

PENGARUH VARIASI PbO TERHADAP SERAPAN OPTIS KACA Er:TZPBN

Mukhayyarotin Niswati Rodliyatul Jauhariyah^{1,2*}, Ahmad Marzuki², Cari²

¹Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Jl. Ketintang Gd. C3 Lt. 3 Surabaya

²Program Studi Ilmu Fisika Pascasarjana, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta

*Email: mukhayyarotin_87@yahoo.com

Abstrak

Kaca tellurite banyak diminati peneliti karena kemampuannya sebagai host laser. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membuat kaca tellurite yang sesuai untuk aplikasi laser infra merah dan menganalisis sifat optis kaca tellurite berupa serapan. Kaca tellurite yang dikembangkan ialah kaca tellurite dengan komposisi Er:TZPBN $[55\text{TeO}_2\text{-}35\text{ZnO}\text{-(}5\text{+}x\text{)PbO}\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}2\text{-}x\text{)Na}_2\text{O-Er}_2\text{O}_3]$ dengan $x = 0; 0,5; 1; 1,5; \text{ dan } 2 \%$ mol. Kaca Er:TZPBN dengan komposisi tersebut telah difabrikasi dengan metode melt quenching. Setelah kaca diannealing dan dipolish, dilakukan pengukuran serapan optis kaca tellurite pada suhu ruang menggunakan Shimadzu UV-Vis Spectrophotometer pada rentang panjang gelombang 200-1100 nm. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa serapan optis meningkat dengan penambahan PbO. Serapan optis terbesar pada sampel 5 dengan konsentrasi 2% mol PbO. Dari data serapan optis, nilai energi band gap optis kaca Er:TZPBN juga telah ditentukan. Optical band gap energi menurun seiring dengan penambahan konsentrasi PbO.

Kata kunci: serapan optis, kaca Er:TZPBN, energi band gap optis.

1. PENDAHULUAN

Kaca tellurite banyak diminati peneliti di bidang fotonik karena kemampuan sebagai host laser. Banyak parameter yang digunakan untuk mengukur kualitas sebuah kaca yang digunakan sebagai penguat laser, diantaranya ialah *optical absorption*, *density*, dan *refractive index*. Kaca tellurite memiliki kekuatan mekanik yang bagus dan memiliki transmisi yang bagus pada daerah cahaya tampak dan infra merah dekat hingga $4,5 \mu\text{m}$ (El-Deen dkk., 2008). Massera (2009) menemukan bahwa kaca tellurite memiliki nilai indeks bias yang lebih tinggi (sekitar 1,9-2,25 bergantung pada komposisinya) daripada kaca silica (1,458), kaca fosfat (1,507), dan kaca fluoride (1,499). Keunggulan kaca tellurite ini dapat digunakan untuk berbagai aplikasi seperti laser, *broadband amplifier*, dan *fiber optic*.

Pada penelitian sebelumnya, diperoleh informasi bahwa penambahan PbO dan pengurangan Na₂O pada kaca Er:TZPBN dengan komposisi yang sama dengan penelitian ini dapat meningkatkan densitas kaca. Semakin besar penambahan senyawa PbO dalam komposisi Er:TZPBN $[55\text{TeO}_2\text{-}35\text{ZnO}\text{-(}5\text{+}x\text{)PbO}\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}2\text{-}x\text{)Na}_2\text{O-Er}_2\text{O}_3]$ dengan $x = 0; 0,5; 1; 1,5; \text{ dan } 2 \%$ mol, semakin besar pula densitasnya (Jauhariyah dkk., 2014). Variasi PbO dan Na₂O tersebut juga meningkatkan indeks bias kaca Er:TZPBN dengan rentang nilai indeks bias 1,7090 hingga 2,0057 (Jauhariyah, dkk., 2014).

Ketika cahaya melewati bidang batas benda bening, sebagian energi akan dipantulkan (*reflected*), sebagian akan diserap (*absorbed*), dan sebagian akan diteruskan (*transmitted*). Besarnya serapan optis kaca bergantung pada ketebalan dan panjang gelombang yang merupakan fungsi dari struktur fisik dan kimia dari kaca (Massera, 2009).

Serapan cahaya oleh suatu molekul merupakan bentuk interaksi gelombang cahaya dengan atom atau molekulnya. Energi cahaya diserap oleh atom atau molekul digunakan oleh elektron di dalam atom tersebut untuk bertransisi dari suatu level energi E_1 ke tingkat energi yang lebih tinggi E_2 . Serapan hanya terjadi jika selisih kedua tingkat energi tersebut ($\Delta E = E_2 - E_1$) bersesuaian dengan energi cahaya atau foton yang datang, yakni $\Delta E = E_{\text{foton}}$.

Penyerapan cahaya dari suatu kumpulan atom dinyatakan oleh hukum Lambert-Beer. Proporsi berkas cahaya datang yang diserap oleh bahan atau medium tidak bergantung pada intensitas berkas cahaya yang datang. Hukum Lambert-Beer hanya berlaku jika di dalam bahan tersebut tidak ada reaksi kimia atau proses fisis yang dapat dipicu oleh berkas cahaya datang

tersebut. Dengan demikian, intensitas cahaya yang keluar I setelah melewati bahan atau medium dapat dituliskan: $I = T.I_0$,

dengan I_0 merupakan intensitas berkas cahaya datang dan T adalah transmitansi. Serapan cahaya A berbanding lurus dengan konsentrasi dan ketebalan bahan atau medium, dituliskan dengan persamaan: $A = \varepsilon.c.l$, dengan ε adalah molar absorpsivitas untuk panjang gelombang tertentu atau disebut juga sebagai koefisien ekstensif (1/mol cm), c adalah konsentrasi molar (mol/liter), dan l adalah ketebalan bahan yang dilintasi oleh cahaya (cm). Kombinasi hukum Lambert-Beer tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:

$$T = \frac{I}{I_0} \cdot 100 = \exp(-\varepsilon cl) \quad (1)$$

$$A = \log\left(\frac{I}{I_0}\right) = \log(T^{-1}) = \varepsilon cl \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan di atas dapat diketahui bahwa nilai serapan sebanding dengan konsentrasi dan molar absorpsivitas. Dengan demikian, besarnya nilai serapan bergantung dari besarnya konsentrasi molar larutan. Semakin besar konsentrasi molar larutan, semakin besar nilai serapannya. Semakin besar konsentrasi molar larutan, nilai transmitansi akan menurun secara eksponensial.

Pada paper ini akan dipaparkan tentang sifat optis kaca tellurite yang disusun oleh senyawa TeO_2 , ZnO , PbO , Bi_2O_3 , Na_2O , dan Er_2O_3 . Paper ini menjelaskan tentang pengaruh variasi PbO terhadap serapan optis kaca Er:TZPBN dan perubahan energi *band gap* optis pada kaca.

2. METODOLOGI

Kaca Er:TZPBN [55TeO_2 - 35ZnO -($5+x$) PbO - $2\text{Bi}_2\text{O}_3$ -($2-x$) Na_2O - Er_2O_3] dengan $x = 0; 0,5; 1; 1,5; \text{ dan } 2$ % mol telah difabrikasi menggunakan *melt quenching technique* sesuai penjelasan pada penelitian sebelumnya (Jauhariyah dkk., 2014). Setelah proses annealing dan proses *polish*, sampel kaca Er:TZPBN dapat diuji sifat optisnya. Pengujian sifat optis berupa indeks bias telah dilaporkan dalam Jauhariyah dkk (2014). Pengujian serapan dilakukan menggunakan spektrofotometer berkas ganda (*double beam*) SIMADZU UV-Vis pada rentang panjang gelombang UV-Vis-NIR (200-1100 nm) dengan *scan rate* sebesar 1 nm/s. Melalui pengukuran serapan kaca, dapat ditentukan energi *band gap* optis dari kaca Er:TZPBN dengan variasi PbO.

Energi *band gap* optis didefinisikan sebagai perbedaan antara pita valensi dan pita konduksi dari kaca (Xu dkk., 2011). Untuk menentukan energi *band gap* optis, dilakukan konversi nilai panjang gelombang menjadi energi foton ($E = h \frac{c}{\lambda}$) terlebih dahulu. Tiap-tiap panjang gelombang memiliki nilai serapan tersendiri, nilai serapan tersebut kemudian dikalikan dengan nilai energi foton yang telah ditentukan. Selanjutnya dibuat grafik hubungan antara energi foton ($h\nu$) dengan $(\alpha h\nu)^n$.

Penentuan energi *band gap* optis dapat dilakukan menggunakan metode *Taucs' plot*. Metode *Taucs' plot* merupakan metode penentuan celah optik dengan cara melakukan ekstrapolasi dari grafik hubungan antara $h\nu$ dan $(\alpha h\nu)^n$ hingga memotong sumbu energi sehingga diperoleh nilai celah pita optik (Effendi dan Bilalodin, 2012). Energi *band gap* optis ditentukan dengan menggunakan persamaan (Oo dkk., 2012):

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_{opt})^n \quad (3)$$

dengan α adalah koefisien serapan, $h\nu$ adalah energi foton yang datang, B adalah konstanta transisi elektronik, n merupakan jenis dari transisi elektronik, dan E_{opt} adalah *optical band gap*. Nilai n sama dengan $\frac{1}{2}$ untuk transisi langsung (*direct transition*), sedangkan untuk transisi tidak langsung

(*indirect transition*), nilai n sama dengan 2. Serapan oleh transisi tidak langsung ($n=2$) digunakan untuk banyak oksida kaca, termasuk tellurite (El-Mallawany dkk., 2008).

Material penyusun kaca dalam penelitian ini adalah tellurite. Berdasarkan informasi dari El-Mallawany dkk (2008), maka serapan yang terjadi merupakan serapan oleh transisi tidak langsung sehingga nilai n yang digunakan ialah 2. Oleh sebab itu energi *band gap* optis dapat ditentukan dengan merujuk pada persamaan (3) dan diperoleh persamaan:

$$E_{opt} = h\nu - \left(\frac{\alpha h\nu}{B} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

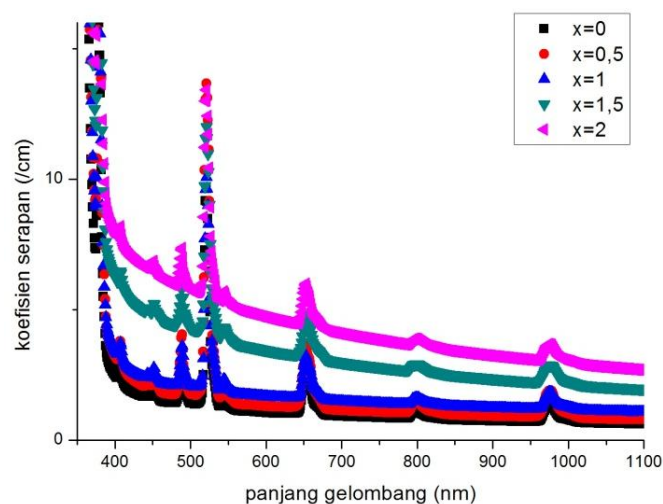
Berdasarkan persamaan (4), maka grafik yang dibuat untuk penentuan energi *band gap* optis melalui metode *Taucs' plot* adalah grafik hubungan antara $(h\nu)$ dengan $(\alpha h\nu)^{\frac{1}{2}}$. Nilai energi *band gap* optis merupakan kesesuaian antara daerah ekstrapolasi linier dengan $(\alpha h\nu)^{1/2}=0$.

3. HASIL DAN DISKUSI

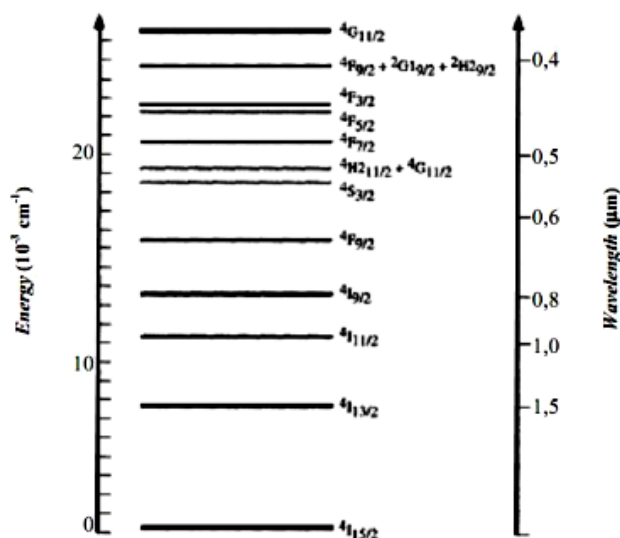
Pengukuran spektrum serapan kaca dilakukan menggunakan SHIMADZU UV-Vis *Spectrophotometer* pada rentang panjang gelombang 200-1100 nm. Spektrum serapan kaca Er:TZPBN pada suhu ruang ditunjukkan oleh Gambar 1. Spektrum pada Gambar 1 menunjukkan bahwa terdapat puncak-puncak serapan. Puncak-puncak serapan ini muncul disebabkan oleh adanya *doping* ion Er^{3+} . Konsentrasi ion Er^{3+} dalam penelitian ini dijaga tetap sebesar 1% mol. Namun, penambahan konsentrasi ion Pb^{2+} dalam komposisi kaca tellurite ini menyebabkan perubahan nilai serapan. Semakin tinggi konsentrasi ion Pb^{2+} pada kaca Er:TZPBN menyebabkan peningkatan nilai serapan. Sampel 5 dengan $x=2$ memiliki nilai serapan paling tinggi daripada sampel lainnya.

Pengukuran nilai serapan optis kaca Er:TZPBN menggunakan spektrofotometer SHIMADZU UV-Vis menghasilkan 8 (delapan) puncak serapan (Gambar 1). Serapan terjadi pada rentang panjang gelombang 350 nm hingga 1000 nm. Puncak serapan pada kaca TZPBN dengan variasi konsentrasi ion Pb^{2+} ini terjadi pada sekitar panjang gelombang 407 nm; 452 nm; 489 nm; 523 nm; 546 nm; 656 nm; 804 nm, dan 977 nm atau sama dengan notasi level energi $^4\text{H}_{9/2}$, $^4\text{F}_{5/2}$, $^4\text{F}_{7/2}$, $^4\text{H}_{11/2}$, $^4\text{S}_{3/2}$, $^4\text{F}_{9/2}$, $^4\text{I}_{9/2}$, dan $^4\text{I}_{11/2}$. Diagram level energi untuk ion Erbium tampak pada Gambar 2. Serapan tertinggi untuk masing-masing komposisi terjadi pada panjang gelombang sekitar 523 nm, pada tingkat energi $^4\text{H}_{11/2}$. Nilai serapan kaca Er:TZPBN meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi ion Pb^{2+} .

Lezal dkk (2001) menemukan bahwa penambahan ion Pb^{2+} pada kaca tellurite akan menggeser kurva serapan UV *edge* menuju panjang gelombang yang lebih panjang. Pada pengukuran serapan ini terdapat kecenderungan serapan untuk bergeser pada daerah dekat ultraviolet. Namun, tidak terjadi pergeseran yang signifikan karena adanya puncak-puncak serapan yang disebabkan oleh adanya *doping* ion Er^{3+} . Perbedaan peningkatan nilai serapan masing-masing komposisi pada daerah yang mendekati UV lebih signifikan daripada peningkatan serapan pada daerah cahaya tampak. Oleh sebab itu, kurva serapan semakin miring membentuk eksponensial seiring dengan penambahan ion Pb^{2+} . Kurva serapan untuk sampel 1 dengan $x=0$ lebih landai meskipun memiliki puncak-puncak serapan yang sama dengan sampel lainnya, sedangkan untuk sampel 5 dengan $x=2$ lebih miring pada daerah panjang gelombang 600 nm hingga 350 nm. Serapan semakin tinggi saat mendekati daerah panjang gelombang 350 nm.



Gambar 1. Spektrum Serapan Kaca Er:TZPBN [55TeO₂-35ZnO-(5+x)PbO-2Bi₂O₃-(2-x)Na₂O-Er₂O₃]

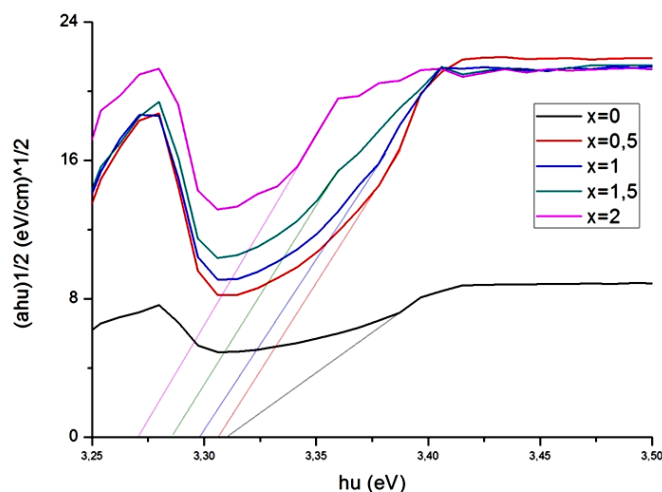


Gambar 2. Diagram level energi untuk ion Erbium (Becker dkk, 1999)

Hasil pengukuran serapan optis dapat digunakan untuk menentukan besarnya energi *band gap* optis kaca Er:TZPBN. Energi *band gap* optis dapat ditentukan menggunakan metode *Taucs' Plot* melalui persamaan (4). Setelah diperoleh nilai energi $h\nu$ dalam eV dan nilai $(\alpha h\nu)^{1/2}$, diperoleh grafik seperti tampak pada Gambar 3. Nilai energi *band gap* optis merupakan kesesuaian antara daerah ekstrapolasi linier dengan $(\alpha h\nu)^{1/2}=0$.

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai $(\alpha h\nu)^{1/2}$ pada kaca Er:TZPBN semakin besar seiring dengan bertambahnya konsentrasi ion Pb²⁺ dan berbanding terbalik dengan pengurangan Na₂O dalam kaca Er:TZPBN. Penelitian ini menunjukkan bahwa kenaikan konsentrasi ion Pb²⁺ sebagai ion berat (*heavy ion*) dapat menaikkan nilai $(\alpha h\nu)^{1/2}$ pada kaca.

Penentuan nilai energi *band gap* optis menggunakan metode *Taucs' plot* dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil ekstrapolasi linier terhadap $(\alpha h\nu)^{1/2}=0$ merupakan nilai energi *band gap* optis. Energi *band gap* optis untuk sampel 1 dengan x=0 adalah 3,311 eV, untuk sampel 2 dengan x=0,5 sebesar 3,307 eV, untuk sampel 3 dengan x=1 diperoleh nilai sebesar 3,298 eV, untuk sampel 4 dengan x=1,5 diperoleh nilai sebesar 3,286 eV, sedangkan untuk sampel 5 dengan x=2 diperoleh nilai energi *band gap* optis sebesar 3,271 eV.

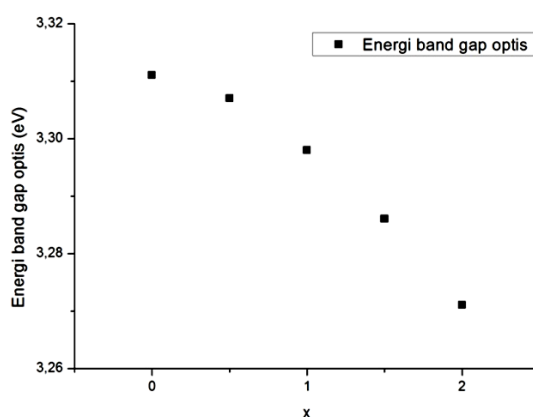


Gambar 3. Ekstrapolasi linier terhadap $(\alpha h\nu)^{1/2}=0$ pada kurva $h\nu$ vs $(\alpha h\nu)^{1/2}$ untuk kaca Er:TZPBN $[55\text{TeO}_2\text{-}35\text{ZnO}\text{-(}5\text{+x)PbO}\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}2\text{-x)Na}_2\text{O-Er}_2\text{O}_3]$

Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa penambahan konsentrasi ion berat Pb^{2+} dan pengurangan konsentrasi Na^+ dalam komposisi kaca Er:TZPBN menyebabkan penurunan nilai energi *band gap* optis. Tabel 1 menunjukkan pengaruh variasi PbO dan Na_2O terhadap densitas, indeks bias, dan energi *band gap* optis pada kaca Er:TZPBN $[55\text{TeO}_2\text{-}35\text{ZnO}\text{-(}5\text{+x)PbO}\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}2\text{-x)Na}_2\text{O-Er}_2\text{O}_3]$. Nilai densitas dan indeks bias diperoleh dari hasil pengukuran pada penelitian sebelumnya (Jauhariyah dkk., 2014).

Tabel 1. Tabel pengaruh variasi PbO dan Na_2O terhadap densitas, indeks bias, dan energi *band gap* optis pada kaca Er:TZPBN $[55\text{TeO}_2\text{-}35\text{ZnO}\text{-(}5\text{+x)PbO}\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}2\text{-x)Na}_2\text{O-Er}_2\text{O}_3]$.

Sampel ke-	x	Densitas (gr/cm^3)	Indeks bias	Energi <i>band gap</i> optis (eV)
1	0	$5,6587 \pm 0,0004$	1,7090	3,311
2	0,5	$5,7127 \pm 0,0003$	1,7556	3,307
3	1	$5,7294 \pm 0,0003$	1,7675	3,298
4	1,5	$5,8024 \pm 0,0004$	1,9347	3,286
5	2	$5,8382 \pm 0,0002$	2,0057	3,271



Gambar 4. Energi *band gap* optis kaca Er:TZPBN $[55\text{TeO}_2\text{-}35\text{ZnO}\text{-(}5\text{+x)PbO}\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}2\text{-x)Na}_2\text{O-Er}_2\text{O}_3]$

Berdasarkan data tersebut dapat diketahui bahwa PbO sebagai senyawa yang memiliki ion berat dapat meningkatkan nilai densitas. Peningkatan nilai densitas menyebabkan terjadinya pemadatan volume kaca Er:TZPBN. Salah satu faktor yang mempengaruhi nilai indeks bias adalah densitas. Karena penambahan PbO dapat meningkatkan densitas, maka indeks bias kaca Er:TZPBN tersebut juga meningkat. Penambahan konsentrasi PbO juga meningkatkan nilai serapan optis kaca

Er:TZPBN. Namun, penambahan senyawa PbO ini tidak meningkatkan energi *band gap* optis. Energi *band gap* optis menurun seiring dengan penambahan PbO dan pengurangan Na₂O.

Hal ini juga terjadi pada penelitian Eraiah (2010), setiap kenaikan konsentrasi PbO akan menurunkan energi *band gap* optis kaca tellurite. Alasan lain bisa jadi bahwa pada konsentrasi dopan tinggi, perluasan pita energi oleh pengotor dan pembentukan pita konduksi dan pita valensi akan mengakibatkan penurunan E_{opt} seperti pada semikonduktor (Aw dkk, 1991 dalam Eraiah, 2006). Jika penelitian Eraiah (2006) menggunakan variasi konsentrasi samarium, dalam penelitian ini variasi berupa perubahan konsentrasi PbO. PbO memiliki molaritas yang tinggi mengingat Pb²⁺ merupakan *heavy ion*. Penambahan PbO akan meningkatkan konsentrasi dopan sehingga perluasan pita energi oleh pengotor serta pembentukan pita konduksi dan pita valensi. Oleh sebab itu, peningkatan PbO mengakibatkan penurunan nilai energi *band gap* optis kaca tellurite.

Mustafa, dkk (2013) juga menemukan bahwa nilai *band gap* optis untuk proses transisi tidak langsung sebelum iradiasi menurun seiring dengan penambahan PbO dari 0% hingga 0,15% pada kaca dengan komposisi (TeO₂)_y[(PbO)_x(B₂O₃)_{1-x}]_{1-y}. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya gangguan jaringan yang menyebabkan perpanjangan kondisi lokal dalam kesenjangan (*gap*). Mustafa, dkk (2013) pun mengungkapkan bahwa nilai E_{opt} untuk transisi tidak langsung menurun dengan meningkatnya dosis iradiasi yang mengandung PbO ≤ 0,2% karena peningkatan derajat gangguan dari fase amorf.

Rentang energi *band gap* optis dalam penelitian ini masih berada pada jangkauan 3 eV. Hal ini menunjukkan bahwa kaca Er:TZPBN dapat dimanfaatkan sebagai material semikonduktor.

4. KESIMPULAN

Kaca Er:TZPBN [55TeO₂-35ZnO-(5+x)PbO-2Bi₂O₃-(2-x)Na₂O-Er₂O₃] telah difabrikasi dengan metode *melt quenching*. Penambahan PbO dalam komposisi ini mengakibatkan peningkatan densitas, peningkatan nilai indeks bias, dan peningkatan nilai serapan optis pada kaca. Namun, penambahan PbO menurunkan nilai energi *band gap* optis pada kaca Er:TZPBN. Untuk sampel 1 dengan x=0, nilai energi *band gap optis* sebesar 3,311. Untuk sampel 2 dengan x=0,5, nilai energi *band gap optis* sebesar 3,307. Untuk sampel 3 dengan x=1, nilai energi *band gap optis* sebesar 3,298. Untuk sampel 4 dengan x=1,5, nilai energi *band gap optis* sebesar 3,286. Sedangkan untuk sampel 5 dengan x=2, nilai energi *band gap optis* sebesar 3,271. Rentang energi *band gap* optis ini masih berada dalam jangkauan 3 eV yang menunjukkan bahwa kaca Er:TZPBN ini dapat dimanfaatkan sebagai material semikonduktor.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada *Optics and Photonics Research Center (OPR)*, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Sebelas Maret atas fasilitas laboratorium dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Becker, C.P, Olsson, N.A., Simpson, S.R., (1999), *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology*, USA: Academic Press.
- Effendi, M. Dan Bilalodin, (2012), Analisis Sifat Optik Lapisan Tipis TiO₂ doping Nitrogen yang Disiapkan dengan Metode Spin Coating, *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXVI HFI Jateng & DIY*, 14 April 2012, Purworejo.
- El-Deen, L.M.S., Al-Sakhi, M.S., and Elkholy, M.M., (2007), IR and UV Spectral Studies for Rare Earth-Doped Tellurite Glass, *Journal of Alloy and Compounds*, 456 (2008) 333-339.
- El-Mallawany, R., Abdalla, R.D., Ahmed, I.A., (2008), New Tellurite Glasses: Optical Properties, *Science Direct Materials Chemistry and Physics*, 109, 291-296.
- Eraiah, B., (2006), Optical Properties of Samarium Doped Zinc-Tellurite Glasses, *Bull. Mater.Sci.*, Vol.29, No.4, August 2006, pp.375-378, ©Indian Academy of Sciences.
- Eraiah, B., (2010), Optical Properties of Lead Tellurite Glasses Doped with Samarium Trioxide, *Bull. Material Science*, Vol. 33, No.4, p.391-394.
- Jauhariyah, M.N.R., Marzuki, A., and Cari, (2014), The Effect of Reducing Na₂O and Increasing PbO on Optical and Physical Properties of Er:TZPBN Glasses, *Proceeding: International Conference on Research, Implementation and Education of Mathematics and Sciences 2014*, Yogyakarta, 18-20 May 2014, ISBN. 978-979-99314-8-1, pp. P-45 – P-53.

- Lezal, D., Jitka, P., Petr, K., Jana, B., Marcel, P., Jiri, Z., (2001), Heavy Metal Oxide Glasses: preparation and Physical Properties, *Journal of Non-Crystalline Solid*, Elsevier, No. 284: 288-295.
- Massera, J., (2009), *Nucleation and Growth Behavior of Tellurite-Based Glasses Suitable for Mid-Infrared Applications*, Thesis, Clemson University.
- Mustafa, I.S., Kamari, H.M., Yusoff, W.M.D.W., Aziz, S.A., Rahman, A.A., (2013), Structural and Optical Properties of Lead-Boro-Tellurite Glasses Induced by Gamma Ray, *International Journal of Molecular Sciences*, Feb 2013; 14(2):3201-3214.
- Oo, H.M., Mohamed-Kamari, H., Wan-Yusof, W.M.D., (2012), Optical Properties of Bismuth Tellurite Based Glass. *International Journal of Molecular Sciences*, 13, 4623-4631.
- Xu, T., Chen, F., Dai, S., Shen, X., Wang, X., Nie, Q., Liu, C., Xu, K., Heo, J., (2011), Glass Formation and Third Order Optical Nonlinear Properties within $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ Pseudo Ternary System, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 357, 2219-2222.