

Uji Fisis dan Mekanik pada Desain Struktur Keramik Forsterite (Mg_2SiO_4) dengan Teknik Sintering (Solid State-Reaction)

JORENA, HADIR KABAN, DAN AHMAD AMINUDDIN BAMA

Jurusan Fisika FMIPA Universitas Sriwijaya, Sumatra Selatan, Indonesia

Intisari: Telah dilakukan penelitian tentang sintesis, uji fisis dan mekanik keramik forsterite dengan metode solid state reaction (sintering). Keramik forsterite disintesis dengan menggunakan powder silika dan magnesium oksida sintetik. Selanjutnya silika dan magnesium powder dicampur dan digerus hingga halus. Ke dalam campuran tersebut ditambah etanol dan ditirir dengan magnetik stirrer agar menjadi homogen, dan dikalsinasi pada suhu 110°C hingga membentuk bubuk/serbuk. Selanjutnya serbuk digerus kembali dengan mortar dan pastel untuk menghasilkan serbuk forsterite. Serbuk dicetak menjadi pelet silinder dan kemudian disintering dengan suhu yang berbeda yaitu 850 , 950 dan 1050°C . Selanjutnya dilakukan pengukuran/uji porositas, densitas dan konduktivitas, *hardness/kekerasan* dan *fracture toughness/keretakan*.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa densitas meningkat dengan seiring dengan kenaikan suhu sintering, sebaliknya porositas dan *fracture toughness* menurun dengan meningkatnya suhu sintering. Hasil analisis *fracture toughness* dengan SEM menunjukkan bahwa keretakan pada suhu sintering 850°C lebih besar dibandingkan dengan sampel yang disintering pada suhu 950 dan 1050°C . Dengan kata lain, tingkat keretakan pada sampel yang disintering pada 850°C lebih besar dibandingkan dengan sampel yang disintering pada suhu 950 dan 1050°C . Fenomena ini menunjukkan bahwa butiran-butiran semakin besar disertai jumlah pori yang semakin sedikit. Kekerasan meningkat seiring dengan kenaikan suhu sintering. Semakin tinggi suhu sintering, semakin tinggi kekerasan yang sesuai dengan meningkatnya densitas, serta diikuti menurunnya porositas. Pengukuran konduktivitas menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering, konduktivitas semakin kecil yang sesuai dengan meningkatnya densitas dan menurunnya porositas. Berdasarkan karakteristik perubahan konduktivitas, keramik forsterite yang diperoleh dalam penelitian ini mendekati sifat isolator sehingga dapat diaplikasikan sebagai bahan isolator listrik.

Kata kunci: keramik forsterite, uji fisis dan mekanik, porositas, *fracture toughness*, konduktivitas

Email: jorenabangun@yahoo.co.id

1 PENDAHULUAN

Keramik merupakan salah satu material yang pada umumnya tersusun dari beberapa oksida logam yang dapat menghasilkan sifat-sifat yang berbeda dari sifat-sifat penyusunnya (Gibson & Ronald, 1994). Dewasa ini, salah satu material yang banyak diminati untuk diteliti yakni keramik *forsterite*, yang tersusun dari dua senyawa yaitu magnesium oksida (MgO) dan silika (SiO_2). Sebagai bahan keramik maju (*advanced ceramics*), *forsterite* adalah salah satu keramik dalam sistem $MgO-SiO_2$, merupakan kelompok senyawa yang sangat jarang ditemukan di alam, dengan komposisi kimia SiO_2 dan MgO yang bervariasi (Kingrey, *et.al.*, 1976) seperti *andalusite*, *enstantie* dan *forsterite*, dimana *forsterite* merupakan senyawa yang paling stabil.

Salah satu konsekuensi logis dari era industrialisasi dewasa ini adalah meningkatnya kebutuhan

akan bahan keramik untuk berbagai industri seperti industri gelas, keramik, dan elektronik. Dalam kehidupan kita sehari-hari, keramik merupakan bahan yang sangat umum kita kenal dengan aplikasi yang sangat luas, mulai dari aplikasi untuk bahan bangunan hingga kebutuhan teknologi tinggi, misalnya sebagai isolator listrik dan komponen untuk perangkat suhu tinggi.

Forsterite telah banyak digunakan sebagai bahan dasar dalam berbagai industri menarik untuk dikaji karena memiliki beragam keunggulan antara lain, stabilitas kimia yang baik, (Chesters, 1973; Diesperova, *et al.* 1977), konduktivitas listrik yang rendah tinggi (Saber, *et al.* 2007), refraktori tinggi dan ekspansi termal yang rendah (Xu dan Wei, 2005; Jing *et.al.*, 2009), sehingga dapat digunakan sebagai penopang baja cair, bahan proyektil, refraktori, pembuatan gelas keramik, (Matthew *et.al.*, 1998; Pack *et.al.*, 2005). Berdasarkan penelitian yang dilakukan sebelumnya (Song and Chen, 2008) menunjukkan

bahwa *forsterite* mempunyai nilai permitivitas dielektrik rendah ($\epsilon_r = 6,8-8,2$) dan resistivitas tinggi ($\sim 10^5-10^{10}$ W cm) sehingga sangat baik digunakan sebagai bahan isolator listrik. Berdasarkan sifat-sifat tersebut, *forsterite* sangat baik digunakan sebagai isolator listrik tegangan tinggi dan isolator panas suhu tinggi sehingga dapat diaplikasikan secara luas seperti penukar panas, bahan furnace dan bahan pelapis logam.

Penelitian ini digagas sebagai pengembangan teknologi dalam mensintesis keramik *forsterite*. Berkaitan dengan teknologi yang dipaparkan di atas, serangkaian percobaan akan dilakukan dengan penekanan utama pada suhu sintering sebagai kontrol terhadap karakteristik utama keramik *forsterite* yakni (i) *sifat fisis* (densitas, porositas, dan konduktivitas), (ii) *sifat mekanik* (*hardness/kekerasan* dan *fracture toughness/keretakan*). Dari kegiatan yang direncanakan dalam penelitian ini diharapkan akan diperoleh berbagai informasi ilmiah sebagai dasar bagi pengembangan teknologi dan *forsterite* dapat dimanfaatkan dan diaplikasikan secara luas.

Masalah yang akan diteliti dan dipelajari adalah uji fisis dan mekanik dalam desain struktur keramik *Forsterite* (Mg_2SiO_4) dengan teknik sintering (*Solid State-Reaction*). Secara lebih rinci, masalah yang akan diteliti adalah: bagaimanakah sifat fisis (densitas, porositas, dan konduktivitas) dan mekanik (*hardness/kekerasan* dan *fracture toughness/keretakan*) yang diatur dengan suhu sintering.

Tujuan penelitian diharapkan dapat memberikan informasi:

- Sintesis/pemrosesan pembentukan struktur keramik *forsterite* dengan perlakuan sintering.
- Mengetahui karakterisasi sifat fisis meliputi (densitas, porositas, dan konduktivitas) dan sifat mekanik (*hardness/kekerasan* dan *fracture toughness/keretakan*) yang diatur dengan suhu sintering,
- Mengetahui karakteristik permukaan (gugus fungsi, struktur, mikrostruktur, dan termal) yang diatur dengan suhu sintering.

2 TINJAUAN PUSTAKA

Keramik

Struktur kristal keramik (terdiri dari berbagai ukuran atom yang berbeda atau minimal terdiri dari 2 jenis unsur) merupakan salah satu yang paling kompleks dari semua struktur bahan. Ikatan antara atom-atom ini umumnya ikatan kovalen (berbagi elektron, sehingga ikatan ini kuat) atau ion (terutama ikatan antara ion bermuatan, sehingga ikatan ini kuat). Ikatan

ini jauh lebih kuat daripada ikatan logam. Akibatnya, sifat-sifat seperti kekerasan dan ketahanan panas dan listrik secara signifikan lebih tinggi keramik dari pada logam. Keramik dapat berikatan kristal tunggal atau dalam bentuk polikristalin. Ukuran butir mempunyai pengaruh besar terhadap kekuatan dan sifat-sifat keramik; ukuran butir yang halus (sehingga dikatakan keramik halus), semakin tinggi kekuatan dan ketangguhannya. Kebanyakan bahan pembentuk keramik memiliki ikatan ion, ikatan kovalen dan ikatan antara. Misal, bagian ikatan ion dalam sistem Mg-O, Al-O, Zn-O dan Si-O dapat dikatakan masing-masing 70%, 60%, 60% dan 50%. Yang sangat menarik adalah bahwa pada ReO_3 , V_2O_3 dan TiO, yang merupakan oksida dan tidak pernah menunjukkan sifat liat atau dapat di deformasikan, tetapi memiliki hantaran listrik yang relatif dapat disamakan dengan logam biasa. Dalam Kristal yang rumit, berbagai macam atom berperan dan ikatannya merupakan ikatan campuran dalam banyak hal. Struktur kristal demikian dapat dimengerti apabila mengingat bahwa kristal tersusun oleh kombinasi dari polyhedron koordinasi, dimana satuan kecil dari kation dikelilingi oleh beberapa anion. Salah satu contoh adalah silikat yang merupakan bahan baku penting bagi keramik.

Keramik *Forsterite* (Mg_2SiO_4)

Keramik merupakan material rekayasa yang banyak dikembangkan dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi, karena mampu menggabungkan dua material/lebih yang berbeda secara makroskopis sehingga menghasilkan material yang lebih unggul dan dapat memenuhi sifat yang diperlukan. Pada dasarnya, material keramik terdiri dari dua komponen material anorganik penyusun maupun lebih seperti MgO-SiO₂ yang banyak digunakan dalam pembuatan keramik dan gelas (Kasanovic *et al.*, 2005), terdiri dari magnesium oksida (MgO) dan silikon oksida (SiO₂). Keramik MgO-SiO₂ mempunyai rumus kimia ($MgSiO_3$) dengan nama mineral *enstatite* dan (Mg_2SiO_4) dengan nama mineral *forsterite*.

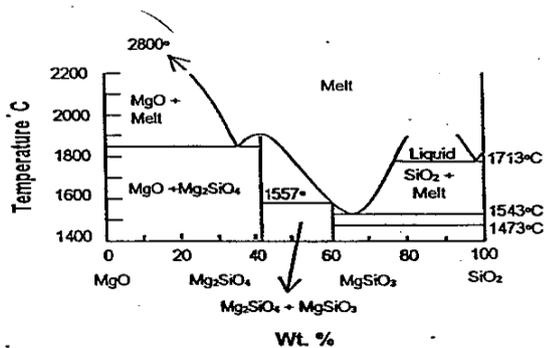
Enstatite ($MgSiO_3$) adalah mineral umum yang ditemukan dalam metamorf dan beberapa batuan beku serta dalam meteorit batuan dan besi. *Enstatite* membentuk serangkaian larutan padat dengan mineral *hipersten* dan *ferrosilite*. Serangkaian larutan padat terjadi ketika dua atau lebih elemen dapat menggantikan satu sama lain dalam struktur. *Enstatite* adalah *orthopyroxene* atau piroksen yang merupakan kelas penting dari batuan mineral pembentuk unit struktural dasar dengan rantai tunggal tetrahedra SiO₄ (Jahn, 2010). *Enstatite* terbentuk pada suhu sintering 1000°C, awalnya MgO berdifusi ke

permukaan SiO₂ untuk membentuk *enstantite* (Tavangarian dan Emadi, 2010) dan difusi berlanjut melalui lapisan *enstantite* untuk membentuk *forsterite*. Sampai pemanasan 1200°C silika amorf MgSiO₃ (*enstantite*) bereaksi dengan MgO, sehingga Mg₂SiO₄ (*forsterite*) muncul sebagai fase tunggal (Kharaziha and Fathi, 2009).

Forsterite adalah kristal dengan rumus kimia Mg₂SiO₄ yang dibangun pada silika tetrahedral dari ikatan kovalen (Kharaziha and Fathi, 2010), *forsterite* juga merupakan *polimorf*, seperti *ringwodite*, *wadsleyite* dan *olivin*. *Forsterite* memiliki konduktivitas listrik rendah sehingga ideal digunakan untuk bahan elektronik. Selain itu, dengan titik leleh yang tinggi yaitu sebesar 1890°C, menunjukkan bahwa *forsterite* sebagai bahan tahan panas dan aplikasi pembuatan keramik karena memiliki stabilitas kimia yang baik dan koefisien ekspansi termal yang rendah (Kasanovic et al., 2005; Saberi et al., 2007).

Diagram Fasa Sistem MgO-SiO₂

Rasio molekul MgO-SiO₂ dan perlakuan temperatur berperan penting dalam pembentukan komposit MgO-SiO₂ seperti yang ditunjukkan pada Gambar1. Gambar 1 menunjukkan bahwa MgO dan SiO₂ hanya akan membentuk *anhydrous silicate* yaitu *forsterite* (Mg₂SiO₄) dan *enstantie* (MgSiO₃).

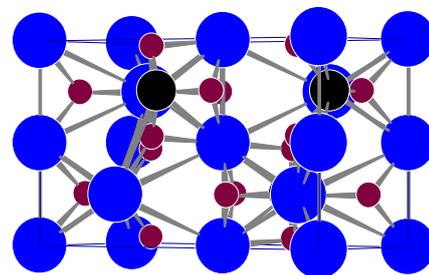


Gambar 1. Diagram fasa komposit MgO-SiO₂ (Kharaziha, and Fathi, 2010).

Kedua *anhydrous silicate* tersebut adalah fasa yang stabil dalam sistem MgO-SiO₂. Selama berlangsungnya proses sintering, fosteritisasi berlangsung melalui tahap dehidrasi, reorganisasi kation, pembentukan *forsterite* dan *enstantite*. Pada tahap dehidrasi, terjadi pelepasan gugus hidroksil dan pembentukan fasa oksida dimana serpentinit dan magnesit terurai menjadi MgO dan SiO₂. Pada tahap reorganisasi kation, terjadi pemisahan kation seiring meningkatnya suhu sintering dan pada fasa stabil MgO-SiO₂ terbentuk *forsterite* dan sedikit *enstantite* sedangkan MgO yang berlebih akan membentuk *periclase*.

Struktur Forsterite (MgO-SiO₂)

Forsterite merupakan salah satu senyawa dari magnesium silikat yang memiliki rumus kimia Mg₂SiO₄ dengan berat molekul sebesar 140,69 gr/mol dan densitas yang dimiliki sebesar 5,236 g/cm³. Senyawa ini tersusun dari anion Si⁴⁻ dan kation Mg²⁺ dengan sistem kristal dan simetris kristal secara berurutan yakni ortorombik dan 2/m 2/m 2/m. Menurut Kudoh dan Takeuchi (1985) dalam *Database American Mineralogist* menjelaskan bahwa *space group forsterite* yakni Pbnm pada No. 62 dengan parameter cell yaitu a = 4,724 Å; b = 10,077 Å, dan c = 5,942 Å. Struktur atom *forsterite* dapat diperlihatkan pada Gambar 2.



Keterangan:

- = atom O
- = atom Si
- = atom Mg

Gambar 2. Struktur kristal *forsterite* (Mg₂SiO₄). Ikatan ionik terdiri dari Mg, Si dan O dengan jari-jari ionik yang dimiliki secara berurutan adalah 1,6; 1,15 dan 0,73 Å (Kudoh dan Takeuchi, 1985).

Teknik Sintering

Teknik sintering adalah suatu reaksi yang terjadi pada proses pembakaran dengan suhu yang terkontrol dan densifikasi padatan serbuk dapat diperoleh sekaligus sehingga tingkat porositas berkurang dan densitas relatif bertambah/naik. Dengan teknik ini dapat diperoleh bahan dengan densitas yang relatif tinggi. Suhu sintering sangat penting, karena berkaitan dengan perubahan struktur, sifat termal dan sifat fisis material yang dihasilkan. Beberapa sifat yang diketahui sangat dipengaruhi oleh suhu sintering adalah densitas, porositas dan kekerasan serta kekuatan tarik (*mechanical strength*). Hasil penelitian yang dilakukan Rahaman (1995) menunjukkan bahwa proses difusi selama proses sintering akan memberikan efek terhadap perubahan fisis bahan meliputi, densitas, porositas, penyusutan volum dan kekerasan.

Manfaat utama dari keramik adalah bahwa mudahnya pemeliharaan, kokoh, dan pilihan produk tentu selalu ada dan terus berinovasi. Keramik lebih tahan lama, dan mudah dibersihkan dengan cara mudah bisa menggunakan handuk basah atau spons. Hal ini akan berdampak pada ketahanan akan kelembaban, sehingga sangat populer di beberapa area dengan intensitas air seperti dapur dan kamar mandi. Belum lagi, anda dapat menggunakan warna cerah, maupun kalem dan gaya yang anda inginkan, sehingga keramik dapat di kustomisasi serta adaptasi dengan preferensi gaya pribadi yang anda inginkan.

Namun, kelemahan lainnya yang begitu mencolok adalah bahwa dasar keramik yang terasa tidak nyaman saat diinjak, ini dikarenakan permukaan keramik yang memang tidak rata karena asal dari keramik itu sendiri. Karena keramik sangat keras, saat terjatuh benda berat di atasnya atau benda lainnya maka akan muncul kerusakan yang mengakibatkan retak bahkan terbelah menjadi beberapa bagian, yang tentunya akan sulit untuk memperbaikinya kembali. Selain itu, memasang keramik sendiri sangat sulit, sehingga dianjurkan bahwa Anda memiliki tukang yang memang ahli dan profesional dalam melakukan instalasi keramik. Jadi bisa dikatakan ada daya tarik tersendiri jika anda menggunakan atau mengaplikasikan keramik batu alam pada rumah anda.

3 METODE PENELITIAN

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan selama 10 bulan di Laboratorium Fisika Material, FMIPA Universitas Sriwijaya dan Laboratorium Kimia Fisik FMIPA Universitas Lampung dan Batan Serpong.

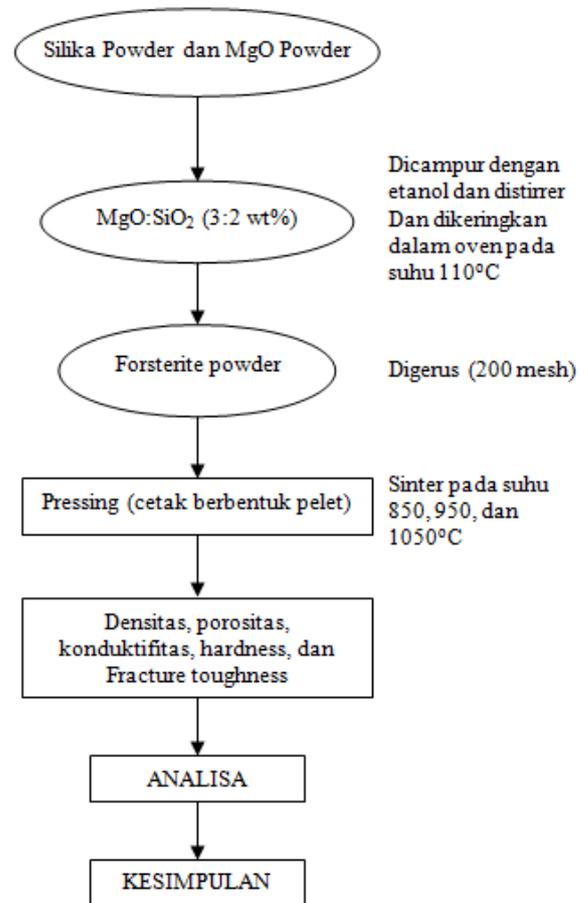
Alat dan Bahan

Adapun alat yang digunakan pada penelitian ini adalah, pompa vacum, magnetik stirrer, air bebas ion, mortar, pengaduk, *beaker glass*, labu elenmeyer, aluminium foil, cawan tahan panas, timbangan digital, pengayak dengan diameter 180 µm, penekan hidrolik, dan *furnace*, uji fisis dan mekanik. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk MgO, SiO₂

Pendekatan Eksperimen Secara Umum

Untuk mencapai tujuan, pendekatan eksperimen mengacu pada tiga aspek utama dalam prinsip penelitian dan pengembangan material Gambar 3) yang berkaitan satu sama lain yakni (1) sintesis, (2)

karakteristik sifat fisis (densitas, porositas, dan konduktivitas) dan mekanik (*hardness/kekerasan* dan *fracture toughnes/keretakan*) yang diatur dengan suhu sintering,



Gambar 3. Diagram Alir Pelaksanaan Penelitian

Prosedur Penelitian

a. Sintesis Keramik Forsterite

Serbuk MgO dan silika dicampur dengan perbandingan komposisi MgO:SiO₂ adalah 3:2 (wt%). Kemudian campuran diaduk dengan magnetik stirrer selama 4 jam dengan menggunakan mediator air bebas ion, lalu dipanaskan pada suhu 110 °C selama 6 jam, sehingga serbuk kelihatan putih dan transparan, digunakan sebagai sampel *forsterite*. Selanjutnya sampel yang telah diperoleh, dalam bentuk serbuk, digerus dengan ukuran butir 200 mesh, dan dicetak dalam bentuk pellet silinder dengan alat penekan seberat 10 ton. Selanjutnya disintering pada suhu 850, 950, dan 1050°C dengan heating rate 3 °C/min 4 jam. Sampel berupa pellet sebanyak 4 buah, ditambah dengan sampel tanpa sintering sebagai kontrol.

b. Uji Sifat Fisis Keramik Forsterite

Pengukuran Densitas dan Porositas

Metode yang digunakan dalam pengukuran densitas dan porositas adalah prinsip Archimedes (Autralian standard, 1989) sebagai berikut:

$$\rho = M_d \rho_m (1/M_s - 1/M_i) \tag{1}$$

Dimana, ρ = densitas sampel (gr/cm^3), ρ_m = densitas media pencelupan (gr/cm^3), M_d = massa kering sampel (gr), M_s dan M_i adalah masing-masing massa sampel jenuh (massa immersi) dan massa sampel jenuh di udara (massa saturasi). Mengukur persentasi porositas (%P) dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

$$\%P = (M_s - M_i) / (M_s - M_d) \times 100\% \tag{2}$$

c. Uji Sifat Mekanik Keramik Forsterite

Uji Kekerasan (*Hardness*)

Uji *hardness* dan *fracture toughness* dilakukan menggunakan *microhardness test*, yakni dengan menekan beberapa titik pada sampel. Nilai *hardness* dapat dan *fracture toughness* dihitung dengan persamaan di bawah ini:

$$Vickers\ Hardness\ (H_v) = (1.854\ P) / d^2 \tag{3}$$

Dimana, nilai kekerasan (HV) bahan dalam satuan *Pascal* (Pa), P adalah tekanan (n/m^2), d = diagonal penekanan (m).

$$Fracture\ Toughness = 0.16\ (H_v)\sqrt{a\ (c/a)^{1/2}} \tag{4}$$

Dimana c adalah panjang keretakan (m) dan a adalah panjang 1/2 diagonal

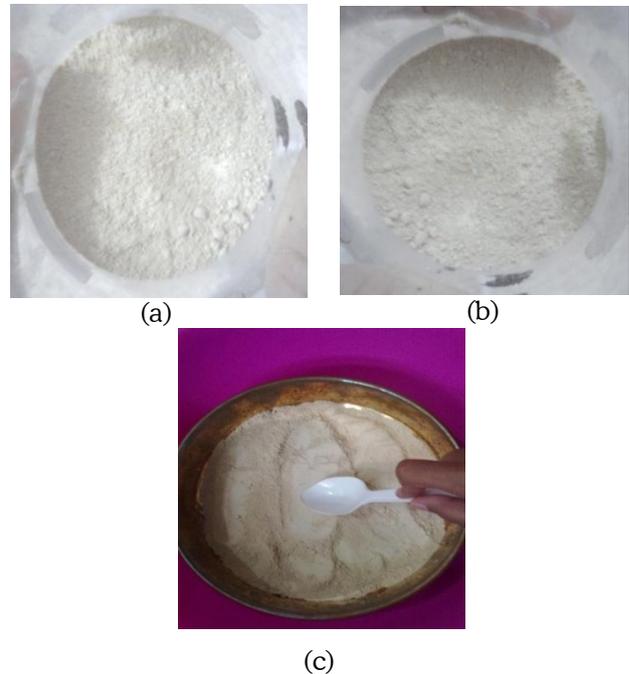
4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Sintesis Keramik Forsterite dengan Metode Padatan (Solid state reaction)

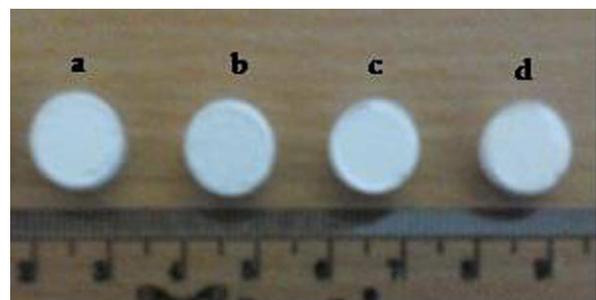
Pada penelitian ini sintesis keramik forsterite dilakukan dengan mencampurkan serbuk silika (SiO_2) dan magnesium oksida (MgO) dengan perbandingan 3:2. Serbuk silika (Gambar 4a) dicampur dengan serbuk magnesium oksida (Gambar 4b). Untuk mendapatkan perbandingan komposisi di atas, sebanyak 1,22 gr silika dicampur dengan 1,84gr magnesium oksida dan digerus. Selanjutnya, dicampur dengan pelarut etanol serta diaduk selama 6 jam menggunakan magnetik stirrer dan dikeringkan dalam oven pada suhu 110°C selama 6 jam, sehingga serbuk kelihatan putih (Gambar 4c).

Serbuk forsterite yang diperoleh, selanjutnya digerus hingga ukuran butir 200 mesh, dan dicetak dalam bentuk pellet silinder dengan alat penekan

seberat 10 ton. Selanjutnya disintering pada suhu 850, 950, dan 1050°C dengan heating rate 3 °C/min 4 jam. Sampel berupa pellet sebanyak 4 buah, ditambah dengan sampel tanpa sintering sebagai kontrol. Pellet keramik forsterite ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 4. Proses sintesis keramik forsterite (a) serbuk silika, (b) Serbuk magnesium oksida dan (c) Serbuk forsterite



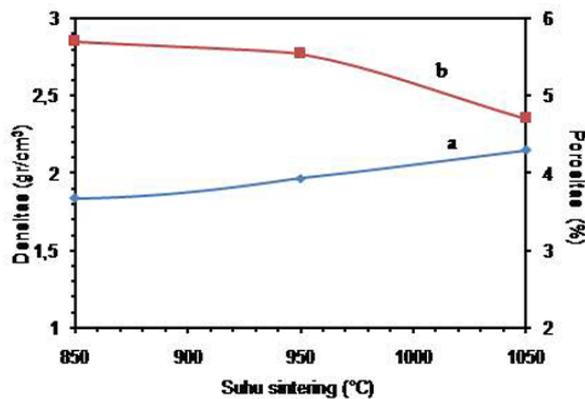
Gambar 5. Keramik forsterite (a) tanpa sintering dan sintering pada suhu (b) 850, (c) 950 dan (d) 1050°C

Hasil Uji Sifat Fisis dan Mekanik Keramik Forsterite

Perlakuan sintering dapat mempengaruhi mikrostruktur diantaranya, pori, *microcracking*, luas permukaan, dan *grain boundary*. Perubahan tersebut juga akan mempengaruhi sifat fisis keramik forsterite yakni densitas, porositas, konduktivitas, kekerasan dan *fracture toughness*.

Hasil Uji Densitas dan Porositas

Pada penelitian ini pengukuran densitas dan porositas dilakukan menggunakan timbangan *analytic balance* merk *Wiggen Hauser* dengan prinsip *Archimedes*. Hasil pengukuran densitas dan porositas ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil pengukuran densitas keramik forsterite terhadap perubahan suhu sintering menunjukkan bahwa nilai densitas meningkat seiring dengan peningkatan suhu sintering (Gambar 6a). Peningkatan densitas mengindikasikan terjadinya proses pemadatan (*densifikasi*), dan kemungkinan terjadinya perubahan struktur dan mikrostruktur, serta partikel-partikel saling mengikat sehingga ukuran butiran menjadi lebih besar dan menutupi seluruh permukaan. Peningkatan densitas sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya (Kharaziha, and Fathi, 2009), menyimpulkan bahwa peningkatan densitas akibat peningkatan suhu sintering dan juga peningkatan pembentukan struktur forsterite. Dari hasil pengukuran menunjukkan nilai densitas yang disintering pada rentang suhu sintering 850-1050 °C adalah sebesar 1,89 - 2,15 gr/cm³. Perbedaan yang cukup signifikan dengan nilai densitas yang diperoleh Jing *et al*, 2009 yang menunjukkan nilai densitas 0,8 - 1,6 gr/cm³.



Gambar 6. Perubahan (a) densitas dan (b) porositas terhadap suhu sintering

Hasil pengukuran porositas (Gambar 6b) menunjukkan bahwa porositas menurun seiring dengan kenaikan suhu sintering. Penurunan porositas secara perlahan lahan mulai suhu sintering 850 °C hingga 950 °C dan porositas menurun secara drastis mulai suhu sintering 950 hingga 1050 °C meskipun penurunan cukup kecil yang mengindikasikan penyusutan sampel tidak mengalami perubahan yang signifikan. Fenomena ini terjadi akibat pembentukan struktur forsterite terjadi pada suhu range 850-1050°C. Penurunan porositas juga kemungkinan terjadi akibat pengaruh energi panas yang mengaktifkan proses difusi atom antar butiran sehingga terjadi pertumbuhan butir yang dapat menutupi pori-

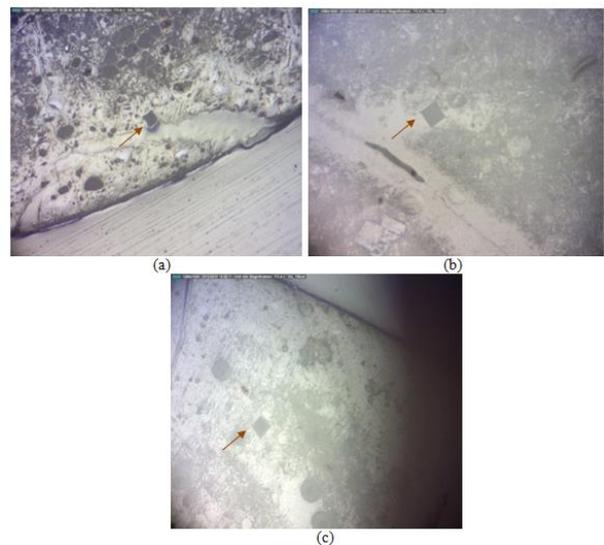
pori sehingga porositas mengecil. Penurunan porositas sekaligus meningkatkan naiknya densitas forsterite. Fenomena ini menunjukkan bahwa jarak antar atom dan partikel semakin kecil sehingga meningkatkan luas permukaan forsterite.

Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan alat *microhardness tester* merk *Zwick/Roell ZHμ* (Gambar 7a) dengan metode *vickers* pada tiga titik, beban yang diberikan sebesar 0,1 kgf sehingga pada bekas indentasi terdapat retakan kecil berbentuk bujur sangkar yang dapat dilihat menggunakan mikroskop optik (Gambar 7b). Gambar 8 (a), (b), (c) dan (d) menunjukkan bekas indentasi pada pengujian kekerasan.



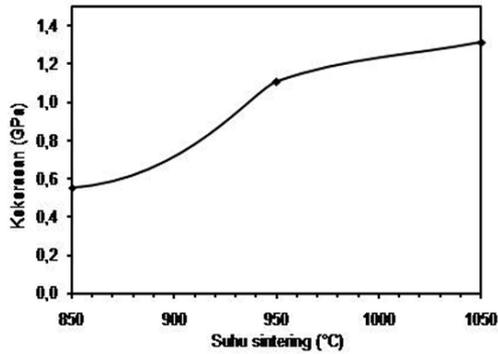
Gambar 7. (a) Alat microhardness tester dan (b) mikroskop optik.



Gambar 8. Bekas indentasi pada pengujian kekerasan keramik forsterite pada suhu (a) 850, (b) 950, (c) 1050 °C.

Berdasarkan Gambar 8 (a), (b), dan (c), bekas indentasi yang berbentuk bujur sangkar seperti yang ditunjuk panah berwarna merah, diukur panjang kedua diagonalnya untuk mendapatkan nilai kekerasan. Semakin kecil panjang diagonal rata-ratanya maka kekerasan akan semakin besar. Gambar 9 me-

nunjukkan perubahan nilai kekerasan akibat kenaikan suhu sintering sampel.



Gambar 9. Perubahan kekerasan terhadap suhu sintering

Hasil pengukuran kekerasan menunjukkan bahwa kekerasan meningkat seiring dengan kenaikan suhu sintering. Salah satu faktor peningkatan kekerasan adalah akibat meningkatnya densitas dan persentase porositas yang menurun, sehingga semakin merapatnya partikel-partikel dalam sampel dan sekaligus ikatan antar butiran satu dengan yang lainnya menjadi kuat. Dari hasil perhitungan didapatkan nilai kekerasan sampel pada rentang suhu sintering 850-1050°C adalah sebesar 0,55-1,25 GPa. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Kharaziha and Fathi, 2010 menunjukkan perbedaan nilai kekerasan yang diperoleh sebesar 2,8 GPa pada suhu sintering sampel 750 – 1200 °C. Berdasarkan perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa karakteristik forsterite dapat diatur dengan perlakuan termal. Hasil pengukuran ini sesuai dengan hasil teoritis yang menyatakan bahwa nilai kekerasan meningkat seiring meningkatnya densitas dan menurunnya persentase porositas serta didukung oleh kehomogenan sampel, Homogenitas sampel dapat diketahui dengan melakukan analisis *fracture surface* menggunakan alat SEM (Gambar 10 (a)).

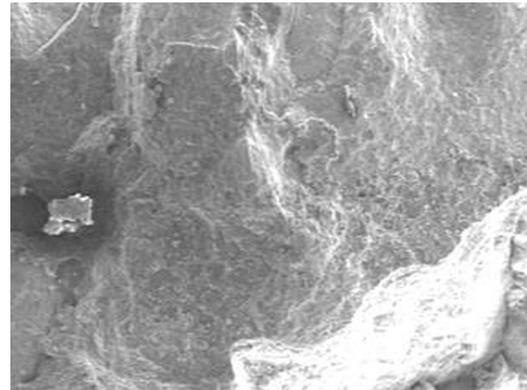


Gambar 10. (a) Alat SEM, (b) Sampel Forsterite.

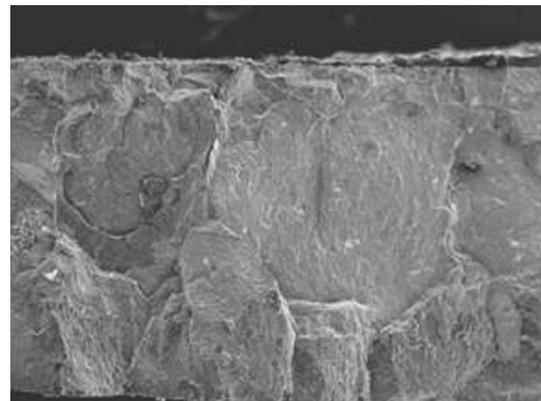
Hasil analisis *fracture surface* dari keramik forsterite ditunjukkan oleh Gambar 11 (a), (b), dan (c).

Berdasarkan gambar di atas, hasil analisis sampel yang disintering pada suhu 850 dan 950 °C (Gambar 11a dan b) mempunyai bentuk butir yang seragam dengan ukuran butir yang kecil. Selain itu, dari

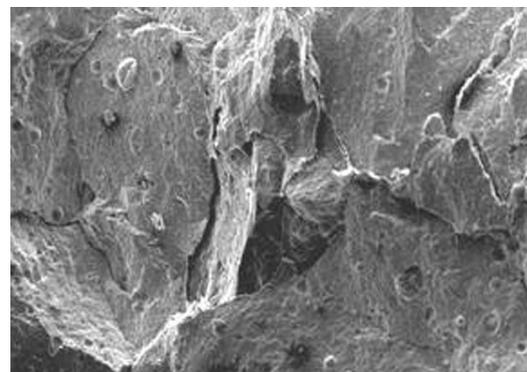
gambar juga terlihat bahwa sampel mengalami keretakan dengan ukuran yang kecil, ditunjukkan oleh panah warna biru. Keretakan terjadi karena terbentuknya fasa kristobalit yang mendominasi sampel akibat pengaruh suhu sintering (Damiyanti and Eristian, 2012)., sehingga mengakibatkan timbulnya keretakan (*micro cracking*) Pada suhu 1050 °C (Gambar 11c), hasil analisis menunjukkan penyatuan butiran secara lebih jelas, jumlah pori menjadi berkurang dan tidak terlihat lagi retakan yang disebabkan oleh menurunnya fasa kristobalit.



(a)



(b)

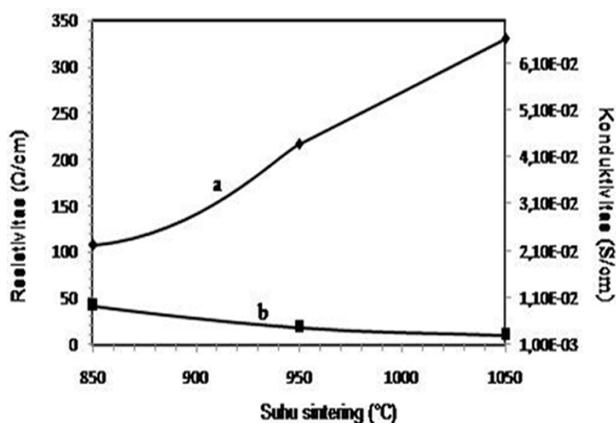


(c)

Gambar 11. Hasil analisis *fracture surface* keramik forsterite pada suhu (a) 850 °C, (b) 950 °C, dan (c) 1050 °C

Hasil Uji Konduktivitas

Perubahan nilai resistivitas dan konduktivitas keramik forsterite akibat perubahan suhu sintering disajikan pada Gambar 12. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa resistivitas meningkat seiring dengan kenaikan suhu sintering, sementara konduktivitas menurun seiring dengan kenaikan suhu sintering. Gambar 12a menunjukkan bahwa terjadi peningkatan nilai resistivitas mulai dari suhu sintering sampel 850-1050 °C, dengan rentang nilai $1,1 \times 10^2 - 3,3 \times 10^2 \Omega/\text{cm}$. Peningkatan nilai resistivitas ini terjadi akibat densitas meningkat dan porositas menurun seperti yang ditunjukkan pada gambar 6. Dengan kata lain ukuran butir yang semakin besar seiring dengan kenaikan suhu sintering, Semakin besar ukuran butiran maka jumlah pori berkurang, akibatnya mobalitas ion oksigen semakin terhambat dan menyebabkan nilai konduktivitas listrik mengalami penurunan (Gambar 12b). Dari hasil perhitungan didapatkan nilai konduktivitas listrik keramik forsterite rata-rata sebesar $1,8 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$. Menurut penelitian yang dilakukan Schock *et al*, 1989 nilai konduktivitas forsterite yang diperoleh sebesar $1 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$. Berdasarkan nilai di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa forsterite cenderung mendekati sifat isolator. Dengan kata lain, keramik forsterite yang diperoleh dalam penelitian ini mendekati sifat isolator sehingga dapat diaplikasikan sebagai bahan untuk keperluan elektronik sebagai isolator listrik.



Gambar 12. Perubahan (a) resistivitas dan (b) konduktivitas terhadap suhu sintering.

5 SIMPULAN

Berdasarkan hasil uji densitas, porositas, kekerasan dan konduktivitas sampel forsterite yang disintesis, maka dapat ditarik kesimpulan yakni:

Densitas, kekerasan dan porositas keramik forsterite mengalami perubahan dengan perubahan suhu sintering, yakni densitas dan kekerasan meningkat dan sebaliknya porositas menurun dengan kenaikan

suhu sintering. Perubahan nilai densitas dalam rentang sebesar 1,89 - 2,15 gr/cm³ dan perubahan nilai kekerasan sebesar 0,45 - 1,52 GPa.

Konduktivitas keramik forsterite mengalami penurunan seiring kenaikan suhu sintering dengan rentang nilai Pengaruh suhu sintering terhadap konduktivitas sampel menunjukkan bahwa, terjadi penurunan nilai konduktivitas seiring dengan meningkatnya suhu sintering sampel, dengan nilai rata-rata berkisar $1,8 \times 10^{-2} \text{ S/cm}$ dan nilai resistivitas dengan rentang nilai $1,1 \times 10^2 - 3,3 \times 10^2 \Omega/\text{cm}$. Berdasarkan karakteristik kedua nilai tersebut mengindikasikan bahwa keramik forsterite bersifat isolator.

REFERENSI

- [1] Australian Standard, (1989), "Refractories and Refractory Material Physical Test Methods: The Determination of Density, Porosity and Water Adsorption", 1774.
- [2] Chesters, J.H. 1973. *Refractories: Production and Properties*. The Iron and Steel Institute: London, UK. (p 3-13).
- [3] Diesperova, M I, V A Bron, V.A., Perepelitsyn, V.A., Boriskova, T.A., Alekseeva, V.A.,
- [4] Kelareva, E.I., (1977). "Refract." Ind Ceram, pp. 278.
- [5] Damiyanti, Eristian. 2012. Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Karakteristik Struktur Dan Mikrostruktur Komposit MgO-SiO₂ Berbasis Silika Sekam Padi (Skripsi). Fisika FMIPA Universitas Lampung. Bandar Lampung
- [6] Gibson, R F. (1994) *Principles of Composite Material Mechanics*. New York: McGraw-Hill Inc.
- [7] Jahn, S., (2010). First-Principles Study of Elastic Properties and Displacive Phase Transitions In MgSiO₃ Enstatites. GFZ. Germany.
- [8] Jing, L., Qi, W., Jihui, L., and L. Peng, L., (2009). Synthesis Process of Forsterite Refractory by Iron Ore Tailings. *Journal of Environmental Sciences Supplement*. S92-S95.
- [9] Kasanovic, Cleo., Stubicar, Nada., Tomasic, Nenad., Vladmir, Bermanec., Stubicar Mirko and Ivankovic, Hrvoje .(2005). Synthesis of Forsterite Powder from Zeolite Precursors. Pp. 203-208. *Croatica Chemica Acta*. University of Zagreb. Croatia.
- [10] Kharaziha, M and Fathi, M.H., (2009). Synthesis and characterization of bioactive forsterite nanopowder. *Ceramics International* 35. Pp. 2449-2454.
- [11] Kharaziha, M and Fathi, M. H. (2010). Mechanically Activated Crystallization of Phase Pure Nanocrystalline forsterite Powders. Pp.534. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. Department of Materials Engineering Isfahan. University of Technology Isfahan. Iran.
- [12] Kingrey, W.D, Bowen, H.H, Uhlmann, D.R, (1976), "Introduction to Ceramics" 2nd, Eddition, Jhon Wiley & Sons.

- [13] Kudoh, Y and Takeuchi, Y. (1985). The Crystal Structure of Forsterite Mg_2SiO_4 under High Pressure up to 149 kb. *Journal Zeitschrift fur Kristallographie* 171:291-302.
- [14] Matthew, B.D., Jackson, D., and James, P.F. (1998). Preparation and Characterization of Forsterite (Mg_2SiO_4) Aerogels. *Journal of Non-Crystalline Solids*. Department of Engineering Materials: University of Sheffield. 225: 125–129
- [15] Pack, A., Palme, H., Michael, J., and G. Shelley, G., (2005). Origin of Chondritic Forsterite Grains. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 69(12): 3159–3182.
- [16] Rahaman, I.A. (1995). *Ceramics Pressing and Sintering*. Department of Ceramics Engineering University of Missouri-Rolla Rola. Issouri.
- [17] Saberi, A., Alijened, B., Negahdari, Z., Kazemi, F., (2007). Low Temperature Synthesis of Nanocrystalline Forsterite." *Materials Reseach Bulletin*, pp.666-673.
- [18] Schock, R. N., Duba, A and T. J, Shankland. 1989. Electrical Condition in Olivin. *J Geophys. Res.*, 94, 5829-5839.
- [19] Song, K.X. and X.M. Chen, X.M., (2008). Phase Evolution and Microwave Dielectric Characteristics of Ti-Substituted Mg_2SiO_4 Forsterite Ceramics. *Matterials Letter*. 62: 520-522.
- [20] Tavangarian, F and Emadi, R. (2010). Synthesis of Pure Nanocrystallin Magnesium Silicate Powder. pp. 122. Isfahan University of Technology (IUT).
- [21] Xu, P.K. and G.Z. Wei, G.Z., (2005). *New Process Technology for Refractory*. Metallurgy Industry Press, Beijing. 46–47.
-