yahya. 2011. "Conductivity studies on cellulose acetate – ammonium tetrafluoroborate based polymer electrolytes" 15. doi:10.1179/143307511X1303189074885 8.
- Kuo, C.W., W.B Li, P.R. Chen, J.W. Liao, C.G. Tseng, dan T.Y. Wu. 2013. "Effect of Plasticizer and Lithium Salt Concentration in PMMA- based Composite Polymer Electrolytes" 8: 5007–21.
- Liu, H., R. Adhikari, Q. Guo, dan B. Adhikari. 2013. "Preparation and characterization of glycerol plasticized (high-amylose) starch – chitosan films." *Journal of Food Engineering* 116 (2): 588–97. doi:10.1016/j.jfoodeng.2012.12.037.
- Mohamed, S.A., A.A. Al-Ghamdi, G.D. Sharma, dan M.K. El Mansy. 2014. "Effect of ethylene carbonate as a plasticizer on CuI/PVA nanocomposite: Structure, optical and electrical properties." *Journal of Advanced Research* 5 (1). Cairo University: 79–86. doi:10.1016/j.jare.2012.11.008.
- Morni, N.M., dan A.K. Arof. 1999. "Chitosan–lithium triflate electrolyte in secondary lithium cells." *Journal of Power Sources* 77 (1): 42–48. doi:10.1016/S0378-7753(98)00170-0.
- Navaratnam, S, K Ramesh, dan W J Basirun. 2011. "Investigation of ion conducting behaviour of composite chitosan based polymer electrolytes." *Materials Research Innovations* 15 (1): 184–86. doi:10.1179/143307511X1303189074897 5.
- Noor, M. M., M.A. Careem, S .R. Majid, dan A.K. Arof. 2011. "Characterisation of plasticised PVDF–HFP polymer electrolytes." *Materials Research Innovations* 15 (s2): s157–60. doi:10.1179/143307511X1303189074873 1.
- Prabu, M., S. Selvasekarapandian, A.R. Kulkarni, G. Hirankumar, dan C. Sanjeeviraja. 2010. "Conductivity and dielectric studies on LiCeO₂." *Journal of Rare Earths* 28 (3): 435–38. doi:10.1016/S1002-0721(09)60128-9.
- Rahman, M. Y. A., A. Ahmad, T .K. Lee, Y. Farina, dan H .M. Dahlan. 2011. "Effect of Ethylene Carbonate (EC) Plasticizer on Poly (Vinyl Chloride)-Liquid 50% Epoxidised Natural Rubber (LENR50) Based Polymer Electrolyte." *Materials Sciences and Application* 2 (July): 818–26. doi:10.4236/msa.2011.27111.
- Sanyang, M.L., S.M. Sapuan, M. Jawaid, M.R. Ishak, dan J. Sahari. 2015. "Effect of Plasticizer Type and Concentration on Tensile, Thermal and Barrier Properties of Biodegradable Films Based on Sugar Palm (Arenga pinnata) Starch," 1106–24. doi:10.3390/polym7061106.
- Schnürch, A.B., dan S. Dünnhaupt. 2012. "Chitosan-based drug delivery systems." *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 81 (3): 463–69. doi:10.1016/j.ejpb.2012.04.007.
- Shukur, M. F., Y.M. Yusof, S.M.M. Zawawi, H.A. Illias, dan M.F.Z. Kadir. 2013. "Conductivity and transport studies of plasticized chitosan-based proton conducting biopolymer electrolytes." *Physica Scripta* T157: 14050. doi:10.1088/0031-8949/2013/T157/014050.
- Stephan, A.M., dan K. S. Nahm. 2006. "Review on composite polymer electrolytes for lithium batteries." *Polymer* 47 (16): 5952–64. doi:10.1016/j.polymer.2006.05.069.
- Subramanian, Selvasekarapandian, dan Vinoth Pandi. 2014. "Preparation and characterization of PVA complexed with amino acid, proline," no. July. doi:10.1007/s11581-014-1206-0.
- Sudaryanto, E. Yulianti, dan Patimatuzzohrah. 2016. "Structure and properties of solid polymer electrolyte based on chitosan and ZrO₂ nanoparticle for lithium ion battery." In *AIP Conference Proceeding*, 1710:020003–1. doi:10.1063/1.4941464.
- Tripathi, S., G.K. Mehrotra, dan P .K. Dutta. 2008. "Chitosan based antimicrobial films for food packaging applications," no. 93: 1–7.
- Winie, Tan, N. S M Hanif, C. H. Chan, dan A. K. Arof. 2014. "Effect of the surface treatment of the TiO₂ fillers on the

- properties of hexanoyl chitosan/polystyrene blend-based composite polymer electrolytes." *Ionics* 20 (3): 347–52. doi:10.1007/s11581-013-0983-1.
- Yahya, M. Z. A., dan A .K. Arof. 2003. "Effect of oleic acid plasticizer on chitosan – lithium acetate solid polymer electrolytes" 39: 897–902. doi:10.1016/S0014-3057(02)00355-5.
- Yulianti, E., J. Ginting, dan Sudaryanto. 2015. "Pengaruh Penambahan Garam Garam Litium Terhadap Sifat Elektrolit Padat polimer Berbasis Kitosan." *Jurnal Sains Materi Indonesia* 16: 133–38.
- Yulianti, E., R.D. Saputri, S. Sudaryanto, H. Jodi, dan R. Salam. 2013. "Pembuatan Bahan Polimer Elektrolit Padat Berbasis Nanokomposit Kitosan Montmorillonite untuk Aplikasi Baterai." *Jurnal Kimia dan Kemasan* 35 (2): 77.
- Yulianti, E, A Karo Karo, dan L Susita. 2012. "Synthesis of Electrolyte Polymer Based on Natural Polymer Chitosan by Ion Implantation Technique" 4: 202–7. doi:10.1016/j.proche.2012.06.028.