



Preparasi, Sifat Fisis Dan Analisis Termal Medium Gelas Fluorofosfat Didoping Oleh Ion Nd^{3+} Untuk Aplikasi Medium Penguat Laser

Juniastel Rajagukguk*

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, Indonesia

Diterima Agsutus 2016; Disetujui September 2016; Dipublikasikan Nopember 2016

Abstrak

Salah satu medium penguat laser yang sangat populer saat ini adalah berbahan dasar gelas yang disisipkan (*doped*) dengan ion aktif tanah jarang (*rare earth*). Dalam penelitian ini telah berhasil dibuat sebuah medium berbahan dasar gelas fosfat (P_2O_5) untuk diaplikasikan sebagai medium penguat laser. Rumus kimia dari komposisi gelas tersebut adalah $(50-x)\text{P}_2\text{O}_5-8\text{Al}_2\text{O}_3-12\text{Na}_2\text{O}-10\text{KF}-10\text{CaO}-10\text{CaF}_2-x\text{Nd}_2\text{O}_3$ (dengan $x = 0,0; 0,5; 1,0; 1,5$ dan $2,0$). Proses preparasi medium dilakukan dengan metode *melt-quenching* yang dilebur pada suhu 1000°C . Sifat fisis dari medium gelas seperti volume molar, kerapatan, indeks bias, konstanta dielektrik dan sifat lainnya telah diukur dengan menggunakan prinsip Archimedes. Sedangkan analisis termal telah diperoleh dengan menggunakan Thermogravimetry analysis (TGA) untuk mengetahui titik lebur dari sistem gelas. Dari hasil pengukuran diperoleh bahwa medium gelas yang telah dibuat memiliki transparansi yang tinggi, tingkat kekerasan yang baik dan homogen. Hal ini menjadi sebuah langkah awal untuk dapat mengaplikasikan medium gelas Nd:Fosfat sebagai medium penguat laser.

Kata kunci: *fosfat, medium gelas, sifat fisis.*

How to Cite: Juniastel Rajagukguk, (2016), Preparasi, Sifat Fisis Dan Analisis Termal Medium Gelas Fluorofosfat Didoping Oleh Ion Nd^{3+} Untuk Aplikasi Medium Penguat Laser, *Jurnal Einstein Prodi Fisika FMIPA Unimed*, 4 (3) : 46-52.

*Corresponding author:
E-mail : juniastel@unimed.ac.id

p-ISSN : 2338 – 1981
e-ISSN : 2407 – 747x

INTRODUCTION

Pemanfaatan material gelas sebagai medium *host* ion neodimium (Nd^{3+}) pertama kali diperkenalkan oleh Snitzer (Snitzer, 1961). Saat itu radiasi emisi yang terstimulasi dapat dihasilkan oleh 2,0 wt.% ion Nd_2O_3 dengan menggunakan lampu *xenon flash* sebagai sumber *pumping*. Sejak saat itu hingga sekarang, penelitian di bidang material gelas sebagai *host* matriks ion tanah jarang (*rare earth*) khususnya neodimium (Nd^{3+}) terus dilakukan. Kajian dan evaluasi terhadap efek amorf material gelas sebagai *host* dari ion Nd^{3+} sangat diperlukan untuk memperoleh jenis dan komposisi optimum dari material gelas tersebut (Vijaya dkk, 2009). Diantara ion-ion tanah jarang, Nd^{3+} merupakan salah satu ion aktif yang sangat populer dan banyak menarik perhatian peneliti di bidang laser karena berpotensi diaplikasikan dalam berbagai bidang. Beberapa aplikasi yang menjanjikan dari pemanfaatan ion Nd^{3+} yang didoping pada material gelas (Nd :gelas) diantaranya sebagai penguat optik, pandu gelombang, fiber optik dan sistem penyimpan data optik (Serqueira dkk, 2011; Ratnakaram dkk, 2005; Jamalaih dkk, 2012). Pemanfaatan medium Nd :gelas untuk bidang komunikasi optik (Wan dkk, 2010; Jacobs dkk, 1976) juga sangat menjanjikan khususnya pada rentang panjang gelombang *infrared* (IR). Hal ini disebabkan radiasi ion Nd^{3+} sangat efisien pada transisi ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$.

Dalam perkembangan sistem laser dewasa ini, bahan gelas menjadi hal yang sangat menarik untuk dikembangkan sebagai *host* matriks dari ion tanah jarang khususnya in neodimium. Seperti diekathui, sampai dengan saat ini industri laser untuk rentang mendekati infra merah (NIR) masih menggunakan *host* matriks dari bahan kristal padat. Padahal bahan kristal padat memiliki beberapa kelemahan dibanding dengan gelas yakni: proses penumbuhannya yang lama dan rumit, titik lebur yang sangat tinggi yakni mencapai 1500°C (Yuping dkk, 2015) dan

mahal. Sebaliknya medium dari bahan gelas pada umumnya memiliki titik lebur yang lebih rendah, mudah dibentuknya dan murah. Beberapa jenis gelas komersial yang secara intensif diteliti untuk dijadikan sebagai *host matrix* laser diantaranya gelas silika (Pal dkk, 2014), gelas fosfat (Nogata dkk, 2013), gelas borat (Shanmugavelu dkk, 2014) dan gelas *tellurite* (Kumar dkk, 2007). Gelas fosfat secara tepat digunakan sebagai matriks *host* Nd^{3+} karena memiliki sifat fluoresensi, konstanta termal-optik yang rendah dan indeks bias nonlinier yang rendah. Lebih lanjut, gelas fosfat juga memiliki temperatur transisi gelas yang rendah, titik lebur yang rendah dan koefisien ekspansi termal yang tinggi (Seshadari dkk, 2010, Rajagukguk dkk, 2016).

Beberapa peneliti di bidang optik dan laser telah mencoba mensintesis senyawa pembentuk gelas dengan unsur *modifier* lainnya untuk mendapatkan *host* medium penguat laser. Teknik difusi zat padat (Mishra dkk, 2012) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan untuk menyisipkan ion Nd^{3+} ke dalam sistem gelas fosfat. Selain itu, metode *melt-quenching* (Rajagukguk dkk, 2015) juga telah dilakukan untuk memperoleh medium gelas untuk diaplikasikan sebagai penguat laser.

Dalam artikel ini dijelaskan pembuatan medium gelas berbasis pada gelas fosfat yang didoping oleh ion neodimium (Nd^{3+}) untuk diaplikasikan sebagai medium penguat laser. Medium gelas tersebut telah disintesis dengan menggunakan metode *melt-quenching* pada suhu 1000°C . Pengukuran terhadap massa jenis dilakukan untuk mengetahui sifat fisis medium gelas tersebut. Sedangkan analisis termal dilakukan untuk mengetahui titik lebur dari medium tersebut.

METODOLOGI PENELITIAN

Unsur utama pembentuk gelas yang digunakan dalam penelitian ini adalah fosfor pentoksida ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$). Untuk

memperoleh medium yang tidak mudah pecah dan memiliki sifat fluoresensi yang bagus maka unsur fosfat tersebut dicampur dengan beberapa unsur *modifier* dan *fluoride*. Formulasi kimia dari gabungan *host material* dan ion doping adalah (50-x)P₂O₅-8Al₂O₃-12Na₂O-10KF-10CaO-10CaF₂-xNd₂O₃. Dimana x merupakan persentase berat molekul ion Nd³⁺ yang didoping ke dalam sistem gelas yang diawali dengan tanpa pendopingan (x = 0) sampai pada nilai x = 2,0 mol%. Adapun jumlah sampel yang mewakili gelas fosfat ini adalah sebanyak 5 sampel gelas dengan inisial masing-masing adalah PANCaF, PANCaFN1, PANCaFN2, PANCaFN3 dan PANCaFN4 untuk masing-masing nilai x = 0; 0,5; 1,0; 1,5 dan 2,0 mol% seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Variasi terhadap konsentrasi ion Nd³⁺ dalam material gelas berbasis fosfat.

Jenis sampel	Komposisi Gelas
PANCaF	50P ₂ O ₅ -8Al ₂ O ₃ -12Na ₂ O-10KF-10CaO-10CaF ₂
PANCaFN1	49,5P ₂ O ₅ -8Al ₂ O ₃ -12Na ₂ O-10KF-10CaO-10CaF ₂ -0,5Nd ₂ O ₃
PANCaFN2	49P ₂ O ₅ -8Al ₂ O ₃ -12Na ₂ O-10KF-10CaO-10CaF ₂ -1,0Nd ₂ O ₃
PANCaFN3	48,5P ₂ O ₅ -8Al ₂ O ₃ -12Na ₂ O-10KF-10CaO-10CaF ₂ -1,5Nd ₂ O ₃
PANCaFN4	48P ₂ O ₅ -8Al ₂ O ₃ -12Na ₂ O-10KF-10CaO-10CaF ₂ -2,0Nd ₂ O ₃

Setiap komposisi gelas dicampur di dalam wadah alumina dengan massa total adalah 20 gram. Sedangkan massa setiap unsur penyusun medium gelas dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan:

$$M_1 = \frac{x_1(Z_1)(M_T)}{Z_T}$$

Dimana x₁ adalah persentase unsur penyusun medium, Z dan M masing-masing merupakan berat molekul dan massa dari unsur penyusun medium. Setelah diperoleh massa setiap unsur, selanjutnya dimasukkan, dicampur dan diaduk di dalam wadah alumina (*alumina*

crucible) untuk memperoleh komposisi yang merata. Sebelum dilebur, terlebih dahulu wadah alumina dimasukkan ke dalam ruang vakum udara untuk mengurangi uap air yang ada dalam material. Langkah selanjutnya adalah wadah alumina yang berisi serbuk penyusun gelas dimasukkan ke dalam tungku listrik. Suhu tungku listrik diatur suhunya 1000 °C dan dibiarkan selama kurang lebih 3 jam. Setelah seluruh material berbentuk cair, wadah alumina diangkat dan segera dituangkan ke atas cetakan *stainless steel* yang berbentuk segi empat. Untuk menghindari terjadinya penurunan suhu yang sangat drastis, gelas yang telah dicetak dimasukkan ke dalam tungku listrik lainnya dengan mengatur suhu sebesar 500°C, dimana proses disebut sebagai proses *annealing*. Selanjutnya secara perlahan, suhu di dalam tungku listrik diturunkan sampai pada suhu ruang sehingga pada gelas tersebut tidak terjadi retak atau pecah. Untuk mengetahui sifat-sifat fisis dari medium gelas maka dilakukan pengukuran terhadap kerapatan dan volume molar gelas dengan metode Archimedes. Adapun sifat termal dari gelas dapat diketahui melalui analisis thermal oleh Simultaneous Analysis Thermal (STA) 449 F1 Jupiter.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang diperoleh dari perhitungan dengan menggunakan persamaan (1) merupakan massa setiap unsur penyusun medium gelas. Adapun ukuran massa setiap penyusun sistem gelas fosfat tersebut dapat dilihat dalam Tabel 2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa semua komposisi unsur pembentuk dan pemodifikasi medium gelas semakin⁽¹⁾ berkurang massanya dengan ditambahkannya ion Nd³⁺ ke setiap medium gelas.

Tabel 2. Massa setiap komponen penyusun sistem gelas (50-x)P₂O₅-8Al₂O₃-12Na₂O-10KF-10CaO -10CaF₂-xNd₂O₃

Simbol/ komp.	Massa setiap komponen (gr) di dalam setiap sampel (x)				
	PANCaF 0,0Nd ³⁺	PANCaFN1 0,5Nd ³⁺	PANCaFN2 1,0 Nd ³⁺	PANCaFN3 1,5 Nd ³⁺	PANCaFN4 2,0 Nd ³⁺
P ₂ O ₅	13,4174	13,1622	12,9116	12,6655	12,4238
Al ₂ O ₃	1,4061	1,3933	1,3807	1,3683	1,3562
Na ₂ O	1,5421	1,5280	1,5142	1,5007	1,4874
KF	1,0601	1,0505	1,0410	1,0317	1,0225
CaO	1,0983	1,0883	1,0785	1,0688	1,0594
CaF ₂	1,4760	1,4626	1,4494	1,4364	1,4237
Nd ₂ O ₃	0,0000	0,3152	0,6246	0,9286	1,2271
Total	20 gr	20 gr	20 gr	20 gr	20 gr

Adapun sifat fisis dari medium gelas Nd:Fosfat seperti halnya Indeks bias (n), kerapatan (ρ), konsentrasi ion Nd³⁺ dan parameter lainnya dapat dilihat dalam Tabel 3.3. Parameter-parameter tersebut dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan fisika seperti yang telah dilaporkan sebelumnya (Rajagukguk dkk, 2015). Beberapa sifat

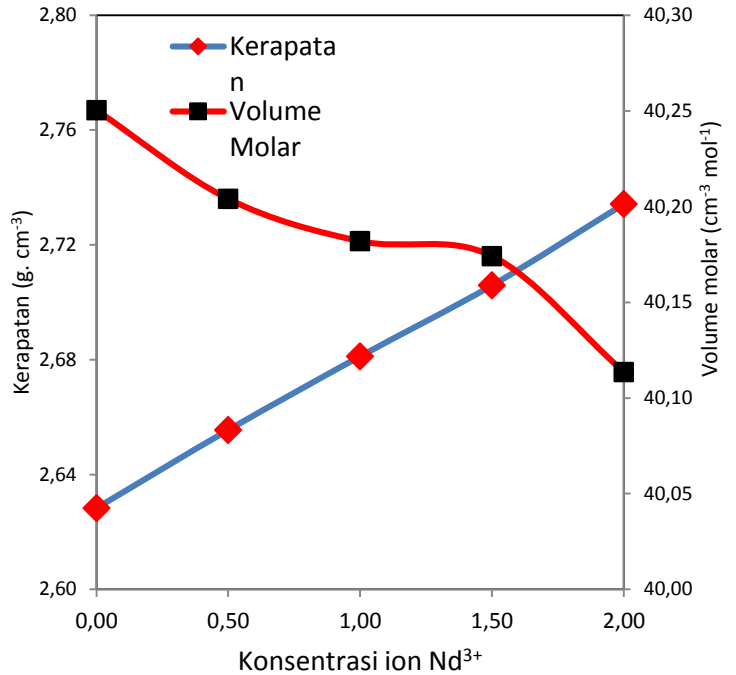
fisis gelas tersebut seperti indeks bias (n), kerapatan (ρ), kekuatan medan (F), konstanta dielektrik (ε), refraktifitas molar (R_m), suseptibilitas (χ) dan polarisabilitas ion oksida (α_m) mengalami peningkatan nilai terhadap pertambahan konsentrasi ion Nd³⁺ di dalam gelas.

Tabel 3. Hasil pengukuran dan perhitungan sifat fisis material gelas (50-x)P₂O₅-12Na₂O-8Al₂O₃-10CaO-10KF-10CaF₂-xNd₂O₃

Parameter	Inisial Gelas Nd:Fosfat				
	PANCAF	PANCaFN1	PANCaFN2	PANCaFN3	PANCaFN4
Massa molar	105,8	106,8	107,7	108,7	109,7
Kerapatan (g/cm ³)	2,628	2,656	2,681	2,706	2,734
Volume molar (cm ³ /mol)	40,25	40,20	40,18	40,17	40,11
Konsentrasi ion Nd ³⁺ (N x 10 ²² /cm ³)	0,000	0,749	1,499	2,249	3,003
Polaron radius (Å)	0,000	2,060	1,634	1,428	1,297
Jarak inter nuklir (Å)	0,000	5,111	4,056	3,543	3,217
Kekuatan medan (F x 10 ¹⁷ cm ²)	0,000	3,400	5,399	7,076	8,581
Indeks bias	1,523	1,526	1,530	1,533	1,534
Konstanta dielektrik (ε)	2,318	2,330	2,342	2,349	2,353
Refraktivitas molar, R _m (cm ³)	12,29	12,34	12,42	12,46	12,47
Suseptibilitas, χ	0,105	0,106	0,107	0,107	0,108
Reflection loss, R(%)	4,291	4,340	4,394	4,423	4,441
Polarisabilitas ion oksida (α _m x 10 ⁻²⁴ cm ³)	0,487	0,490	0,493	0,494	0,495

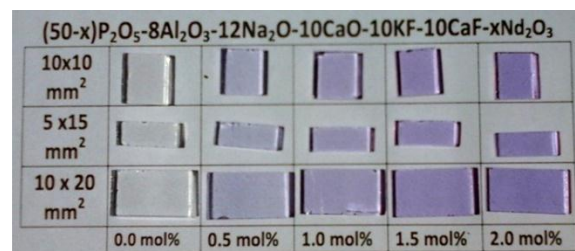
Berbeda dengan volume molar semakin padat dengan semakin (V_M), jari-jari polaron dan jarak inter ditambahkan konsentrasi ion Nd³⁺. Secara nuklir yang semakin menurun terhadap bersamaan, jarak rata-rata antar atomik meningkatnya konsentrasi ion Nd³⁺ di juga semakin menurun dengan dalam gelas fosfat. Penurunan volume berkurangnya komposisi phosphor molar pada gelas Nd:Fosfat ini sehingga menyebabkan jumlah efek NBO mengindikasikan bahwa struktur gelas semakin berkurang. Penurunan volume

molar gelas Nd:Fosfat masih terlihat stabil saat mulai konsentrasi Nd^{3+} 0,5 sampai 1,5 mol%. Namun terjadi penurunan yang signifikan saat konsentrasi ion Nd^{3+} menjadi 2,0 mol%. Berdasarkan data tersebut dapat diperoleh bahwa homogenitas maksimum untuk jenis gelas Nd:Fosfat dihasilkan oleh PANCaFN3 atau saat konsentrasi ion Nd^{3+} sebesar 1,5 mol%. Hubungan volume molar gelas terhadap konsentrasi ion Nd^{3+} juga ditunjukkan pada Gambar 1. Volume molar dari sistem gelas menunjukkan tren penurunan dengan dinaikkannya komposisi Nd_2O_3 . Hal ini mencerminkan terjadinya peningkatan kepadatan struktur gelas dimana dengan semakin meningkatnya konsentrasi ion Nd^{3+} , maka jarak rata-rata antar atomik semakin kecil (J. Rajagukguk dkk, 2016). Dalam gambar 1 juga diperlihatkan hubungan antara kerapatan dengan konsentrasi ion Nd^{3+} . Seperti terlihat dalam gambar, dengan ditambahkan konsentrasi ion Nd_2O_3 ke dalam jaringan sistem gelas P_2O_5 - Na_2O - Al_2O_3 - CaO - KF - CaF_2 maka kerapatan dari medium gelas tersebut semakin meningkat. Kenaikan kerapatan ini disebabkan oleh perubahan kedudukan P_2O_3 oleh ion oksida N_2O_3 di dalam gelas. Seperti diketahui bahwa oksida N_2O_3 memiliki berat molekul lebih besar dibandingkan P_2O_3 sehingga semakin banyak ion Nd^{3+} maka kerapatan gelas juga semakin tinggi.

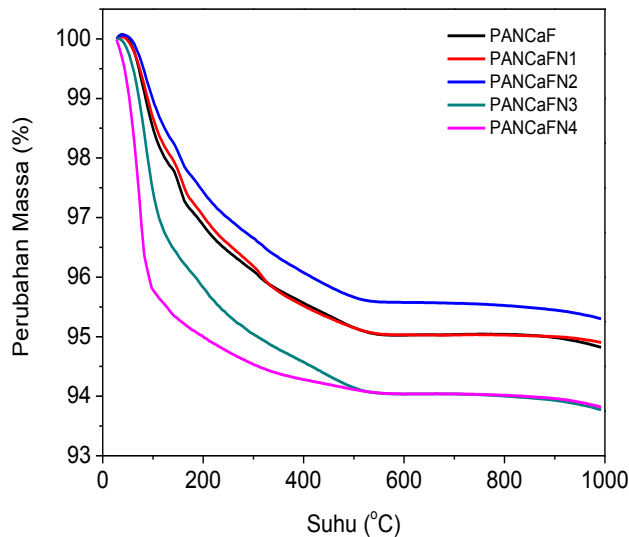


Gambar 1. Grafik Kerapatan dan volume molar material gelas $(50-x)\text{P}_2\text{O}_5-12\text{Na}_2\text{O}-8\text{Al}_2\text{O}_3-10\text{CaO}-10\text{KF}-10\text{CaF}_2-x\text{Nd}_2\text{O}_3$ didoping oleh ion Nd^{3+}

Untuk memperoleh material gelas yang memiliki ukuran bervariasi, lebih halus dan transparan maka perlu dilakukan pemotongan dan penghalusan. Adapun material gelas hasil pemotongan dan penghalusan untuk gelas Nd:Fosfat ditunjukkan pada Gambar 2. Setiap sampel dipotong menjadi tiga ukuran yakni $10 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$, $15 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$ dan $20 \times 10 \times 3 \text{ mm}^3$. Terlihat dari gambar bahwa gelas tersebut berwarna ungu sesuai dengan karakteristik warna ion neodimium. Selain itu diperoleh juga tampilan warna ungu yang semakin pekat untuk konsentrasi dopingan ion Nd^{3+} yang makin tinggi.



Gambar 2. Medium gelas Nd:Fosfat yang telah dipotong dan dihaluskan



Gambar 3. Analisis Thermogravimetry (TG) dari bubuk medium gelas P_2O_5 - Na_2O - Al_2O_3 - CaO - KF - CaF_2 didoping oleh ion Nd^{3+} .

Gambar 3 menunjukkan hasil dari analisis thermogravimetry (Thermogravimetry -TGA) dari sistem gelas fosfat yang didoping oleh ion Nd^{3+} . Sebelum dianalisis, terlebih dahulu medium gelas diubah kedalam bentuk serbuk dengan menggunakan peralatan ball mill. Kemudian STA 449 dipanaskan dari suhu $35^\circ C$ sampai dengan $1000^\circ C$ dengan laju kenaikan suhu sebesar $20^\circ C$ /menit. Kurva TGA untuk semua sampel dikarakterisasi melalui pengaruh endotermik lemah pada rentang suhu 200 - $400^\circ C$ dan dihubungkan pada fenomena transisi gelas (T_g). Persentasi kehilangan massa pada rentang suhu 600 – $1000^\circ C$ yang ditunjukkan oleh kurva TGA menandakan bahwa titik lebur material ini mendekati suhu $1000^\circ C$. Hal ini ditunjukkan dari semakin kecilnya perubahan massa sampel pada saat suhu mendekati $1000^\circ C$.

KESIMPULAN

Medium gelas berbasis fosfat yang didoping oleh ion Nd^{3+} telah berhasil dibuat dengan metode melt-quenching pada suhu $1000^\circ C$. Dari hasil peleburan diperoleh gelas yang memiliki tingkat kekerasan yang baik dan transparansi

yang tinggi. Campuran dari semua unsur penyusun gelas juga terlihat homogen. Hal ini diketahui dari tidak adanya bintik atau cacat struktur di dalam gelas. Berdasarkan pengukuran terhadap kerapatan diperoleh hasil yang semakin meningkat dengan ditambahkannya konsentrasi ion Nd^{3+} ke dalam komposisi gelas. Hal ini disebabkan oleh perubahan kedudukan P_2O_3 oleh ion oksida N_2O_3 di dalam gelas. Seperti diketahui bahwa oksida N_2O_3 memiliki berat molekul lebih besar dibandingkan P_2O_3 sehingga semakin banyak ion Nd^{3+} maka kerapatan gelas juga semakin tinggi. Kerapatan medium ini juga mempengaruhi indeks bias gelas yang juga semakin tinggi dengan ditambahkannya konsentrasi ion Nd^{3+} . Dari hasil analisis termal diperoleh bahwa titik lebur susunan gelas Nd:Fosfat ini adalah mendekati suhu $1000^\circ C$.

DAFTAR PUSTAKA

- J. Rajagukguk, M. Djamal, R. Hidayat, Suprijadi and J. Kaewkhao. "Structural and Optical Characteristics of Eu^{3+} ions in Sodium Borate Glass System". *Journal of Molecular Structure* 1121 (2016) 180-187.
- Jacobs, R.R., dan Weber, M.J. (1976): Dependence of the ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ induced-emission cross section for Nd^{3+} on glass composition, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **12**(2), 102-109.
- Jamalaiah, B. C., Suhasini, T., Rama Moorthy, L., Kim, I.G., Yoo, D.S., dan Jang, K. (2012): Structural and luminescence properties of Nd^{3+} -doped PbO - B_2O_3 - TiO_2 - AlF_3 glass for $1.07\mu m$ laser applications, *Journal of Luminescence*, **132**, 1144-1149.
- Kumar, K.U., Prathyusha, V.A., Babu, P., Jayasankar, C.K., Joshi, A.S., Speghini, A, dan Bettinelli, M. (2007): Fluorescence properties of Nd^{3+} -doped tellurite glasses, *Spectrochimica Acta. Part A*,

- Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **67(3-4)**, 702–708.
- Mishra, G. C., Upadhyay, A. K., Kher, R. S., & Dhoble, S. J. (2012). Synthesis and luminescence properties of rare earth doped, 898–901. <https://doi.org/10.1007/s10853-011-5870-4>
- Nogata, K., Suzuki, T., dan Ohishi, Y. (2013): Quantum efficiency of Nd³⁺-doped phosphate glass under simulated sunlight, *Optical Materials*, **35(11)**, 1918–1921.
- Pal, I., Agarwal, A., Sanghi, S., Aggarwal, M.P., dan Bhardwaj, S. (2014): Fluorescence and radiative properties of Nd³⁺ ions doped zinc bismuth silicate glasses, *Journal of Alloys and Compounds*, **587**, 332–338.
- Rajagukguk, J., Djamal, M., Hidayat, R., Suprijadi, S., Amminudin, A., Ruangtawee, Y., & Kaewkhao, J. (2016). Optical Properties of Nd³⁺ Doped Phosphate Glasses at 4F_{3/2}-> 4I_{11/2} Hypersensitive Transitions. *The Journal of Pure and Applied Chemistry Research*, **5(3)**.
- Rajagukguk, J., Simamora, P., Aminudin, A., Djamal, M., Suprijadi, Hidayat, R. (2015): Preparasi dan Karakterisasi Sifat Fisis Ion Nd³⁺ Didoping pada Gelas Na₂O-PbO-ZnO-Li₂O-B₂O₃. Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya, **16**, (3).
- Ratnakaram, Y.C., Vijaya, K.A., Tirupathi Naidu, D., dan Chakradhar, R.P.S. (2005): Absorption and emission properties of Nd³⁺ in lithium cesium mixed alkali borate glasses. *Solid State Communications*, **136**, 45–50.
- Serqueira, E.O., Dantas, N.O., Anjos, V., Pereira-da-Silva, M.A., dan Bell, M.J.V. (2011): Optical spectroscopy of Nd³⁺ ions in a nanostructured glass matrix, *Journal of Luminescence*, **131**, 1401–1406.
- Seshadri, M., Rao, K.V., Rao, J.L., Rao, K.K., dan Ratnakaram, Y.C. (2010): Spectroscopic investigations and luminescence spectra of Nd³⁺ and Dy³⁺ doped different phosphate glasses, *Journal of Luminescence*, **130(4)**, 536–543.
- Shanmugavelu, B., Venkatramu, V., dan Kumar, V. R. K. (2014): Optical properties of Nd³⁺ doped bismuth zinc borate glasses, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, **122**, 422–427.
- Snitzer, E. (1961): Optical maser action of Nd³⁺ in a barium crown glass, *Physical Review Letter*, **7**, 444–446.
- Tai, Y., Zheng, G., Wang, H., & Bai, J. (2015). Near-infrared quantum cutting of Ce³⁺-Nd³⁺ co-doped Y₃Al₅O₁₂ crystal for crystalline silicon solar cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **303–304**, 80–85. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2015.02.009>
- Vijaya, R., Venkatramu, V., Babu, P., Moorthy, L.R., dan Jayasankar, C.K. (2009): 1.06μm laser transition characteristics of Nd³⁺-doped fluorophosphate glasses. *Materials Chemistry and Physics*, **117(1)**, 131–137.
- Wan, J., Cheng, L., Sun, J., Zhong, H., Li, X., Lu, W., Tian, Y., Wang, B., dan Chen, B. (2010): Composition-dependent spectroscopic properties of Nd³⁺-doped tellurite-germanate glasses. *Physica B: Condensed Matter*, **405(8)**, 1958–1963. Research Institute (JAERI), Japan.