PREPARASI TITANIUM FOSFAT SEBAGAI BAHAN ELEKTROLIT PADAT UNTUK BATERAI SEKUNDER

Preparation of Titanium Phosphate as Solid Electrolyte Material for Secondary Battery

Handoko Setyo Kuncoro¹, Suhandi¹, Muhammad Syaifun Nizar¹, Ratih Resti
Astari¹, Didit Nur Rahman¹, Evvy Kartini², Bambang Prihandoko³

¹Balai Besar Keramik(BBK) – BPPI - Kemenperin

Jl. Jendral Ahmad Yani 392 Bandung Indonesia Telp. (022) 7206221

² Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) - BATAN

Jl. Kw. Puspipetek, Muncul, Setu, Tangerang Selatan Indonesia Telp. (021) 7560922

³Pusat Penelitian (P2) Fisika – LIPI

Jl. Kw. Puspipetek, Muncul, Setu, Tangerang Selatan Indonesia Telp. (021) 7560570

Naskah masuk: 5 Juni 2018, Revisi 1: 20 Juni 2018, Diterima: 31 Agustus 2018

ABSTRAK

Industrialisasi baterai lithium di Indonesia membutuhkan selain teknologi mineral juga dukungan bahan baku lokal. Elektrolit padat merupakan salah satu komponen sel baterai lithium yang menentukan kestabilan kerja (umur) baterai dan keamanan penggunaannya. Dalam penelitian ini telah dibuat elektrolit padat untuk baterai sekunder jenis *Lithium Aluminium Titanium Phosphate (LATP)* dengan variasi $LATP.n\%Li_2O$ dimana Li_2O sebagai aditif peningkat konduktivitas dengan $n=0,5,10$. Secara teoritis kandungan elektrolit padat *LATP* terbesar adalah bahan *Titanium Phosphate (TiP)* sekitar 80% fraksi beratnya, bahan tersebut bisa diperoleh dari bahan mineral alam seperti ilmenit dan apatit yang ada di Indonesia. Hal ini telah memenuhi syarat industrialisasi komponen baterai dengan tingkat komponen dalam negeri (TKDN) bahan melebihi 60%. Bahan TiP disiapkan dengan metode destruksi sintering dan asam-basa, sedangkan $LATP.n\%Li_2O$ dibuat dengan metalurgi serbuk dan sintering dengan pre-heating 400°C. Hasil uji XRD menunjukkan pola difraktogram TiP yang mirip dengan pola TiP dari referensi publikasi lain. Adanya sedikit perbedaan pola XRD mengindikasikan adanya bebasan kandungan rutil TiO_2 dalam bahan TiP dan sedikit pengotor lainnya, yang juga telah dibuktikan dengan hasil uji XRF. Hasil uji SEM memberikan mikrograf yang memamerkan balok-balok kristalit sesuai dengan bentuk yang digambarkan oleh referensi lain. Bahan *LATP* yang dibuat memiliki mekanisme konduktivitas ionik tunggal dan stabil berdasarkan interpretasi Cole-cole plot diagram. Hasil uji konduktivitas ionik untuk $LATP.n\%Li_2O$ menunjukkan variasi penelitian dengan $n=5$ memiliki konduktivitas ($4,5 \times 10^{-5}$ S/cm) yang lebih tinggi dibanding variasi lainnya.

Kata Kunci: TiP, LATP, elektrolit padat, bahan alam, baterai lithium, konduktivitas ionik

ABSTRACT

Industrialization of lithium batteries in Indonesia requires in addition to mineral technology as well as local raw material support. Solid electrolytes are one of the lithium battery cell components that determine the working stability (long life-time) of the battery and the safety of its use. In this study solid electrolyte for secondary battery with type of Lithium Aluminum Titanium Phosphate (LATP) was synthesized in variation of LATP.n% Li₂O where Li₂O functioned as conductivity enhancing additive with n=0,5,10. Theoretically, the largest LATP solid electrolyte content is the Titanium Phosphate (TiP) material about 80% by weight fraction, the material can be obtained from natural mineral materials such as ilmenite and apatite in Indonesia. It has qualified for the industrialization of battery components with domestic component level (TKDN) material exceeding 60%. The TiP material was prepared by sintering destruction and acid-base methods, while the LATP.n% Li₂O was made using powder metallurgy and sintering method with pre-heating 400 ° C. The XRD test result shows a diffraction pattern of TiP similar to TiP pattern from other publication reference. A slight difference in the XRD pattern indicated an excess of TiO₂ rutile content in TiP material and other impurities, which has also been proven by XRF test results. The SEM test result provided a micrograph showing off the crystal blocks corresponding to the shape described by other references. The LATP material made has a single and stable ionic conductivity mechanism based on the interpretation of the Cole-cole plot diagram. The result of ionic conductivity test for LATP.n% Li₂O showed variation with n = 5 having conductivity (4.5x10⁻⁵ S / cm) higher than other variations.

Keywords: *TiP, LATP, solid electrolyte, natural material, lithium battery, ionic conductivity*

I. PENDAHULUAN

Saat ini Indonesia baru memiliki satu industri baterai di wilayah Gunung Putri, Bogor, Jawa Barat, yakni PT. Nipress, Tbk. Perusahaan ini memproduksi jenis baterai dengan bahan elektrolit berwujud cair. Padahal elektrolit padat memiliki banyak kelebihan diantaranya lebih aman dibandingkan dengan yang menggunakan elektrolit cair dan

polimer, karena tidak mudah bocor dan terbakar[1][2][3]. Elektrolit padat umumnya juga memiliki stabilitas elektrokimia, stabilitas termal dan konduktivitas ionik yang baik [4]. Dewasa ini juga diketahui bahwa efek dendrit lithium dalam elektrolit cair bisa memperpendek usia pakai baterai [5] dimana hal tersebut tidak dijumpai pada penggunaan bahan elektrolit padat.

Penelitian bahan elektrolit padat untuk baterai sekunder di Indonesia masih langka, dan saat ini sedang dikembangkan oleh Konsorsium Riset Baterai Lithium Nasional. Penelitian terakhir bahan elektrolit padat [6] di Indonesia masih menggunakan bahan polimer alam yakni komposit polimer kitosan dan *montmorillonite* yang mampu menghasilkan konduktivitas ionik $2,382 \times 10^{-5}$ S/cm.

Produksi (pabrik) bahan elektrolit padat ini nantinya juga harus memenuhi persyaratan tingkat komponen dalam negeri (TKDN) bahan diatas 60% dari sisi biaya [7]. Memang tidak semua bahan baku untuk pembuatan elektrolit padat ini bisa diperoleh di Indonesia. Namun jika bahan tersebut kebutuhannya relatif sedikit dan harga relatif murah maka nilai TKDN 60% untuk bahan baku bisa dicapai. Dalam penelitian ini telah dibuat bahan elektrolit jenis *Lithium Aluminium Titanium Phosphate* (LATP) yang di sintesis dari bahan *Titanium Phosphate* (TiP).

Bahan fosfat bisa diperoleh dari mineral apatit. Cadangan fosfat alam (dalam mineral apatit yang biasanya terdapat pada sedimen guano) di Indonesia diperkirakan tersedia 895 ribu ton dimana 66% ada di Pulau

Jawa [8]. Bahan titania bisa disintesis dari mineral ilmenit yang sumber dayanya di Indonesia cukup berlimpah yakni sekitar 40 juta ton [9]. Selain itu, mineral ilmenit juga bisa diperoleh dari limbah pengolahan timah [10] dan limbah pengolahan zirkonia. Ekstraksi titania dari mineral ilmenit menggunakan reaksi asam-basa secara langsung kurang efektif dan efisien yang secara umum menghasilkan residu yang masih banyak. Karenanya dalam penelitian ini ditambahkan proses pemisahan awal menggunakan metode destruksi sintering [11].

Pemanfaatan bahan baku titanium fosfat dari mineral alam untuk pembuatan elektrolit padat jenis LATP (atau $LATP.0\%Li_2O$), diharapkan mendorong (menginspirasi) tumbuhnya industri bahan baku elektrolit padat yang menunjang industri baterai lithium di Indonesia. Sebagai kedalaman penelitian juga telah dilihat efek penambahan fraksi berat bahan aditif Li_2O pada elektrolit padat jenis LATP. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan mekanisme konduksi ion-ion Li^+ dalam bahan keramik gelas LATP. Hal ini akan terindikasikan dari hasil pengukuran

konduktivitas ionik bahan yang divariasikan [12].

II. METODOLOGI PENELITIAN

Secara garis besar tahapan penelitian ini meliputi: perancangan variasi penelitian, penyiapan bahan dari mineral alam, pembuatan bahan baku TiP dan elektrolit padat *LATP*, karakterisasi bahan dan uji unjuk kerja *LATP.n%Li₂O*.

Perancangan Penelitian

Produk elektrolit padat *LATP* yang dibuat diberikan aditif n persen Li_2O dengan variasi fraksi berat 0%, 5%, dan 10%. Aditif ini diambil dari bahan aktif Li_2CO_3 untuk mempermudah pembentukan ikatan oleh proses sintering saat diberikan perlakuan panas akhir. Persentase aditif yang berlebihan akan mengakibatkan deformasi dimensi bahan karena dinamika ion lithium yang tinggi dalam bahan.

Seperti ditunjukkan Gambar 1 bahwa kegiatan tahap awal penelitian adalah membuat tabel variasi penelitian.

Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian.

Tabel 1. Perancangan variasi aditif Li_2O dalam elektrolit padat *LATP*.

Kode sampel	Berat LATP, gram	Berat aditif Li_2CO_3 , gram
EP1	15	0
EP2	15	1,85
EP3	15	3,71

Berat campuran bahan dasar *LATP* dan bahan aktif untuk aditif Li_2CO_3 diukur menggunakan timbangan analitik yang memiliki ketelitian 10^{-4} gram. Dasar perhitungan beratnya didekati dengan acuan massa reaksi stoikiometrik berikut

Dalam praktik percobaannya, dibuat *batch* bahan terlebih dahulu

sekitar 150 gram campuran dengan komposisi fraksi berat proporsional terhadap Tabel 1. Lalu bahan di-*milling* secara mekanik dengan mortar sekitar 15 menit. Kemudian ditimbang sesuai dengan jumlah bahan dasar dan aditifnya.

Penyiapan Bahan dari Mineral Alam

Dua bahan baku yang mendominasi dalam kuantitas pada pembentukan titanium fosfat adalah bahan asamfosfat dan titanium hidroksida/titania. Dalam penelitian ini asam fosfat telah diekstraksi dari mineral apatit. Umumnya mineral apatit memiliki tiga bentuk mineral turunan yakni flourapatit $Ca_5(PO_4)_3F$, klorapatit $Ca_5(PO_4)_3Cl$, dan hidroksiapatit $Ca_5(PO_4)_3OH$. Reaksi sintesis asam fosfat mengikuti persamaan berikut:

dimana H_3PO_4 dan $CaSO_4$ masing-masing adalah asam fosfat dan endapan gipsum. Persamaan (2a) dan (2b) menghasilkan residu asam

flourida dan asam klorida, sedangkan persamaan reaksi (2c) hanya menghasilkan asam fosfat dan gipsum ($CaSO_4$). Kemudian asam fosfat yang terbentuk dipisahkan dari residunya.

Seperti dijelaskan sebelumnya ekstraksi titania dari ilmenit ditambahkan proses awal destruksi sintering mengikuti persamaan berikut:

.. (3)

Pada metode destruksi sintering seperti ditunjukkan persamaan (3), bahan natrium karbonat ditambahkan untuk memisahkan ikatan sinter besi dan titan dalam sistem ilmenit pada suhu kalsina sisekitar 900°C. Setelah dikalsinasi campuran tersebut dilarutkan dalam asam agar terjadi reaksi pemecahan antara besi dan titania menjadi natrium besi dan natrium titania dalam bentuk larutan yang bersifat asam yang kemudian di tambahkan basa agar pH mendekati netral sehingga terpisah antara natrium titania dan pengotor natrium besi, endapan yang dihasilkan adalah natrium titania yang selanjutnya dicuci dengan aquades untuk membersihkan pengotor yang terlarut dan natrium

yang berlebih. Pengotor seperti besi yang tersisa diduga berasal dari reaksi kimia yang tidak sempurna dikarenakan keadaan stoikiometri yang tidak seimbang dan adanya ketidakhomogenan campuran pada saat proses *mixing*.

Pembuatan TiP dan LATP

Salah satu jalur pembuatan bahan dasar elektrolit padat LATP adalah melalui penggunaan bahan TiP. Pembentukan titanium fosfat dari asam fosfat dan titania mengikuti persamaan berikut:

Sesuai persamaan (4), asam fosfat (H_3PO_4) direaksikan dengan titania (TiO_2) yang menghasilkan bahan TiP ($TiH_2(PO_4)_2$). Hasil ini masih harus di-*milling* secara mekanik untuk mendapatkan serbuk halus yang mudah dicampur dengan bahan-bahan serbuk lain pada proses berikutnya.

Produksi LATP dari bahan TiP bisa dilakukan dengan mereaksikan bahan TiP dengan lithium karbonat dan aluminium hidroksida ($Al(OH)_3$) mengikuti persamaan reaksi berikut:

Tambahan titania dalam persamaan (5) digunakan untuk menjaga keseimbangan stoikiometri produk LATP yang kebetulan merupakan hasil bebasan saat pembuatan TiP persamaan (4). Bagian akhir reaksi ini merupakan proses *sintering* pembentukan LATP dengan suhu *sinter* 925°C. Koefisien pada persamaan (5) juga bisa dijadikan dasar perhitungan perkiraan kebutuhan bahan TKDN.

Karakterisasi bahan TiP dan produk LATP

Komposisi bahan TiP telah diuji dengan karakterisasi *X-ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mendapatkan informasi kesesuaian bahan yang dihasilkan berdasarkan komposisi komponnya dan bentuk kristal yang terjadi. Secara teoritis fraksi berat komposisi kompon penyusun TiP bisa diambil dari reaksi dekomposisinya sebagai berikut:

dimana dengan persamaan (6) kompon oksida diprediksi $TiO_2=33,3\%$ dan $P_2O_5=59,2\%$ dari 100% TiP.

Karakterisasi XRF dilakukan di Pusat Penelitian dan Pengembangan

Geologi Kelautan (PPGL), Bandung. Karakterisasi XRD dilakukan di Pusat Penelitian Fisika – LIPI, Serpong. Sedangkan karakterisasi SEM dilakukan di Balai Besar Tekstil Bandung. Karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) produk *LATP* dilakukan untuk memotret formasi struktur mikro permukaan bahan yang diuji.

Pengujian konduktivitas ionik variasi $LATP.n\%Li_2O$

Walaupun impedansi R (atau juga konduktivitas σ dengan ukuran dimensi tetap) besarnya bergantung pada frekuensi [13], namun pada frekuensi (rendah) dengan rentang uji yang pendek, pengaruhnya pada konduktivitas ionik cenderung konstan (berubah kecil). Frekuensi yang dipakai pengukuran konduktivitas ionik dalam penelitian ini didekati dengan rentang frekuensi uji umumnya untuk bahan elektrolit cair (karena digunakan sebagai bahan penggantinya), yakni mulai dari 1 kHz hingga 4 kHz. Guna memudahkan analisis, hasil uji konduktivitas ionik untuk ketiga variasi $LATP.n\%Li_2O$ berikutnya diplot dalam satu gambar. Pengukuran konduktivitas ion dan impedansi ini menggunakan *LCR-meter*

impedance spectroscopy tipe *Hioki 3522-50 LCR HiTester* dari instansi PSTBM BATAN.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil uji XRF untuk unsur-unsur menunjukkan komposisi elementer bahan TiP didominasi oleh Fosfor dan Titanium dengan bebasan utama unsur Besi. Sedangkan unsur pengotor lain jumlahnya sangat kecil dibawah 0,4%, dimana pengaruhnya bisa diabaikan.

Tabel 2. Fraksi berat unsur-unsur TiP

Kompon	Fraksi berat	StdErr
<i>P</i>	16,60	0,11
<i>Ti</i>	22,75	0,15
<i>Fe*</i>	6,05	0,10
<i>Si</i>	0,37	0,02
<i>Al</i>	0,22	0,01

*Fe aktif memiliki karakter dasar ionnya, yakni cukup kuat mengikat sistem atom / molekul sekitarnya.[14] Hal ini tidak menguntungkan bagi mobilitas ion Li^+ dalam bahan elektrolit padat.

Masih adanya/terdeteksinya unsur *Fe* oleh uji XRF dalam Tabel 2, menunjukkan bahwa proses ekstraksi titania dari mineral alam ilmenite belum sempurna.

Hasil analisis XRF untuk komponen oksida pembentuk TiP seperti diberikan pada Tabel 3, dengan mempertimbangkan fraksi berat

stoikiometrik persamaan (6), menunjukkan fraksi TiO_2 yang lebih. Hal ini dimungkinkan oleh pemakaian bebasan TiO_2 dalam persamaan (4) yang belum optimal dan sebagian lagi dari ketidaksempurnaan tahap destruksi sintering dalam proses ekstraksi titania. Namun demikian uraian kompon oksida masih didominasi oleh bahan P_2O_5 dan TiO_2 .

Tabel 3. Fraksi berat kompon-kompon TiP

Kompon	Fraksi berat	StdErr
P_2O_5	38,04	0,24
TiO_2	37,95	0,24
Fe_2O_3	8,66	0,14
SiO_2	0,78	0,04
Al_2O_3	0,42	0,02

Difraktogram hasil uji XRD bahan TiP yang dibuat akan dibandingkan dengan hasil penelitian lain [15]. Puncak-puncak defraktogram hasil penelitian ini hampir mirip dengan standar JCPDS 80-1067 dan hasil penelitian Wang dkk yang mensintesis TiP dari H_3PO_4 komersial untuk sudut-sudut 2θ puncak $11,63^\circ$, $20,83^\circ$ dan $25,73^\circ$, terkecuali lebar FWHM-nya yang lebih besar. Lebar FWHM ini mengindikasikan besar butiran TiP yang lebih baik (kecil) dari penelitian

ini dibandingkan penelitian sebelumnya.

Gambar 3. Difraktogram TiP hasil sintesis

Namun demikian adanya puncak-puncak tambahan diantara sudut (2θ) 40° - 45° merupakan indikasi adanya kelebihan rutil TiO_2 berdasarkan JCPDS 88-1175 seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Hal ini sesuai dengan analisis hasil uji XRF sebelumnya.

Sebelum pembahasan beberapa hasil-hasil karakterisasi bahan LATP, berikut diberikan penentuan suhu sintering dari hasil *Thermo Gravimetric Analysis* (TGA) (Gambar 4). Suhu sinter optimum diindikasikan dari susut massa bahan optimum saat pembakaran.

Massa susut bahan LATP terjadi saat suhu pembakaran mencapai 925°C dimana suhu tersebut ditentukan sebagai suhu *sintering* bagi proses pembakaran LATP.

Gambar 4. Hasil uji TGA bahan LATP

Sebagai karakterisasi awal, formasi partikulat padatan LATP telah diuji menggunakan SEM untuk mengamati morfologi bentukan butiran kristal yang terjadi.

Gambar 5. Hasil uji SEM untuk LATP

Nampak dari Gambar 5 kristalit yang terbentuk rata-rata berukuran $0,5\ \mu\text{m}$ – $1,5\ \mu\text{m}$, dengan morfologi menyerupai bentuk kubus / kubik. Hasil penampakan morfologi ini hampir sama dengan hasil penelitian[16] lain yang menyiapkan LATP mereka dalam bentuk *pellet*,

namun lebar kristalit penelitian merekalebih besar sekitar 5 mikron.

Konduktivitas ionik bahan terkait erat dengan sifat impedansinya. Interpretasi *Cole-cole plot* dari hasil pengujian impedansi untuk elektrolit padat LATP menunjukkan adanya kestabilan konduktivitas ion yang baik.

Gambar 6. Analisis kestabilan *Cole-cole plot* bahan LATP

Hal ini dicirikan dengan bentuk kurva setengah lingkaran yang dihasilkan dari plot pengukuran impedansi imajiner (X) terhadap impedansi real (R_s) seperti ditunjukkan dalam Gambar 6. Bentuk ini juga mengindikasikan kemungkinan terjadinya mekanisme konduktivitas ion tunggal dalam bahan yang diuji.

Hasil pengujian konduktivitas ion pada temperatur kamar dalam rentang frekuensi 1000-4000 Hz untuk bahan

LATP, memberikan harga konduktivitas ionik dalam orde 10^{-6} S/cm, seperti ditunjukkan Gambar 7 berikut.

Gambar 7. Hasil uji konduktivitas ion LATP

Gradien konduktivitas ionnya sangat kecil $6,7 \times 10^{-11}$ S/cm.Hz, sehingga besar konduktivitas ioniknya bisa dikonstantkan (dianggap stabil) sekitar $3,3 \times 10^{-6}$ S/cm. Nilai tersebut masih masuk dalam katagori bahan elektrolit padat dari keluarga bahan LTP di *level* bawah. Penambahan aditif Li_2O dalam LATP diharapkan bisa meningkatkan unjuk kerjanya.

Gambar 8. Hasil uji konduktivitas ion LATP.n%Li₂O

Hasil uji konduktivitas ion dengan aditif Li_2O sejumlah 0%, 5%, dan 10% untuk bahan LATP.n%Li₂O mengindikasikan ketiganya memiliki kestabilan konduktivitas ion dalam julat frekuensi 1000-4000 Hz, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Meskipun demikian variasi aditif dengan komposisi LATP.5%Li₂O memiliki konduktivitas ion paling baik diantara variasi komposisi lainnya, yakni sekitar $4,5 \times 10^{-5}$ S/cm.

Persyaratan dan kebutuhan pemenuhan TKDN untuk produksi bahan elektrolit padat baterai lithium jenis LATP.n%Li₂O bisa dipertimbangkan menggunakan persamaan (5), dimana diprediksi produksi bahan ini bisa didukung fraksi berat bahan baku lokal hingga ~85%.

Tabel 4. Perhitungan TKDN bahan LATP.n%Li₂O

Bahan	Harga (Kg) x Rp1000	Kebutuhan (Kg)	Harga Totalx Rp1000	Keterangan
Li ₂ CO ₃	4550	0,14	637	LN*
TiO ₂	2300	1,8	4140	Lokal
H ₃ PO ₄	210	1,5	315	Lokal
Al(OH) ₃	2000	0,06	120	LN*
Jumlah			5212	

*LN: LuarNegeri (merk: Sigma Aldrich)

Dari Tabel 4 persentase komponen bahan dalam negeri bisa dihitung sekitar 85,48%.

Hal ini akan memenuhi syarat TKDN produksi dalam negeri melebihi 60% dengan asumsi harga-harga komponen penyusun bahan *LATP* tidak terlalu berubah dihitung di awal tahun 2018.

IV. KESIMPULAN

Telah berhasil dibuat bahan elektrolit padat *LATP* dari mineral alam apatit dan ilmenit. Hal ini telah didukung dengan bukti hasil-hasil tes produk dan prosesnya melalui uji XRF, XRD, SEM, impedansi dan konduktivitas ion.

Penambahan aditif Li_2O sebanyak 5% dari fraksi berat telah meningkatkan sekitar 36% konduktivitas ionik bahan *LATP* yang dibuat, yakni menjadi $4,5 \times 10^{-5} \text{ S/cm}$.

Produksi elektrolit padat jenis *LATP.n%Li₂O* di Indonesia nampak berpeluang untuk direalisasikan mengingat bahan baku lokal yang digunakan telah mendominasi komposisi produk sekitar 85% (diatas syarat TKDN 60%).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis banyak berterima kasih kepada Kementerian Perindustrian yang telah mendanai penelitian ini melalui anggaran DIPA TA 2017. Juga kepada seluruh staf PSTBM BATAN yang membantu dalam proses pengujian impedansi dan konduktivitas ion. Tidak lupa kepada semua rekan Konsorsium Baterai Lithium Indonesia, penulis mengapresiasi yang sedalam-dalamnya atas saran dan bimbingannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. G. Balakrishnan, R. Ramesh, and T. Prem Kumar, "Safety mechanisms in lithium-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 155, no. 2. pp. 401–414, 2006.
- [2] Z. J. Zhang, P. Ramadass, and W. Fang, "Safety of Lithium-Ion Batteries," in *Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications*, 2014, pp. 409–435.
- [3] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, and C. Chen, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," *Journal of Power*

- Sources*, vol. 208. pp. 210–224, 2012.
- [4] A. Manthiram, X. Yu, and S. Wang, “Lithium battery chemistries enabled by solid-state electrolytes,” *Nature Reviews Materials*, vol. 2, no. 4. 2017.
- [5] J. Steiger, D. Kramer, and R. Mönig, “Mechanisms of dendritic growth investigated by in situ light microscopy during electrodeposition and dissolution of lithium,” *J. Power Sources*, vol. 261, pp. 112–119, 2014.
- [6] E. Yulianti, R. D. Saputri, S. Sudaryanto, H. Jodi, and R. Salam, “Pembuatan Bahan Polimer Elektrolit Padat Berbasis Nanokomposit Kitosan Montmorillonite untuk Aplikasi Baterai,” *J. Kim. dan Kemasan*, vol. 35, no. 2, p. 77, 2013.
- [7] Menteri Perindustrian, *No Title*. Pasir Zirkon Teknis dengan Metode Modifikasi Fasa,” *J. Keramik dan Gelas Indones.*, vol. 22, no. 1, pp. 22–34, 2013.
- [12] M. Chintapalli *et al.*, “Relationship between Conductivity, Ion Diffusion, and Peraturan Menteri, 2011, p. 21 hal.
- [8] F. Nabeel, D. D. Warnana, and A. S. Bahri, “Analisa Sebaran Fosfat dengan Menggunakan Metode Geolistrik Konfigurasi Wenner-Schlumberger : Studi Kasus Saronggi, Madura,” *J. Sains dan Seni Pomits*, vol. 2, no. 1, pp. 2337–3520, 2013.
- [9] B. Setiawan, “Ekstraksi TiO₂ Anatase dari Ilmenit Bangka Melalui Senyawa antara Amonium Peroxo Titanat dan Uji Awal Fotoreaktivitasnya (Skripsi),” Universitas Indonesia, 2012.
- [10] H. Aman, Sunarno, Fuad Nugroho, “Kinetika Reaksi Hidrolisa TiOSO₄ menjadi TiO(OH)₂,” in *Seminar Nasional Teknik Kimia Oleo & Petrokimia Indonesia*, 2008, pp. 1–6.
- [11] Suhandi and R. Septawandar, “Isolasi Zirkonia dan Silika dari Transference Number in Perfluoropolyether Electrolytes,” *Macromolecules*, vol. 49, no. 9, pp. 3508–3515, 2016.
- [13] H. Xu, S. Zhang, S. M. Anlage, L. Hu, and G. Grüner, “Frequency- and electric-field-

- dependent conductivity of single-walled carbon nanotube networks of varying density," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 77, no. 7, 2008.
- [14] H. S. Kuncoro, M. Sakaue, H. Nakanishi, H. Kasai, and H. K. Dipojono, "First-principles investigation on ionization strength, volume expansion, and water rotational rigidity of small water cluster systems formed around sodium(I), calcium(II), and iron(II) ions," *J. Phys. Soc. Japan*, vol. 80, no. 2, 2011.
- [15] X. Wang *et al.*, "Novel Flower-like Titanium Phosphate Microstructures and Their Application in Lead Ion Removal From Drinking Water," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 19, pp. 6718–6722, 2014.
- [16] S. Breuer *et al.*, "Separating bulk from grain boundary Li ion conductivity in the sol–gel prepared solid electrolyte $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{0.5}\text{Ti}_{1.5}(\text{PO}_4)_3$," *J. Mater. Chem. A*, vol. 3, no. 42, pp. 21343–21350, 2015.