

PENINGKATAN KONDUKTIVITAS BAHAN KONDUKTOR SUPERIONIK (LiBr)_{0,5}(MONTMORILLONITE K-10)_{0,5} DENGAN PROSES IRADIASI SINAR- γ DAN DIFUSI IONIK

Didin Sahidin Winatapura

*Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir (PTBIN)-BATAN
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan 15314
Email: didinsw@batan.go.id*

ABSTRAK

PENINGKATAN KONDUKTIVITAS BAHAN KONDUKTOR SUPERIONIK (LiBr)_{0,5}(MONTMORILLONITE K-10)_{0,5} DENGAN PROSES IRADIASI SINAR- γ DAN DIFUSI IONIK. Peningkatan konduktivitas (σ) bahan konduktor superionik (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} melalui proses iradiasi sinar- γ dan difusi ionik telah dilakukan. Pembuatan cuplikan dilakukan melalui metode reaksi padatan dari campuran bahan LiBr dan montmorillonite K-10 kemudian diikuti dengan proses *sintering* pada 600 °C selama 2 jam. Proses iradiasi sinar- γ dilakukan dengan dosis 100 kGy, 150kGy, 250 kGy dan 400 kGy, diikuti proses difusi pada tegangan DC 1 volt selama 4 jam. Fasa di dalam cuplikan diidentifikasi dengan metode difraksi sinar-X (XRD), sedangkan perubahan σ_{ionik} cuplikan diukur dengan *LCR-meter* dari frekuensi 0,1 Hz hingga 100 kHz. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa dalam bahan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} sebelum diiradiasi sinar- γ teramati fasa-fasa *aluminum silicate hydrate*, Al₂Si₄O₁₀(OH)₂ dan LiBr (111). Setelah proses iradiasi sinar- γ , σ_{ionik} cuplikan meningkat dengan penambahan dosis iradiasi hingga 250 kGy dan kemudian meningkat lagi setelah proses difusi ionik. Peningkatan konduktivitas optimum pada bahan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} dicapai pada dosis 250 kGy.

Kata kunci : Konduktor superionik, Konduktivitas, Difusi, Iradiasi sinar- γ

ABSTRACT

THE CONDUCTIVITY IMPROVEMENT OF (LiBr)_{0,5}(MONTMORILLONITE K-10)_{0,5} SUPERIONIC CONDUCTOR MATERIALS USING γ -RAYS IRRADIATION AND IONIC DIFFUSION PROCESS. The conductivity (σ) improvement of (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} superionic conductor materials with γ -rays irradiation and ionic diffusion process has been done. Synthesis of the specimen was done with solid state reaction of materials mixture of LiBr and montmorillonite K-10, then followed by sintering at 600 °C for 2 hours. The γ -rays irradiation process was conducted with dose of 100, 150, 250, 400 kGy, followed with a ionic diffusion process at DC electric voltage of 1 volt for 4 hours. The phase identification inside the specimen was carried out by using X-ray diffraction (XRD) method. The conductivity change of the specimen was measured by means of LCR-meter at the frequency of 0.1 Hz - 100 kHz. The result shows that in the (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} materials before γ -rays irradiation observed aluminum silicate hydrate, Al₂Si₄O₁₀(OH)₂ and LiBr (111) phases. After γ -rays irradiation, the σ_{ionic} increases by increasing irradiation dose to 250 kGy, and then increased again after ionic diffusion process. The optimum conductivity improvement of (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} materials was obtained at dose of 250 kGy.

Key words : Super ionic conductor, Conductivity, Diffusion, γ -rays irradiation

PENDAHULUAN

Konduktor superionik dipakai mulai dari baterai ponsel hingga laptop, batere isi ulang, baik untuk bagian elektrolit maupun untuk elektrodanya. Selain itu bahan konduktor superionik juga digunakan untuk sensor, *smart window* dan *fuel cell*. Aplikasi dalam teknologi ini juga terus berkembang sejalan dengan ditemukannya berbagai bahan-bahan konduktor superionik baru.

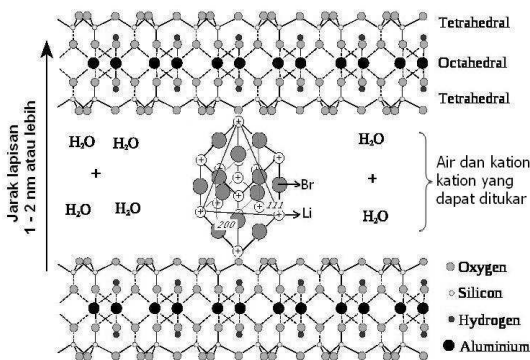
Ion-ion pada bahan konduktor superionik dapat bergerak dengan mudah, padahal dalam bentuk padatan ikatan antar atom dalam kristal begitu kuat sehingga tidak memungkinkan ion untuk berpindah posisi. Salah satu alasan yang diyakini oleh para ahli di bidang bahan tersebut adalah karena adanya ketidakteraturan posisi atom atau cacat dalam struktur kristal bahan konduktor

superionik. Jenis konduktor superionik lain seperti $(\text{ZrO}_2)_9(\text{Y}_2\text{O}_3)$, $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-AgI}$, $\beta\text{-AgI}$, LiI , CaF_2 dan $\beta''\text{-Al}_2\text{O}_3$ diperoleh pada suhu cukup tinggi atau diperoleh dengan proses *doping* [1,2].

Dalam penelitian ini dibuat bahan konduktor superionik $(\text{LiBr})_x(\text{montmorillonite K-10})_x$ dengan $x = 0,5$ dari campuran kelompok litium halida, yaitu litium bromida (LiBr) berbentuk serbuk dan bahan serbuk *montmorillonite* K-10 dengan rumus kimia $\text{M}_{0,3}(\text{Al}_5\text{Mg}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \times n\text{H}_2\text{O})_5$, dengan $\text{M}_{0,3} = \text{Ca}^{2+}$ yang dapat mengikat kation. Hal ini dilakukan karena senyawa LiBr merupakan bahan yang sangat higroskopis dengan konduktivitas (σ) ionik sekitar $10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$, sehingga untuk aplikasi dalam industri elektronik masih sulit diterapkan [3-5]. Oleh karena itu, pembentukan komposit konduktor superionik LiBr dan *montmorillonite* K-10 selain dapat meningkatkan σ_{ionik} nya, juga memperbaiki sifat mekaniknya sehingga dapat diaplikasikan dalam industri elektronik.

Montmorillonite K-10 merupakan bahan aluminium silikat yang tersusun dari unsur utama seperti Al, Si, O dan H dan terdapat pada lempung (*clay*). Bahan ini bersifat negatif dan dapat mengikat kation Li^+ melalui pertukaran ion, dengan atom Li berada diantara kristal aluminium silikat. Bahan *montmorillonite* dikenal sebagai bahan silikat berbentuk lembaran, setiap lembaran terdiri dari 2 lapisan tetrahedral yang tersusun dari unsur Si(O,OH) dan lapisan oktahedral yang tersusun dari Al(O,OH), seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Gaya antar lembaran ini relatif lemah, dengan ruang antar-lembaran dapat mengembang bila dilarutkan dalam air dan alkohol sehingga kemungkinan terjadinya interaksi molekul-molekul kecil diantara lembaran ini cukup rendah. Kation-kation terikat secara longgar dan dapat dipertukarkan dengan kation-kation lain yang memiliki aktivitas ion yang lebih besar [6-10].

Namun demikian, σ_{ionik} campuran bahan LiBr dan aluminium silikat juga masih rendah, yakni dalam orde 10^{-5} - $10^{-4} \text{ S.cm}^{-1}$ [5]. Dalam penelitian ini salah satu metode untuk dapat meningkatkan σ_{ionik} bahan campuran LiBr dan aluminium silikat dilakukan melalui proses iradiasi sinar- γ dengan dosis 100 kGy, 150 kGy, 250 kGy, 400kGy dan diikuti proses difusi ionik



Gambar 1. Ilustrasi ikatan LiBr dengan aluminium silikat dari *montmorillonite* K-10 [10]

dengan bahan LiBr pada tegangan listrik tertentu. Proses iradiasi sinar- γ dilakukan karena diharapkan dapat menghasilkan konsentrasi cacat dalam bahan yang cukup tinggi, sementara proses difusi ionik dapat menambah jumlah konsentrasi dan mobilitas dari *mobile ion carriers* dari kation Li^+ sehingga σ_{ionik} bahan tersebut bisa meningkat [8-10].

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan σ_{ionik} dari bahan campuran LiBr dan serbuk *montmorillonite* K-10 dengan metoda iradiasi sinar- γ dan difusi ionik serta mendapatkan informasi parameter-parameter yang dapat mempengaruhinya.

METODE PERCOBAAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk *montmorillonite* K-10 dan serbuk LiBr . Pembuatan bahan konduktor superionik ini dilakukan dengan metode reaksi larutan padat. Serbuk LiBr dengan komposisi jumlah mol sebesar 0,5 (2,0250 gram), dicampur dengan bahan serbuk *montmorillonite* K-10 dengan komposisi jumlah mol 0,5 (7,9750 gram) membentuk bahan $(\text{LiBr})_{0,5}(\text{montmorillonite K-10})_{0,5}$. Kedua bahan serbuk tersebut digerus di dalam *mortar agate* selama 30 menit, kemudian dicetak menjadi bentuk *bulk* menggunakan *dies* berdiameter 1,5 cm dan kemudian dipanaskan di dalam *furnace* pada 600°C selama 2 jam. Diagram alir proses pembuatan bahan $(\text{LiBr})_{0,5}(\text{montmorillonite K-10})_{0,5}$ tersebut ditunjukkan



Gambar 2. (a). Diagram alir pembuatan bahan konduktor super ionik $(\text{LiBr})_{0,5}(\text{montmorillonite K-10})_{0,5}$ dan (b). Proses difusi ionik pada tegangan listrik DC sebesar 1 volt selama 4 jam

pada Gambar 2(a). Dari hasil proses ini diperoleh cuplikan tanpa iradiasi, IR-0.

Untuk meningkatkan konduktivitas ionik pada bahan tersebut dilakukan dua perlakuan : pertama, proses iradiasi sinar- γ memakai sumber iradiator Co-60 yang tersedia di PATIR-BATAN dengan dosis 100 kGy, 150 kGy, 250 kGy dan 400 kGy. Kedua, setelah proses iradiasi sinar- γ dilakukan proses difusi ionik menggunakan bahan pelet LiBr pada tegangan listik DC, $V_{DC} = 1$ volt masing-masing selama 4 jam, seperti ditunjukkan pada Gambar 2(b). Dari perlakuan ini diperoleh cuplikan IR-100, IR-150, IR-250 dan IR-400.

Identifikasi fasa cuplikan dilakukan menggunakan metode difraksi sinar-X (XRD) dengan target Cu ($\lambda = 1,540 \text{ \AA}$) dan kemudian datanya dianalisis dengan metode Hanawalt. Perubahan nilai konduktivitas ionik cuplikan diukur dengan peralatan LCR-meter mulai dari frekuensi 0,1 Hz hingga 100 kHz. Pengukuran cuplikan dengan LCR-meter menghasilkan kurva antara $\log \sigma$ (S.cm^{-1}) terhadap $\log f$ (Hz). Dari kurva tersebut dapat diperoleh harga rata-rata setiap σ melalui Persamaan (1) :

$$\log \sigma = \log \sigma_0 + s \log f \quad \dots\dots\dots (1)$$

dimana [6] :

- σ = Konduktivitas bahan yang bergantung frekuensi
- σ_0 = Konduktivitas yang tidak bergantung pada frekuensi
- f = Frekuensi
- s = Faktor eksponensial ($0 < s < 1$)

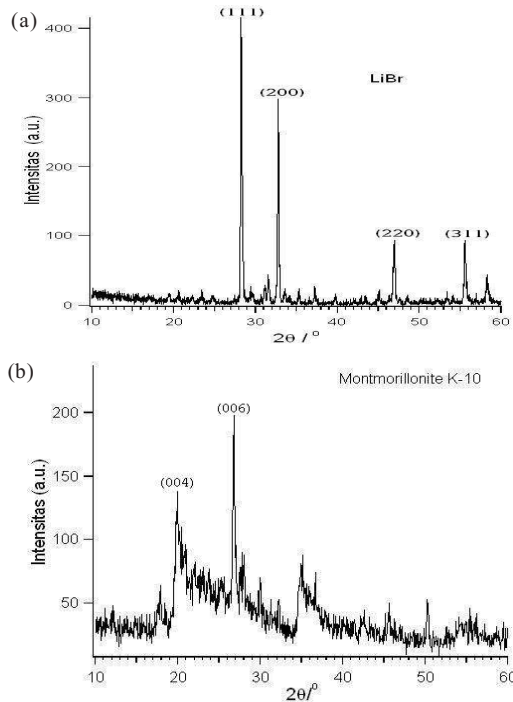
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Pola Difraksi Sinar-X

Pola difraksi cuplikan dari serbuk LiBr ditunjukkan pada Gambar 3(a). Dari gambar tersebut teramati 2 puncak difraksi yang dominan dan tajam dengan intensitas tinggi. Hasil analisis dengan metode Hanawalt menunjukkan bahwa pola difraksi sinar-X tersebut sesuai dengan data pada JCPDS, no. 06-0319, yakni litium bromida (LiBr), grup ruang $Fm\bar{3}m(225)$, parameter kisi $a=5,501 \text{ \AA}$ dan berstruktur kristal kubik pemusatan muka [11]. Hasil pencocokan tersebut dicantumkan pada Tabel 1.

Pola difraksi sinar-X serbuk montmorillonite K-10 diperlihatkan pada Gambar 3(b). Hasil analisis dengan metode Hanawalt menunjukkan bahwa pola difraksi sinar-X tersebut sesuai dengan data pada JCPDS, no 12-0203, yakni *aluminum silicate hydroxyde*, $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ dengan parameter kisi $a = 5,138 \text{ \AA}$; $b = 8,910 \text{ \AA}$ dan $c = 18,60 \text{ \AA}$ [12], seperti dicantumkan dalam Tabel 1.

Pola difraksi sinar-X dari bahan (LiBr)_{0,5} (montmorillonite K-10)_{0,5} ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3. Pola difraksi bahan (a). LiBr dan (b). Montmorillonite K-10

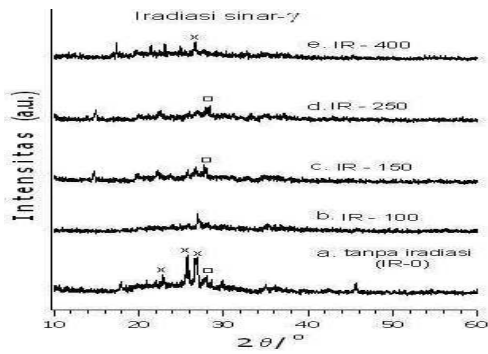
Tabel 1. Sudut hamburan 2θ , jarak antar bidang d , dan intensitas relatif I_r dari LiBr dan montmorillonite K-10 sesuai data JCPDS

No.	Nama Bahan	2θ ($^\circ$)	d (\AA)	I_r (%)	hkl
LiBr					
1.		28	3,177	100	111
2.		32	2,751	80	200
Montmorillonite K-10					
1.		20	4,580	50	004
2.		27	3,080	100	006

Dari profil a pada gambar tersebut teramati beberapa puncak pola difraksi pada sudut $2\theta = 22,82^\circ$; $25,91^\circ$; $26,90^\circ$ dan $28,05^\circ$. Hasil analisis kualitatif dengan metode Hanawalt menunjukkan bahwa keempat puncak tersebut teridentifikasi sebagai fasa *aluminum silicate hydrate* dan LiBr, seperti dicantumkan dalam Tabel 2 [10-12]. Intensitas pola difraksi fasa LiBr (111) meningkat dengan kenaikan iradiasi sampai dosis 250kGy (profil d) tetapi kemudian intensitas turun dengan penambahan dosis iradiasi yang lebih besar (profil e).

Analisis Konduktivitas Ionik

Hasil pengukuran σ_{ionik} cuplikan tanpa dan setelah proses iradiasi sinar- γ dengan LCR-meter ditunjukkan pada Gambar 5. Konduktivitas σ cuplikan tanpa iradiasi (IR-0) diperoleh dalam orde $10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$ (profil a) dan meningkat setelah perlakuan iradiasi sinar- γ hingga dosis 250 kGy, tetapi kemudian dengan penambahan dosis iradiasi selanjutnya, harga σ_{ionik} turun. Harga rata-rata σ_{ionik} cuplikan yang diperoleh melalui Persamaan (1) dicantumkan pada Gambar 6. Harga σ_{ionik}



Gambar 4. Pola difraksi sinar-X cuplikan (a). IR-0, (b). IR-100, (c). IR-150, (d). IR-250 dan (e). IR-400. Tanda X = fasa Al₂Si₄O₁₀(OH)₂ dan □ = fasa LiBr

Tabel 2. Data parameter sudut hamburan 2θ (°), jarak antar bidang d(Å), dan intensitas relatif I_r dari bahan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} [12,13].

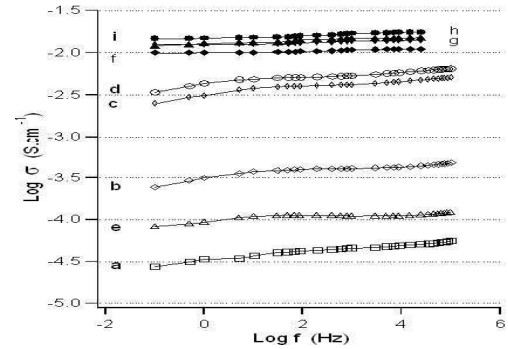
No. Puncak	2θ (°)	d (Å)	I _r (%)	hkl	fasa
2	22,82	3,830	50	021	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
3	25,91	3,440	169	101	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
4	26,90	3,080	149	006	Al ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂
5	28,05	3,177	66	111	LiBr

cuplikan sebelum diiradiasi (IR-0) diperoleh sekitar 3,33x10⁻⁵ S.cm⁻¹ (profil a). Setelah proses iradiasi σ_{ionik} meningkat menjadi 4,21x10⁻³ S.cm⁻¹, namun kemudian turun menjadi 9,75 x 10⁻⁵ S.cm⁻¹ dengan penambahan dosis iradiasi selanjutnya (profil b). Proses iradiasi sinar-γ optimum dari bahan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} diperoleh pada dosis 250 kGy.

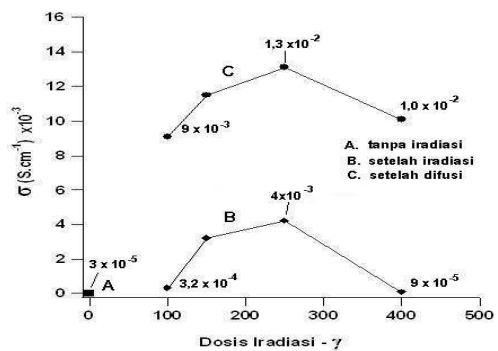
Peneliti terdahulu [15,17] mengungkapkan bahwa poses iradiasi-γ dapat menyebabkan ionisasi pada bahan sehingga menghasilkan ketidakteraturan posisi atom atau adanya cacat dalam struktur. Cacat tersebut akan menjadi media untuk terjadinya gerakan kation pada bahan. Cacat yang terbentuk dalam bahan LiBr adalah tipe cacat titik intrinsik Schottky [16]. Pada cacat tipe Schottky, keduanya baik kation (Li⁺) dan anion (Br) bisa terlepas dari lokasi kisi-kisi reguler (regular lattice sites). Akibat iradiasi sinar-γ terbentuk posisi kosong pada tempat-tempat tertentu dalam kristal. Posisi yang kosong ini dapat diisi oleh atom lain di sekitarnya dan meninggalkan posisi kosong yang baru, demikian seterusnya sehingga ion dalam kristal tersebut dapat berpindah-pindah.

Hasil proses difusi seluruh cuplikan ditunjukkan pada Gambar 5 (profil f hingga profil i). Terlihat bahwa σ_{ionik} seluruh cuplikan mengalami peningkatan yang signifikan setelah dilakukan proses difusi ionik pada tegangan listrik 1 volt. Harga σ_{ionik} seluruh bahan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} hasil iradiasi sinar-γ naik setelah dilakukan proses difusi, seperti ditunjukkan pada Gambar 6 (profil c). Nilai ionik tertinggi pada bahan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} diperoleh pada cuplikan IR-250 sekitar 1,30x10⁻² S.cm⁻¹.

Peningkatan σ_{ionik} melalui proses difusi ionik dapat dijelaskan melalui pendekatan teori difusi dalam bahan



Gambar 5. Hasil pengukuran LCR-meter dari cuplikan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} : (a). tanpa iradiasi, (b). hingga (e). setelah proses iradiasi sinar-γ dan (f). hingga (i). setelah proses difusi.



Gambar 6. Kurva peningkatan harga ionik cuplikan (LiBr)_{0,5}(montmorillonite K-10)_{0,5} (a). tanpa iradiasi, (b). setelah proses iradiasi sinar-γ dan (c). setelah proses difusi ionik

elektrolit padat, karena melibatkan skala ion, seperti ilustrasi pada Gambar 7. Dalam bahan elektrolit padat proses difusi melibatkan beberapa mobile ion carriers (dalam bahan LiBr mobile ion carriers dapat berupa ion Li⁺ (kation) dan Br⁻ (anion)). Menurut hukum Fick, pada bahwa proses difusi dalam elektrolit padat, konsentrasi (c) dari mobile ion carriers dapat menyebabkan dua jenis driving force :

Arus difusi partikel (J_{diff}) yang menuju ke dalam bahan dipengaruhi oleh concentration gradients, grad(c) dari mobile ion carriers. J_{diff} sebanding dengan concentration gradients dari mobile ion carriers, atau

$$J_{diff} = -D \text{ grad}(c) \dots\dots\dots (2)$$

dimana :

D = Koefisien difusi dari partikel (cm²/detik)

Arus medan listrik (J_{field}) yang disebabkan oleh medan internal, juga dipengaruhi oleh concentration gradients dari mobile ion carriers dan medan yang datang dari luar sama dengan

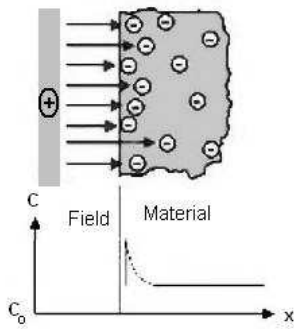
$$J_{field} = \sigma \cdot E = q \cdot c \cdot \mu \cdot E \dots\dots\dots (3)$$

dimana :

σ = Konduktivitas bahan

q = Charge carriers

μ = Mobilitas carriers



Gambar 8. Ilustrasi difusi partikel bermuatan dalam bahan elektrolit padat [16]

Kedua *driving force* tersebut terjadi secara serentak, dengan arus listrik total yang dihasilkan merupakan jumlah dari arus medan listrik dan arus difusi partikel [15-16]. Dari Persamaan (3) tampak bahwa $\sigma = q \cdot c \cdot \mu$ yang dipengaruhi antara lain oleh konsentrasi *carriers* (c) dan mobilitas *carriers* [15,17].

KESIMPULAN

Setelah dilakukan penelitian dapat disimpulkan bahwa dalam bahan campuran bahan konduktor super ionik $(\text{LiBr})_{0,5}(\text{montmorillonite K-10})_{0,5}$ tanpa iradiasi sinar- γ teramati fasa *aluminum silicate hydrate*, $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ dan litium bromida, LiBr. Setelah proses iradiasi sinar- γ , intensitas puncak difraksi fasa LiBr meningkat dengan pertambahan dosis iradiasi sinar- γ sampai 250kGy. Demikian juga konduktivitas ionik bahan tersebut meningkat dari orde $10^{-5} \text{ S.cm}^{-1}$ sebelum proses iradiasi, menjadi orde $10^{-3} \text{ S.cm}^{-1}$ setelah proses iradiasi sampai dosis 250 kGy. σ_{ionik} bahan $(\text{LiBr})_{0,5}(\text{montmorillonite K-10})_{0,5}$ kemudian dapat ditingkatkan lagi menjadi orde $10^{-2} \text{ S.cm}^{-1}$ setelah melalui proses difusi ionik. Peningkatan konduktivitas ionik optimum diperoleh pada dosis 250 kGy.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir, Kepala Bidang Karakterisasi dan Analisis Nuklir dan kepada seluruh rekan-rekan yang telah membantu hingga selesainya makalah ini. Penelitian ini didukung oleh pendanaan dari Program *Insentif Riset BATAN-DIKNAS* 2009.

DAFTAR ACUAN

- [1]. M. KURIAN, M. E. GALVIN, P. E. TRAPA, D. R. SADOWAY and A. M. MAYES, *Electrochimica Acta*, **50** (2005) 2125-2134
- [2]. H. MAEKAWA, M. MATSUO, M. ANDO, Y. NODA, T. KARHASHI and S. ORIMO *J. Am. Chem. Soc.*, **131**(3) (2009) 894-895
- [3]. M. WASIUCIONEK and M. W. BREITER, *Journal of Applied Electrochemistry*, **27** (1997) 1106-1110
- [4]. A. LEINWEHER and E. J. MUTTEMEIYER, *Z. Kristalogr. Suppl.*, **23**(2006) 117-122
- [5]. DIDIN S. WINATAPURA, P. PURWANTO dan S. PURNAMA, Konferensi Mikroskopi ASEAN ke-7, Bali, 3-5 Desember 2009
- [6]. J. DAVID JACOB, HILMAR, KOERNER, HENDRIK HEINZ, BARRY L. FARMER, PETER MIRAN, PATRICK H. GARRETT and RICHARD A. VARA, *J. Phys. Chem. B*, **110**(41) (2006) 20143-20157
- [7]. T. KOZAKI, A. SAITO and H. OHASHI, *Engineering Geology*, **81** (2005) 246-254
- [8]. D. RALZAR, N. AUDEBRAND, M. DAYMOND and B. TOBI, *Journal of Applied Crystallography*, **37** (2004) 911-924
- [9]. SHIDONG LI, M. S. SELLER, C. BASARAN, A. J. SCHULTZ and D. A. KOFKE, *Int. J. Mol. Sci.*, **10** (2009) 2798-2808
- [10]. <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Montmorillonite.svg>, diakses 29 Februari 2010.
- [11]. SWANSON, *Nat. Bur. Stand. (US). Circ.*, **539**, 4, 30, (1955)
- [12]. H. KODAMA, *Mineral J.*, **2** (1958) 236
- [13]. W.P. DAVEY, *Phys. Rev.*, **21** (1923) 143
- [14]. S. PURNAMA, P. PURWANTO dan ADEL FISLI, *Jurnal Sains Materi Indonesia*, Edisi Khusus Desember 2008, (2008)167-170.
- [15]. N. IWAMOTO, Y. TSUNAWAKI, N. UMESAKI, K. FURUKAWA and HIDEO OHNO, *J. Transaction of JWRI*, **6** (1997) 17-21
- [16]. http://www.tf.uni-iel.de/matwis/amat/elmat_en/kap_2/backbone/r_2_4_1.html diunduh pada 17 Maret 2010.
- [17]. C.H. BRIDGEMAN and N.T. SKIPPER, *Journal of Physics-Condensed Matter*, **9** (1997) 4081-4087