

## PENENTUAN INDEKS BIAS KACA TBZP TERDEDDAH ION $\text{Nd}^{3+}$ DENGAN METODE SUDUT BREWSTER

A Pramuda<sup>2</sup>✉, A. Marzuki<sup>1</sup>, Cari<sup>1</sup>, Wahyudi<sup>2</sup>, R. Susanto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Fisika, Program Pascasarjana Universitas Sebelas Maret, Indonesia

<sup>2</sup>STKIP PGRI Pontianak, Indonesia

### Info Artikel

*Sejarah Artikel:*  
Diterima Agustus 2013  
Disetujui September 2013  
Dipublikasikan Oktober 2013

*Keywords:*  
refractive index; tellurite glass; brewster angle method; melt quenching technique.

### Abstrak

Kaca *tellurite* merupakan material yang sangat menjanjikan untuk aplikasi laser dan optika non linear. Pengukuran indeks bias merupakan salah satu bagian dari penentuan sifat fisik optik yang penting untuk mengestimasi sifat-sifat laser kaca. Penelitian ini bertujuan menentukan dan menganalisis indeks bias kaca berbasis *tellurite* TBZP Terdedah ion  $\text{Nd}^{3+}$  yang telah berhasil difabrikasi dengan teknik *melt quenching* dengan komposisi  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}38\text{-}x\text{) ZnO-}5\text{PbO-}x\text{Nd}_2\text{O}_3\text{(}\% \text{ mol)}(x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5)$ . Indeks bias kaca diukur dengan metode sudut brewster pada mode *tranverse magnetic* (TM). Pada mode TM dapat ditentukan besar sudut brewster dan nilai reflektansi minimum kaca. Hasil penelitian menunjukkan kaca TBZP terdedah ion  $\text{Nd}^{3+}$  yang telah berhasil dipabrikasi memiliki indeks bias kaca yang tergolong tinggi meningkat dari 1,825 ke 2,081 seiring meningkatnya konsentrasi *modifier*  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  dari 0,5 % mol ke 2,5 % mol. Penambahan kation pada jaringan struktur kaca memberikan pengaruh pada struktur kaca dan mengarah ke perubahan lokal dari distribusi ikatan *Bridging Oxygen* (BO) dan *Non Bridging Oxygen* (NBO). Penambahan konsentrasi  $\text{Nd}^{3+}$  menyebabkan terjadinya peningkatan pada nilai parameter sifat fisik lain seperti massa molar, massa jenis, volume molar, dan *molar refraction*.

### Abstract

*Tellurite glass is a promising material for laser applications and non-linear optics. The measurement of the refractive index is a part of the physical properties determination that is important for estimating the optical properties of glass laser. This research determined and analyzed the refractive index of tellurite-based glass TBZP doped  $\text{Nd}^{3+}$  fabricated by melt quenching technique with composition  $55\text{TeO}_2\text{-}2\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-(}38\text{-}x\text{) ZnO-}5\text{PbO-}x\text{Nd}_2\text{O}_3\text{(mol}\%)(x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5)$ . The refractive index of glass was measured by the brewster angle method on tranverse magnetic mode (TM). On the TM mode it could be determined the brewster angle and minimum reflectance value of the glass. The results showed high refractive index of fabricated glass TBZP doped by  $\text{Nd}^{3+}$  increasing from 1.825 to 2.081 with increasing concentrations of modifier  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  from 0,5 %mol to 2,5 %mol. The addition of cations on the network structure of the glass affected to the glass structure which lead to a local change of the distribution of Bridging Oxygen (BO) and Non Bridging Oxygen (NBO) bond. The addition of  $\text{Nd}^{3+}$  concentration caused an increasing of the value of the parameters of physical properties such as molar mass, density, molar volume, and molar refraction.*

© 2013 Universitas Negeri Semarang

✉ Alamat korespondensi:  
E-mail: adi\_pramuda@yahoo.com

## Pendahuluan

Ilmu pengetahuan dan teknologi terus berkembang terutama di bidang optik dan telekomunikasi. Untuk beberapa waktu satelit tampaknya menjadi cara yang paling elegan untuk menjamin komunikasi yang efisien. Akan tetapi, pada satu atau dua decade kemudian, sistem komunikasi berbasis satelit tidak menunjukkan pertumbuhan dan perkembangan teknologi yang signifikan untuk mendukung komunikasi. Di sisi lain justru transmisi serat optik makin mendunia mengambil alih peran di bidang komunikasi. Jumlah data yang dapat ditangani oleh serat optik melebihi teknologi apapun yang lebih tua yang pernah digunakan sebelumnya. Tanpa adanya serat optik, maka lalu lintas dan kepadatan data melalui internet dan biaya panggilan telepon jarak jauh saat ini tentunya masih akan semahal seperempat abad yang lalu. Perkembangan teknologi serat optik pada kehidupan sehari-hari sebagian besar didorong oleh tantangan aplikasi di bidang telekomunikasi. Banyak pertanyaan yang timbul terkait teori dasar dari pandu gelombang optik, dan banyak peneliti di seluruh dunia bekerja keras untuk mencari jawabannya. Sebagai konsekuensinya teknologi serat optik berkembang lebih dari pada sekadar untuk hantaran komunikasi seperti saat ini. Serat optik juga menjadi berguna dalam akuisisi data. Pada saat yang sama karena bahan serat optik sebagian besar terbuat dari kaca, atau terkadang juga bahan lain, maka muncul berbagai penelitian yang menunjukkan gejala fisis atau sifat nonlinear dari bahan nantinya akan menyebabkan perkembangan teknologi baru yang menarik (Mitschke 2009). Dengan demikian, teknologi kaca dalam serat optik perlu dikaji tidak hanya dari sifat kelistrikannya, tetapi juga sifat optiknya.

Serat optik sebagai pemandu gelombang merupakan salah satu pengembangan optik dalam bidang transmisi informasi. Serat optik dipilih karena mampu membawa arus informasi jarak jauh dalam jumlah besar dengan *loss* rendah, fleksibel, *bandwidth* yang lebar, tidak mudah terbakar, dan tidak mengalirkan arus listrik. Akan tetapi, terdapat kesulitan untuk membuat terminal pada kabel serat, penyambungan serat harus menggunakan ketelitian yang tinggi agar tidak

terjadi pelemahan yang disebabkan oleh ketidakmurnian bahan serat. Untuk mempertahankan intensitas dan pembagian sinyal dapat dilakukan dengan menggunakan *planarwaveguide* (Wilson 2011). Kesulitan lain adalah pada awal perkembangan teknologi komunikasi optik, penguatan sinyal optik dilakukan dengan mengubah sinyal optik ke sinyal elektrik kemudian sinyal elektrik tersebut dikuatkan dan diubah kembali ke sinyal optik, jadi penguatan dilakukan pada kawasan elektrik. Keadaan ini membuat sistem jaringan optik masih kurang efisien, untuk itu suatu devais penguat gelombang optik (*optical amplifier*) yang kompak, murah dan efisien sangat diperlukan (Xu *et al.* 2003). Fungsi penguat optik tersebut untuk menguatkan sinyal optik tanpa diubah ke sinyal elektrik.

Perkembangan *erbium doped amplifier* pada era akhir 1980 tidak dapat dipungkiri membawa kemajuan yang sangat pesat di bidang telekomunikasi. Akan tetapi, ketersediaan dan harga material *erbium* yang relatif lebih mahal dari kandidat *rare earth* lain seperti *neodymium* menjadikan penelitian untuk menggantikan *erbium doped amplifier* (EDFA) sangat menjanjikan. Berbagai penelitian menunjukkan salah satu cara yang dapat dilakukan adalah menggunakan material *neodymium* dengan material kaca sebagai *host* yang lebih baik.

Dari segi bahan kaca sebagai *host* telah dilakukan beberapa penelitian teknologi pembuatan kaca. Kaca *zinc-tellurite* merupakan salah satu sistem kaca yang mempunyai sifat optoelektronik yang khusus dan sangat baik untuk aplikasi modulator laser. Kaca *zinc-tellurite* memiliki suhu transisi kaca yang rendah dan daya transmisi yang tinggi (Sulhadi *et al.* 2004). Kaca *zinc-tellurite* merupakan bahan dasar optis aktif jika didoping dengan ion *lanthanide* (*rare earth*) (Sidebottom 1997). Doping ion *lanthanide* pada kaca *zinc-tellurite* dapat menghasilkan kaca dengan sifat optik dan kimia yang sesuai untuk aplikasi optik serta dapat menaikkan daya emisi karena memerlukan energi *phonon* yang rendah (Marjanovic 2003). Chimalawong *et al.* (2010) menambahkan bahwa kaca yang mengandung unsur tanah jarang (*rare earth*) sangat menarik untuk diteliti karena sifat makroskopiknya seperti ketahanan mekanik yang tinggi, stabil secara

kimiawi, dan ketahanan panas yang baik. Ditambah lagi sifat optis dan magnetisnya yang dapat digunakan secara luas pada penguat optik di komunikasi fiber optik dan sebagai perangkat serta komponen utama pada teknologi laser. Seperti halnya pada material kaca Terdedah erbium, maka aplikasi utama kaca yang mengandung neodimium sebagai penguat optik adalah pada telekomunikasi jarak jauh

Dalam kelompok lantanida, *Neodymium* (Nd) adalah salah satu ion aktif yang tidak hanya dikembangkan untuk aplikasi industri dan penelitian, tetapi juga karena kecenderungan sifat *lasing* yang bervariasi dengan komposisi  $Nd^{3+}$  (Azkargorta *et al.* 2008). Menurut Azkargorta *et al.* (2008) dan Wang *et al.* (2005), pendedahan atau doping pada kaca *tellurite* memiliki banyak keunggulan dibandingkan laser kaca lainnya, misalnya serapan dan emisi tampang lintang (*cross-section*) yang tinggi, dan waktu floresen yang lama. Kaca *tellurite* dengan multi komponen akan berkontribusi dalam menjaga stabilitas kimia dan thermal. Wang *et al.* (2005) menggunakan ion  $Yb^{3+}$ , diperoleh koefisien gain yang tinggi, waktu hidup (*lifetime*) hingga 1,14 ms dan stabilitas termalnya pun juga tinggi. Ruvalcaba *et al.* (2005) meneliti ion  $Nd^{3+}$  yang didedah pada kaca *tellurite*, menunjukkan terjadi emisi luminesen pada level  $^4F_{3/2}$  ke  $^4I_{9/2}$ . Penelitian lain menggunakan ion  $Tm^{3+}$  yang dilakukan oleh Fusari (2010) menunjukkan penambahan ion dedah dapat meningkatkan intensitas. Pendedahan pada kaca telurite dapat menjadi media laser aktif untuk energi tinggi. Ion dedah  $Nd^{3+}$  memiliki transisi yang memungkinkan untuk material laser. Hal ini diperkuat hasil penelitian Marzuki (2007) dengan dedah  $Nd^{3+}$  pada kaca *floroaluminat*, Jiang *et al.* (2008) dengan dedah pada kaca *yttrium aluminium garnet*. Zhang *et al.* (2004) juga menyatakan bahwa dedah  $Nd^{3+}$  pada kaca *tellurite* merupakan material yang menjanjikan untuk laser *planar waveguide* dan amplifier yang bekerja pada panjang gelombang 1,3  $\mu m$ . Dengan demikian, walaupun telah dikembangkan pada beberapa penelitian, kajian lebih lanjut untuk mendapatkan kaca *tellurite* yang didedah  $Nd^{3+}$  dengan *lasic action* optimum masih sangat diperlukan.

Berkaitan dengan komposisi laser atau *lasic action* optimum kaca *tellurite* merupakan material

yang sangat menjanjikan untuk aplikasi laser dan optika non linear dengan karakteristiknya yang memiliki indeks bias yang tinggi dan titik lebur yang rendah (Prakash *et al.* 2010). Pengukuran indeks bias sendiri merupakan salah satu bagian dari penentuan sifat fisik optik yang penting selain reflektansi dan absorptansi. Indeks bias merupakan parameter penting untuk mengestimasi sifat-sifat laser kaca menggunakan teori Judd-Ofelt (Shoundararajan 2009). Indeks bias dapat diestimasi dengan pendekatan polarisabilitas, maupun dikukur langsung secara eksperimental. Salah satu cara mengukur indeks bias kaca *tellurite* adalah dengan menggunakan refraktometer ABBE, akan tetapi tidak dapat dilakukan untuk indeks bias bahan yang tinggi, sehingga diperlukan metode lain untuk mengukur secara tepat indeks bias kaca *tellurite*. Metode pengukuran indeks bias yang cukup tepat dan banyak digunakan adalah dengan menggunakan metode sudut brewster. Dengan demikian, secara khusus kajian ini bertujuan untuk membahas hasil pengukuran Indeks bias dengan sudut brewster. Akibat penambahan konsentrasi  $Nd^{3+}$  pada kaca *tellurite* dan *estimasi molar refraction* menggunakan pendekatan polarisabilitas. Adapun sampel yang digunakan dalam pengukuran indeks bias dengan metode sudut brewster adalah kaca dengan komposisi  $55TeO_2-2Bi_2O_3-(38-x) ZnO-5PbO-xNd_2O_3$  (%mol) ( $x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ ) atau kaca TBZP yang telah berhasil dipabrikasi. Tujuan lain komposisi ini dipilih adalah untuk mengetahui konsistensi dan kestabilan metode dan komposisi.

### Metode Penelitian

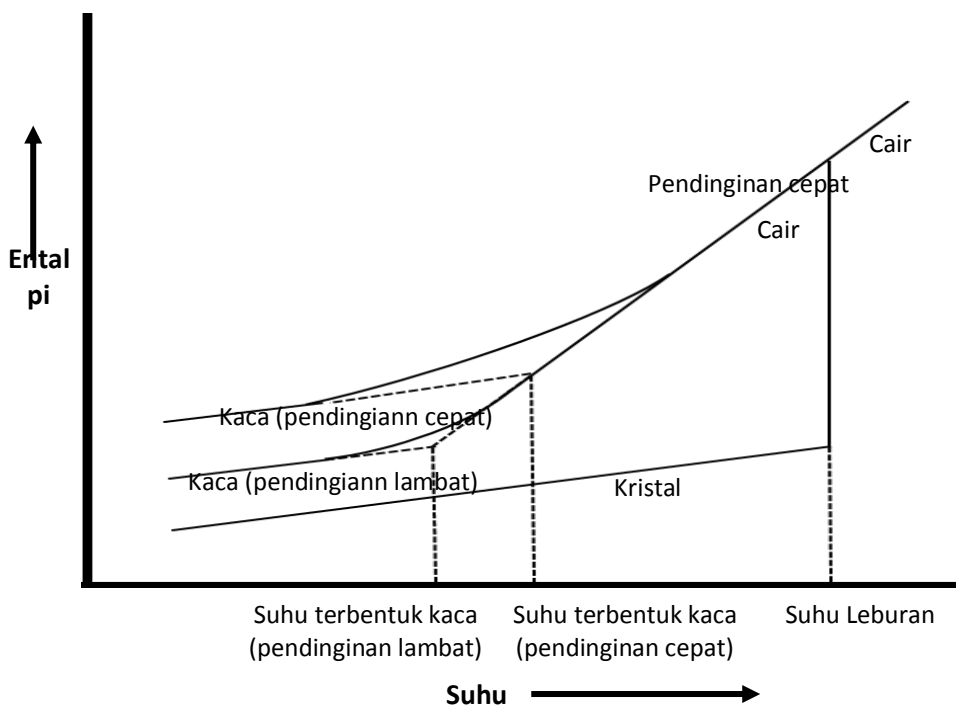
Pembuatan kaca memiliki keunikan tersendiri karena tidak sembarang cara dan komposisi akan menghasilkan kaca. Beberapa penelitian mengenai komposisi kaca *tellurite* telah dilakukan. Sebagai contoh, pada komposisi  $75TeO_2-15ZnO-5Na_2O-5Li_2O$  (Zhang *et al.* 2004);  $(TeO_2)_{1-x}(ZnO)_x$  (Rosmawati *et al.* 2007);  $(90-x)TeO_2-xZnO-10Bi_2O_3$  (Massera 2009);  $75TeO_2-20ZnO-5Na_2O$  (Yamamoto *et al.* 2009). Berdasarkan sifat ikatan ionik pada ikatan kation-anion kaca, ada tiga komponen pembentuk kaca, yaitu *former*, *intermediate*, dan *modifier*. Penggunaan  $Na_2O$  bertujuan untuk menaikkan kelarutan

apabila didedah dengan ion  $Nd^{3+}$  dari  $Nd_2O_3$  (Digonet & Michel 2001) dan stabilitas termal kaca (Shelby 2005), sedangkan Pb dan  $Bi_2O_3$  bertujuan untuk menaikkan viskositas kaca (Suri *et al.* 2006) dan indeks bias kaca *tellurite* (Yousef *et al.* 2007). Keberhasilan eksperimentasi kaca berdasarkan komposisi penyusunnya akan membentuk *glass forming area*.

Sebagian besar kaca dibentuk dengan peleburan, tetapi secara umum teknik fabrikasi kaca dapat diklasifikasikan menjadi tiga metode, yaitu metode CVD (*Chemical Vapour Deposition*), metode *sol gel*, dan metode *melt quenching*. Bahan *tellurite* memiliki laju pendinginan cepat sehingga metode *melt quenching* lebih efektif untuk fabrikasi kaca *tellurite*. Metode ini memiliki fleksibilitas untuk komposisi dan ukuran material yang besar (Shelby 2005). Pada Gambar 1 disajikan ilustrasi

pengaruh suhu terhadap entalpi pada proses terbentuknya kaca dari leburan.

Berdasarkan gambar, pendinginan cepat dimaksudkan agar atom-atom tidak cukup waktu untuk menuju kondisi setimbangnya dan sebaliknya apabila dilakukan pendinginan lambat maka atom-atom akan memiliki cukup waktu untuk mencapai kondisi setimbangnya. Daerah transformasi kaca adalah daerah atau kisaran suhu yang menyebabkan leburan menjadi padatan kaca saat didinginkan. Disebut sebagai daerah atau kisaran karena laju pendinginan sangat mempengaruhi kondisi tercapainya suhu yang membuat leburan menjadi kaca. Laju pendinginan secara lebih lanjut akan mempengaruhi pula sifat makroskopik dari kaca. Sedangkan suhu kaca transisi ( $T_g$ ) adalah suhu yang diperoleh secara eksperimental, saat mencapai suhu ini sifat kaca akan berubah menjadi bersifat leburan.



**Gambar 1.** Pengaruh suhu terhadap entalpi pada proses terbentuknya kaca dari leburan (Shelby 2005)

Berdasarkan ciri khas kaca *tellurite* yang memerlukan pendinginan cepat dalam pabrikan, maka kaca TBZP dipabrikan pula dengan teknik *melt quenching* dengan komposisi  $55TeO_2-2Bi_2O_3-(38-x)ZnO-5PbO-xNd_2O_3$  (%mol) ( $x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ ). Campuran bahan disiapkan sesuai dengan komposisi dan dimasukkan ke dalam *crucible* platinum untuk selanjutnya bahan dilebur

menggunakan *furnace* pada suhu  $950^{\circ}C$  untuk menghilangkan gelembung gas yang terjebak secara sempurna dan kemudian diturunkan ke suhu  $900^{\circ}C$  selama 1 jam sambil diaduk. Sampel kaca dicetak di dalam *preheating mold* yang telah dipanaskan pada suhu  $250^{\circ}C$ . Sampel yang telah tercetak untuk menghilangkan stress dianealing dengan heating time 30 menit dan ditahan selama

6 jam, kemudian didinginkan dengan *colling rate* 2°C/menit ke suhu 100°C dan selanjutnya hingga mencapai suhu kamar. Dasar proses *annealing* adalah dari analisis uji *Differential Thermal Analysis* (DTA) dari sampel kaca TBZ.

**Pengukuran Indeks Bias dengan Metode Sudut Brewster**

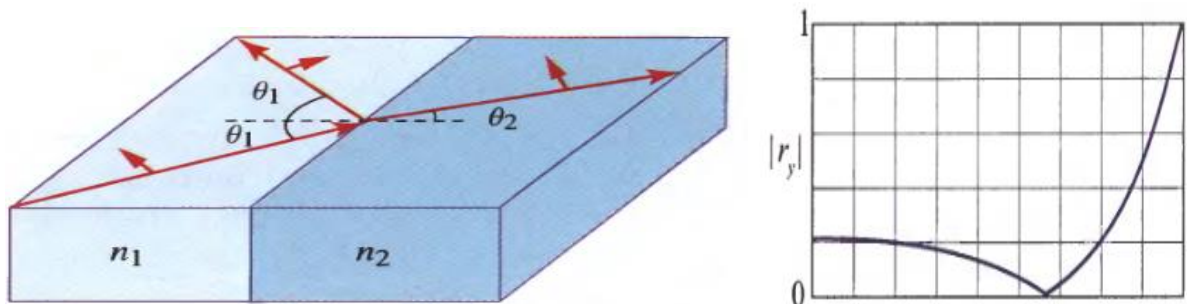
Untuk preparasi pengukuran indeks bias permukaan sampel kaca dihaluskan menggunakan *polishing machine* dengan sand paper 1000, 2400, dan 4000. Indeks bias kaca diukur dengan metode sudut brewster dengan perangkat alat yang terdiri dari goniometer dengan skala terkecil 1/60°, Laser Ne-He Klasse 2 DIN58126 UNIPHASE™λ=632,8nm, Osiloskop Digital Yokogawa DL1520 dan Large-Area Visible Photoreceiver Model 2031 New Focus 90kHz. Untuk mengukur indeks bias menurut El-Mallawany (2002) sebenarnya ada beberapa metode yang dapat digunakan, seperti metode *single-surface methods*, pengukuran dengan

*refractometer Abbe measurements*, pengukuran menggunakan sudut Brewster atau metode prisma yang memungkinkan untuk mendapatkan sudut deviasi minimum.

Pengukuran indeks bias dengan metode sudut Brewster cukup sederhana, mudah, dan cukup teliti, hal ini didasarkan atas beberapa penelitian seperti penelitian Reddy *et al.* (2011), Thomas *et al.* (2011), Pradeesh *et al.* (2008), Lin *et al.* (2007), dan Nazabal *et al.* (2003). Pengukuran reflektansi dilakukan dengan mode *transverse magnetic* (TM). Dari grafik reflektansi mode TM dapat ditentukan besarnya sudut brewster dan indeks bias kaca *tellurite* dapat ditentukan dengan persamaan (1) dan contoh ilustrasi disajikan pada Gambar 2.

$$n = \tan \theta_p \quad (1)$$

$n$  merupakan indeks bias bahan dan sudut polarisasi  $\theta_p$  dalam persamaan (1) disebut sudut Brewster. Sudut brewster dapat diketahui dari nilai reflektansi terkecil (Saleh & Teich 2007).



**Gambar 2.** Contoh magnitudo dan phase dari koefisien refleksi ( $r_y$ ) sebagai fungsi dari sudut datang dari gelombang yang telah terpolarisasi pada mode TM dengan  $n_2/n_1=1,5$  (Saleh & Teich 2007).

Salah satu sifat yang paling penting dari bahan, yang erat kaitannya dengan penerapan bahan tersebut dalam bidang Optik dan Optoelektronik adalah polarisabilitas elektronik, sehingga estimasi yang biasa digunakan untuk mendapatkan tingkat polarisasi dari ion sering disebut sebagai pendekatan polarisabilitas (Moustafa & Elkhateb 2012). Berdasarkan hasil pengukuran indeks bias, perhitungan massa molar, massa jenis, volume molar dapat ditentukan *molar refraction* dari kaca (Chimalawong *et al.* 2010)

Pendekatan polarisabilitas didasarkan Persamaan Lorentz-Lorenz yang digabungkan dengan persamaan Clausius-Mosotti. Persamaan tersebut menunjukkan hubungan antara indeks

bias  $n_0$ , refraksi molar  $R_m$  dan Volum molar  $V_m$ , yang dapat dilihat pada Persamaan (7).

$$R_m = [(n_0^2 - 1) + (n_0^2 + 2)]V_m \quad (2)$$

Refraksi molar (*Molar refraction*)  $R_m$  memiliki dimensi volume/mol ( $\text{cm}^3/\text{mol}$ ).  $V_m$  merupakan molar volume yang nilainya sama dengan  $\frac{M}{\rho}$ . Refraksi molar dapat dijabarkan sebagai fungsi dari polarisabilitas molekul  $\alpha_m$  dalam satuan  $\text{\AA}^3$  (Prakash *et al.* 2010) seperti pada Persamaan (3).

$$R_m = \frac{4}{3} \pi N_A \alpha_m \quad (3)$$

Jika  $N_A$  merupakan bilangan Avogadro, maka Persamaan (3) akan menjadi,

$$R_m = 2,52 \alpha_m \quad (4)$$

Polarisabilitas molekul  $\alpha_m$  merupakan jumlah dari polarisabilitas kation dan anion, untuk oksida  $A_iO_q$  dapat dijabarkan melalui hubungan seperti pada Persamaan (5).

$$\alpha_m = i \alpha_i + q \alpha_0^{-2} \quad (5)$$

dengan  $\alpha_i$  merupakan polarisabilitas kation dan  $\alpha_0^{-2}$  merupakan polarisabilitas anion (oksigen)).

Berdasarkan nilai densitas masing-masing senyawa, maka nilai densitas kaca dapat diperkirakan dengan pendekatan secara teoritis yang diberikan oleh persamaan berikut (Meliegy & Noort 2012):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{V_A + V_B + V_C + \dots} \quad (6)$$

Dimana  $\rho$  adalah densitas,  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  adalah fraksi volume di dalam kaca per unit massa.

## Hasil dan Pembahasan

Setiap material ketika dipanaskan memiliki titik lebur (*melting point*) yang berbeda. Kaca yang dipanaskan sebelum mencapai titik lebur akan mencapai keadaan seperti karet yang disebut dengan *rubbery*. Temperatur saat kaca berubah menjadi keadaan *rubbery* disebut suhu kaca transisi ( $T_g$ ). Besarnya suhu transisi kaca mendekati 2/3 dari suhu titik leburnya (Almeida 2005). Di sisi lain, struktur material yang terbentuk juga tergantung pada proses laju pendinginan. Menurut Shelby (2005) kaca adalah benda padat amorf yang mempunyai range keteraturan atomik yang pendek. Saat kaca didinginkan atau dipanaskan maka menunjukkan adanya gejala kaca transisi. Kaca transisi merupakan peristiwa

perubahan fase suatu material diantara fase liquid dan padat.

Leburan material akan menjadi material padat berupa kristal atau kaca jika leburan tersebut didinginkan. Jika leburan material didinginkan dengan laju pendinginan lambat maka akan terbentuk suatu material dengan struktur atom yang teratur yang bersifat stabil dan mempunyai volume yang relatif kecil dan entalpi yang relatif kecil yaitu kristal. Apabila laju pendinginan dilakukan secara cepat, maka akan terbentuk material dengan struktur atom tidak teratur yang bersifat metastabil serta mempunyai volume dan entalpi yang relatif besar yaitu kaca (Shelby 2005). Dengan demikian, secara konkrit perbedaan kristal dengan kaca adalah kristal merupakan susunan teratur dari serangkaian atom-atom dalam rentang yang cukup panjang, dengan volume yang lebih kecil daripada kaca dan energi yang lebih rendah daripada kaca, tetapi memiliki fase yang stabil ditinjau dari sifat termodinamikanya. Sedangkan kaca memiliki susunan yang kurang teratur, volume dan energi yang lebih besar daripada kristal, namun dapat disusun kembali menjadi lebih rapat jika diberikan energi termal dalam waktu yang cukup, memiliki fase yang metastabil ditinjau dari sifat termodinamikanya.

Komposisi 55TeO<sub>2</sub>-2Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(38-x) ZnO-5PbO-xNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%mol) (x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5) cukup berhasil untuk mendapatkan kaca. Berdasarkan sifat ikatan ionik pada ikatan kation-anion kaca, ada tiga komponen pembentuk kaca, yaitu *former*, *intermediate*, dan *modifier*. Penggunaan Pb dan Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada kaca *zinc tellurite* bertujuan pula untuk menaikkan viskositas kaca dan indeks bias kaca *tellurite*. Detail identitas kaca dan komposisinya disajikan pada Tabel 1.

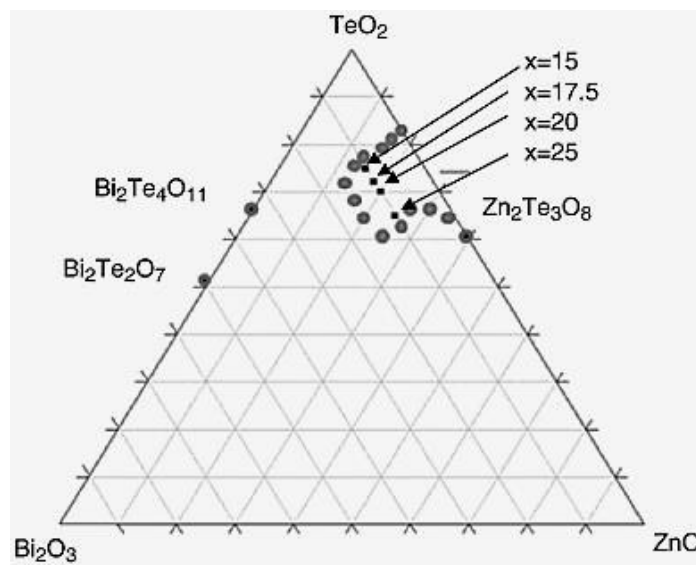
**Tabel 1.** Identitas Kaca Sampel TBZP dan Komposisi Penyusunnya

Identitas kaca Sampel	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%mol)	Komposisi Kaca	Massa (gram)
TBZP Nd 01	0,5	55TeO <sub>2</sub> -2Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(37,5)ZnO-5PbO-0,5Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
TBZP Nd 02	1	55TeO <sub>2</sub> -2Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(37)ZnO-5PbO-1Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
TBZP Nd 03	1,5	55TeO <sub>2</sub> -2Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(36,5)ZnO-5PbO-1,5Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
TBZP Nd 04	2	55TeO <sub>2</sub> -2Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(36)ZnO-5PbO-2Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10
TBZP Nd 05	2,5	55TeO <sub>2</sub> -2Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -(35,5)ZnO-5PbO-2,5Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10

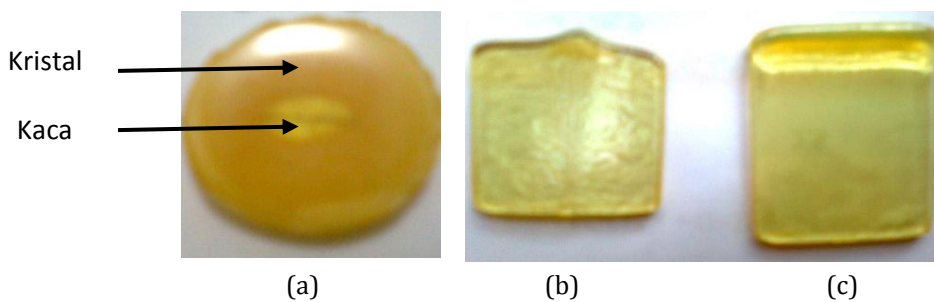
Variasi komposisi dalam pembuatan kaca bukan suatu hal yang linier, maka pada komposisi tertentu saja akan berhasil didapatkan kaca, sedangkan pada komposisi lain akan terbentuk kristal. Gambar 3 menunjukkan titik-titik *glass forming area* kaca  $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$ , yang besar kemungkinan membentuk kaca pada komposisi tersebut.

Ilustrasi hasil pabrikasi sampel untuk memperjelas pengaruh suhu pada proses pabrikasi kaca TBZP disajikan pada Gambar 4, yang menunjukkan pengaruh dari waktu pencetakan

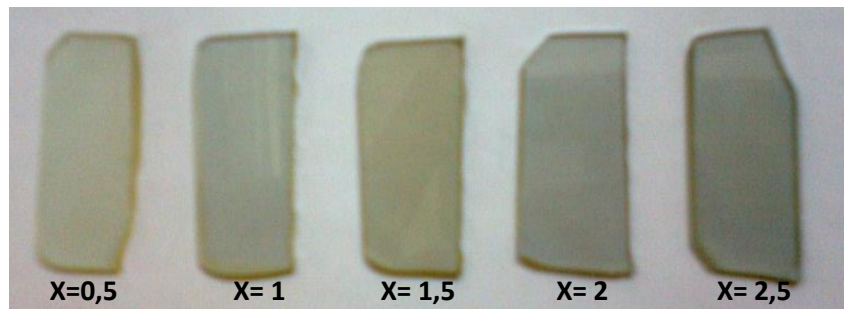
terhadap kualitas kaca *tellurite*. Waktu pencetakan yang tepat pada  *mold* akan menghasilkan tekstur kaca yang halus yang memudahkan untuk proses  *polishing*. Waktu penuangan yang terlalu cepat akan mengakibatkan suhu akhir kaca pada  *mold* masih cukup tinggi dan akibatnya dapat terbentuk kristal. Waktu penuangan yang terlalu lambat akan mengakibatkan suhu akhir kaca pada  *mold* terlalu rendah dan terbentuk tekstur kaca yang permukaannya kasar, bergelombang dan rentan pecah.



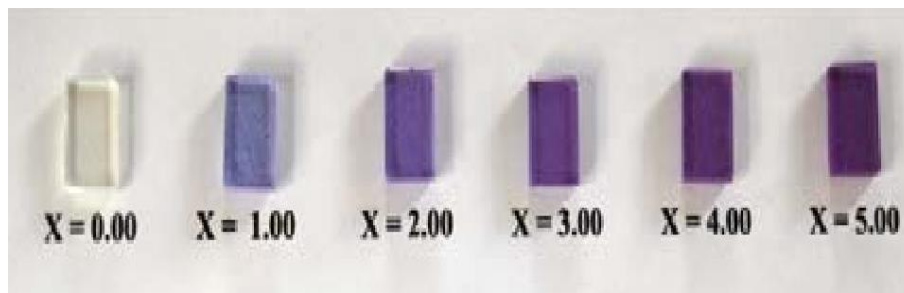
**Gambar 3.** *Glass Forming Area* untuk  $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$  (Massera 2009).



**Gambar 4.** (a) dan (b) Kaca *tellurite* dengan waktu pencetakan kurang cepat. (c) Kaca *tellurite* dengan waktu pencetakan tepat.



**Gambar 5.** Kaca TBZPTerdedah Ion  $Nd^{3+}$  hasil fabrikasi .



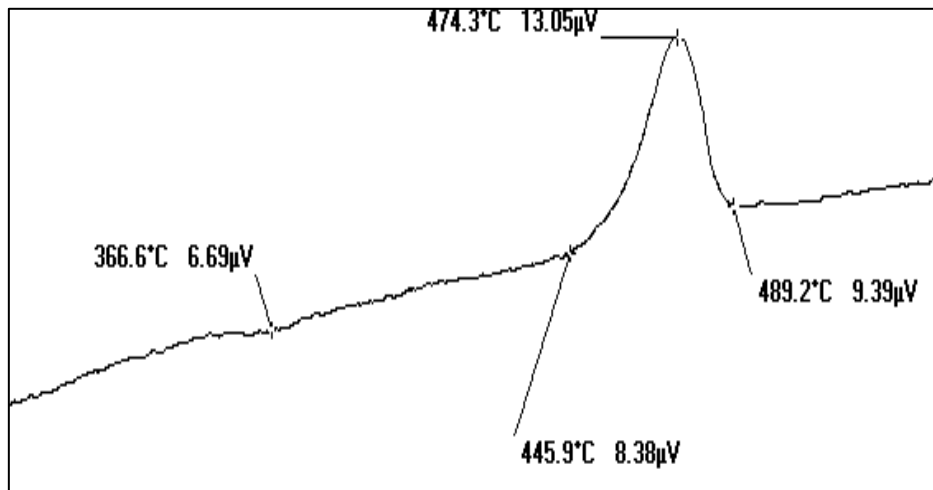
**Gambar 6.** Kaca TBZPTerdedah Ion  $Nd^{3+}$  hasil fabrikasi dengan komposisi  $(65-x) SiO_2-25Na_2O-10CaO-xNd_2O_3$  ( $x = 1-5$  mol%) (Chimalawong 2010)

Gambar 5 menunjukkan kaca  $55TeO_2-2Bi_2O_3-(38-x) ZnO-5PbO-xNd_2O_3$  (%mol) ( $x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ ) yang berhasil dipabrikasi, yang menunjukkan ciri khas kaca yang transparan. Sesuai dengan tujuan penggunaan komposisi, didapatkan hasil bahwa komposisi yang dipilih cukup mengindikasikan konsistensi komposisi dan kestabilan metode yang dipakai. Dari sisi visual warna kaca, perubahan warna kaca sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Chimalawong (2010), terdapat pergeseran ke arah ungu untuk kaca *sodalime sillicate* dengan komposisi  $(65-x) SiO_2-25Na_2O-10CaO-xNd_2O_3$  ( $x = 1-5$  mol%) dan kuning keunguan cerah ke kuning keunguan pekat untuk kaca TBZP Terdedah  $Nd^{3+}$  hasil pabrikan (warna kuning transparan merupakan ciri khas kaca *tellurite*). Adapun *illustrasi* untuk memperjelas visualisasi disajikan pada Gambar 5 dan Gambar 6.

#### **Annealing**

Suhu *annealing* yang digunakan adalah suhu mendekati suhu gelas transisi, yang diketahui dari kurva DTA seperti pada Gambar 3. Suhu gelas transisi adalah suhu saat suatu gelas mengalami transformasi dari padatan yang *rigid* menjadi cairan *supercooled* dan sangat *viscous*. Titik gelas transisi merupakan sifat penting dari kaca karena sifat ini merepresentasikan batas suhu atas ketika suatu kaca dapat digunakan. Kristalisasi muncul pada suhu tertentu di atas suhu transisi kaca dan di bawah titik *melting* atau titik leleh. Pada Gambar 7, suhu kristalisasi ditandai serapan energi atau puncak yang tertinggi, sedangkan suhu gelas transisi ditunjukkan pada titik  $366,6^{\circ}C$ . Dengan demikian, suhu *annealing* adalah suhu yang dekat di bawah  $366,6^{\circ}C$ .





**Gambar 7.** Kurva DTA kaca TBZ

**Tabel 2.** Hasil Pengukuran Indeks bias kaca TBZP Terdedah Nd<sup>3+</sup>

Sampel	Sudut Brewster	Indeks Bias ( $n \pm \Delta n$ )
TBZP Nd 01	61,278	1,825±0,014
TBZP Nd 02	62,667	1,935±0,000
TBZP Nd 03	63,167	1,977±0,002
TBZP Nd 04	64,000	2,050±0,000
TBZP Nd 05	64,333	2,081±0,000

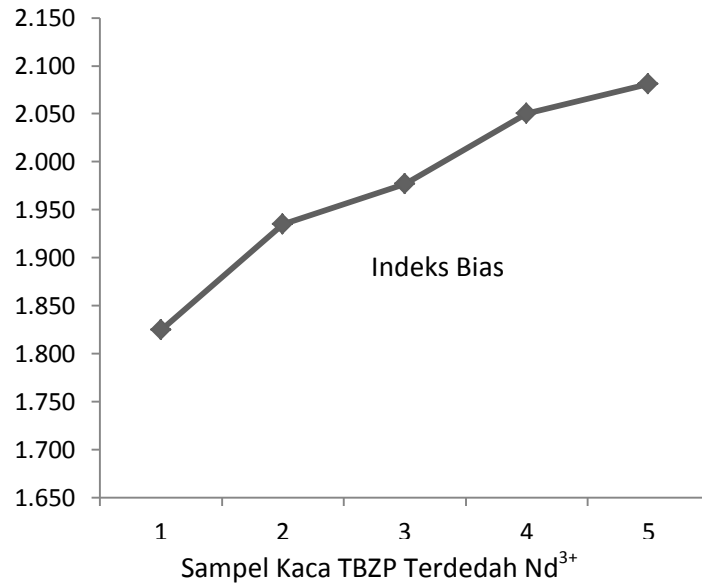
Semakin lebar jarak antara suhu glass transisi dan suhu kristalisasi akan menyebabkan kaca secara teknis mudah untuk dibentuk. Hal ini sangat penting terutama pada *drawing* pabrikasi fiber optik. Penambahan Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> menyebabkan viskositas kaca menjadi lebih tinggi yang memperlebar jarak suhu gelas transisi dan suhu kristalisasi dan kaca akan semakin mudah untuk dipabrikasi. Hasil DTA juga memiliki peranan yang sangat penting pada *planar waveguide* untuk mengetahui suhu kerja pada saat pendifusian menggunakan leburan garam agar pada saat pendifusian leburan garam dapat masuk dalam kaca tanpa merusak kaca.

#### Hasil Pengukuran Indeks Bias dengan Metode Sudut Brewster

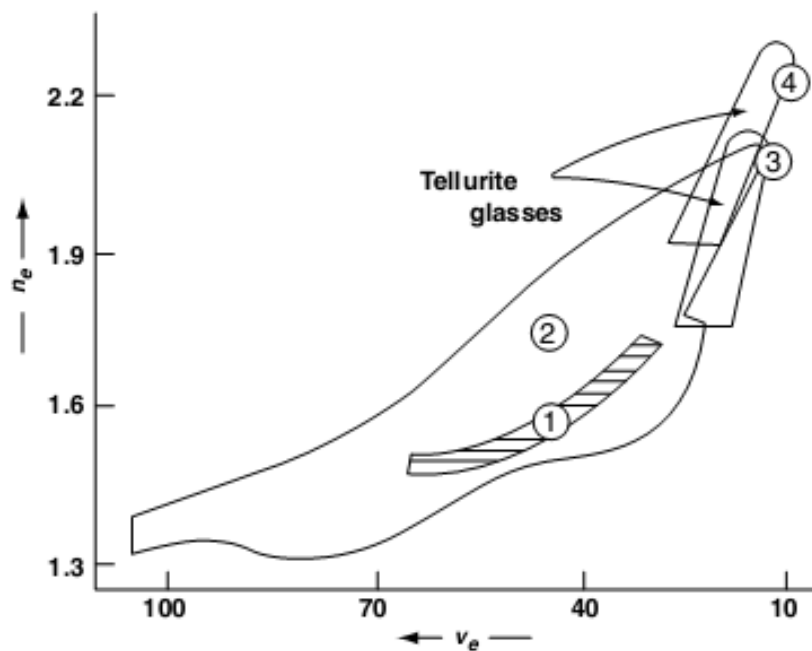
Hasil pengukuran indeks bias dengan mode TM pada 5 buah sampel kaca TBZP disajikan pada Tabel 2.

Hasil pengukuran indeks bias tersebut menunjukkan bahwa kaca yang terbentuk memiliki

range indeks bias pada kisaran 1,825 sampai 2,081 dan termasuk kategori indeks bias tinggi. Hal ini menunjukkan pula bahwa reflektansi akan berharga minimum pada sudut antara *source* laser dengan *detector* berkisar 61,278° sampai 64,333°. Kaca zinc-tellurite TBZP Terdedah Nd<sup>3+</sup> yang dihasilkan memiliki suhu transisi kaca yang rendah dan daya transmisi yang tinggi. Pada Gambar 8 nampak dengan jelas bahwa penambahan ion *rare earth* Nd<sup>3+</sup> pada jaringan struktur kaca menyebabkan meningkatnya indeks bias. Dari kestabilan komposisi kaca 55TeO<sub>2</sub>-2Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(38-x)ZnO-5PbO-xNd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%mol) (x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5) yang telah berhasil dipabrikasi dan berdasar parameter sifat optisnya, yaitu indeks bias, dimungkinkan bahwa kaca zinc-tellurite TBZP Terdedah Nd<sup>3+</sup> merupakan salah satu sistem kaca yang mempunyai sifat optoelektronik yang khusus dan memiliki prospek baik untuk aplikasi modulator laser.



**Gambar 8.** Grafik indeks bias tiap sampel kaca TBZP



**Gambar 9.** Grafik *range* indeks bias kaca *tellurite* dari Burger *et al.* (dalam El-Mallawany 2002)

Dari Gambar 8 nampak bahwa indeks bias meningkat dari 1,825 ke 2,081 seiring meningkatnya konsentrasi *Modifier*  $Nd_2O_3$  dari 0,5 %mol ke 2,5 %mol. Hasil pengukuran indeks bias ini sesuai dengan Grafik *range* indeks bias kaca *tellurite* dalam El-Mallawany (2002) pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11.

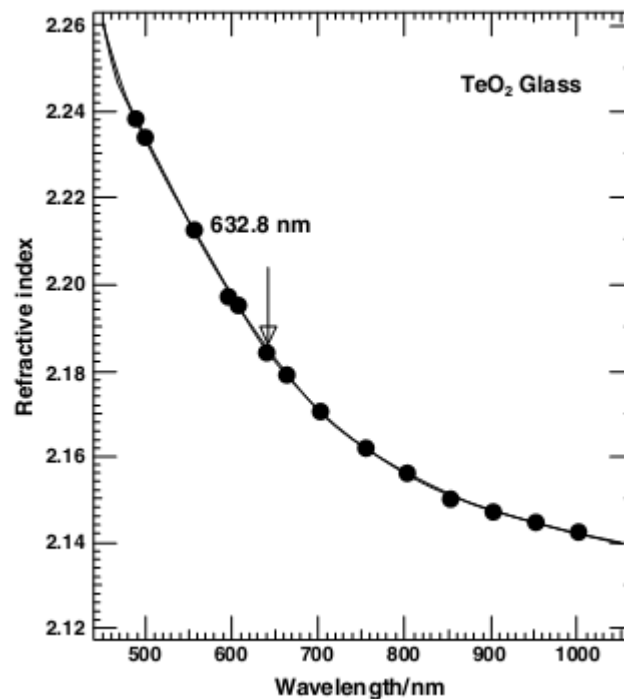
Penambahan kation pada jaringan struktur kaca memberikan pengaruh pada struktur kaca yang mengarah ke perubahan lokal dari distribusi

ikatan *Bridging Oxygen* (BO) dan *Non Bridging Oxygen* (NBO). Penambahan modifier khususnya dengan material yang memiliki kekuatan medan yang lebih besar mengakibatkan penambahan jumlah ikatan NBO pada jaringan struktur kaca yang akan mengakibatkan perubahan ke arah depolimerisasi jaringan kaca secara luas yang tentunya sangat berhubungan dengan modifikasi sifat kimia dan sifat fisis dari material kaca (Chimalawong *et al.* 2010). Peningkatan jumlah

NBO yang menggantikan BO meningkatkan indeks bias. Hal ini disebabkan NBO memiliki kemampuan untuk terpolarisasi lebih besar daripada BO. Konsekuensinya adalah ada hubungan secara langsung yang proporsional antara polarisasi dan indeks bias. Menurut El-Mallawany *et al.* (2008) penambahan ion *rare earth* seperti  $\text{Nd}^{3+}$  sama pengaruhnya seperti dengan penambahan ion logam dalam meningkatkan nilai indeks bias, halnya saja dengan mekanisme yang berbeda. Penambahan ion *rare earth*  $\text{Nd}^{3+}$  pada jaringan

struktur kaca menyebabkan terbentuknya struktur yang lebih rapat. Hal inilah yang merupakan efek langsung pada meningkatnya indeks bias karena ukuran ion  $\text{Nd}^{3+}$  yang cukup besar, yaitu 1,123 Å.

Perbedaan nilai indeks bias antara eksperimen satu dengan yang lain pada metode sudut Brewster dapat dikarenakan karena berbagai hal teknis seperti teknik pembuatan kaca, suhu *annealing*, komposisi sampel bahan, dan terutama panjang gelombang *source* yang digunakan.

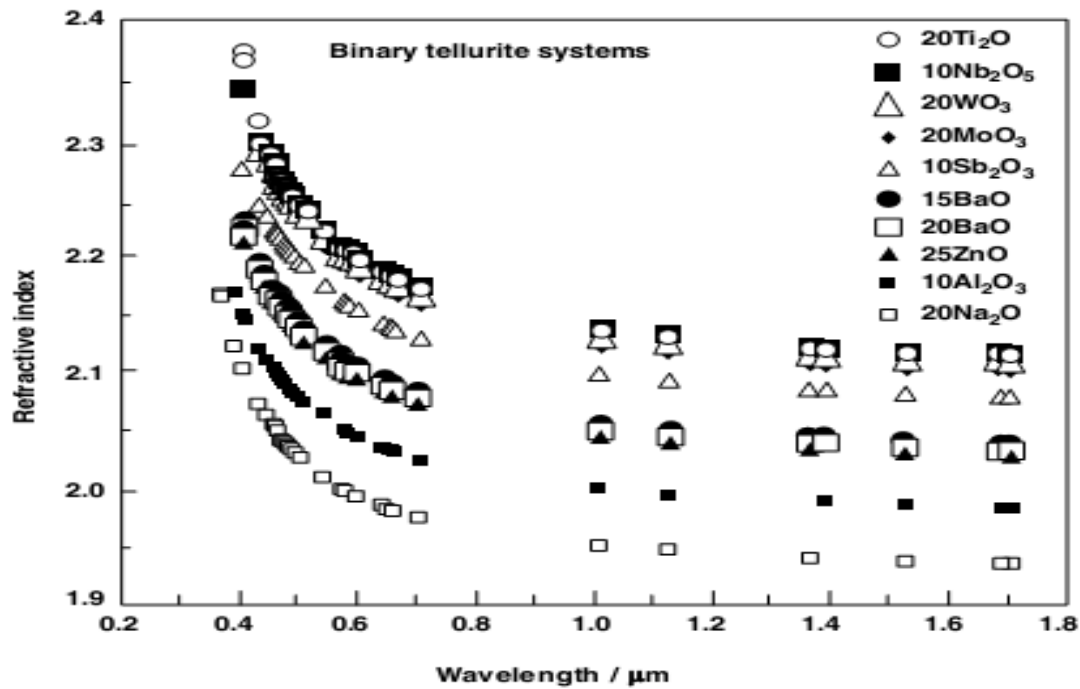


**Gambar 10.** Grafik indeks bias kaca *tellurite* yang diukur sebagai fungsi dari panjang gelombang yang dimulai dari 486,1 sampai 1.000 nm dari Kim *et al.* dalam El-Mallawany (2002)

Gambar 10 menunjukkan indeks bias kaca *tellurite* merupakan fungsi dari panjang gelombang. Apabila digunakan *source* dengan panjang gelombang yang semakin panjang, akan didapatkan hasil pengukuran indeks bias yang semakin kecil, menurun secara gradual sesuai peningkatan besar panjang gelombang *source* yang digunakan, dan berlaku sebaliknya bila digunakan dengan panjang gelombang yang pendek. Grafik indeks bias kaca *tellurite* yang diukur sebagai fungsi dari panjang gelombang pada Gambar 10 pada dasarnya juga dapat didekati dengan persamaan dispersi menurut teori Cauchy pada persamaan (7).

$$n_{\lambda} = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots \quad (7)$$

Dimana  $A$ ,  $B$ , dan  $C$  adalah konstanta. Berdasarkan persamaan tersebut nilai indeks bias menurun seiring peningkatan panjang gelombang (Burtan *et al.* 2011; El-Mallawany *et al.* 2008; El-Mallawany 2002). Bila digunakan laser dengan dua buah panjang gelombang yang berbeda, maka nilai indeks bias dapat didekati sampai suku kedua. Persamaan dispersi menurut teori Cauchy juga dapat ditemukan pada penentuan indeks bias dengan berbagai panjang gelombang pada kaca *binary tellurite systems* yang lain, seperti disajikan pada Gambar 11.



**Gambar 11.** Grafik indeks bias kaca *tellurite* yang diukur sebagai fungsi dari panjang gelombang dari berbagai *binary tellurite systems* dari Takabe *et al.* dalam El-Mallawany (2002)

**Tabel 3.** Hasil perhitungan sifat fisis lain dari tiap komposisi sampel

Sampel	Massa Molar (g/mol)	Massa jenis (g/cm <sup>3</sup> )	Volume Molar (cm <sup>3</sup> /mol)	Molar refraction (cm <sup>3</sup> /mol)
TBZP Nd 01	140,458	6,009	23,376	9,607
TBZP Nd 02	141,734	6,022	23,535	10,585
TBZP Nd 03	143,009	6,035	23,695	11,000
TBZP Nd 04	144,284	6,048	23,855	11,638
TBZP Nd 05	145,559	6,061	24,015	11,954

Gambar 11 merupakan hasil penelitian Takabe *et al.* dari *binary tellurite glasses* dalam El-Mallawany (2002). Ia mengukur indeks bias dari *binary tellurite glasses* pada daerah panjang gelombang dari 0,4 sampai pada 1,71μm dengan menggunakan metode deviasi minimum. *Binary glasses* yang diukur memiliki komposisi (100-x)TeO<sub>2</sub>-xA<sub>n</sub>O<sub>m</sub> dalam mol%, dengan x mol% A<sub>n</sub>O<sub>m</sub> adalah 20 mol% Na<sub>2</sub>O, 10 mol% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 25 mol% ZnO, 20mol% BaO, 15 mol% BaO, 10 mol% Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20 mol% MoO<sub>3</sub>, 20 mol% WO<sub>3</sub>, 10 mol% Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, dan 20 mol% Tl<sub>2</sub>O.

Dari data komposisi dan hasil penentuan indeks bias dengan sudut Brewster, maka dapat dikaji secara lebih lanjut beberapa parameter sifat fisik lain menggunakan pendekatan polarisabilitas yang didasarkan pada persamaan Lorentz-Lorenz yang digabungkan dengan persamaan Clausius-Mosotti. Adapun hasil perhitungan massa molar,

massa jenis, volume molar, dan *molar refraction* pada kaca TBZP selengkapnya disajikan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 nampak bahwa seiring penambahan konsentrasi Nd<sup>3+</sup> terjadi peningkatan pada nilai parameter sifat fisik lain seperti massa molar, massa jenis, volume molar, dan *molar refraction*. Hal ini memperkuat konsep sebelumnya bahwa efek langsung pada meningkatnya indeks bias karena ukuran ion Nd<sup>3+</sup> yang cukup besar, yaitu 1,123 Å. Penambahan ion *rare earth* Nd<sup>3+</sup> pada jaringan struktur kaca menyebabkan terbentuknya struktur yang lebih rapat yang berpengaruh pada polarisabilitas, indeks bias, massa molar, massa jenis, volume molar, dan *molar refraction*.

**Penutup**

Telah berhasil dipabrikasi 5 sampel kaca TBZP yang cukup stabil dengan komposisi 55TeO<sub>2</sub>-

$2\text{Bi}_2\text{O}_3-(38-x)\text{ZnO}-5\text{PbO}-x\text{Nd}_2\text{O}_3$  (%mol) ( $x=0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$ ). Indeks bias kaca TBZP dapat diukur dengan metode sudut brewster. Pada mode *tranverse magnetic* dapat ditentukan besar sudut brewster yang akan menentukan nilai indeks bias kaca TBZP. Dari 5 sampel kaca yang ada menunjukkan bahwa nilai indeks bias kaca TBZP termasuk kategori indeks bias tinggi, meningkat dari 1,825 ke 2,081 seiring meningkatnya konsentrasi *modifier*  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  dari 0,5 %mol ke 2,5 %mol. Seiring penambahan konsentrasi  $\text{Nd}^{3+}$  terjadi peningkatan pada nilai parameter sifat fisik lain seperti massa molar, massa jenis, volume molar, dan *molar refraction*. Untuk kajian lebih lanjut, nilai indeks bias sebagai fungsi  $\lambda$  dapat didekati dengan persamaan dispersi menurut teori Couchy.

#### Daftar Pustaka

- Almeida RM.2005. *Optical and Photonic Glasses*. IMI for New Functionality in Glass Leigh University.
- Azkargorta, Iparraguirre, Balda R & Fernandez J. 2008. On The Origin of biochromatic laser emission in  $\text{Nd}^{3+}$  doped flouride glasses. *J Optics Express*.16(16): 11894-11906.
- Burtan B, Reben M, Cisowskia J, Wasylak J, Nosidlaka N, Jaglarza J & Jarzabek B. 2011. Influence of Rare Earth Ion The Optical *Tellurite* of *Tellurite* Glass. *J Acta Physica Polonica*. 120(4): 579-581.
- Chimalawong P, Kaewkhao J, Kittiauchawal T, Kedkaew C & Limsuwan P. 2010. Optical Properties of the  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-CaO-Nd}_2\text{O}_3$  Glasses. *Am J Applied Sci* 7(4): 584-589.
- Digonet & Michel JF. 2001. *Rare Earth Doped Fibre Lasers and Amplifiers*. New York: Marcel Dekker Inc.
- El-Mallawany RAH. 2002. *Tellurite Glasses Handbook: Physical Properties and Data*. Florida: CRC Press
- El-Mallawany RAH, Dirar AM & Ahmed IA. 2008. New *Tellurite* Glass: Optical Properties. *J. Material Chem and Phys*. 109: 291-296.
- Fusari F. 2010. *Continuous wave and Modelocked femtosecond novel bulk glass lasers operating around 2000 nm*. Thesis. St Andrews: University of St AndrewsScotland.
- Jiang LI, Yong YZ, Song WY, Bin LW, Bai PY, Ping HL & Kun GJ. 2008. Spectroscopic Properties And Judd Ofelt Theory Analysis Of Nd:YAG Transparent Laser Chericamic. *J Inorganic Materials*. 23(3): 429-432.
- Lin H, Wang XY, Li CM, Li XJ, Tanabe S & Yu JY.2007. Spectral Power Distribution and Quantum Yields Of  $\text{Sm}^{3+}$ -Doped Heavy Metal *Tellurite* Glass Under The Pumping Of Blue Lighting Emitting Diode. *J. Spectrochimica Acta Part A* 67: 1417-1420.
- Marjanovie S. 2003. Characterization of New erbium-doped *Tellurite* Glasses and Fiber. *J Non-Cryst Solids* 322: 282-289
- Marzuki A. 2007. *Laser analysis of  $\text{Nd}^{3+}$  ion in fluoroaluminat glasses*. *J Matematika dan Sains*.12 (1): 32-37.
- Massera J. 2009. *Nucleation and Growth Behavior of Tellurite Based Glass Suitable for Mid Infrared Applications*. Thesis. Graduate School Clemson University.
- Meliegy E & Noort RV. 2012. *Glasses And Glass Ceramics For Medical Applications*. London: Springer Science And Business Media.
- Mitschke F. 2009. *Fiber Optics Physics and Technology*.Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Moustafa ES & Elkhateb F. 2012. The Estimation of the Oxide Ion Polarizability for  $\text{B}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O-Mo}$  Glass System. *Am J App Sci*. 9 (3): 446-449.
- Nazabal V, Todoroki S, Inoue S, Matsumoto T, Suehara S, Hondo T, Araki T & Cardinal T. 2003. Spectral Properties of  $\text{Er}^{3+}$  Doped Oxyfluoride *Tellurite* Glasses. *J Non-Crystalline Solids* 326&327: 359-363.
- Pradeesh K, Oton CJ, Agotiya VK, Raghavendra M & Prakash GV.2008. Optical Properties Of  $\text{Er}^{3+}$  Doped Alkali Chlorophosphate Glasses for Optical Amplifiers. *J. Optical Materials* 31: 155-160.
- Prakash GV, Rao DN & Bhatnagar AK. 2010. Linear Optical Properties of Niobium-based *Tellurite* Glasses. *J. Solid State Commun*.119: 39-44.
- Reddy AA, Babu SS, Pradeesh K, Otton CJ & Prakash GV. 2011. Optical Properties Of Highly  $\text{Er}^{3+}$ -Doped Sodium-Aluminium-Phosphate Glassesfor Broadband 1.5  $\mu\text{m}$  Emission. *J Alloys and Compounds* 509: 4047-4052.
- Rosmawati S, Sidek HAA, Zainal AT & Mohd ZH. 2007. Preparation and Physical Studies on Binary Zinc *Tellurite* Glass System. *J Solid State Sci Technol*. 14(2): 95-99.
- Ruvalcaba CC, Zayas ME, Lozada MR, Peres. TM, Dias CG & Stillo SJ. 2005. *Optical And Thermal Analysis Of Nd Doped ZnO-CdO-TeO<sub>2</sub> Glasses*. Maringa: Department of Physics University of Estadual De Maringa Brasil.
- Saleh B & Teich M. 2007. *Fundamental of Photonics2nd Ed*. New Jersey: John Wiley and Son Inc.
- Shelby JE. 2005. *Introduction to Glass Science and Technology*. Cambridge: The Royal Society of Chemistry.
- Sidebottom DL. 1997. Structure and Optical Properties Rare Earth-doped Zinc Oxyhalide *Tellurite* Glasses. *J. Non-Cryst. Solids* 222: 282-289.

- Shoundararajan G. 2009. *Optical Characterization of Rare Earth Doped Glass*. Thesis. Graduate Studies, Department of Electrical and Computer Engineering University of Saskatchewan Saskatoon Canada.
- Sulhadi, Sahar MR & Rohani. 2004. *Kajian Struktur Kaca Zinc-Tellurite*. Prosiding Seminar Nasional Rekayasa Kimia. Universitas Diponegoro Semarang.
- Suri N, Bindra KS, Kumar P, Kamboj MS & Thangaraj R. 2006. Thermal Investigations Ion Bulk Se (80-x) Te<sub>2</sub>OBi<sub>x</sub> Chalcogenide Glass. *J Ovonic Rese.* 2(6): 111-118.
- Thomas RL, Vasuja, Hari M, Nampoori VPN, Radhakrishnan P & Thomas S. 2011. Optical Non-Linearity in ZnO Doped TeO<sub>2</sub> Glasses. *J. Optoelectronics and Advanced Materials.* 13(5): 523-527.
- Wang G, Dai S, Zhang J, Xu S, Hu L & Jiang Z. 2005. Effect Of F- Ion On Physical and Spectroscopic Properties Of Yb<sup>3+</sup> Doped TeO<sub>2</sub> Based Glasses. *J. Luminescence* 113: 27-32.
- Wilson K. 2011. *Recent Development in High-Data Rate Optical Communications at JPL*. California: Jet Propulsion Laboratory. NASA Technical Reports Server.
- Xu S, Yang Z, Dai S, Yang J, Hu L & Jiang Z. 2003. Spectral properties and thermal stability of Er doped oxyfluoride silicate glasses for broadband optical amplifier. *J Alloys Compounds* 361: 313-319.
- Yamamoto Y, Matsumoto S & Shimodaira N. 2009. Mechanism Surface Colouration in Tellurite Glass During Press Forming. *J Glass Sci Technol.* 50 (4): 203-205.
- Yousef E, Houtzel M & Rüssel C. 2007. Effect of ZnO and Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Addition on Linear and Non-linear Optical Properties of Tellurite Glasses. *J Non-Crystalline Solid.* 353: 333-338.
- Zhang J, Dai S, Wang G, Xu S, Zhang L & Hu L. 2004. Spectroscopic Properties Of Neodymium-Doped Tellurite Glass Fiber. *Chinese Optics Letters* 2(9): 546-548