



## Uji X-ray Fluorescence pada Limbah Kaca Bening untuk Analisis Silika dan Oksida terkait

Bunga Salmadani Indira, Universitas Negeri Padang, Indonesia

Miftahul Khair\*, Universitas Negeri Padang, Indonesia

### ABSTRACT

Indonesia produces abundant glass waste of up to 0.7 million tonnes per year. Glass is a reusable source of silica for the synthesis of advanced functional materials. This study aims to identify the oxide content in a clear glass waste through qualitative and quantitative analysis with X-ray Fluorescence (XRF). This clear glass waste contains 73.197% silica by mass. Furthermore, the CaO content is quite high, namely 20.269%. This CaO can act as a negative charge neutralizer, network structure modifier, and plays a role in lowering the melting point of glass. Cations with higher valence and lower coordination numbers were also found, namely 1.4515% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0.077% ZrO<sub>2</sub>, 0.08% TiO<sub>2</sub>, and 0.003% ZnO. These cations can act as covalent network shapers and modifiers in the studied silica glass. .

### ARTICLE HISTORY

Submitted : 02/06/2023  
Revised : 06/06/2023  
Accepted : 09/06/2023

### KEYWORDS

Silica, clear glass waste, XRF

### CORRESPONDENCE AUTHOR

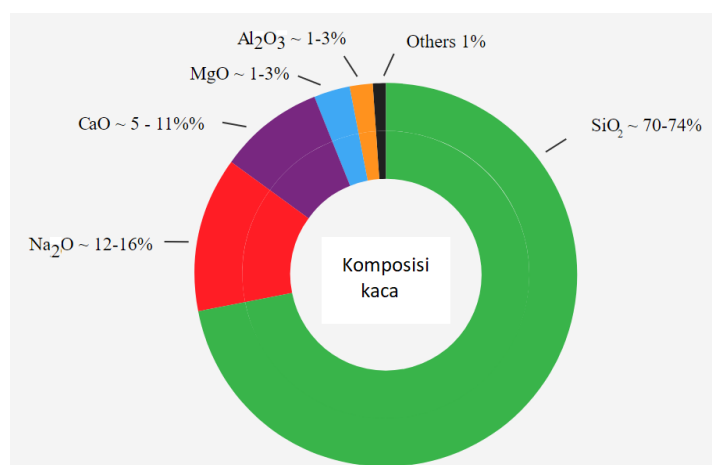
✉ [miftah@fmipa.unp.ac.id](mailto:miftah@fmipa.unp.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.30743/cheds.v7i1.7119>

## 1. PENDAHULUAN

### 1.1 Kimia Kaca

Limbah kaca adalah limbah anorganik yang dibuang dalam jumlah besar hingga mencapai 0,7 juta ton per tahun di Indonesia (Suhartini *et al.*, 2014). Kaca sendiri adalah material nonkristalin. Pendinginan kaca cair menghasilkan cairan yang semakin kental hingga akhirnya menjadi kental tak terhingga pada titik pematatannya tanpa berubah menjadi struktur kristal yang teratur. Sebagian besar kaca komersial adalah kaca oksida dengan komposisi kimia yang serupa (gambar 1). Kaca dibuat dengan menggabungkan beberapa mineral seperti silika (SiO<sub>2</sub>), soda (Na<sub>2</sub>O) dan kapur (CaO).

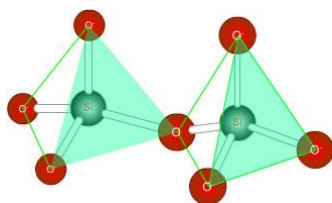


Gambar 1. Kandungan Kimia Kaca (Solar Glass & Mirrors, 2016)

Untuk mendeskripsikan struktur kaca diusulkan beberapa model, diantaranya model jaringan acak, model kristalit, serta model struktur lainnya. Model jaringan acak awalnya didasarkan pada gagasan Zachariasen dan menjadi model yang paling umum digunakan untuk menjelaskan struktur kaca (Hasanuzzaman *et al.*, 2016). Kaca silika terdiri dari tetrahedron-tetrahedron SiO<sub>4</sub> yang terhubung pada atom O (gambar 2). Ikatan kimianya sangat kuat, dimana setiap

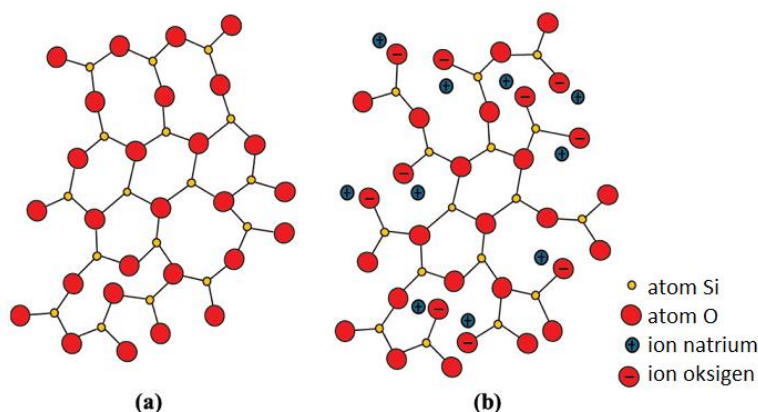


atom Si terhubung ke empat atom O dan setiap atom O berikatan dengan dua atom Si membentuk struktur jaringan tiga dimensi.



Gambar 2. Ikatan Si–O–Si

Ikatan kovalen bertanggung jawab untuk pembentukan struktur jaringan dalam silika kristalin ( $\text{SiO}_2$ ) dan silika amorf pada kaca (Gambar 3a). Silikat alkali membentuk kaca dengan mudah dan ketika alkali oksida seperti  $\text{Na}_2\text{O}$  ditambahkan ke kaca silika, ion  $\text{Na}^+$  menjadi bagian dari struktur dan menempati posisi acak yang didistribusikan ke seluruh struktur agar muatan tetap netral (Gambar 3b).



Gambar 3. Skema struktur kaca dua dimensi: (a)  $\text{SiO}_2$  amorf jaringan; (b)  $\text{SiO}_2$  jaringan dimodifikasi melalui penambahan  $\text{Na}_2\text{O}$

Hampir semua kaca adalah kaca silikat yang didasarkan pada jaringan tiga dimensi  $\text{SiO}_2$  (Verry Andre Fabiani, 2018). Kaca kuarsa dibuat hanya dengan memanaskan  $\text{SiO}_2$  murni di atas  $2000^\circ\text{C}$  dan kemudian menuangkan cairan kental ke dalam cetakan. Namun, titik leleh yang tinggi menghalangi penggunaan kaca kuarsa untuk membuat peralatan kaca sehari-hari.

Kaca komersial dapat diklasifikasikan ke dalam 3 kelompok sesuai dengan tujuan penggunaan atau komposisi kimianya (tabel 1). Sekitar 90 persen kaca yang digunakan saat ini adalah kaca soda-kapur (soda lime glass). Jenis ini memiliki titik leleh yang rendah, sehingga sangat mudah untuk mencetaknya ke dalam wadah cetakan seperti untuk keperluan cangkir minuman. Di laboratorium kimia terdapat kaca yang tidak akan retak akibat tekanan panas saat dipanaskan, yaitu kaca borosilikat. Kaca timbal memiliki indeks bias yang tinggi; sehingga permukaan kaca yang terpotong akan berkilau seperti batu permata.

**Tabel. 1 Kandungan Kimia dari kaca yang umum dijumpai**

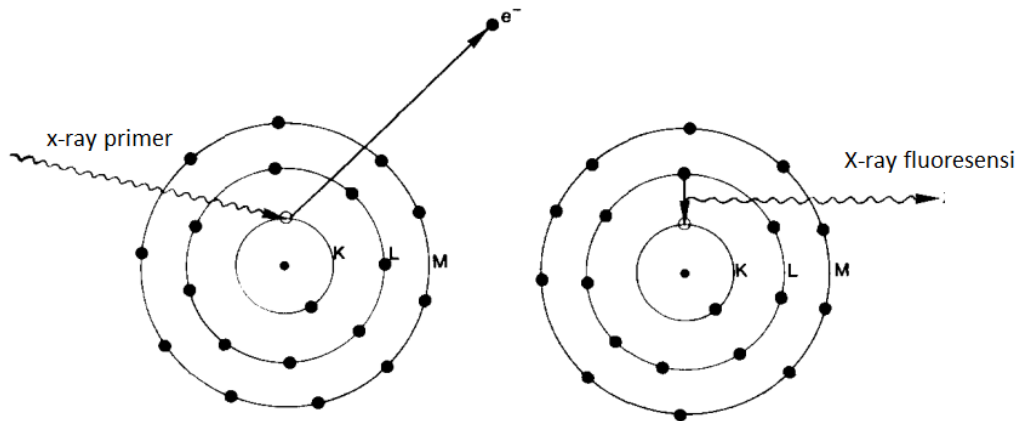
Komposisi oksida	Soda Kapur (%)	Borosilikat (%)	Kaca timbal (%)
$\text{SiO}_2$	73	81	60
CaO	11	-	-
PbO	-	-	24
$\text{Na}_2\text{O}$	13	5	1
$\text{K}_2\text{O}$	1	-	15
$\text{B}_2\text{O}_3$	-	11	-
Lain-lain	2	3	>1

Silika memiliki potensi pemanfaatan dalam berbagai aplikasi, antara lain bahan baku industri kaca, panel surya, silika gel, bahan semikonduktor, dan bahan keramik (Ni'mah et al., 2022) (Munasir, 2012).

## 1.2 X-Ray Fluorescence

Spektrometri fluoresensi sinar-X (XRF) adalah teknik yang banyak digunakan untuk penentuan unsur-unsur utama serta sejumlah besar unsur kelumit. XRF adalah salah satu dari metode analitik di mana pengukuran biasanya dilakukan pada sampel padat (sebagai pelet bubuk), sehingga menghindari tahap pelarutan yang merupakan prasyarat untuk sebagian besar teknik spektroskopi atom lainnya dengan sensitivitas yang sebanding, misalnya AAS. Selain itu, XRF juga dikenal dalam pengukuran analitik presisi tinggi, setelah teknik spektrometri massa. XRF menjadi teknik yang disukai untuk menentukan unsur utama dalam batuan seperti Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe (Ni'mah et al., 2022) (Potts & Webb, 1992).

Ketika sampel tereksitasi oleh sinar primer sinar-X, interaksi foton sinar-X dengan atom menyebabkan ionisasi elektron orbital kulit bagian dalam oleh apa yang disebut efek foto-listrik (Gbr. 4).



Gambar 4. Ionisasi fotolistrik dari elektron kulit bagian dalam yang menyebabkan fluoresensi sinar-X (garis-K)

Dalam keadaan tereksitasi ini, atom tidak stabil dan seketika menuju ke konfigurasi elektron yang lebih stabil melalui perpindahan elektron dari kulit terluar untuk mengisi kekosongan yang disebabkan oleh ionisasi. Energi dilepaskan ketika elektron ini turun ke arah inti atom yang dipancarkan sebagai foton sinar-X "fluoresensi" sekunder yang memiliki energi diskrit yang sesuai dengan perbedaan energi antara dua tingkat energi orbital yang terlibat dalam perpindahan elektron. Untuk keperluan pengukuran analitis, intensitas radiasi fluoresensi karakteristik ini diukur, karena sinyal ini sebanding dengan konsentrasi atom dari masing-masing unsur. Karena emisi sinar-X melibatkan elektron kulit dalam, XRF biasanya tidak sensitif terhadap keadaan oksidasi unsur (Jenkins, 2008)

Sinar-X yang dihasilkan adalah kombinasi dari spektrum kontinu dan spektrum tidak kontinu yang berasal dari bahan sasaran yang dihantam oleh elektron. Jenis spektrum diskrit yang dihasilkan ditentukan oleh jenis perpindahan elektron dalam atom bahan. Spektrum sinar-X karakteristik disematkan untuk spektrum ini. Sebagaimana XRD, XRF juga mempergunakan sinar-X yang dihasilkan yang selanjutnya ditangkap detektor untuk keperluan analisis kandungan kimia dalam suatu material. Analisis X-ray Fluorescence (XRF) terbukti sukses untuk menganalisis kandungan bahan alam. Material yang dianalisis dapat berupa padatan (bubuk atau pelet). (Silvia & Zainuri, 2020).

Sintesis dan karakterisasi material merupakan kajian penelitian yang sangat menarik. Diantara material mineral oksida yang telah banyak dikembangkan saat ini adalah silika  $\text{SiO}_2$  dan oksida lain seperti  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  dan lain-lain.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi dan menentukan kadar unsur atau oksida yang terkandung didalam limbah kaca bening, terutama silika karena manfaat aplikasi fungsionalnya. Konstituen oksida-oksida dominan lain yang terkait dengan sifat dan pembentukan kaca juga perlu ditentukan. Metode yang efisien dan cepat untuk keperluan ini adalah uji X-Ray Fluorescence (XRF).

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini adalah penelitian eksperimental, yang dilaksanakan pada Januari-Juni 2023 di laboratorium Kimia Universitas Negeri Padang. Bahan yang digunakan sebagai sampel adalah limbah pecahan gelas minum kaca bening merek Royalex. Pecahan gelas kaca dibersihkan dari sisa-sisa kotoran dengan air dan sabun untuk menghilangkan impuriti organik dan anorganik. Sampel juga diradiasi dengan ultrasonic cleaner untuk menghilangkan kotoran yang mungkin masih tersisa, lalu dibilas, dan dikeringkan. Sampel kering dan bersih lalu didestruksi hingga halus dengan

lumpang dan alu, kemudian digerus hingga halus dan dilakukan uji XRF (PANalytical Epsilon3) di laboratorium Kimia UNP.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Limbah kaca bening dikarakterisasi menggunakan X-ray fluorescence (XRF) untuk menentukan komposisi kimianya. Komposisi limbah kaca bening tersebut didapatkan hasil seperti disajikan pada Tabel 2.

Table 2 Komposisi kimia limbah kaca bening

Unsur	Conc	Geologi	Conc	Oksida	Conc
Al	1,17%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,454%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,4515
Si	58,212%	SiO <sub>2</sub>	73,383%	SiO <sub>2</sub>	73,197%
P	2,603%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,911%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,901%
Cl	0,028%	Cl	0,013%	K <sub>2</sub> O	0,217%
K	0,392%	K <sub>2</sub> O	0,218%	CaO	20,269%
Ca	33,368%	CaO	20,349%	TiO <sub>2</sub>	0,08%
Ti	0,126%	Ti	0,048%	MnO	0,017%
Mn	0,036%	Mn	0,013%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,091%
Fe	0,173%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,091%	ZnO	0,003%
Zn	0,007%	Zn	0,003%	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,125%
As	0,261%	As	0,095%	SrO	0,062%
Sr	0,145%	Sr	0,052%	ZrO <sub>2</sub>	0,077%
Zr	0,159%	Zr	0,057%	Ag <sub>2</sub> O	0%
Ag	0%	Ag	0%	In <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,498%
In	0,93%	In	0,414%	BaO	0,998%
Ba	2,388%	Ba	0,898%	CeO <sub>2</sub>	0%
Ce	0%	Ce	0%	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0%
Eu	0%	Eu	0%	Cl	0,013%
Re	0,002%	Re	0,001%	Re	0,001%

Dari tabel diatas terlihat bahwa kandungan unsur kimia tertinggi dari limbah kaca bening adalah Si kemudian diikuti oleh Ca serta P dan Ba. Jika dilihat oksidanya, maka diperoleh data bahwa kandungan oksida SiO<sub>2</sub> adalah terbesar, yaitu sebanyak 73,197%. Hal ini menunjukkan bahwa kaca bening ini adalah berbasis kepada silika, bukan jenis kaca lain seperti kaca posfat yang berbasis Fosfor Oksida. Kaca komersial ini mengandung bahan utama silika (SiO<sub>2</sub>) dan fosfor pentoksida (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Keberadaan silika dalam jumlah besar dan merupakan bahan penyusun kaca yang paling penting dimana 95% produksi industri kaca adalah dari bahan silikat (Rayner-Canham & Overton, 2003). Dari ketiga jenis kaca yang umum, yaitu kaca soda-kapur sebagai jenis kaca yang paling umum, borosilikat, dan kaca timbal (lihat tabel 1), dapat diketahui bahwa limbah kaca bening yang diteliti bukanlah termasuk keluarga kaca borosilikat dan kaca timbal.

Kaca soda-kapur adalah kaca komersial yang paling umum. Jenis ini relatif murah dan dapat didaur ulang. Komposisi khas kaca ini adalah 70–75% berat SiO<sub>2</sub>, 12–16% berat Na<sub>2</sub>O, dan 10–15% berat CaO ((Hasanuzzaman et al., 2016); (Pfaender, 2012)). Sebagian kecil reagen lain dapat ditambahkan untuk keperluan tertentu.

Hal yang menarik dari penelitian ini adalah bahwa untuk jenis kaca soda kapur yang harusnya memiliki jumlah Na<sub>2</sub>O yang signifikan, tapi kaca yang diteliti tidak menampakkan jumlah Na<sub>2</sub>O yang signifikan. Diketahui bahwa ikatan kovalen jaringan bertanggung jawab untuk pembentukan struktur jaringan dalam silika kristalin dan silika amorf pada kaca. Silikat alkali membentuk kaca dengan mudah dan ketika alkali oksida seperti Na<sub>2</sub>O ditambahkan ke kaca silika, karena ion Na<sup>+</sup> dari senyawa ionik Na<sub>2</sub>O menjadi bagian dari struktur dan menempati posisi acak yang didistribusikan ke seluruh struktur agar muatan tetap netral (Gambar 4). Bahan tambahan utama Na<sub>2</sub>O juga bisa menurunkan suhu leleh campuran (Bloomfield, 2001).

Nampaknya peran ion alkali Na<sup>+</sup> ini digantikan oleh ion Ca<sup>2+</sup> dari CaO yang dari hasil pengukuran memiliki jumlah sangat signifikan sebanyak 20,269%. Jumlah ini merupakan jumlah oksida terbesar setelah SiO<sub>2</sub>. Senyawa ionik

CaO yang tinggi jumlahnya ini, bisa menyediakan kation  $\text{Ca}^{2+}$  dan anion oksigen. Kation  $\text{Ca}^{2+}$  bisa berperan di dalam struktur silika untuk menetralkan kelebihan muatan negatif pada atom O terminal jaringan silikat. Peran ini selama ini dilakukan oleh  $\text{Na}^+$  dari  $\text{Na}_2\text{O}$ . Sementara anion oksigen bisa memodifikasi struktur jaringan kovalen silika. Dengan jumlah CaO yang tinggi, rasio oksigen terhadap silikon juga meningkat dan memecah jaringan tiga dimensi dengan pembentukan oksigen berikatan tunggal yang tidak berpartisipasi dalam jaringan, sehingga mengurangi panjang rantai. Sehingga dapat disimpulkan bahwa ion CaO bisa menggantikan peran  $\text{Na}_2\text{O}$  dalam kaca bening yang diteliti. Peneliti lain juga menjelaskan adanya efek utama dari pengubah ini pada penurunan suhu leleh (Hasanuzzaman et al., 2016). Hal ini dapat membuat proses peleburan cukup sederhana selama pembentukan kaca.

Selain oksida CaO, dijumpai juga dalam kaca bening ini kation-kation dengan valensi yang lebih tinggi dan jumlah koordinasi yang lebih rendah daripada logam alkali dan logam alkali tanah, yaitu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebanyak 1,4515%,  $\text{ZrO}_2$  sebanyak 0,077%,  $\text{TiO}_2$  sebanyak 0,08%, dan  $\text{ZnO}$  sebanyak 0,003%. Kation ini dapat bertindak sebagai pembentuk dan pengubah jaringan kovalen dalam gelas silika yang diteliti.

#### 4. SIMPULAN DAN SARAN

Limbah kaca bening rumah tangga telah berhasil diketahui komposisinya dengan menggunakan XRF. Limbah kaca bening diketahui mengandung silika sebanyak 73% massa. CaO yang tinggi 20,269% bisa menjadi penetral muatan, pengubah struktur jaringan, dan menurunkan titik leleh kaca. Juga dijumpai kation dengan valensi yang lebih tinggi dan jumlah koordinasi yang lebih rendah yaitu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1,4515%,  $\text{ZrO}_2$  sebanyak 0,077%,  $\text{TiO}_2$  sebanyak 0,08%, dan  $\text{ZnO}$  0,003%. Meskipun sudah diperoleh bahwa silika merupakan konstituen utama pada limbah kaca bening, pengujian dengan instrumen lain seperti XRD, SEM dan lainnya diperlukan.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Bloomfield, L. A. (2001). *How things work: the physics of everyday life*. John Wiley & Sons.
- Hasanuzzaman, M., Rafferty, A., Sajjia, M., & Olabi, A.-G. (2016). Properties of Glass Materials. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 1–12. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.03998-9>
- Jenkins, R. (2008). X-Ray Fluorescence Spectrometry. *Handbook of Analytical Techniques*, 2–2, 753–766. <https://doi.org/10.1002/9783527618323.ch23>
- Munasir, M. (2012). *Uji XRD dan XRF pada Bahan Meneral ( Batuan dan Pasir ) Sebagai Sumber Material Cerdas ( CaCO3 dan SiO2 )*. February 2017. <https://doi.org/10.26740/jpfa.v2n1.p20-29>
- Ni'mah, Y. L., Suprpto, S., Subandi, A. P. K., Yuningsih, N. E., & Pertiwi, A. C. (2022). The optimization of silica gel synthesis from chemical bottle waste using response surface methodology. *Arabian Journal of Chemistry*, 15(12), 104329. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104329>
- Pfaender, H. G. (2012). *Schott guide to glass*. Springer Science & Business Media.
- Potts, P. J., & Webb, P. C. (1992). X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Geochemical Exploration*, 44(1), 251–296. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90052-A](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90052-A)
- Rayner-Canham, G., & Overton, T. (2003). *Descriptive inorganic chemistry*. Macmillan.
- Silvia, L., & Zainuri, M. (2020). Analisis Silika ( $\text{SiO}_2$ ) Hasil Kopresipitasi Berbasis Bahan Alam menggunakan Uji XRF dan XRD. *Jurnal Fisika Dan Aplikasinya*, 16(1), 12. <https://doi.org/10.12962/j24604682.v16i1.5322>
- Solar glass & mirrors*. (2016). Green Rhino Energy. [http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/solar\\_glass.php](http://www.greenrhinoenergy.com/solar/technologies/solar_glass.php)
- Suhartini, A., Gunartri, A. S. S., & Hasan, A. (2014). Pengaruh Penambahan Tumbukan Limbah Botol Kaca Sebagai Bahan Substitusi Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Dan Kuat Lentur Beton. *Jurnal BENTANG*, 2(1), 66–80.
- Verry Andre Fabiani, N. W. R. B. M. N. S. (2018). Sintesis Dan Karakterisasi Silika Gel Dari Limbah Kaca Serta aplikasinya Pada Kromatografi Kolom. *Indonesian Journal of Pure and Applied Chemistry*, 1(1), 10–16.