

PENINGKATAN SIFAT GLASS-CERAMICS FLY ASH TERVITRIFIKASI DENGAN PENAMBAHAN 30 WT.% ALUMINIUM SILIKAT DAN PENGATURAN SUHU SINTER

Nurzal¹⁾ *, Putri Pratiwi¹⁾, Nofriady Handra¹⁾, Mastariyanto Perdana²⁾, Hafni²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Mesin Sarjana, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Padang

²⁾Program Studi Teknik Mesin Diploma, Fakultas Vokasi, Institut Teknologi Padang

*Corresponding Author E-mail: nurzal@itp.ac.id

Abstract

This study investigates the effects of adding 30 wt.% aluminum silicate and varying sintering temperatures on the density and hardness of vitrified fly ash glass ceramics. Fly ash, a waste by product from coal combustion at the Suralaya thermal power plant has long posed environmental challenges. To mitigate these impacts, this research explores its utilization in producing glass ceramics. The samples were prepared as cylindrical samples with a diameter of 15 mm and thickness of 5 mm, and were fabricated using uniaxial pressing at 120 MPa. The samples were sintered at 1050, 1100, and 1150 °C with a heating rate of 5 °C/min. Experimental results reveal that adding 30 wt.% AS significantly improves the density from 2.31 to 2.51 g/cm³ and hardness from 443 to 2418.55 MPa compared to 100 wt.% fly ash. Optimal density and hardness were achieved at a sintering temperature of 1150 °C.

Keywords: Vitrification, Fly Ash, Aluminum Silicate, Glass-Ceramics, Sintering, Density, Hardness

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh penambahan 30 wt.% aluminium silikat serta variasi suhu sinter terhadap densitas dan kekerasan material glass-ceramics berbasis fly ash yang tervitrifikasi. Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap Suralaya dan telah lama menjadi permasalahan lingkungan. Sebagai upaya mitigasi dampak tersebut, penelitian ini mengeksplorasi pemanfaatan fly ash dalam produksi material glass-ceramics. Sampel penelitian berbentuk silinder dengan diameter 15 mm dan ketebalan 5 mm dibuat melalui metode penekanan uniaxial pada tekanan 120 MPa. Sampel-sampel tersebut disinter pada suhu 1050 °C, 1100 °C, dan 1150 °C dengan laju pemanasan sebesar 5 °C/menit. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa penambahan 30 wt.% aluminium silikat secara signifikan meningkatkan densitas material dari 2,31 menjadi 2,51 g/cm³ serta kekerasan dari 443 menjadi 2418,55 MPa dibandingkan dengan menggunakan 100 wt.% fly ash. Kondisi optimal densitas dan kekerasan diperoleh pada suhu sinter 1150 °C.

Kata Kunci: Vitrifikasi, Fly Ash, Aluminium Silikat, Glass-Ceramics, Sintering, Densitas, Kekerasan

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik selalu meningkat seiring dengan pesatnya pertumbuhan ekonomi, populasi dan perkembangan industri. Sumber energi yang tersedia dalam memenuhi kebutuhan energi ini sangat bervariasi mulai dari energi yang bersumber dari bahan bakar fosil hingga energi baru dan terbarukan. Di Indonesia, bahan bakar fosil masih menjadi pilihan utama sebagai sumber energi. Pada tahun 2020 diketahui sumber energi utama didominasi oleh Batubara sebanyak 38% dan minyak bumi sebanyak 32%. Hal ini juga sejalan dengan rencana pemerintah dalam menargetkan percepatan pembangunan infrastruktur ketenagalistrikan yaitu pembangkit tenaga listrik 40.575 MW yang hampir setengahnya sumber energinya masih berasal dari bahan bakar fosil (48%) [1].

Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar menghasilkan limbah atau residu berupa *fly ash* dan *bottom ash* akibat proses pembakaran yang tidak sempurna [2]. *Fly ash* merupakan residu dari proses pembakaran bahan bakar atau proses peleburan material metalurgi yang masuk ke aliran gas buang dan dikumpulkan oleh perangkat kontrol emisi atau langsung keluar melalui cerobong asap. Sementara *bottom ash* adalah abu yang tersisa di tungku pembakaran [3].

Berbagai penelitian menunjukkan pembuangan limbah hasil pembakaran batu bara telah menjadi beban karena mengganggu siklus lingkungan dan ekonomi. *Fly ash* sebagai salah satu produk sampingan dari pembakaran batu bara mengandung SiO_2 (35– 60%), CaO (1 – 35%), Al_2O_3 (10 – 30%), Fe_2O_3 (4 – 20%) dan oksida logam lainnya. Selain itu, $\text{PM}_{2.5}$, NO_x , CO_2 , dan SO_x , polutan udara yang dikenal sangat berbahaya bagi kesehatan manusia terus meningkat di lingkungan karena produksi jutaan ton *fly ash* ini [4]. Walaupun demikian, kandungan senyawa anorganik pada *fly ash* memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan pada sektor industri.

Pemanfaatannya *fly ash* di sektor industri baru sedikit yaitu kurang lebih 20 sampai 30 %. Oleh karena itu perlu dicari suatu solusi untuk mengatasi masalah tersebut dengan cara memanfaatkan *fly ash* sebagai *raw material* dalam pembuatan *glass-ceramics* [5]. *Glass-ceramics* dapat diaplikasi pada sektor konstruksi, pelapis tahan panas, dan material elektronik. Pembuatan *glass-ceramics* dari *fly ash* menggunakan proses vitrifikasi dengan memanaskan *fly ash* pada suhu tinggi sehingga terbentuk struktur kaca yang stabil dan kristalin sehingga dapat meningkatkan kekerasan dan ketahanan terhadap suhu tinggi [6]. Salah satu cara meningkatkan sifat fisis *glass-ceramics* adalah dengan menambahkan bahan lain, seperti aluminium silikat (AS), yang diketahui dapat memperbaiki sifat fisik dari *glass-ceramics*, termasuk kekerasan, densitas, dan ketahanan terhadap suhu tinggi. Aluminium silikat memiliki titik leleh tinggi dan dapat meningkatkan pembentukan kristalin dalam material, sehingga memberikan kekuatan mekanik yang lebih baik [7]. Suhu sintering yang optimal sangat penting untuk mendapatkan material dengan densitas yang tinggi dan kekerasan yang baik. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa suhu sintering yang efektif untuk menghasilkan *glass-ceramics* dengan sifat fisis terbaik berkisar antara 1050 °C hingga 1150 °C [8]. Proses vitrifikasi *fly ash* (Fav) dilakukan dengan cara memanaskan material tersebut pada suhu tinggi untuk membentuk struktur kaca dan kristalin. Proses ini mengubah *fly ash* yang pada awalnya merupakan material berpori menjadi material padat yang memiliki sifat mekanik yang lebih baik. Dengan kontrol suhu sintering yang tepat, *fly ash* dapat diubah menjadi *glass-ceramics* yang memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi, kekerasan, dan ketahanan terhadap korosi [6].

Aluminium silikat (As) merupakan senyawa anorganik yang digunakan dalam pembuatan *glass-ceramics* karena dapat meningkatkan ketahanan thermal dan kekerasan material. Aluminium silikat dapat memperbaiki struktur kristalin dalam *glass-ceramics* dan meningkatkan sifat mekanik material, seperti kekerasan dan densitas [7]. Penambahan aluminium silikat dalam komposisi *fly ash* telah terbukti dapat meningkatkan kualitas *glass-ceramics* yang dihasilkan berupa kekerasan dan ketahanan thermal dari material tersebut [9]. Rahmawati et al. (2020) meneliti tentang penambahan aluminium silikat dapat mengubah fase kaca menjadi lebih stabil dengan pembentukan kristal yang lebih baik dengan meningkatnya sifat fisis dari *glass-ceramics* berbasis *fly ash* [7]. Suhu sintering sangat berpengaruh pada pembentukan struktur kaca dan kristalin dalam *glass-ceramics*. Sintering dilakukan pada suhu yang cukup tinggi untuk memungkinkan terjadinya pengikatan antar partikel dan pembentukan kristal. Suhu sintering yang optimal dapat menghasilkan *glass-ceramics* dengan densitas dan kekerasan yang lebih baik. Suhu sintering yang rendah dapat menyebabkan terbentuknya kaca dengan densitas rendah, sementara suhu sintering yang tinggi dapat menyebabkan material menjadi rapuh atau terlalu lunak. Zhao et al. (2017) meneliti tentang suhu sintering yang lebih tinggi, sekitar 1150 °C, menghasilkan *glass-ceramics* dengan densitas dan kekerasan yang optimal [8]. Dalam penelitian lain oleh Liu et al. (2020), suhu sintering yang tepat juga terbukti sangat berpengaruh terhadap ketahanan thermal dan kekerasan material *glass-ceramics* berbasis *fly ash* [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh penambahan 30 wt% aluminium silikat dan pengaturan suhu sintering terhadap peningkatan densitas dan kekerasan dari *glass-ceramics* berbasis *fly ash* yang ter vitrifikasi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi baru dalam pengelolaan *fly ash* dan menghasilkan material *glass-ceramics* yang ramah lingkungan serta bernilai ekonomis.

2. METODOLOGI

2.1 Bahan Penelitian

Fly ash tervitrifikasi digunakan sebagai matrik dan diperoleh dari PLTU Suralaya, FA ini memiliki karakteristik berupa warna abu-abu, berbentuk serbuk dengan ukuran partikel 74 - 53 μm .

Aluminium silikat sebagai penguat diperoleh dari Multi Kimia Raya Nusantara Semarang, berbentuk serbuk berwarna putih dengan ukuran partikel kecil dari 53 μm .

Mollases digunakan sebagai binder untuk membantu pengikatan bahan sewaktu kompaksi.

Resin digunakan untuk *mounting* specimen.

Fly ash tervitrifikasi digunakan sebagai matriks dan diperoleh dari PLTU Suralaya. Material ini memiliki warna abu-abu, berbentuk serbuk, dengan ukuran partikel antara 74–53 μm . Aluminium silikat digunakan sebagai material penguat, yang diperoleh dari Multi Kimia Raya Nusantara, Semarang, berbentuk serbuk berwarna putih dengan ukuran partikel kurang dari 53 μm . *Mollases* digunakan sebagai binder untuk meningkatkan pengikatan material selama proses kompaksi. Sementara itu, resin digunakan dalam proses *mounting* spesimen.

2.2 Cara Penelitian

Fly ash yang telah divitrifikasi ditimbang dengan komposisi 70 wt.% dan dicampurkan dengan 30 wt.% As. Campuran tersebut di-*mixing* selama 5 jam untuk memastikan homogenitasnya. Setelah itu, spesimen dicetak dalam bentuk silindris menggunakan uniaxial pressing dengan tekanan sebesar 120 MPa. Proses sintering dilakukan pada suhu 1050 °C, 1100 °C, dan 1150 °C. Setelah sintering, spesimen diuji untuk mengukur densitas dan kekerasan menggunakan metode Vickers.

2.3 Pengujian Spesimen

Densitas aktual dianalisis menggunakan prinsip Archimedes dan dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$\rho = \left(\frac{W_{udara}}{W_{udara} - W_{fluida}} \right) \times \rho_{fluida} \quad \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

W_{udara} = berat di udara (gr)
 W_{fluida} = berat dalam fluida (gr)
 ρ_{fluida} = densitas fluida (gr/cm³)

Pengukuran kekerasan dalam penelitian ini dilakukan menggunakan metode Vickers. Beban diaplikasikan secara bertahap tanpa menyebabkan beban kejut dan ditahan selama 10–15 detik. Pengujian kekerasan Vickers dilakukan sesuai dengan standar JIS Z 2251, dan nilai kekerasan Vickers dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

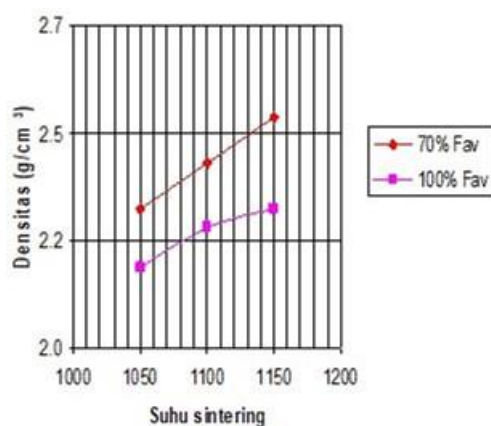
dimana:

HV = angka kekerasan Vickers (MPa)
P = pembebanan (N)
d = diagonal rata-rata akibat pembebanan Vickers (mm)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Densitas

Pengujian densitas dilakukan dengan menggunakan teori Archimedes dengan menggunakan spesimen yang telah di-sinter pada suhu 1050, 1100 dan 1150 °C. Spesimen yang telah di-sinter ditimbang terlebih dahulu di udara (W_{udara}), kemudian ditimbang di dalam air (W_{fluida}). Penimbangan dalam air menyebabkan berat spesimen berkurang sebesar berat fluida air yang dipindahkan. Berdasarkan prinsip ini, densitas aktual komposit dapat dihitung menggunakan persamaan (1).



Gambar 1. Hubungan antara densitas dengan suhu *sintering*

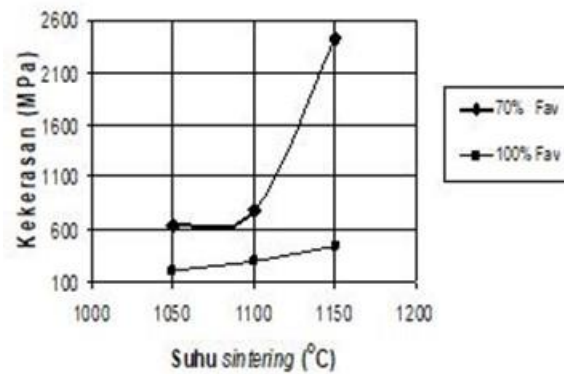
Gambar 1. menunjukkan hasil pengujian spesimen yang disinter pada suhu 1050, 1100, dan 1150 °C. Penambahan 30 wt.% aluminium silikat (As) ke dalam komposisi 70 wt.% fly ash ter vitrifikasi (FAV) meningkatkan densitas spesimen dari 2,31 menjadi 2,51 g/cm³. Nilai densitas ini lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan komposisi 100 wt.% FAV, yang memiliki densitas berkisar antara 2,18–2,31 g/cm³. Densitas optimal diperoleh setelah spesimen disinter pada suhu 1150 °C.

Namun, jika dibandingkan dengan penelitian Karamanov et al. [11], nilai densitas yang Gambar 1. menunjukkan hasil pengujian spesimen yang disinter pada suhu 1050, 1100, dan 1150 °C. Penambahan 30 wt.% aluminium silikat (As) ke dalam komposisi 70 wt.% fly ash ter vitrifikasi (FAV) meningkatkan densitas spesimen dari 2,31 menjadi 2,51 g/cm³. Nilai densitas ini lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan komposisi 100 wt.% FAV, yang memiliki densitas berkisar antara 2,18–2,31 g/cm³. Densitas optimal diperoleh setelah spesimen disinter pada suhu 1150 °C.

diperoleh dalam penelitian ini lebih rendah. Perbedaan tersebut disebabkan oleh metode yang digunakan Karamanov, di mana sebelum proses kompaksi dan sintering, fly ash terlebih dahulu divitrifikasi dengan cara dilebur pada suhu 1350 °C selama 4 jam, kemudian di-blending hingga ukuran partikel di bawah 45 µm. Proses peleburan ini menyebabkan sebagian partikel menguap, sehingga selama proses kompaksi dan sintering terbentuk ikatan yang lebih kuat dibandingkan penggunaan fly ash tanpa perlakuan awal. Persamaan antara penelitian ini dan Karamanov adalah penurunan densitas yang terjadi pada suhu sintering 1150 °C.

3.2 Kekerasan

Pengujian kekerasan Vickers dilakukan pada spesimen berbentuk silindris menggunakan beban sebesar 153,2 N. Sebelum pengujian, spesimen di-mounting dalam resin untuk memudahkan proses pemolesan dan pengujian kekerasan. Jejak indentor yang dihasilkan selama pengujian diukur diagonalnya menggunakan mikroskop optik. Nilai kekerasan Vickers dihitung menggunakan Persamaan (2), dan hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan antara densitas dengan suhu *sintering*

Hasil pengujian kekerasan Vickers pada spesimen yang dikompaksi dengan tekanan 120 MPa menunjukkan bahwa penambahan 30 wt.% As ke dalam 70 wt.% F_{AV} menghasilkan kekerasan sebesar 2418,55 MPa. Kekerasan ini jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan kekerasan spesimen pada komposisi 100 wt.% F_{AV}, yang hanya mencapai 443 MPa. Suhu sinter optimal pada 1150 °C.

4. KESIMPULAN

Penambahan 30 wt.% aluminium silikat (As) pada 70 wt.% fly ash ter vitrifikasi (FAV) meningkatkan densitas dan kekerasan spesimen. Densitas spesimen meningkat dari 2,31 g/cm³ menjadi 2,51 g/cm³, lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan 100 wt.% FAV. Kekerasan juga meningkat signifikan, mencapai 2418,55 MPa, jauh lebih tinggi daripada spesimen 100 wt.% FAV yang hanya 443 MPa. Suhu sintering optimal yang memberikan hasil terbaik untuk keduanya adalah 1150 °C.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Permatasari, "Analisis manfaat limbah fly ash pada industri bahan baku semen," *ENJUST*, vol. 1, no. 1, pp. 40–50, 2024.
- [2] N. Aini, S. Puslitbang, P. B. Pu, J. Panyawungan, C. Wetan, and K. Bandung, "BATA BETON BERLUBANG DARI ABU BATUBARA (FLY ASH DAN BOTTOM ASH) YANG RAMAH LINGKUNGAN."
- [3] D. C. Adriano, A. L. Page, A. A. Elseewi, A. C. Chang, and I. Straughan, "REVIEWS AND ANALYSES Utilization and Disposal of Fly Ash and Other Coal Residues in Terrestrial Ecosystems: A Review I."
- [4] D. Darmansyah, S.-J. You, and Y.-F. Wang, "Advancements of coal fly ash and its prospective implications for sustainable materials in Southeast Asian countries: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, p. 113895, 2023,
- [5] Tao, X., Yang, M., & Chen, Y. (2018). *Utilization of Fly Ash in the Production of Glass-Ceramics*. Environmental Science and Pollution Research, 25(5), 5046-5053.
- [6] Wu, X., Zhang, H., & Wang, Z. (2019). *Study on the Properties of Glass-Ceramics from Fly Ash*. Journal of Hazardous Materials, 370, 144-151.
- [7] Rahmawati, R., Anwar, D., & Hidayati, A. (2020). *Pengaruh Proses Vitrifikasi Fly Ash terhadap Sifat Fisis Glass-Ceramics*. Jurnal Teknik Material, 12(2), 45-53.
- [8] Zhao, L., Zhang, M., & Liu, Z. (2017). *Effect of Sintering Temperature on the Properties of Glass-Ceramics from Fly Ash*. Journal of Non-Crystalline Solids, 485, 45-53.

- [9] Yuan, Z., Liu, M., & Zhao, L. (2018). *Influence of Aluminosilicate Additions on Glass-Ceramics from Fly Ash*. *Ceramics International*, 44(7), 7826-7832.
- [10] Liu, Y., Zhang, Y., & Wang, Z. (2020). *Fabrication of Glass-Ceramics from Fly Ash: Effects of Sintering Temperature and Composition*. *Materials Science and Engineering B*, 260, 114522.
- [11] Karamonov, A., Pelino, M., Salvo, M., and Metekovits, I., 2003, *Sintered Glass-Ceramics from Incinerators Fly Ash. Part II. The Influence of the Particle Size and Heat-Treatment on the Properties*, *Journal of the European Ceramics Society*, 23, 1609-1615.
- [12] Barsoum, M.W., 1997, *Fundamentals of Ceramics*, Mc Graw-Hill Companies, New York.