



## Karakteristik Fisis Aluminosilikat Geopolimer Berbasis Silika Sekam Padi untuk Aplikasi *Fast Ionic Conductor*

Agus Riyanto<sup>\*</sup>, Simon Sembiring, dan Junaidi

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung  
Jl. Prof. Dr. Soemantri Brodjonegoro No.1 Bandarlampung 35145, Telp./Fax. (0721)704625/(0721)704625

<sup>\*</sup>Penulis korespondensi: physicsriyanto@gmail.com

### Abstract

**PHYSICAL CHARACTERISTIC OF ALUMINOSILICATE GEOPOLYMER BASED ON RICE HUSK SILICA FOR FAST IONIC CONDUCTOR APPLICATION.** *The study aims to investigate the effect of calcination temperatures on the phase formation and electrical properties of aluminosilicate geopolimer prepared from rice husk silica and sodium aluminate. The samples were calcined at temperature from 150 to 550°C, the development of structures was characterized using x-ray diffraction (XRD) and the electrical properties were measured by LCR meter. The result obtained indicated the significant role of calcining temperature on phase transformation of boehmite and quartz into aluminosilicate geopolimer, in which at calcining temperatures from 450 to 550°C, and the samples were dominated by semicrystal to amorphous phase which indicated that the aluminosilicate geopolimer has been formed. The presence of aluminosilicate geopolimer resulted in increased ionic electrical conductivity and dielectric loss factor as well as decrease dielectric constant. Ionic electrical conductivity of the calcined sample at 450°C is  $4.49 \times 10^{-5}$  S/cm at frequency of  $5 \times 10^6$  Hz, and XRD analysis demonstrated that the main structure is phase of semicrystal aluminosilicate geopolimer. Based on these character, the sample was considered is very suitable used to the fast ionic conductor materials.*

**Keywords:** *aluminosilicate; phase; rice husk; electrical properties*

### Abstrak

Studi ini bertujuan untuk menginvestigasi efek suhu kalsinasi pada formasi fasa dan sifat listrik aluminosilikat geopolimer yang dipreparasi dari silika sekam padi dan sodium aluminat. Sampel dikalsinasi pada suhu 150-550°C, perubahan struktur dikarakterisasi menggunakan x-ray diffraction (XRD) dan sifat listrik diukur menggunakan LCR meter. Hasil yang diperoleh mengindikasikan pengaruh yang signifikan suhu kalsinasi pada transformasi boehmite dan quartz menjadi aluminosilikat geopolimer, dimana pada suhu kalsinasi 450-550°C didominasi oleh fasa semikristal hingga amorf yang mencirikan terbentuknya aluminosilikat geopolimer. Terbentuknya struktur aluminosilikat geopolimer diikuti dengan peningkatan konduktivitas listrik ionik, penurunan konstanta dielektrik, serta peningkatan faktor rugi dielektrik. Nilai konduktivitas listrik ionik sampel kalsinasi 450°C ialah  $4,49 \times 10^{-5}$  S/cm pada frekuensi  $5 \times 10^6$  Hz, dan analisis XRD menunjukkan struktur utamanya berupa fasa semikristal aluminosilikat geopolimer. Berdasarkan karakteristik tersebut, sampel yang ditinjau merupakan material dengan konduktivitas ionik yang tinggi sehingga sampel tersebut sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai fast ionic conductor.

**Kata kunci:** *aluminosilikat; fasa; sekam padi; sifat listrik*

**How to Cite This Article:** Riyanto, A., Sembiring, S., dan Junaidi, (2017), Karakteristik Fisis Aluminosilikat Geopolimer Berbasis Silika Sekam Padi untuk Aplikasi *Fast Ionic Conductor*, Reaktor, 17(2), 96-103, <http://dx.doi.org/10.14710/reaktor.17.2.96-103>

## PENDAHULUAN

Aluminosilikat geopolimer dengan rumus umum  $nM_2O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$  (M adalah logam alkali) merupakan material polimer anorganik terhidrat dengan struktur semikristal atau amorf yang tersusun atas unit-unit monomer sialat (Si-O-Al-O). Aluminosilikat geopolimer memiliki kerangka unik berupa jaringan bermuatan negatif atau didominasi dengan pembawa muatan listrik (*hole*) yang memungkinkan terjadinya mobilitas ion sehingga material tersebut memiliki konduktivitas listrik ionik yang tinggi (Hanjitsuwan dkk., 2011; Anirudhan dan Unnithan, 2016; Azimi dkk., 2016). Sebagai contoh, Cui dkk. (2008) dengan menggunakan bahan *tetraethoxysilane* (TEOS) dan aluminium nitrat memperoleh hasil konduktivitas listrik ionik aluminosilikat geopolimer mencapai nilai yang tinggi yaitu  $1,5 \times 10^{-6}$  S/cm pada frekuensi 200 kHz pada temperatur ruang dan medium udara. Selain itu, aluminosilikat geopolimer juga memiliki konstanta dielektrik yang kecil, faktor rugi dielektrik yang besar, kekuatan mekanik yang baik, antikorosi, serta memiliki stabilitas termal dan ketahanan kimiawi yang sangat baik (Cui dkk., 2011; Duxson dkk., 2007; Sharma dkk., 2015). Dengan karakteristik tersebut, aluminosilikat geopolimer sangat potensial dimanfaatkan sebagai bahan konduktor ionik cepat (*fast ionic conductor*) yang banyak diaplikasikan pada baterai dan sensor elektrokimia (Henn dkk., 2008).

Aluminosilikat geopolimer dapat terbentuk dari reaksi prekursor aluminosilikat dan larutan alkali (alkali aktivator) atau dari peleburan alumina dan silika menjadi larutan silikat (Melar dkk., 2013; Geraldo dan Camarini, 2015). Melalui proses polikondensasi (geopolimerisasi), monomer-monomer pada larutan silikat akan tersusun menjadi anion aluminosilikat yang memiliki rantai utama yang disebut polisialat. Jaringan polisialat merupakan jaringan bermuatan negatif yang tersusun atas  $[SiO_4]^{4-}$  dan  $[AlO_4]^{5-}$  tetrahedral yang saling terhubung melalui ikatan kovalen, dan kation yang berasal dari logam alkali seperti  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Li^+$ ,  $Ca^{2+}$ , dan  $Ba^{2+}$  dapat mengisi ke dalam rongga-rongga jaringan tersebut untuk menyeimbangkan muatan negatif  $Al^{3+}$  dalam koordinasi tetrahedral (Abdollahnejad dkk., 2015; Mustafa dkk., 2014).

Produksi bahan *fast ionic conductor* umumnya terkendala pada proses preparasi yang membutuhkan suhu tinggi serta bahan baku yang mahal (Cui dkk., 2008). Namun sebaliknya, preparasi aluminosilikat geopolimer tergolong sederhana dan dapat dilakukan pada tekanan atmosfer serta tidak membutuhkan proses *sintering* untuk solidifikasi (Melar dkk., 2013). Metode sol-gel merupakan metode sederhana yang banyak diaplikasikan untuk mempreparasi bahan tersebut. Pada studi sebelumnya, Zheng dkk (2009) menggunakan metode tersebut untuk mempreparasi geopolimer dari TEOS dan aluminium nitrat dan memperoleh hasil

bahwa struktur geopolimer dalam fasa amorf terbentuk pada suhu kalsinasi 300°C, dan fasa tersebut tidak mengalami perubahan hingga suhu 800°C. Hasil ini juga didukung penelitian Cui dkk. (2011) dengan menggunakan bahan awal dan metode yang sama menunjukkan bahwa pada suhu kalsinasi 800°C struktur geopolimer memiliki fasa amorf.

Selain metode sol-gel, metode yang umum digunakan untuk mempreparasi geopolimer ialah dilakukan dengan teknik aktivasi yaitu dengan mengaktivasi prekursor aluminosilikat dengan alkali aktivator. Teknik ini umumnya diterapkan pada prekursor berupa bahan residu atau bahan alam lokal seperti debu terbang (*fly ash*) (Nurwidayati dkk, 2016), *slag* (Allahverdi dkk, 2011), *clay* (Mustafa dkk, 2014), kaolin (Ramasamy dkk., 2015), dan *red mud* (Ke dkk., 2015). Larutan alkali aktivator yang digunakan dapat berupa NaOH, KOH,  $K_2SiO_3$ , dan  $Na_2SiO_3$  (Al-Bakri dkk., 2011). Sebagai contoh, Kramar dan Ducman (2015) mempreparasi dari *fly ash* yang diaktivasi dengan sodium silikat dan NaOH pada suhu ruang, dan hasilnya struktur geopolimer dengan fasa amorf terbentuk setelah proses polimerisasi pada suhu 20°C. Selain itu, Chen dkk. (2016) mempreparasi geopolimer dari metakaolin, sodium silikat, serta NaOH, dan hasilnya struktur geopolimer dengan fasa amorf terbentuk setelah proses geopolimerisasi pada suhu 20-100°C. Kendala pemanfaatan bahan residu atau bahan alam lokal sebagai prekursor ialah terdapat kandungan pengotor yang terkadang jumlahnya cukup tinggi. Namun, selain bahan-bahan tersebut masih terdapat bahan residu yang lebih potensial yaitu sekam padi.

Sekam padi merupakan sumber silika amorf terbarukan dengan jumlah yang sangat melimpah. Berdasarkan hasil riset diketahui sekam padi memiliki kandungan silika amorf dengan kadar serta kemurnian yang tinggi (Faizul dkk., 2013). Selain itu, silika amorf dapat dengan mudah diekstrak dari sekam padi melalui metode ekstraksi sederhana seperti metode ekstraksi alkalis (Riyanto dkk., 2009; Sembiring, 2011). Pada studi sebelumnya, silika dari sekam padi juga telah terbukti efektif dapat dimanfaatkan untuk mempreparasi berbagai material keramik meliputi borosilikat (Riyanto dkk., 2009), *mullite* (Sembiring dkk., 2014), dan *cordierite* (Sembiring dkk., 2016). Dengan demikian, sangat potensial bila silika dari sekam padi dimanfaatkan sebagai bahan untuk mempreparasi aluminosilikat geopolimer, selain metode yang relatif sederhana, biayanya pun relatif murah.

Artikel ini menyajikan hasil penelitian mengenai karakteristik fisis aluminosilikat geopolimer yang dipreparasi dari silika amorf sekam padi. Secara spesifik, artikel ini memuat hasil identifikasi efek kalsinasi terhadap formasi fasa (struktur kristal) dan karakteristik sifat listriknya. Selain itu, sampel dengan karakteristik terbaik yang potensial untuk aplikasi *fast*

*ionic conductor* juga dipaparkan pada artikel ini. Sampel aluminosilikat geopolimer dipreparasi dengan menggunakan metode sol-gel dan prekursor yang diperoleh dari proses preparasi tersebut selanjutnya dikalsinasi pada rentang suhu 150-550°C. Struktur kristal yang terbentuk dikarakterisasi menggunakan difraksi sinar-x, komposisi kimia dikarakterisasi dengan *energy dispersive spectroscopy* (EDS), dan LCR meter untuk mengukur konduktivitas listrik, konstanta dielektrik, dan faktor rugi dielektrik ( $\tan \delta$ ).

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari sekam padi dari Propinsi Lampung sebagai sumber silika amorf, serbuk  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (*Merck, KGaA Germany*),  $\text{Na}(\text{OH})$  (*Merck, KGaA Germany*),  $\text{HNO}_3$  68% (*RP Chemical Product*). Sampel aluminosilikat geopolimer dikarakterisasi struktur dan sifat fisisnya menggunakan instrumen yang terdiri dari: XRD (Shimadzu XTD-7000 Maxima X), EDS JEOL JSM-6360LA, dan LCR meter (HIOKI 3522-50).

### Preparasi Sampel Aluminosilikat Geopolimer

Sampel dipreparasi menggunakan metode sol-gel dari bahan prekursor silika dari sekam padi dan sodium aluminat sol. Prekursor silika dipreparasi menggunakan teknik ekstraksi alkalis (Riyanto dkk., 2009; Sembiring, 2011), yakni dengan mendidihkan sekam padi dengan larutan sodium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ). Larutan ekstrak selanjutnya disaring hingga diperoleh prekursor silika yang telah terpisah dari pengotor. Sedangkan, sodium aluminat sol dipreparasi dari 5 gram  $\text{Al}(\text{OH})_3$  yang dilarutkan ke dalam 50 ml sodium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dan diaduk selama 2 jam. Preparasi sampel aluminosilikat geopolimer dilakukan dengan mencampurkan prekursor silika dan sodium aluminat sol dengan perbandingan volume 5:1 dan kemudian ditambahkan larutan  $\text{HNO}_3$  hingga dicapai pH 7. Proses pencampuran dilakukan dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* selama 5 jam pada suhu ruang dan tekanan atmosfer. Campuran hasil reaksi disaring hingga diperoleh sampel gel dan selanjutnya dikeringkan pada suhu 110°C hingga diperoleh sampel dalam keadaan kering. Selanjutnya, sampel digiling menggunakan mortar dan pastel dan kemudian diayak hingga diperoleh serbuk dengan ukuran butir maksimum 100  $\mu\text{m}$ . Serbuk tersebut selanjutnya dipres pada cetakan logam dengan tekanan 6,36 MPa hingga diperoleh *pellet* silinder. Baik sampel serbuk maupun *pellet* selanjutnya dikalsinasi pada suhu yang berbeda yakni 150, 250, 350, 450, dan 550°C dengan laju pemanasan (*heating rate*) konstan 5°C/menit dan waktu penahanan (*holding time*) selama 3 jam (Rovnanik dan Šafránková, 2016).

### Karakterisasi

Karakterisasi struktur kristal sampel (serbuk) dilakukan dengan menggunakan XRD Shimadzu XTD-7000 Maxima X pada kondisi operasi menggunakan

Cu-K $\alpha$  pada panjang gelombang ( $\lambda$ ) 0,15418 Å dan pada rentang sudut  $2\theta$  dari 10°-80° dengan kenaikan per 0,02°. Data difraksi yang diperoleh dianalisis menggunakan perangkat lunak PCPDFWIN dengan metode *search-match*, yakni dengan mencocokkan data tersebut dengan *data base International Centre for Diffraction Data* (ICDD) 1997 yang disediakan pada perangkat lunak PCPDFWIN. Sedangkan, komposisi kimia sampel (*pellet*) dikarakterisasi menggunakan EDS JEOL JSM-6360LA.

Karakterisasi sifat listrik yang meliputi konduktivitas listrik ( $\sigma$ ), konstanta dielektrik atau permitivitas relatif riil ( $\epsilon_r$ ), dan faktor rugi dielektrik ( $\tan \delta$ ). Pengukuran dilakukan pada sampel (*pellet*) yang telah dilapisi (*coating*) dengan pasta Ag. Selanjutnya, sampel diukur menggunakan Hioki 3522-50 LCR meter pada rentang frekuensi 42 Hz –  $5 \times 10^6$  Hz. Konstanta dielektrik dan  $\tan \delta$  dihitung menggunakan Persamaan (1) dan (2) (Tripathi dkk., 2015; Khan dkk., 2016).

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 A} \quad (1)$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r} \quad (2)$$

Dengan  $C$  ialah kapasitansi sampel (F),  $\epsilon_0$  permitivitas vakum ( $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m),  $d$  ketebalan sampel (m),  $A$  luas permukaan sampel ( $\text{m}^2$ ), dan  $\epsilon_r''$  ialah permitivitas relatif bagian imajiner (F/m). Permitivitas relatif riil berkaitan dengan jumlah energi yang tersimpan dalam material yang mengalami polarisasi, sedangkan permitivitas bagian imajiner merepresentasikan energi yang hilang, dan  $\tan \delta$  merupakan faktor rugi dielektrik atau faktor kehilangan energi. Permitivitas bagian imajiner ( $\epsilon_r''$ ) berkaitan konduktivitas listrik dan dapat dihitung dengan Persamaan (3) dan (4) (Hanjitsuwan dkk., 2011; Hussien, 2011).

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r'' \omega \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (4)$$

dengan  $\sigma$  ialah konduktivitas listrik (S/m atau dapat dikonversi menjadi S/cm),  $\omega$  ialah frekuensi sudut (rad/s), dan  $f$  ialah frekuensi linier (Hz).

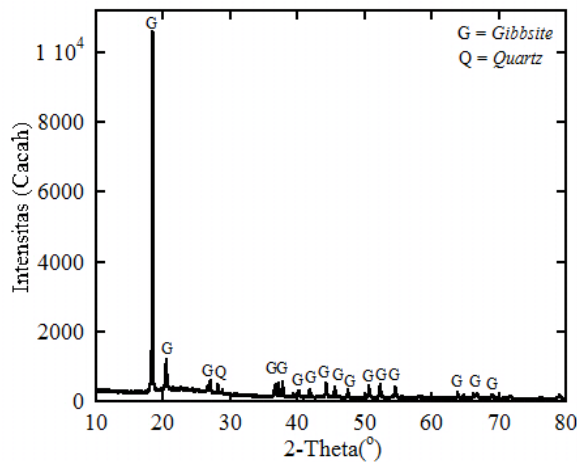
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Fasa dan Komposisi Kimia Aluminosilikat Geopolimer

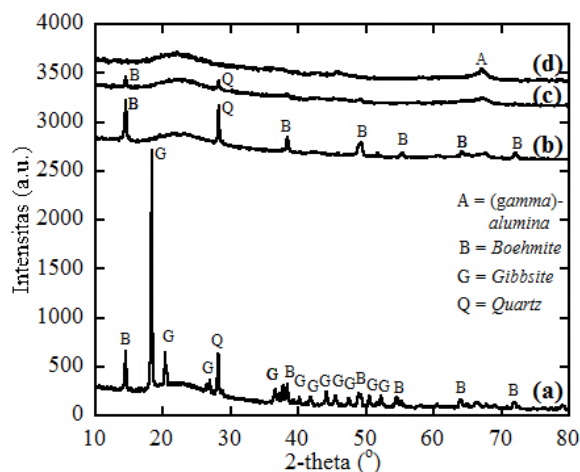
Pola difraksi sinar-x (difraktogram) sampel kalsinasi 150°C ditunjukkan pada Gambar 1. Hasil identifikasi struktur kristal menunjukkan bahwa sampel ini didominasi oleh fasa *gibbsite* ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) yang ditandai dengan terdapatnya puncak difraksi pada  $2\theta$  18,44° (PDF 33-0018). Selain fasa *gibbsite*, juga terdapat fasa *quartz* pada  $2\theta$  28,21° (PDF 47-1300) meskipun dengan intensitas yang sangat kecil. Kehadiran fasa *gibbsite* dan *quartz* mengindikasikan bahwa sampel tersebut tersusun atas fasa-fasa pembentuk struktur aluminosilikat geopolimer.

Sementara itu, hasil analisis XRD sampel kalsinasi 250 °C disajikan pada Gambar 2a. Hasil

analisis menunjukkan kehadiran fasa *gibbsite*, *quartz*, serta fasa *boehmite* (AlO(OH)) pada  $2\theta$  14,44° (PDF 21-1307). Kehadiran fasa *boehmite* mengindikasikan bahwa peningkatan suhu kalsinasi menyebabkan terjadinya transformasi fasa melalui pelepasan molekul air (Filho dkk., 2016; Zhu dkk., 2010). Terbentuknya fasa *boehmite* pada sampel tersebut juga diperkuat dengan berkurangnya tingkat kristalinitas fasa *gibbsite* yang ditandai dengan semakin meningkatnya nilai *full width at half maximum* (FWHM) puncak difraksi fasa tersebut pada sampel ini dibanding dengan sampel kalsinasi 150°C seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Perbedaan signifikan pola difraksi sampel kalsinasi 350°C (Gambar 2b) dibanding dengan pola difraksi dua sampel sebelumnya (Gambar 1 dan 2a) ialah tidak terdapatnya puncak difraksi fasa *gibbsite*, namun puncak difraksi fasa *boehmite* dan *quartz* semakin dominan. Tampak bahwa pertumbuhan kristal *boehmite* semakin meningkat seiring dengan peningkatan suhu kalsinasi.



Gambar 1. Difraktogram sampel kalsinasi 150°C



Gambar 2. Difraktogram sampel dengan suhu kalsinasi berbeda, (a) 250°C, (b) 350°C, (c) 450°C, dan (d) 550°C

Hasil analisis XRD sampel kalsinasi 450°C disajikan pada Gambar 2c. Pola difraksi yang terbentuk memperlihatkan struktur semikristal yang ditandai

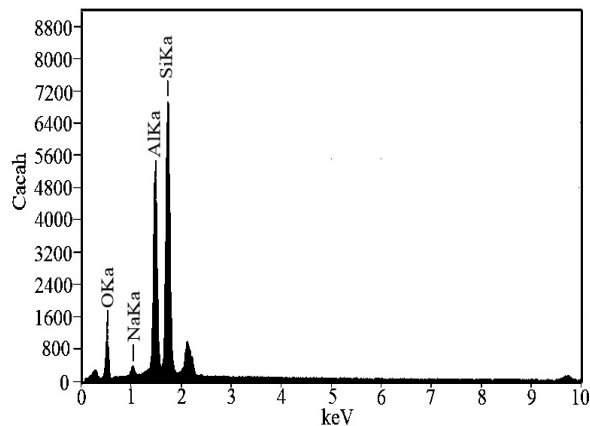
dengan kehadiran puncak difraksi fasa *boehmite* maupun *quartz* dengan intensitas yang kecil. Terbentuknya struktur semikristal menunjukkan bahwa struktur utama aluminosilikat geopolimer berupa jaringan polisialat telah terbentuk melalui proses reaksi polimerisasi dari fasa *boehmite* dan *quartz*. Sesuai dengan hasil penelitian sebelumnya (Sturm dkk., 2016; Sharma dkk., 2015; López dkk., 2014) yang menunjukkan bahwa struktur aluminosilikat berupa struktur semikristal atau amorf. Indikasi terbentuknya struktur utama aluminosilikat geopolimer juga diperkuat dengan semakin melemahnya tingkat kristalinitas fasa *boehmite* dan *quartz* pada sampel ini dibanding dengan sampel kalsinasi 350°C sebagai akibat terjadinya reaksi polimerisasi antara kedua fasa. Hal ini dapat dilihat dari semakin meningkatnya nilai FWHM kedua fasa pada sampel kalsinasi 450°C dibanding dengan sampel kalsinasi 350°C seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. FWHM puncak difraksi fasa-fasa pada sampel kalsiasi 150-550°C

No	Sampel	$2\theta$	Fasa	FWHM (°)
1	150°C	18,44	<i>gibbsite</i>	0,14
2	250°C	18,30	<i>gibbsite</i>	0,26
3	350°C	14,45	<i>boehmite</i>	0,29
		28,35	<i>quartz</i>	0,27
4	450°C	14,45	<i>boehmite</i>	0,37
		28,20	<i>quartz</i>	0,38
5	550°C	67,30	$\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,46

Pada Gambar 2(d) tampak difraktogram sampel kalsinasi 550°C memiliki pola yang tidak jauh berbeda dengan sampel kalsinasi 450°C, namun lebih memperlihatkan struktur dengan fasa amorf. Hal ini mengindikasikan bahwa reaksi polimerisasi pembentukan aluminosilikat geopolimer semakin meningkat dan dimungkinkan sebagian muatan negatif pada rongga-rongga jaringan polisialat telah berikatan dengan kation-kation (Abdullah dkk., 2011; Duxson dkk., 2007). Disisi lain, terdapat puncak difraksi pada  $2\theta$  67,30° yang merupakan puncak difraksi dari fasa (gamma)-alumina ( $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (PDF 47-1308). Fasa ini terbentuk dari sebagian fasa *boehmite* karena pengaruh termal (Zhu dkk., 2010). Dari hasil analisis struktur kristal tampak bahwa suhu kalsinasi memainkan peran yang penting terhadap pembentukan struktur aluminosilikat geopolimer sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Soleimani dkk. (2012).

Hasil analisis komposisi kimia ditunjukkan pada Gambar 3. Hasil analisis spektrum EDS menunjukkan kehadiran unsur silikon (Si), aluminium (Al), oksigen (O), dan sodium (Na) dengan presentase masing-masing ditunjukkan pada Tabel 2. Unsur-unsur tersebut tersusun dalam unit-unit oksida yang merupakan kerangka aluminosilikat geopolimer yakni silikon oksida (SiO<sub>2</sub>), aluminium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dan sodium oksida (Na<sub>2</sub>O) dengan presentase masing-masing ditunjukkan pada Tabel 3. Dengan demikian, hasil analisis EDS memperlihatkan hasil sesuai dengan analisis XRD pembentukan struktur aluminosilikat.



Gambar 3. Hasil analisis EDS pada sampel aluminosilikat geopolimer kalsinasi 550 °C

Tabel 2. Komposisi unsur-unsur penyusun sampel aluminosilikat geopolimer

No	Unsur	Persentase (%)
1	Oksigen (O)	50,54
2	Sodium (Na)	1,00
3	Aluminium (Al)	20,08
4	Silikon (Si)	28,38

Tabel 3. Komposisi senyawa-senyawa penyusun sampel aluminosilikat geopolimer

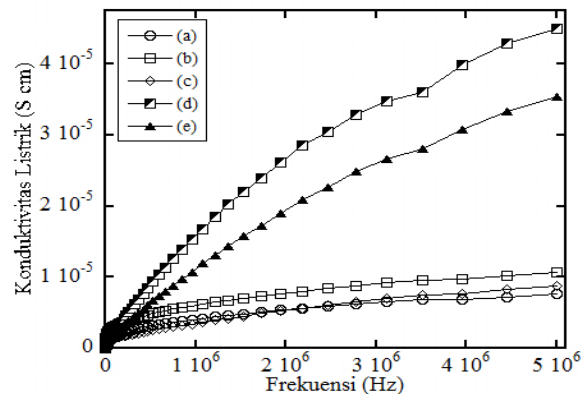
No	Senyawa	Persentase (%)
1	Sodium oksida (Na <sub>2</sub> O)	1,35
2	Aluminium oksida (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	37,93
3	Silikon oksida (SiO <sub>2</sub> )	60,72

**Analisis Sifat Listrik Sampel Aluminosilikat Geopolimer**

Hasil pengukuran nilai konduktivitas listrik pada rentang frekuensi 42-5x10<sup>6</sup> Hz ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konduktivitas listrik meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi. Nilai konduktivitas listrik sampel kalsinasi 450-550°C tampak meningkat lebih tajam seiring dengan meningkatnya frekuensi dibanding dengan sampel kalsinasi 150-350°C. Perbedaan karakteristik nilai konduktivitas listrik tidak terlepas dari perbedaan struktur kristal masing-masing sampel.

Terbentuknya struktur utama aluminosilikat geopolimer berupa jaringan polisialat pada sampel kalsinasi 450°C dan 550°C (Gambar 2c dan 2d) menyebabkan kedua sampel dapat mencapai nilai konduktivitas listrik yang lebih besar (Gambar 4d dan 4e) karena jaringan tersebut tersusun atas banyak pembawa muatan listrik (*hole*) sehingga lebih konduktif. Namun, karena kation sodium (Na<sup>+</sup>) telah menyeimbangkan sebagian *hole* pada sampel kalsinasi 550°C maka nilai konduktivitas listrik pada sampel tersebut lebih kecil dibanding dengan sampel kalsinasi 450°C (Hanjitsuwan dkk., 2011; Cui dkk., 2011). Sementara itu, sampel kalsinasi 150-350°C didominasi oleh struktur yang banyak mengandung molekul air seperti fasa *gibbsite* dan *boehmite* (Gambar 1, 2a, dan 2b) yang menyebabkan timbulnya sifat dielektrik

(isolator terpolarisasi). Sesuai dengan penelitian yang dilakukan Jumrat dkk (2011) bahwa semakin tinggi kandungan molekul air pada geopolimer maka sifat dielektrik semakin kuat. Oleh sebab itu, capaian konduktivitas listrik pada sampel kalsinasi 150-350°C (Gambar 4a, 4b, dan 4c) jauh lebih kecil dibanding dengan sampel kalsinasi 450°C dan 550°C.



Gambar 4. Nilai konduktivitas listrik sampel aluminosilikat geopolimer pada frekuensi 42 – 5.10<sup>6</sup> Hz, (a) kasinasi 150 °C, (b) 250 °C, (c) 350 °C, (d) 450 °C, dan (e) 550 °C

Secara umum, nilai konduktivitas listrik seluruh sampel yang diperoleh dalam penelitian ini mencapai nilai yang tinggi yakni mencapai orde 10<sup>-5</sup> S/cm pada frekuensi 5x10<sup>5</sup> Hz seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Nilai konduktivitas listrik pada Tabel 4 memperlihatkan bahwa sampel aluminosilikat geopolimer memiliki nilai konduktivitas listrik pada wilayah semikonduktor dan termasuk dalam material dengan nilai konduktivitas ionik yang tinggi sesuai dengan penelitian sebelumnya (Irzaman dkk., 2010; Cui dkk., 2008). Namun, berdasarkan nilai konduktivitas listrik ionik yang dicapai, sampel kalsinasi 450°C merupakan sampel dengan nilai konduktivitas listrik ionik yang lebih baik sehingga lebih potensial untuk diterapkan sebagai bahan *fast ionic conductor*.

Tabel 4. Nilai konduktivitas listrik sampel aluminosilikat geopolimer pada frekuensi 5x10<sup>6</sup> Hz

No	Sampel	Konduktivitas listrik (S/cm)
(a)	150°C	0,76.10 <sup>-5</sup>
(b)	250°C	1,07.10 <sup>-5</sup>
(c)	350°C	0,88.10 <sup>-5</sup>
(d)	450°C	4,49.10 <sup>-5</sup>
(e)	550°C	3,54.10 <sup>-5</sup>

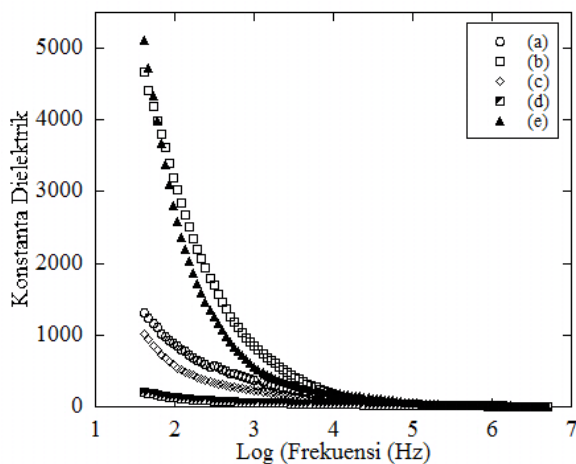
Hasil pengukuran konstanta dielektrik dalam rentang frekuensi 42 – 5x10<sup>6</sup> Hz disajikan pada Gambar 5 dan nilainya ditunjukkan pada Tabel 5. Pada frekuensi rendah (42 – 10<sup>4</sup> Hz) sampel aluminosilikat geopolimer miliki konstanta dielektrik dengan nilai yang besar dan pada frekuensi tinggi (10<sup>4</sup> – 5x10<sup>6</sup> Hz) memiliki nilai yang kecil. Konstanta dielektrik sebanding dengan besarnya polarisasi yang terjadi pada sampel. Pada frekuensi rendah, berbagai jenis



polarisasi (polarisasi dipolar, muatan listrik, ion-ion, dan polarisasi permukaan) sangat mudah dibangkitkan oleh medan listrik. Namun, pada frekuensi tinggi hanya polarisasi muatan listrik saja yang mudah dibangkitkan oleh medan listrik. Oleh sebab itu, nilai konstanta dielektrik semakin menurun seiring dengan peningkatan frekuensi karena polarisasi semakin menurun pada frekuensi tinggi (Khan dkk., 2016; Thakur dkk., 2016). Karakteristik nilai konstanta dielektrik yang diperoleh (Gambar 5) menunjukkan kesesuaian dengan nilai konduktivitas listrik ionik (Gambar 4). Sesuai dengan penelitian Hanjitsuwan dkk. (2011), semakin kecil nilai konstanta dielektrik maka semakin besar nilai konduktivitas listriknya karena polarisasi semakin berkurang.

Tabel 5. Nilai konstanta dielektrik sampel aluminosilikat geopolimer pada rentang frekuensi 42 – 5x10<sup>6</sup> Hz

No	Sampel	Konstanta dielektrik
(a)	150 °C	1.310 – 5,16
(b)	250 °C	4.470 – 6,44
(c)	350 °C	1.020 – 5,66
(d)	450 °C	202 – 5,77
(e)	550 °C	5.110 – 6,53

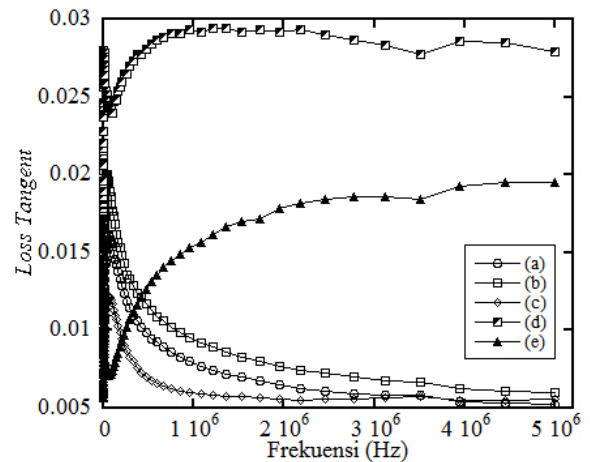


Gambar 5. Nilai konstanta dielektrik ( $\epsilon_r$ ) sampel aluminosilikat geopolimer pada rentang frekuensi 42 – 5x10<sup>6</sup> Hz, (a) kalsinasi 150°C, (b) 250°C, (c) 350°C, (d) 450°C, dan (e) 550°C

Di samping frekuensi, nilai konstanta dielektrik juga dipengaruhi oleh struktur kristal. Terbentuknya struktur utama aluminosilikat geopolimer berupa jaringan yang banyak memiliki pembawa muatan menyebabkan nilai konstanta dielektrik semakin menurun seperti teramati pada nilai konstanta dielektrik sampel kalsinasi 450°C (Gambar 5d) yang cenderung konsisten dengan nilai yang relatif kecil, baik pada frekuensi rendah maupun tinggi. Di sisi lain, meskipun struktur aluminosilikat telah terbentuk, namun sampel kalsinasi 550°C memiliki nilai yang sangat tinggi pada frekuensi rendah diprediksi disebabkan oleh kehadiran fasa  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang memiliki nilai konstanta dielektrik yang besar (Robertson, 2004; Narang dan Bahel, 2010).

Sementara itu, keberadaan fasa *gibbsite* dan *boehmite* yang kaya akan molekul air menyebabkan sampel kalsinasi 150-350°C lebih mudah mengalami polarisasi karena molekul air bersifat polar dan akibatnya nilai konstanta dielektrik pada frekuensi rendah jauh lebih besar dibanding dengan sampel kalsinasi 450°C (Jumrat dkk., 2011). Dengan meninjau nilai konstanta dielektrik, sampel kalsinasi 450°C memiliki potensi yang lebih baik untuk dimanfaatkan sebagai *fast ionic conductor* karena konstanta dielektriknya cenderung konsisten dengan nilai yang kecil baik pada frekuensi rendah maupun tinggi.

Hasil pengukuran faktor rugi dielektrik (*loss tangent*) ditunjukkan pada Gambar 6. Sampel kalsinasi 150-350°C (Gambar 6a, 6b, dan 6c) memiliki pola dengan karakteristik yang mirip yakni semakin menurun seiring dengan meningkatnya frekuensi, sedangkan sampel kalsinasi 450°C dan 550°C (Gambar 6d dan 6e) keduanya memiliki pola semakin meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi. Kemiripan bentuk pola nilai faktor rugi dielektrik tak terlepas dari pengaruh struktur kristal dan sifat konduktif sampel (Khan dkk., 2016).



Gambar 6. Grafik *Loss tangent* (faktor rugi dielektrik) sampel aluminosilikat geopolimer pada frekuensi 42 – 5x10<sup>6</sup> Hz, a) kalsinasi 150°C, (b) 250°C, (c) 350°C, (d) 450°C, dan (e) 550°C

Terbentuknya struktur utama aluminosilikat geopolimer pada sampel kalsinasi 450°C dan 550°C menyebabkan kedua sampel lebih konduktif (Gambar 4d dan 4e) akibatnya nilai faktor rugi dielektrik kedua sampel semakin meningkat dengan meningkatnya frekuensi karena nilai faktor rugi dielektrik sebanding dengan konduktivitas listrik sesuai hasil penelitian sebelumnya (Khan dkk., 2016). Sebaliknya sampel kalsinasi 150-350°C memperlihatkan faktor rugi dielektrik yang semakin menurun seiring meningkatnya frekuensi karena nilai konduktivitas listrik ketiga sampel tidak mengalami peningkatan yang signifikan seiring peningkatan frekuensi. Faktor rugi dielektrik sampel kalsinasi 450°C lebih besar dibanding sampel yang lain, sehingga lebih potensial dimanfaatkan sebagai bahan *fast ionic conductor* (Lim dkk., 2017; Khan dkk., 2016).

## KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa silika sekam padi sangat potensial dimanfaatkan untuk menyintesis aluminosilikat geopolimer. Pembentukan struktur aluminosilikat geopolimer dengan fasa semikristal hingga amorf semakin meningkat seiring dengan naiknya suhu kalsinasi dari 150-550°C melalui reaksi polimerisasi fasa *boehmite* dan *quartz*. Terbentuknya struktur aluminosilikat geopolimer diikuti peningkatan nilai konduktivitas listrik dan nilai faktor rugi dielektrik, sebaliknya konstanta dielektrik semakin menurun. Nilai optimum konduktivitas listrik sampel aluminosilikat geopolimer dicapai oleh sampel dengan kalsinasi 450°C yaitu sebesar  $4,49 \times 10^{-5}$  S/cm pada frekuensi  $5 \times 10^6$  Hz. Sampel tersebut merupakan sampel paling potensial untuk dijadikan sebagai material *fast ionic conductor* karena memiliki nilai konduktivitas listrik jauh lebih tinggi dibanding dengan sampel yang lain.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada LPPM Universitas Lampung yang mendanai penelitian ini melalui hibah DIPA Universitas Lampung.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdollahnejad, Z., Pacheco-Torgal, F., Félix, T., Tahri, W., and Barroso-Aguiar, J., (2015), Mix Design, Properties and Cost Analysis of Fly Ash-Based Geopolymer Foam, *Construction and Building Materials*, 80, pp. 18-30.
- Abdullah, M.M.A., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K.N., and Ibrahim, W.M.W., (2011), Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement-A Review, *Int. J. Pure Appl. Sci. Technol.*, 6(1), pp. 35-44.
- Al-Bakri, A.M.M., Kamarudin, H., Buhussain, M., Nizar, I.K., and Mastura, W.I.W., (2011), Mechanism and Chemical Reaction of Fly as Geopolymer Cement - A Review, *Journal of Asian Scientific Research*, 1(5), pp. 247-253.
- Allahverdi, A, Kani, E., and Yazdanipour, M., (2011), Effects of Blast Furnace Slag on Natural Pozzolan-Based Geopolymer Cement, *Ceramics-Silikáty*, 55(1), pp. 68-78.
- Anirudhan, V.P. and Unnithan, A., (2016), Review on Development of Geopolymer Composites from Aluminosilicate Materials, *International Journal of Scientific Engineering and Research*, 4(3), pp. 2014-2017.
- Azimi, E.A., Mustafa, M., Bakri, A., Ming, L.Y., Yong, H.C., Hussin, K., and Aziz, I.H., (2016), Processing and Properties of Geopolymers as Thermal Insulating Materials : A Review, *Rev. Adv. Mater. Sci.*, 44, pp. 273-285.
- Chen, L., Wang, L., Wang, Y., and Feng, J., (2016), Preparation and Properties of Alkali Activated, *Materials*, 9(767), pp. 1-12.
- Cui, X.M., Liu, L.P., He, Y., Chen, J.Y., and Zhou, J., (2011), A Novel Aluminosilicate Geopolymer Material with Low Dielectric Loss, *Materials Chemistry and Physics*, 130, pp. 1-4.
- Cui, X.-M., Zheng, G.-J., Han, Y.-C., Su, F., and Zhou, J., (2008), A Study on Electrical Conductivity of Chemosynthetic  $Al_2O_3-2SiO_2$  Geopolymer Materials, *Journal of Power Sources*, 184, pp. 652-656.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J.L., Lukey, G.C., Palomo, A., and Van Deventer, J.S.J., (2007), Geopolymer Technology: The Current State of the Art, *Journal of Materials Science*, 42(9), pp. 2917-2933.
- Faizul, C.P., Abdullah, C., and Fazlul, B., (2013), Review of Extraction of Silica from Agricultural Wastes Using Acid Leaching Treatment, *Advance Materials Research*, 626, pp. 997-1000.
- Filho, R.W.N.D., Rocha, G.de A., Montes, C.R., and Vieira-Coelho, A.C., (2016), Synthesis and Characterization of Boehmites Obtained from Gibbsite in Presence of Different Environments, *Materials Research*, 19(3), pp. 659-668.
- Geraldo, R.H. and Camarini, G., (2015), Geopolymers Studies in Brazil: A Meta-Analysis and Perspectives, *International Journal of Engineering and Technology*, 7(5), pp. 390-396.
- Hanjitsuwan, S., Chindaprasirt, P., and Pimraksa, K., (2011), Electrical Conductivity and Dielectric Property of Fly Ash Geopolymer Pastes, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 18(1), pp. 94-99.
- Henn, F., Garcia-Belmonte, G., Bisquert, J., Devautour-Vinot, S., and Giuntini, J.C., (2008), Dielectric Losses Measured in A Sodium Aluminosilicate Glass by Using Electrical Insulating Barriers and Non-Isothermal Experimental Conditions, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(29), pp. 3443-3450.
- Hussien, B., (2011), The DC and AC Electrical Properties of (PMMA- $Al_2O_3$ ) Composites, *European Journal of Scientific Research*, 52(2), pp. 1450-216.
- Irzaman, Maddu, A., Syafutra, H., dan Ismangil, A., (2010), Uji Konduktivitas Listrik dan Dielektrik Film Tipis Lithium Tantalate ( $LiTaO_3$ ) yang Dididat Niobium Pentaoksida ( $Nb_2O_5$ ) Menggunakan Metode Chemical Solution Deposition, *Prosiding Seminar Nasional Fisika 2010*, hal. 175-183.
- Jumrat, S., Chatveera, B., and Rattanadecho, P., (2011), Dielectric Properties And Temperature Profile of Fly Ash-Based Geopolymer Mortar, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38(2), pp. 242-248.

- Ke, X., Bernal, S.A., Ye, N., Provis, J.L., and Yang, J., (2015), One-Part Geopolymers Based on Thermally Treated Red Mud/NaOH Blends, *J. Am. Ceram. Soc.* 98(1), pp. 5-11.
- Khan, M.S., Sohail, M., Khattak, N.S., and Sayed, M., (2016), Industrial Ceramic Waste in Pakistan, Valuable Material for Possible Applications, *Journal of Cleaner Production*, 139, pp. 1520-1528.
- Kramar, S. and Ducman, V., (2015), Mechanical and Microstructural Characterization of Geopolymer Synthesized from Low Calcium Fly Ash, *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 21(1), pp. 13-22.
- Lim, C., Teoh, K.H., Ng, H.M., Liew, C.-W., and Ramesh, S. (2017), Ionic Conductivity Enhancement Studies of Composite Polymer Electrolyte Based on Poly (Vinyl Alcohol)-Lithium Perchlorate-Titanium Oxide, *Advanced Materials Letters*, 8(4), pp. 465-471.
- López, F.J., Sugita, S., Tagaya, M., and Kobayashi, T., (2014), Geopolymers Using Rice Husk Silica and Metakaolin Derivatives; Preparation and Their Characteristics, *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2(5), pp. 35-43.
- Melar, J., Bednarik, V., Slavik, R., and Pastorek, M., (2013), Effect of Hydrothermal Treatment on the Structure of An Aluminosilicate Polymer, *Central European Journal of Chemistry*, 11(5), pp. 782-789.
- Mustafa, N.Y., Mohsen, Q., and El-Maghraby, A., (2014), Characterization of Low-Purity Clays for Geopolymer Binder Formulation, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 21(6), pp. 609-619.
- Narang, S.B. and Bahel, S., (2010), Low Loss Dielectric Ceramics for Microwave Applications : A Review, *Journal of Ceramic Processing Research*, 11(3), pp. 316-321.
- Nurwidayati, R., Ulum, M.B., Ekaputri, J.J., Triwulan, and Suprobo, P., (2016), Characterization of Fly Ash on Geopolymer Paste, *Materials Science Forum*, 841, pp. 118-125.
- Powder Diffraction File (Type PDF-2), *Diffraction Data for XRD Identification*, International Centre for Diffraction data, PA USA (1997).
- Ramasamy, S., Hussin, K., Abdullah, M.M.A.B., Ghazali, C.M.R., Sandu, A.V., Binhussain, M., and Shahedan, N.F., (2015), Recent Dissertations on Kaolin based geopolymer materials, *Reviews on Advanced Materials Science*, 42(1), pp. 83-91.
- Riyanto, A., Ginting, O.M., and Simon, S., (2009), Pengaruh Suhu Sintering Terhadap Pembentukan Gugus Borosiloksan (B-O-Si) Bahan Keramik Borosilikat Berbasis Silika Sekam Padi, *Prosiding Seminar Nasional Sains MIPA dan Aplikasinya*, Universitas Lampung, 1, hal. 219-224.
- Robertson, J., (2004), High Density Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition of Optical Thin Films, *The European Physical Journal Applied Physics*, 28, pp. 265-291.
- Rovnaník, P. and Šafránková, K., (2016), Thermal Behaviour of Metakaolin/Fly Ash Geopolymers with Chamotte Aggregate, *Materials*, 9(7), pp. 1-13.
- Sembiring, S., (2011), Synthesis and Characterisation of Rice Husk Silica Based Borosilicate (B<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>) Ceramics by Sol-Gel Routes, *Indonesia Journal of Chemistry*. 11(1), pp. 85-89.
- Sembiring, S., Simanjuntak, W., Manurung, P., Asmi, D., and Low, I.M., (2014), Synthesis and Characterisation of Gel-derived Mullite Precursors from Rice Husk Silica, *Ceramics International*, 40(5), pp. 7067-7072.
- Sembiring, S., Simanjuntak, W., Situmeang, R., Riyanto, A., and Sebayang, K. (2016), Preparation of Refractory Cordierite Using Amorphous Rice Husk Silica for Thermal Insulation Purposes, *Ceramics International*, 42(7), pp. 8431-8437.
- Sharma, S., Medpelli, D., Chen, S., and Seo, D.-K., (2015), Calcium-modified Hierarchically Porous Aluminosilicate Geopolymer as a Highly Efficient Regenerable Catalyst for Biodiesel Production, *RSC Adv. Royal Society of Chemistry*, 5(80), pp. 65454-65461.
- Sturm, P., Gluth, G.J.G., Brouwers, H.J.H., and Kühne, H.C., (2016), Synthesizing One-Part Geopolymers from Rice Husk Ash, *Construction and Building Materials*, 124, pp. 961-966.
- Thakur, S., Rai, R., Bdikin, I., and Valente, M.A., (2016), Impedance and Modulus Spectroscopy Characterization of Tb modified Bi<sub>0.8</sub>A<sub>0.1</sub>Pb<sub>0.1</sub>Fe<sub>0.9</sub>Ti<sub>0.1</sub>O<sub>3</sub> Ceramics, *Materials Research*, 19(1), pp. 1-8.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., Ganesan, P., Monash, P., and Dey, T.K., (2015), Effect of Microwave Frequency on Dielectric Properties Of Oil Palm Shell (OPS) and OPS Char Synthesized by Microwave Pyrolysis of OPS, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 112, pp. 306-312.
- Zheng, G., Cui, X., Zhang, W., and Tong, Z., (2009), Preparation of Geopolymer Precursors by Sol-Gel Method and their Characterization, *Journal of Materials Science*, 44(15), pp. 3991-3996.
- Zhu, B., Fang, B., and Li, X., (2010), Dehydration Reactions and Kinetic Parameters of Gibbsite, *Ceramics International*, 36, pp. 2493-2498.