PEMANFAATAN ARANG SEKAM PADI SEBAGAI SUMBER SILIKA PADA SINTESIS FORSTERIT DALAM MEDIUM UDARA

*The Utilization of Rice Husk Charcoal as a Source of Silica in The
Synthesis of Forsterite in Air Medium*

Solihudin^{*)}, Haryono^{*)}

^{*)} Kontributor Utama

Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Padjadjaran, Jl. Raya Bandung-Sumedang Km. 21, Jatinangor,
Sumedang, Jawa Barat, Indonesia

Email: haryono@unpad.ac.id

Naskah masuk: 27 Agustus 2020, Revisi: 21 Desember 2020, Diterima: 5 Januari 2021

ABSTRAK

Forsterit memiliki sifat tahan panas pada suhu tinggi sehingga berpotensi sebagai material refraktori. Sebagai komoditas utama pertanian di Indonesia, padi merupakan bahan baku potensial sebagai sumber silika amorf dan karbon melalui proses pembakaran parsial sekam padi. Penelitian ini bertujuan menentukan pengaruh suhu kalsinasi dalam medium udara terhadap proses pembentukan forsterit dari MgCO_3 dan arang sekam padi. Sintesis forsterit dilakukan pada rasio mol MgCO_3 terhadap SiO_2 sebesar 2:1. Metode penelitian meliputi preparasi arang sekam padi dengan gasifikasi; sintesis forsterit dengan variasi suhu kalsinasi pada 700, 800, 900, dan 1000 °C selama 2 jam; dan karakterisasi hasil sintesis dengan FTIR dan XRD. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu kalsinasi, berdasarkan pembentukan ikatan dari hasil analisis FTIR dan difraktogram XRD, struktur forsterit semakin terbentuk. Kalsinasi pada suhu 1000 °C merupakan suhu optimum pembentukan forsterit.

Kata Kunci: arang sekam padi, forsterit, magnesium karbonat, medium udara, suhu kalsinasi.

ABSTRACT

Forsterite has a heat resistance property at high temperatures so it has the potential as a refractory material. As the main agricultural commodity in Indonesia, rice is a potential raw material as a source of amorphous silica and carbon through the partial burning process of rice husks. This study aims to determine the effect of calcination temperature in air medium on the process of forming forsterite from MgCO_3 and rice husk charcoal. The forsterite/carbon synthesis was carried out at a mole ratio of MgCO_3 to SiO_2 of 2:1. The research method includes the

preparation of rice husk charcoal by gasification; synthesis of forsterite with variations in calcination temperature at 700, 800, 900, and 1000 °C for 2 hours; and characterization of synthesis results using FTIR and XRD. The results showed that the higher the calcination temperature, based on the formation of bonds from the results of FTIR analysis and XRD diffractogram, the more the forsterite structure was formed. Calcination at 1000 °C is the optimum temperature for the formation of forsterite.

Keywords: *rice husk charcoal, forsterite, magnesium carbonate, air medium, calcination temperature.*

I. PENDAHULUAN

Forsterit merupakan mineral magnesium silikat kristalin dengan rumus kimia Mg_2SiO_4 berstruktur ortorombik [1]. Forsterit memiliki titik leleh tinggi (1890 °C) dan ekspansi termal rendah ($2,8 \times 10^{-5}$ - $4,5 \times 10^{-5}$ K⁻¹ pada suhu 27-1870 °C) sehingga berpotensi sebagai bahan isolator panas yang baik serta dapat dijadikan sebagai bahan komponen peralatan elektronik yang dalam prosesnya melibatkan suhu tinggi [2, 3]. Forsterit, karena bersifat tahan panas, dapat digunakan sebagai cetakan di industri metalurgi dan *rotary kiln* di industri semen [4]. Forsterit memiliki permitivitas dielektrik rendah ($6,7 \times 10^{-11}$ - $7,2 \times 10^{-11}$ F/m pada 1 MHz) sehingga cocok digunakan sebagai material dasar untuk komponen elektronik dan laser [3]. Penambahan kromium pada forsterit potensial diterapkan pada bidang optik laser [5]. Di bidang

kedokteran implan tulang, keramik forsterit memiliki ketahanan retak yang lebih baik dibandingkan dengan hidroksiapatit dan *bioactive glass*. Hal tersebut membuat forsterit sebagai kandidat penting pada aplikasi perbaikan jaringan keras tubuh manusia [6].

Freund *et al.* menyatakan bahwa forsterit dapat dikompositkan dengan karbon. Jika atom karbon ditambahkan pada sistem forsterit, karbon akan berperan dalam kesetimbangan cacat titik dari forsterit [7]. Keberadaan karbon dan forsterit dalam bentuk komposit dapat meningkatkan sifat isolator panas dan ketahanan oksidasi forsterit [8].

Forsterit dapat disintesis dari berbagai material sebagai sumber Mg dan Si. Perbedaan mineral sebagai sumber Mg dan ukuran partikelnya berdampak terhadap tingkat kekerasan dan ketahanan oksidasi [8]. Sedangkan

Si, selain dari kuarsa, dapat diperoleh juga dari arang sekam padi. Selain silika, arang sekam padi juga mengandung karbon [9, 10] sehingga sangat berpotensi sebagai bahan baku pada sintesis komposit forsterit/karbon.

Arang sekam padi diperoleh dari hasil pirolisis sekam padi pada suhu 400-800 °C [11]. Sekam padi merupakan produk samping dari proses penggilingan padi dengan nilai pemanfaatannya yang masih relatif terbatas. Pada penggilingan padi sebagai gabah kering giling (kadar air 14%) dihasilkan 57-60% beras, 20-22% sekam, dan 8-10% dedak [12]. Rhaman *et al.* menyatakan bahwa berdasarkan analisis proksimat, pada sekam padi terdapat 14,4% *fixed carbon* dan 22,3% abu, dengan kadar silika dalam abu sekam padi sekitar 80% [11].

Forsterit telah disintesis oleh Chen *et al.* dari campuran antara silika pirogenik dan hidromagnesit ($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) pada rentang suhu 700-1100 °C, dan diperoleh hasil bahwa forsterit dengan reaktivitas tertinggi diperoleh pada suhu 1100 °C [13]. Hossain *et al.* telah mensintesis forsterit dari MgO sebagai sumber Mg, dan kuarsa serta abu sekam padi sebagai sumber Si dengan mengkaji pengaruh kadar bahan-bahan tersebut

terhadap pembentukan dan morfologi forsterit [3]. Sedangkan Ratnawulan & Fauzi telah melakukan sintesis dan karakterisasi forsterit dari batuan *dunite* (MgO alam) Sumatera dari Kecamatan Bonjol, Kabupaten Pasaman, Sumatera Barat [14].

Penelitian ini bertujuan menyiapkan dan mengkarakterisasi arang sekam padi dari sekam padi Sumedang, dan mempelajari pengaruh suhu kalsinasi dalam medium udara terhadap pembentukan forsterit dari MgCO_3 sebagai sumber Mg dan arang sekam padi sebagai sumber Si.

II. METODOLOGI PENELITIAN

II.1 Alat dan bahan penelitian

Alat penelitian terdiri dari 3 kelompok utama, yaitu alat untuk: preparasi karbon dan silika dari sekam padi, sintesis forsterit, dan karakterisasi arang sekam padi dan forsterit. Preparasi karbon dan silika dari sekam padi dilakukan dengan alat-alat berupa gasifier, penggerus porselen, ayakan 50 mesh (merk Retsch), penyaring *vacuum*, dan bejana pemurnian bertipe tangki berpengaduk. Alat untuk formulasi campuran reaktan dan sintesis forsterit digunakan bejana pencampur, pengecil ukuran

(penggiling) tipe *planetary ball mill* (merk Retsch GmbH, model PM 400), oven, dan tanur (merk Thermoline TM, jelajah suhu operasi 100-1200 °C) sedangkan karakterisasi dilakukan dengan spektrometer FTIR (*Fourier Transform Infrared*, merk Bruker Tensor 27), dan difraktometer XRD (*X-ray Diffraction*, merk Phillips Analytical PW1710).

Bahan utama dan pendukung yang digunakan meliputi sekam padi (sebagai sumber karbon dan silika dalam bentuk arang sekam padi yang dikoleksi dari pabrik penggilingan padi di daerah Sumedang, Jawa Barat), magnesium karbonat (MgCO_3 99%, Sigma-Aldrich), akuades, dan larutan HCl 1 M (Sigma-Aldrich).

II.2 Metode pengumpulan dan analisis data

Data penelitian diperoleh dari eksperimen laboratorium. Eksperimen dilakukan dalam 3 tahap, yaitu: preparasi prekursor, sintesis forsterit, dan karakterisasi arang sekam padi serta forsterit yang dihasilkan.

Prekursor karbon dan silika disiapkan dalam bentuk arang sekam padi melalui gasifikasi sekam padi pada suhu 600 °C [11, 15]. Arang sekam padi hasil gasifikasi selanjutnya digerus, diayak agar diperoleh arang

dengan ukuran lolos 50 mesh, kemudian arang dicuci dengan larutan HCl 1 M secara merata untuk melarutkan logam-logam pengotor [10].

Sintesis forsterit diawali dengan mencampurkan MgCO_3 sebagai sumber Mg dan arang sekam padi sebagai sumber Si dengan rasio mol $\text{MgCO}_3/\text{SiO}_2$ sebesar 2:1. Campuran kemudian digiling dengan menggunakan *planetary ball mill* sebanyak 2 tahap, yaitu penggilingan kering selama 30 menit, dilanjutkan dengan penggilingan basah (sampel berbentuk pasta sebagai hasil pencampuran prekursor sintesis dengan akuades pada rasio 2:1 b/v) selama 30 menit dengan *planetary ball mill*. Sebelum dikalsinasi, pasta hasil penggilingan tersebut dikeringkan pada suhu 60 °C di dalam oven. Kalsinasi pada tahap pembentukan forsterit dilakukan pada suhu 700, 800, 900, dan 1000 °C selama 2 jam dalam medium udara dengan laju kenaikan suhu 10 °C/menit.

Karakterisasi untuk identifikasi gugus fungsi dilakukan dengan FTIR terhadap arang sekam padi, silika hasil ekstraksi, dan forsterit hasil sintesis. Analisis pembentukan dan tingkat kemurnian forsterit dari variasi perlakuan suhu kalsinasi dilakukan dengan XRD.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

III.1 Preparasi dan karakterisasi arang sekam padi

Arang sekam padi pada penelitian ini diperoleh dari gasifikasi sekam padi pada suhu 600 °C. Penampilan fisik arang sekam padi hasil gasifikasi ditampilkan pada Gambar 1. Berdasarkan analisis kadar abu, arang sekam padi dari hasil gasifikasi pada penelitian ini memiliki kadar abu sebesar 60,40%, sedangkan sisanya adalah karbon. Sementara itu Dunnigan *et al.* memperoleh hasil bahwa kadar abu pada arang sekam padi sebanyak 55,7% [9]. Sebagai rujukan, Ghorbani *et al.* melaporkan bahwa pada abu sekam padi dari proses gasifikasi terdapat silika sebanyak 85,15% [10]. Oleh karena itu potensi silika pada arang sekam padi pada penelitian ini sekitar 51,43%.

Gambar 1. Arang sekam padi lolos 50 mesh dari gasifikasi pada suhu 600 °C

Gugus-gugus fungsi pada arang sekam padi diidentifikasi dengan FTIR

dan dibandingkan dengan gugus-gugus fungsi pada silika hasil ekstraksi dari arang sekam padi. Perbandingan spektra FTIR dan uraian jenis-jenis gugus fungsi dari arang sekam padi dan silika hasil ekstraksi dari sekam padi ditampilkan pada Gambar 2 dan Tabel 1.

Pada Gambar 2 dan Tabel 1 ditampilkan puncak yang menunjukkan vibrasi ulur simetris dari $\equiv\text{Si-O}$ pada ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$) pada bilangan gelombang 798 cm^{-1} pada arang sekam padi, dan 800 cm^{-1} pada silika hasil ekstraksi arang sekam padi. Perbedaan yang cukup jelas terlihat pada bilangan gelombang di atas 3000 cm^{-1} .

Gambar 2. Spektra FTIR: (a) arang sekam padi, (b) silika hasil ekstraksi

Tabel 1. Spektrum FTIR dari Silika Standar, Arang Sekam Padi, dan Silika Hasil Ekstraksi

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm ⁻¹)		
	Silika Standar ^a	Arang Sekam Padi	Silika Hasil Ekstraksi
Vibrasi tekuk $\equiv\text{Si-O}$ dari $(\equiv\text{Si-O-Si}\equiv)$	460	469,6	481,0
Vibrasi ulur simetris dari $\equiv\text{Si-O}$ pada $(\equiv\text{Si-O-Si}\equiv)$	798	798	799
Vibrasi ulur $\equiv\text{Si-O}$ dari $\equiv\text{Si-OH}$	1630	1564	1634
Vibrasi ulur asimetris $\equiv\text{Si-O}$ dari $(\equiv\text{Si-O-Si}\equiv)$	1088	1095	1086
Vibrasi ulur O-H dari $\equiv\text{Si-OH}$	3200-3600	3748	3434

^aHossain *et al.* [3]

Pada Gambar 2(b), puncak melebar pada bilangan gelombang 3434 cm⁻¹ menunjukkan adanya vibrasi ulur O-H yang menandakan adanya gugus OH dari silanol. Selain itu gugus OH terikat juga ditunjukkan dengan adanya puncak pada bilangan gelombang 955,6 & 1217,2 cm⁻¹ [16]. Sedangkan pada Gambar 2(a), puncak yang muncul hanya berupa puncak kecil sehingga diperkirakan hanya terdapat gugus OH bebas. Keberadaan karbon ditunjukkan oleh serapan kecil bilangan gelombang 1564,1 cm⁻¹ yang menandakan adanya karbon sp².

III.2 Sintesis dan karakterisasi forsterit

Sintesis forsterit dari MgCO₃ sebagai sumber Mg dan arang sekam padi

sebagai sumber Si dan C (pada rasio mol MgCO₃/SiO₂ sebesar 2:1) dilakukan dengan metode kalsinasi dalam medium udara. Suhu kalsinasi dipelajari pada suhu 700 - 1000 °C dengan interval 100 °C untuk mengetahui dinamika pembentukan struktur forsterit. Keberadaan udara selama kalsinasi menyebabkan komposit forsterit/karbon tidak terbentuk sebagai dampak seluruh karbon teroksidasi oleh udara menjadi gas CO dan/ CO₂.

Pada tahap pertama, dinamika pembentukan struktur forsterit tersebut ditentukan berdasarkan spektra hasil karakterisasi dengan FTIR. Puncak-puncak serapan pada berbagai bilangan gelombang spektra FTIR sampel forsterit hasil sintesis dibandingkan dengan spektra forsterit standar. Pada forsterit, puncak serapan dengan FTIR di bilangan gelombang sekitar 3400, 1016, 987, 883, 832, 609, dan (440 & 508) cm⁻¹ berturut-turut merupakan gugus OH terikat, ulur asimetris Si-O-Si, vibrasi ulur simetris Si-O-Mg, vibrasi ulur asimetris Si-O-Mg, ulur simetris Si-O-Si, vibrasi tekuk SiO₄, dan vibrasi ulur oktahedral MgO₆ [3, 17]. Sedangkan pada tahap kedua dilakukan penentuan jenis mineral yang terdapat pada

forsterit/karbon dari kondisi kalsinasi optimum dengan XRD.

Hasil karakterisasi gugus fungsi dari setiap forsterit sebagai dampak perubahan suhu kalsinasi dalam medium udara ditampilkan pada Gambar 3 dan Tabel 2.

Gambar 3. Spektra FTIR forsterit pada variasi suhu kalsinasi dalam medium udara dan spektra pada inset adalah gugus OH terikat

Spektra FTIR dari forsterit pada Gambar 3 menunjukkan adanya kecenderungan bahwa seiring peningkatan suhu kalsinasi, puncak-puncak serapan yang menunjukkan adanya vibrasi tekuk SiO_4 dan vibrasi ulur simetris dan asimetris Si-O-Mg semakin kuat/jelas dan tajam. Sedangkan vibrasi ulur oktahedral MgO_6 nampak mulai terdeteksi pada suhu kalsinasi 900 dan 1000 °C walaupun dengan ketajaman puncak spektra yang masih relatif terbatas.

Tabel 2. Spektrum FTIR Forsterit pada Variasi Suhu Kalsinasi dalam Medium Udara

Gugus Fungsi	Bilangan Gelombang (cm^{-1})				
	Hossain et al. [3]	Suhu Kalsinasi ($^{\circ}\text{C}$)			
		700	800	900	1000
GF-1	508	-	-	-	-
GF-2	609	-	-	618	615
GF-3	832	-	837	841	841
GF-4	883	-	-	899	899
GF-5	987	-	-	960	961
GF-6	1016	1045	-	1008	1007
GF-7	3400	3425	3424	3424	3429

Keterangan: GF-1: vibrasi ulur oktahedral MgO_6 , GF-2: vibrasi tekuk SiO_4 , GF-3: vibrasi ulur simetris Si-O-Si , GF-4: vibrasi ulur asimetris Si-O-Mg , GF-5: vibrasi ulur simetris Si-O-Mg , GF-6: vibrasi ulur asimetris Si-O-Si , GF-7: vibrasi ulur O-H dari H_2O .

Pada suhu kalsinasi 700 dan 800 °C, sesuai data pada Gambar 3 dan Tabel 2, sebagian besar ikatan kimia pada struktur forsterit belum terbentuk. Ikatan vibrasi tekuk SiO_4 sudah mulai terbentuk pada suhu kalsinasi 900 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu kalsinasi 900 °C ini energi yang dibutuhkan untuk membentuk SiO_4 tetrahedral sudah cukup, sehingga reaksi pembentukan forsterit sudah terjadi pada suhu tersebut. Kesimpulan ini juga didukung dengan adanya puncak-puncak serapan dari vibrasi ulur simetris dan asimetris Si-O-Mg yang mulai muncul pada suhu 900 °C. Selain ikatan-ikatan pada pembentukan forsterit, terdapat puncak pada bilangan gelombang sekitar 3400 cm^{-1} . Bilangan gelombang ini menunjukkan

keberadaan gugus OH dari air sebagai dampak peristiwa adsorpsi uap air pada permukaan forsterit.

Kalsinasi pada suhu 1000 °C, sesuai spektra FTIR, ikatan-ikatan kimia pada struktur forsterit (Si–O–Mg dan Si–O–Si) telah terbentuk secara lengkap dan jelas. Kesimpulan ini sama dengan hasil dari penelitian Matur *et al.* [18] yang mensintesis forsterit dari MgO dan abu sekam padi dengan kalsinasi (*solid-state route*) dalam medium udara. Oleh karena itu suhu 1000 °C ditentukan sebagai suhu kalsinasi optimum pada pembentukan forsterit.

Komposit forsterit yang dihasilkan dari kalsinasi pada 1000 °C selanjutnya ditentukan kandungan jenis mineralnya dengan metode XRD. Pola difraktogram XRD dari forsterit tersebut ditampilkan pada Gambar 4. Pola-pola difraktogram dari forsterit pada Gambar 4 menunjukkan puncak-puncak tajam dengan intensitas rendah sampai tinggi pada beberapa sudut yang didominasi oleh fase forsterit.

Pada forsterit hasil sintesis masih dijumpai mineral pengotor. Puncak dengan intensitas tinggi pada sudut $2\theta = 42,5^\circ$ dan 62° menunjukkan adanya periklas yang merupakan polimorf dari magnesium oksida (MgO). Periklas dapat terbentuk dari reaksi dekomposisi MgCO_3 menjadi MgO dan gas CO_2 .

Keberadaan periklas mengindikasikan sebagian MgO belum bereaksi dengan silika membentuk forsterit. Forsterit terbentuk dari MgCO_3 dan SiO_2 menurut 3 tahapan reaksi berikut [19]:

Gambar 4. Pola difraktogram forsterit dari kalsinasi pada suhu 1000 °C dalam medium udara

Selain periklas, pada forsterit hasil sintesis juga terdapat mineral pengotor berupa *brucite*. *Brucite* merupakan polimorf dari magnesium hidroksida, $\text{Mg}(\text{OH})_2$. *Brucite* dapat terbentuk dari reaksi antara MgO (yang terdekomposisi dari MgCO_3) dengan uap air yang terdapat dalam udara. *Brucite* memiliki titik leleh 350 °C, jauh lebih rendah daripada titik leleh forsterit, dengan nilai rata-rata koefisien ekspansi termal rata-rata *brucite* pada rentang suhu 20-310 °C sebesar

$10,9 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ [20]. Oleh karena itu keberadaan *brucite* di dalam forsterit akan mengurangi keunggulan sifat termal dari forsterit secara signifikan. Selain itu, *brucite* sebagai material bersifat basa memiliki sifat mudah larut dalam larutan asam. Akibatnya, kandungan *brucite* di dalam forsterit akan berdampak terhadap penurunan ketahanan kimia dari forsterit. Keberadaan *brucite* sebagai pengotor dapat dikurangi atau bahkan dicegah melalui minimalisasi atau meniadakan keberadaan uap air di lingkungan di dalam reaktor sintesis forsterit. Uap air dapat dihilangkan dengan mengalirkan gas *inert* (misalnya gas nitrogen atau argon) selama tahap sintesis forsterit. Namun tentunya metode sintesis forsterit dengan diiringi pengaliran gas *inert* akan meningkatkan biaya proses produksi.

IV. KESIMPULAN

Arang sekam padi berpotensi sebagai sumber silika dan karbon untuk bahan baku pembuatan forsterit maupun komposit forsterit/karbon.

Suhu kalsinasi dalam medium udara mempengaruhi proses pembentukan ikatan-ikatan kimia pada struktur forsterit. Semakin tinggi suhu kalsinasi, ikatan-ikatan kimia dari struktur forsterit

semakin terbentuk. Kalsinasi dalam medium udara pada suhu 1000°C merupakan suhu optimum pada sintesis forsterit dari magnesium karbonat dan arang sekam padi. Pada kondisi sintesis tersebut semua ikatan kimia dari struktur forsterit telah terbentuk berdasarkan hasil karakterisasi dengan FTIR.

Forsterit hasil sintesis pada suhu optimum, berdasarkan hasil XRD, didominasi oleh fase forsterit. Mineral pengotor jenis periklas dan *brucite* masih dijumpai pada forsterit sebagai dampak reaksi yang belum sempurna dan terjadinya reaksi samping.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kosanovic, C., Stubicar, N., Tomasic, N., Bermanec, V., M. Stubicar, M., "Synthesis of a Forsterite Powder by Combined Ball Milling and Thermal Treatment", *Journal of Alloys and Compounds* 389[1] 306-309 (2005)
2. Xu, P.K., Wei, G.Z., "New Process Technology for Refractory", Metallurgy Industry Press, Beijing, 2005.
3. Hossain, S. K. S., Mathur, L., Singh, P., Majhi, M.R., "Preparation of Forsterite Refractory Using Highly Abundant Amorphous Rice Husk

- Silica for Thermal Insulation”, *Journal of Asian Ceramic Societies* 5[2] 82-87 (2017)
4. Pack, A., Palme, H., Michael, J., Shelley, G., “Origin of Chondritic Forsterite Grains”, *Geochimica et Cosmochimica Acta* [69] 3159-3182 (2005)
 5. Whitby, R.L.D., Brigatti, K.S., Kinloch, I.A., Randall, D.P., Maekawa, T., “Novel Mg_2SiO_4 Structures”, *Chemistry Communication* 2396-2397 (2004)
 6. Saidi, R., Fathi, M., Salimjazi, H., “Synthesis and Characterization of Bioactive Glass Coated Forsterite Scaffold for Tissue Engineering Applications”, *Journal of Alloys and Compounds* [727] 956-962 (2017)
 7. Freund, F., Kathreen, H., Wengeler, H., Knobel, R., Heinen, H.J., “Carbon in Solid Solution in Forsterite - A Key to the Untractable Nature of Reduced Carbon in Terrestrial and Cosmogenic Rocks, *Geochimica et Cosmochimica Acta* [44] 1319-1333 (1980)
 8. Ohtsuki, Y., Komatsu, N., Watanabe, A., Saeki, G., Forsterite-Carbon Refractory, *United States Patent*. No. 4.497.901 (1985)
 9. Dunnigan, L., Ashman, P.J., Zhang, X., Kwong, C.W., “Production of Biochar from Rice Husk: Particulate Emissions from the Combustion of Raw Pyrolysis Volatiles”, *Journal of Cleaner Production* [172] 1639-1645 (2018)
 10. Ghorbani, F., Sanati, A. M., & Maleki, M., “Production of Silica Nanoparticles from Rice Husk as Agricultural Waste by Environmental Friendly Technique”, *Environmental Studies of Persian Gulf* 1[2] 56-65 (2015)
 11. Rhaman, M.T., Haque, M.A., Rouf, M.A., Siddique, M.A.B., Islam, M.S., “Preparation and Characterization of Activated Carbon and Amorphous Silica from Rice Husk”, *Bangladesh J. Sci. Ind. Res.* 4[50] 263-270 (2015)
 12. Rachmat, R., Suismono, “Model Penggilingan Padi Terpadu untuk Meningkatkan Nilai Tambah”, *Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian* 2[8] 99-111 (2012)
 13. Chen, L., Ye, G., Wang, Q., Blanpain, B., Malfliet, A., Guo, M., “Low Temperature Synthesis of Forsterite from Hydromagnesite and Fumed Silica Mixture”, *Ceramics International* [41]: 2234-2239 (2015)
 14. Ratnawulan, Fauzi, A., “Synthesis and Characterization of Forsterite (Mg_2SiO_4) Nanomaterials of Dunite from Sumatera”, *Book Chapter: Recent Advances in Pyrolysis*, IntechOpen, 2019.

15. Zhang, Y., Zhai, M., Wang, X., Sun, J., Dong, P., Liu, P., Zhu, Q., "Preparation and Characteristic of Biomass Char", *BioResource* [10] 3017-3026 (2015)
16. Tran, T.N., Pham, T.V.A., Le, M.L.P., Nguyen T.P.T., Tran, V.M., "Synthesis of Amorphous Silica and Sulfonic Acid Functionalized Silica Used as Reinforced Phase for Polymer Electrolyte Membrane, *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 4[4] 1-6 (2013)
17. Yan, W., Liu, D., Tan, D., Yuan, P., Chen, M., "FTIR Spectroscopy Study of the Structure Changes of Palygorskite under Heating", *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* [97] 1052-1057 (2012)
18. Mathur, L., Hossain, S.K.S., Majhi, M.R., Roy, P.K., "Synthesis of nano-crystalline forsterite (Mg_2SiO_4) powder from biomass rice husk silica by solid-state route. *Boletin De La Sociedad Espanola De Ceramica Y Vidrio* [57] 112-118 (2018)
19. Tavangarian, F., Emadi, R., Shafyei, A., "Influence of Mechanical Activation and Thermal Treatment Time on Nanoparticle Forsterite Formation Mechanism", *Powder Technology* [198] 412-416 (2010)
20. Redfern, S.A.T., Wood, B.J., "Thermal Expansion of Brucite, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ", *American Mineralogist* [77] 1129-1132 (1992)