

Pengaruh Konsentrasi Ion Aktif Erbium (Er^{3+}) pada Sifat Fisis Medium Gelas Borat-Lithium

Juniastel Rajagukguk^{1,*} dan Fitrilawati²

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Medan, Medan 20221

²Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Sumedang 45363

Intisari

Medium gelas lithium-borat yang disisipi (*doping*) oleh ion aktif erbium (Er^{3+}) telah berhasil dipreparasi dengan teknik *melting-quenching*. Komposisi penyusun medium mengikuti persamaan kimia $(65-x)\text{B}_2\text{O}_3 - 5\text{ZnO} - 5\text{Li}_2\text{O} - 15\text{Na}_2\text{O} - 10\text{PbO} - x\text{Er}_2\text{O}_3$ (dengan $x = 0; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0$ dan $4,0$ mol%). Sampel dalam serbuk dicampur dalam wadah alumina dan dilebur pada suhu 1200°C menggunakan tungku pemanas listrik. Untuk memperoleh hasil yang baik dan tidak retak, suhu sampel gelas diturunkan secara teratur dengan laju rata-rata 7°C per menit. Untuk mengetahui sifat fisis medium tersebut maka telah dilakukan pengukuran beberapa parameter dasar seperti kerapatan, volume molar dan indeks bias. Dari hasil tersebut diketahui bahwa konsentrasi ion aktif Er^{3+} yang didoping telah mempengaruhi sifat fisis *host* gelas tersebut. Seperti halnya kerapatan gelas semakin meningkat dari $2,96 \text{ gr/cm}^3$ ($x = 0,1$ mol%) menjadi $3,185 \text{ gr/cm}^3$ ($x = 4$ mol%). Indeks bias medium gelas juga semakin meningkat dengan ditambahkan konsentrasi ion Er^{3+} . Adapun indeks bias maksimum diperoleh saat konsentrasi ion Er^{3+} sebesar $2,0$ mol%. Dari hasil penelitian ini dapat diperoleh bahwa medium gelas lithium borat yang didoping oleh Er^{3+} ini dapat dimanfaatkan sebagai salah satu kandidat penguat optik.

ABSTRACT

Lithium-borate glasses medium doped Erbium (Er^{3+}) active ion have been prepared by melting-quenching technique. The glasses medium followed composition (mol%): $(65-x)\text{B}_2\text{O}_3 - 5\text{ZnO} - 5\text{Li}_2\text{O} - 15\text{Na}_2\text{O} - 10\text{PbO} - x\text{Er}_2\text{O}_3$ (with $x = 0; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0$ dan $4,0$ mol%). Sample with powder form are mixed in the crucible alumina and melted at temperature 1200°C by using of electrical furnace. After poured in to stainless steel, glasses sample were annealed with the decreases rate 7°C per minute. Physical properties of glass medium such as density, molar volume and refractive index were investigated. From measured results can be known that Er^{3+} ion doped with lithium borate glass can affect physical properties of glass host medium. Density of glass is increased from 2.96 gr/cm^3 ($x = 0.1$ mol%) to 3.185 gr/cm^3 ($x = 4$ mol%). Refractive index of glass medium also increased with addition Er^{3+} ion concentration. The maximum refractive index is obtained when Er^{3+} ion concentration of 2.0 mol%. Based on research results can be explained that Er^{3+} doped Lithium-Borat glasses can be used as one of optical gain candidate.

KATA KUNCI: Erbium, Glass medium, Optical properties, Lithium-Borate
<http://dx.doi.org/10.12962/j24604682.v14i2.3529>

I. PENDAHULUAN

Ion erbium (Er^{3+}) merupakan salah satu ion aktif dalam golongan lanthanida (Ln^{3+}) pada sistem periodik unsur-unsur yang saat ini sangat luas pemanfaatannya. Salah satu produk pemanfaatan Er^{3+} yang sangat terkenal adalah dalam *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA) dimana ion Er^{3+} berperan sebagai penguat optik dalam medium fiber [1]. Kemampuan Er^{3+} yang dapat menghasilkan spektrum luminesensi yang lebar pada daerah panjang gelombang 1500 nm menjadikan ion ini sangat cocok digunakan dalam bidang telekomunikasi. Selain dalam EDFA, pemanfaatan ion erbium dalam bidang lain seperti halnya laser up-konversi, perangkat optik non-linier, pandu gelombang dan sensor optik juga semakin gencar

diteliti [2].

Untuk meningkatkan performa, maka beberapa peneliti telah mencoba menyisipkan (*doping*) ion Er^{3+} ke dalam komposisi gelas. Pemanfaatan senyawa gelas sebagai *host* matriks dari ion aktif, khususnya golongan Ln^{3+} telah banyak dilakukan seperti yang dilakukan pada penelitian sebelumnya [3, 4]. Di dalam gelas ion oksida tanah jarang (*rare earth*) membentuk ikatan baru dengan ion lainnya sehingga dapat menghasilkan kualitas radiasi cahaya yang lebih baik. Hal ini terjadi akibat ion aktif yang didoping menyebar dalam lingkungan kimia baru sehingga terjadi bentuk (spektrum) emisi yang melebar secara homogen [2]. Pemanfaatan komposisi gelas sebagai medium (*host matrix*) dari ion Er^{3+} sangat tepat untuk menghasilkan emisi *up-conversion*. Selanjutnya, jenis gelas oksida merupakan kandidat *host* matriks yang sangat populer bagi ion Er^{3+} untuk dapat menghasilkan banyak aplikasi. Hal ini disebabkan gelas oksida memiliki beberapa keunggulan diantaranya kekuatan mekanik yang

*E-MAIL: juniastel@yahoo.com

tinggi, stabilitas termal dan durabilitas kimia yang baik dan mudah untuk dipabrikasi [5, 6]. Beberapa jenis gelas oksida yang sangat banyak dimanfaatkan sebagai host ion aktif adalah gelas boron oksida (B_2O_3), fosfat oksida (P_2O_5) dan silikat oksida (Si_2O_3).

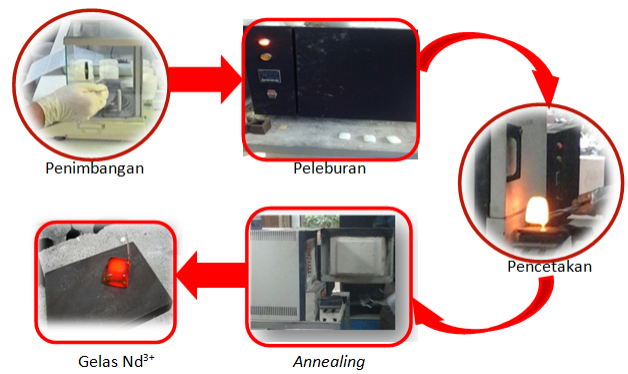
Studi yang berkaitan dengan sifat fisis medium gelas didoping oleh ion Er^{3+} sangat perlu dilakukan untuk mengetahui kualitas struktur dan optik medium tersebut. Dengan diperolehnya sifat fisis maka sifat optik dan spektroskopik medium gelas dapat ditentukan baik melalui karakterisasi menggunakan instrumen maupun melalui perhitungan. Beberapa parameter sifat fisis seperti massa molar, volume molar dan kerapatan sangat perlu ditentukan. Selanjutnya dari parameter tersebut beberapa parameter lainnya seperti konsentrasi ion dalam gelas, radius polar, jarak inter nuklir, kekuatan medan, refraktivitas molar, susceptibilitas, kehilangan refleksi, polarisabilitas ion oksida dan konstanta dielektrik dapat diketahui. Adapun persamaan yang digunakan untuk menentukan parameter-parameter sifat fisis medium gelas telah ditampilkan dalam tulisan sebelumnya [4, 7].

Pembentukan medium gelas yang didoping oleh ion aktif Er^{3+} tentu memerlukan metode pendopingan sehingga diperoleh struktur medium yang baik. Salah satu metode pembuatan medium gelas yang didoping ion aktif adalah dengan menggunakan teknik peleburan-pendinginan (*melt-quenching*) [8]. Teknik *melt-quenching* ini menjadi salah satu metode yang sangat populer dalam proses preparasi material gelas dikarenakan proses pelaksanaannya yang mudah dan biaya yang relatif murah. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik *melt-quenching* dapat menghasilkan medium gelas dengan stabilitas mekanik dan durabilitas kimia yang baik juga indeks bias linear dan non linear yang cukup tinggi.

Dalam tulisan ini dilaporkan bahwa penelitian terhadap pengaruh ion aktif Er^{3+} terhadap sifat fisis medium gelas lithium borat telah dilakukan. Komposisi gelas yang dibuat merupakan gabungan dari former gelas dengan beberapa modifier yang mengikuti komposisi: $(65-x)B_2O_3 - 5ZnO - 5Li_2O - 15 Na_2O - 10PbO - xEr_2O_3$. Beberapa variasi konsentrasi ion Er^{3+} telah didoping pada komposisi gelas dengan menggunakan teknik *melt-quenching*. Untuk mengetahui performa dari medium tersebut, maka dilakukan pengukuran terhadap sifat fisis dan indeks bias gelas.

II. EKSPERIMEN

Medium gelas yang diamati dalam penelitian ini mengikuti komposisi kimia $(65-x)B_2O_3 - 5ZnO - 5Li_2O - 15 Na_2O - 10PbO - xEr_2O_3$ (dengan $x = 0; 0,05; 0,1; 0,5; 1,0; 2,0$ dan $4,0$ mol%). Dari komposisi tersebut terlihat bahwa perubahan konsentrasi ion Er_2O_3 terhadap konsentrasi pembentuk gelas B_2O_3 menjadi fokus utama dalam penelitian ini. Untuk membedakan sampel, maka diberikan inisial pada setiap sampel dari konsentrasi terendah sampai tertinggi mengikuti BERLi.0; BERLi.1; BERLi.2; BERLi.3; BERLi.4; BERLi.5 dan BERLi.6. Bahan kimia yang digunakan bersifat oksida dan memiliki tingkat kemurnian



Gambar 1: Proses preparasi medium gelas yang didoping oleh ion Er^{3+} dengan metode *melt-quenching*.

99,9%. Untuk memperoleh medium yang kuat, transparan dan tidak mudah retak maka proses pembuatan dilakukan dengan metode *melt-quenching* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Semua bahan kimia ditimbang terlebih dahulu menggunakan timbangan semi micro digital sebelum dicampur dan dimasukkan ke dalam wadah alumina. Setelah semua bahan digabung ke dalam wadah alumina, maka komposisi gelas dilebur dengan menggunakan tungku listrik pada suhu $1000^{\circ}C$ selama 3 jam. Selanjutnya komposisi gelas yang telah melebur dituang ke dalam cetakan dari bahan logam stainless dan didinginkan secara bertahap di dalam tungku listrik bersuhu $500^{\circ}C$.

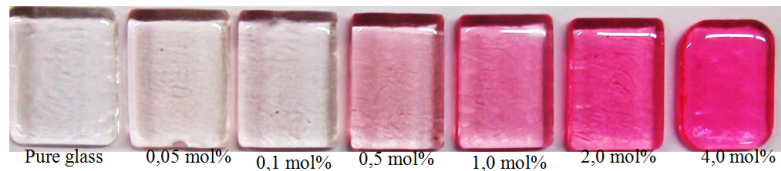
Proses pendinginan dilakukan secara bertahap sampai suhu medium gelas berada pada suhu ruang. Setelah diperoleh medium gelas yang homogen dan tidak retak, maka dilakukan pengukuran volume molar dan kerapatan melalui metode Archimedes. Parameter berupa konsentrasi ion dalam gelas, radius polar, jarak inter nuklir, kekuatan medan, refraktivitas molar dan sifat fisis lainnya juga telah diperoleh melalui persamaan yang telah diperoleh sebelumnya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Salah satu parameter penting yang diperoleh dari penelitian ini adalah volume molar (mol%) secara gabungan maupun per senyawa. Massa molar yang diperoleh untuk setiap komponen penyusun dapat dilihat dalam Tabel I. Komposisi B_2O_3 dan Er_2O_3 merupakan senyawa-senyawa yang divariasikan sehingga dapat dilihat bahwa pengaruh perubahan komposisi kedua senyawa tersebut telah mempengaruhi massa molar senyawa itu sendiri. Empat senyawa pemodifikasi (*modifier*) antara lain ZnO , Li_2O , Na_2O dan PbO dibuat tetap sehingga massa molarnya juga tetap. Jumlah sampel yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah sebanyak tujuh sampel dengan konsentrasi ion Er^{3+} yang bervariasi yakni $0,0$ mol%; $0,05$ mol%; $0,1$ mol%; $0,5$ mol%; $1,0$ mol%; $2,0$ mol% dan $4,0$ mol%. Adapun wujud medium gelas borat lithium yang didoping oleh beberapa konsentrasi ion Er^{3+} dapat dilihat pada Gambar 2.

TABEL I: Persentase massa molar setiap komposisi kimia untuk medium gelas Er³⁺:Borat Lithium (dalam mol%).

Inisial Gelas	B ₂ O ₃ (mol%)	ZnO (mol%)	Li ₂ O (mol%)	Na ₂ O (mol%)	PbO (mol%)	Er ₂ O ₃ (mol%)
BERLi_0	45,25313	4,06947	1,49407	9,296841	22,31994	0
BERLi_1	45,21832	4,06947	1,49407	9,296841	22,31994	0,1912591
BERLi_2	45,18351	4,06947	1,49407	9,296841	22,31994	0,3825182
BERLi_3	44,90503	4,06947	1,49407	9,296841	22,31994	1,912591
BERLi_4	44,55693	4,06947	1,49407	9,296841	22,31994	3,825182
BERLi_5	43,86073	4,06947	1,49407	9,296841	22,31994	7,650364
BERLi_6	42,46832	4,06947	1,49407	9,296841	22,31994	15,300728



Gambar 2: Bentuk medium gelas Lithium Borat didoping oleh ion Erbium (Er³⁺).

Terlihat dari Gambar 2 bahwa warna medium mengikuti warna dasar yang dimiliki oleh senyawa Erbium. Semakin tinggi konsentrasi ion yang didoping maka semakin kontras pula warna yang diberikan sampel. Sampel untuk konsentrasi ion 0,0 mol% terlihat berwarna putih bening (transparan), sedangkan sampel dengan konsentrasi 4,0 mol% terlihat berwarna merah jambu (*pink*). Selain itu terlihat bahwa semua sampel yang dihasilkan memiliki transparansi tinggi dan tidak terjadi retak.

Untuk memperoleh gelas dengan ukuran proporsional dan halus, maka dilakukan pemotongan dan penghalusan terhadap sampel. Gambar 3 menunjukkan sampel yang telah dipotong dan dihaluskan dengan variasi ukuran yang berbeda-beda. Pemotongan dengan beberapa ukuran ini dilakukan untuk mempermudah pengukuran terhadap sifat-sifat fisis dengan menyesuaikan terhadap standar alat ukur yang digunakan. Adapun variasi ukuran yang telah dibuat adalah (10 × 10) mm²; (5 × 15) mm² dan (10 × 20) mm². Terlihat dari gambar bahwa ketiga jenis sampel (berdasar ukuran) menunjukkan transparansi yang tinggi dan struktur yang homogen. Meskipun telah dilakukan pemotongan menggunakan gerinda putar, namun pada struktur gelas tidak terjadi keretakan atau pecah. Hal ini menunjukkan bahwa medium gelas borat lithium yang didoping oleh ion Er³⁺ ini memiliki kekuatan mekanik yang baik.

Perubahan parameter kerapatan, volume molar dan indeks bias medium gelas borat-lithium akibat penambahan konsentrasi ion Er³⁺ dapat dilihat dalam Tabel II. Sedangkan pada Tabel III berisi konsentrasi ion dalam host gelas, polaron radius, jarak inter nuklir, kekuatan medan dan parameter fisis lainnya. Adapun massa molar terbesar diperoleh untuk sampel BERLi_6 yakni sebesar 94,95 mol. Massa ini drastis naik dibandingkan dengan sampel BERLi_5 yakni sebesar 88,69 mol. Kenaikan massa molar ini mengikuti kenaikan konsentrasi molar dari ion Er³⁺.

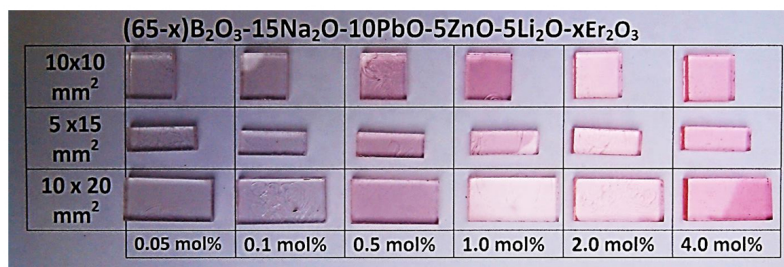
Seperti diketahui bahwa berat atom ion erbium jauh lebih besar dibandingkan dengan boron (B). Begitu juga setelah menjadi senyawa Er₂O₃ berat molekulnya menjadi sebesar 382,52 gr/mol. Sedangkan boron oksida (B₂O₃) hanya sebesar 69,62 gr/mol. Hal ini menyebabkan bahwa ion Er³⁺ telah menggantikan dan mempengaruhi massa molar dari komposisi gelas [9].

Kerapatan (ρ) dan volume molar (V_M) dari sebuah medium gelas merupakan parameter fundamental dan sangat penting ditentukan untuk mengetahui sifat fisis dari material tersebut. Dengan menggunakan prinsip dan persamaan Archimedes maka kerapatan medium gelas dan volume molar dapat diketahui [10].

$$\rho = \frac{W_u}{W_u - W_a} \rho_a \tag{1}$$

$$V_M = \frac{M}{\rho} \tag{2}$$

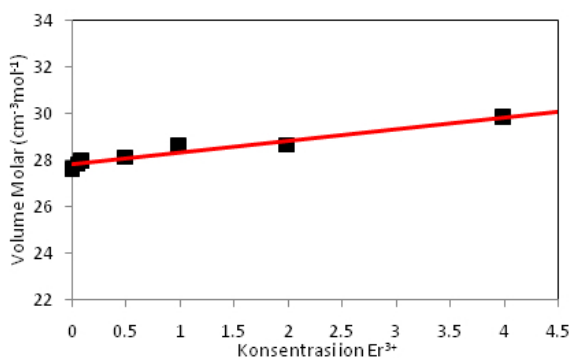
Hubungan antara konsentrasi ion Er³⁺ dengan volume molar medium gelas borat lithium dapat dilihat pada Gambar 3. Data yang menunjukkan nilai volume molar untuk setiap jenis gelas telah ditampilkan dalam Tabel II. Secara umum volume molar semakin meningkat dengan ditambahkan konsentrasi ion Er³⁺. Peningkatan terbesar diperoleh saat konsentrasi ion Er³⁺ dinaikkan dari 2,0 mol% menjadi 4,0 mol% yakni dari 28,68 cm³/mol menjadi 29,81 cm³/mol. Pengaruh dari peningkatan jumlah oksigen tak terikat (*Non-Bridging Oxygen-NBO*) dalam struktur gelas menjadi penyebab dari peningkatan volume molar [11]. Seperti diketahui bahwa jumlah oksigen dalam komposisi gelas telah meningkat dengan ditambahkan ion Er₂O₃. Selain itu perubahan volume molar ini juga tergantung pada laju perubahan kerapatan dan berat molekul komposisi gelas [12]. Untuk mendukung analisis di atas, maka dilakukan juga analisis terhadap pengaruh penambahan konsentrasi ion Er³⁺ terhadap kerapatan



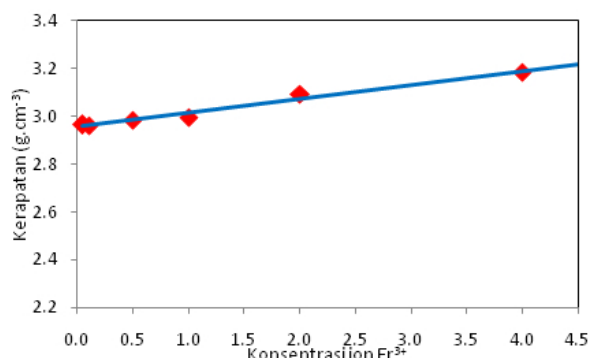
Gambar 3: Medium Gelas Er³⁺: Gelas Lithium Borate yang telah dipotong dan dihaluskan.

TABEL II: Hasil pengukuran Massa molar (M); Kerapatan (ρ), Volume Molar (VM) dan Indeks bias medium gelas Er³⁺:Borat Lithium.

Parameter	BERLi_0	BERLi_1	BERLi_2	BERLi_3	BERLi_4	BERLi_5	BERLi_6
Massa molar (mol)	82,43	82,59	82,75	84,00	85,56	88,69	94,95
Kerapatan (g/cm ³)	2,987	2,965	2,962	2,985	2,994	3,092	3,185
Volume molar (cm ³ /mol)	27,60	27,86	27,94	28,14	28,58	28,68	29,81
Indeks bias	1,500	1,5356	1,5464	1,5489	1,601	1,6204	1,6049



Gambar 4: Hubungan konsentrasi ion Er³⁺ terhadap volume molar medium gelas.



Gambar 5: Hubungan konsentrasi ion Er³⁺ terhadap kerapatan medium gelas.

medium gelas borat lithium seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pada saat kenaikan konsentrasi ion aktif dibuat kecil, maka diperoleh perubahan kerapatan yang fluktuatif. Namun saat konsentrasi dinaikkan dari 0,1 mol% menuju 4,0 mol% maka kerapatan medium gelas meningkat dari 2,962 gr/cm³ menuju 3,185 gr/cm³. Peningkatan kerapatan yang mengikuti kenaikan konsentrasi ion Er³⁺ ini menunjukkan adanya fenomena perubahan ikatan dalam struktur jaringan gelas borat-lithium. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa berat molekul senyawa Er₂O₃ jauh lebih besar dibandingkan dengan B₂O₃, sehingga menyebabkan perubahan yang besar pada konsentrasi molar BO₃ dan BO₄. Hal ini juga mempengaruhi besar volume molar dari medium gelas, dimana dengan kehadiran oksida tanah jarang dapat berperan sebagai pemodifikasi (*modifier*) tiga atom NBO ke dalam sistem gelas borat-lithium [13].

Sifat optik berupa indeks bias medium gelas juga diukur dengan menggunakan Abbe *Refractometer* (ATAGO) tipe NAR-2T Liquid dengan menggunakan lampu LED sebagai sum-

ber cahaya emisi pada panjang gelombang 589,3 nm (D-line). Adapun hasil pengukuran indeks bias tersebut ditampilkan dalam Tabel II. Indeks bias medium gelas tanpa ion dopan Er³⁺ diperoleh sebesar 1,5. Namun setelah didoping oleh ion Er³⁺ dari konsentrasi 0,05 mol% sampai dengan 4,0 mol% diperoleh indeks bias yang juga semakin meningkat. Peningkatan indeks bias ini tidak terlepas dari ikatan ionik antara molekul dalam sistem gelas yang mana senyawa Er₂O₃ juga berperan sebagai modifier [14]. Jumlah atom Er³⁺ di dalam medium gelas borat-lithium semakin meningkat dengan ditamhkannya konsentrasi ion Er³⁺ seperti ditampilkan dalam Tabel III. Pada saat konsentrasi dopan 0,5 mol% diperoleh jumlah atom dalam medium gelas sebesar $1,07 \times 10^{22}/\text{cm}^3$. Jumlah atom penguat ini meningkat berturut-turut dua kali lipat yakni sebesar $2,107 \times 10^{22}/\text{cm}^3$; $4,199 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ dan $8,08 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ saat konsentrasi dopan yang diberikan masing-masing sebesar 1,0 mol%; 2,0 mol% dan 4,0 mol%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan konsentrasi ion Er³⁺ dapat meningkatkan jumlah ion penguat di

TABEL III: Hasil perhitungan parameter sifat fisis untuk medium gelas ion aktif Er³⁺: borat lithium.

Parameter	BERLi_0	BERLi_1	BERLi_2	BERLi_3	BERLi_4	BERLi_5	BERLi_6
Konsentrasi ion Er ³⁺ (N x 10 ²² /cm ³)	0	0,1081	0,2155	1,07	2,107	4,199	8,08
Polaron radius (Å)	0	3,927	3,12	1,829	1,459	1,159	0,9322
Jarak inter nuklir (Å)	0	9,744	7,741	4,538	3,62	2,877	2,313
Kekuatan medan (F x 10 ¹⁷ cm ²)	0	1,085	1,718	5,001	7,857	12,44	19,25
Refraktivitas molar	8,118	8,681	8,852	8,949	9,789	10,08	10,266
Suseptibilitas	0,099	0,108	0,111	0,111	0,124	0,129	0,125
Reflection loss	4,000	4,462	4,604	4,637	5,339	5,605	5,392
Polarisabilitas ion oksida (am x 10 ⁻²⁴ cm ³)	0,322	0,344	0,351	0,355	0,388	0,400	0,407
Konstanta dielektrik (ε)	2,250	2,358	2,391	2,399	2,563	2,626	2,576

dalam medium gelas borat-lithium.

IV. SIMPULAN

Komposisi gelas borat-lithium yang disusun dalam bentuk persamaan (65-x)B₂O₃ - 5ZnO - 5Li₂O - 15 Na₂O - 10PbO - xEr₂O₃ telah berhasil disintesis melalui teknik *melt-quenching*. Konsentrasi ion Er³⁺ yang divariasikan adalah (x = 0,05 mol%; 0,1 mol%; 0,5 mol%; 1,0 mol%; 2,0 mol% dan 4,0 mol%). Untuk mengetahui performa dari medium gelas,

maka sifat fisis dari medium tersebut diinvestigasi. Hasil investigasi diketahui bahwa penambahan konsentrasi ion aktif Er³⁺ dapat meningkatkan kerapatan dan volume molar dari medium gelas borat-lithium (BERLi). Peningkatan ini disebabkan semakin meningkatnya jumlah ion oksigen yang tidak terikat (*Non-Bridging Oxygen* NBO). Selain kerapatan dan volume molar, besar indeks bias juga semakin meningkat dengan ditingkatkannya konsentrasi Er³⁺ ke dalam komposisi gelas. Dari hasil dan analisis tersebut, maka komposisi medium gelas yang telah disintesis tersebut dapat dijadikan sebagai kandidat penguat optik berbasis ion Erbium.

- [1] Q. Qian, *et al.*, "The spectroscopic properties of Er³⁺-doped antimonyborate glasses", *Physica B*, vol. 405, no. 9, pp. 2220-2225, 2010.
- [2] M. Seshadri, *et al.*, "Optical characterization, infrared emission and visible up-conversion in Er³⁺ doped tellurite glasses", *J. Non-CrysSolids*, vol. 402, pp. 141-148, 2014.
- [3] J. Rajagukguk, *et al.*, "Structural and Optical Properties of Nd³⁺ Doped Na₂O-PbO-ZnO-Li₂O-B₂O₃ Glasses System", *Key Eng. Mater.*, vol. 675, pp. 424-429, 2016.
- [4] J. Rajagukguk, *et al.*, "Structural and optical characteristics of Eu³⁺ ions in sodium-lead-zinc-lithium-borate glass system", *J. Mol.Struc.*, vol. 1121, pp. 180-187, 2016.
- [5] H.U. Gudel, *et al.*, "Near-infrared to visible photon upconversion processes in lanthanide doped chloride, bromide and iodide lattices", *J. Alloys and Comp.*, vol. 303-304, pp. 307-315, 2000.
- [6] J. Rajagukguk, *et al.*, "Spectroscopic and Radiative Properties of Several Nd³⁺ Ions in Borate Glass System", *J. Pure and App.Chem. Research*, vol. 5, no. 2, pp. 116-12, 2016.
- [7] J. Rajagukguk, *dkk.*, "Preparasi, Sifat Fisis Dan Analisis Termal Medium Gelas Fluorofosfat Didoping Oleh Ion Nd³⁺ Untuk Aplikasi Medium Penguat Laser", *J. Einstein*, vol. 4, no. 3, hal. 46-52, 2016.
- [8] A. Miguel, *et al.*, "Structural, optical, and spectroscopic properties of Er³⁺-doped TeO₂-ZnO-ZnF₂ glass-ceramics", *J. Eur. Cer. Soc.*, vol. 34, pp. 3959-3968, 2014.
- [9] E. Banks, *et al.*, "Synthesis and characterization of rare earth metal-containing polymers. I. Fluorescent properties of ionomers containing Dy³⁺, Er³⁺, Eu³⁺, and Sm³⁺", *J. App. Poly. Sci.*, vol. 25, no. 3, pp. 359-368, 1980.
- [10] S. Rakpanich, *et al.*, *J. Glass and Cer.*, vol. 3, no. 01, pp. 6, 2013.
- [11] I. Kashif, *et al.*, "Effect of Nd₂O₃ addition on structure and characterization of lead bismuth borate glass", *Results in Phy.*, vol. 4, pp. 1-5, 2014.
- [12] H. Doweidar, "Insights into the structure of Bi₂O₃-B₂O₃ glasses as predicted from density correlations", *J. Non-Crys. Solids*, vol. 404, pp. 49-54, 2014.
- [13] M. Wang, *et al.*, "Structure and properties of soda lime silicate glass doped with rare earth", *Physica B*, vol. 406, no. 2, pp. 187-191, 2011.
- [14] M.R Sahar, *et al.*, "The Physical Properties of P₂O₅-Sm₂O₃-MnO₂ Glass System", *Opt. Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 101-103, 2006.