

## Studi Pemanfaatan Limbah Lumpur Merah Sebagai Bahan Baku Refraktori dengan Paduan Kaolin, Abu Sekam, dan Pasir Kuarsa Berbasis Potensi Lokal Kalimantan Barat

Dwi Handoko<sup>1)</sup>, Iyus<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Pontianak

E-mail: 1) dwihandokopb@gmail.com, 2) polneppujarianto@gmail.com

### Abstrak

Lumpur merah atau *red mud* adalah limbah yang dihasilkan dari pengolahan bauksit menjadi alumina. Limbah ini seringkali dibuang atau disimpan tanpa diproses atau dimanfaatkan secara optimal sehingga dapat menimbulkan permasalahan lingkungan kemudian hari. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pemanfaatan limbah lumpur merah dengan paduan kaolin, abu sekam dan pasir kuarsa yang merupakan sumber daya alam lokal Kalimantan Barat, untuk dapat dijadikan bahan refraktori. Tantangan dari penelitian ini yaitu menentukan variasi dalam komposisi kaolin, abu sekam dan pasir kuarsa dalam mempengaruhi sifat fisik dan termal dari bahan refraktori yang dihasilkan. Metode penelitian meliputi menganalisis komposisi kimia dan fisik limbah lumpur merah, menguji sampel dari variasi bahan paduan tersebut, serta melakukan pengujian sifat mekanik dan termal. Luaran dari penelitian ini adalah pengembangan bahan refraktori yang efisien dan ramah lingkungan, serta publikasi hasil penelitian dalam jurnal ilmiah. Studi ini berharap tidak hanya memberikan solusi untuk masalah limbah, tetapi juga mengurangi ketergantungan pada impor bahan baku refraktori di Indonesia dengan pemanfaatan sumber daya alam lokal Kalimantan Barat.

Kata Kunci: Lumpur merah, kaolin, abu sekam, pasir kuarsa, refraktori

### Abstract

*Red mud is waste produced from the processing of bauxite into alumina. This waste is often disposed of or stored without being processed or utilized optimally so that it can cause environmental problems in the future. This study was conducted to find out the extent of the use of red mud waste with an alloy of kaolin, husk ash and quartz sand which are local natural resources of West Kalimantan, to be used as refractory materials. The challenge of this study is to determine the variations in the composition of kaolin, husk ash and quartz sand in influencing the physical and thermal properties of the resulting refractory materials. The research methods include analyzing the chemical and physical composition of red sludge waste, testing samples of variations of these alloy materials, and testing mechanical and thermal properties. The output of this research is the development of efficient and environmentally friendly refractory materials, as well as the publication of research results in scientific journals. The study hopes not only to provide a solution to the waste problem, but also to reduce dependence on the import of refractory raw materials in Indonesia by utilizing West Kalimantan's local natural resources.*

*Keywords: Red mud, kaolin, husk ash, quartz sand, refractory*

## 1. PENDAHULUAN

Material refraktori merupakan komponen penting dalam berbagai industri, terutama dalam industri metalurgi, semen, dan petrokimia, yang memerlukan material tahan terhadap suhu tinggi dan lingkungan agresif. Saat ini, industri refraktori masih bergantung pada bahan baku impor seperti alumina dan magnesia sintetik, yang memiliki biaya tinggi dan dampak lingkungan signifikan dalam proses produksinya. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan material refraktori berbasis sumber daya lokal yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Lumpur merah (*red mud*) adalah limbah padat bersifat basa (pH 10–13) yang dihasilkan dari proses ekstraksi alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dari bauksit melalui metode Bayer. Setiap ton alumina yang diproduksi menghasilkan 1–2 ton lumpur merah, dan secara global, diperkirakan 150 juta ton limbah ini dihasilkan per tahun [1]. Di Indonesia, PT. ICA (Indonesia Chemical Alumina) di Kalimantan Barat merupakan salah satu produsen alumina yang menyisakan lumpur merah dalam jumlah signifikan. Limbah ini umumnya ditimbun di lahan khusus, berpotensi mencemari tanah dan air akibat kandungan logam berat (seperti Fe, Al, dan Na) serta sifatnya yang korosif [2].

Pemanfaatan *red mud* sebagai bahan baku sekunder menjadi solusi berkelanjutan. Komposisi lumpur merah ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 30–60%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 10–20%,  $\text{SiO}_2$ : 3–20%) berpotensi dikombinasikan dengan kaolin (sumber aluminosilikat) dan pasir kuarsa (sumber  $\text{SiO}_2$ ) untuk membentuk fase keramik tahan panas seperti mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) atau hercynite ( $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ) setelah sintering [3]. Beberapa penelitian telah menguji penggunaannya dalam material konstruksi, seperti geopolimer, keramik porous, dan refraktori [4]. Refraktori, material tahan panas ( $>1000^\circ\text{C}$ ) yang digunakan di industri baja, semen, dan kiln, biasanya berbasis alumina-kuarsa dengan bahan primer seperti bauksit atau andalusit. Namun, harga bahan baku tersebut terus meningkat, sehingga perlu alternatif berbasis limbah. Penelitian terbaru mengembangkan refraktori berbasis geopolimer dengan penambahan limbah industri seperti pasir kuarsa dan alumina halus. Formulasi ini menunjukkan penyusutan rendah, ketahanan api baik, dan potensi aplikasi pada suhu tinggi, sekaligus mengurangi ketergantungan pada bahan primer alami. Penggunaan limbah juga dapat menurunkan biaya produksi dan dampak lingkungan.

Kaolin dari Singkawang, Kalimantan Barat, seperti kaolin, pasir kuarsa dan lempung bola memiliki total endapan sekitar 1.200.000 m<sup>3</sup>, 930.000 m<sup>3</sup> dan 1.790.000 m<sup>3</sup>. Sinergi ketiga bahan ini belum banyak dieksplorasi, untuk aplikasi refraktori berbasis sumber daya lokal. Pemanfaatan bahan kaolin, abu sekam, dan pasir kuarsa sebagai bahan refraktori telah dilakukan dan hasilnya memiliki kekuatan tekan dan konduktivitas panas yang baik untuk bahan refraktori [5].

## 2. METODE PENELITIAN

### a. Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *red mud*, kaolin, abu sekam, pasir kuarsa, dan binder. Sedangkan sebagai pencampur menggunakan air dengan komposisi tetap untuk masing-masing spesimen. Adapun komposisi tersebut dapat dilihat pada tabel berikut ini :

**Tabel 1.** Komposisi spesimen uji

Sampel	Red Mud (%)	Kaolin (%)	Abu Sekam (%)	Pasir Kuarsa (%)
RKP-1	40	40	10	10
RKP-2	30	50	10	10
RKP-3	20	60	10	10

### b. Prosedur Sintesis Material Refraktori

Prosedur preparasi dimulai dengan pengeringan bahan baku berupa *red mud*, kaolin, abu sekam, dan pasir kuarsa di udara terbuka selama 24 jam, diikuti dengan penghalusan dan pengayakan menggunakan ayakan standar 200 mesh untuk menjamin homogenitas ukuran partikel. Selanjutnya, prekursor dicampur sesuai variasi komposisi yang ditentukan menggunakan *dry mixer* selama 30 menit, kemudian dikompaksi menggunakan cetakan baja berukuran 5x5x5 cm. Sampel hasil cetakan dikeringkan di dalam oven pada suhu 150°C selama 12 jam untuk menghilangkan kadar air residual sebelum memasuki tahap termal. Proses sintering dilakukan di dalam furnace listrik hingga mencapai suhu puncak 1000 °C dengan laju pemanasan 5 °C/menit dan *holding time* selama 2 jam untuk memfasilitasi fusi antar-partikel secara optimal. Tahap akhir melibatkan pendinginan terkontrol di dalam furnace (*furnace cooling*) hingga mencapai suhu ruang untuk meminimalisir risiko retak termal pada sampel.

### c. Pengujian Sifat Fisik dan Mekanik

Kualitas dan kelayakan sampel sebagai material refraktori (tahan api) dievaluasi melalui serangkaian pengujian fisis dan mekanis pasca-sintering. Kekuatan mekanik material pada suhu ruang ditentukan melalui uji kuat tekan (*compressive strength*) menggunakan universal *testing machine* (UTM). Stabilitas dimensi material dianalisis dengan parameter penyusutan bakar (*firing shrinkage*), yang dihitung berdasarkan perbandingan dimensi linear sampel sebelum dan sesudah proses sintering. Selain itu, kemampuan material dalam menahan fluktuasi suhu ekstrem dievaluasi melalui uji ketahanan kejutan termal (*thermal shock resistance*). Pengujian ini dilakukan dengan metode siklus termal, di mana sampel dipanaskan hingga suhu spesifik kemudian didinginkan secara mendadak menggunakan media air (*water quenching*) hingga terjadi kegagalan struktural atau retak pada permukaan sampel. Berdasarkan hasil evaluasi sifat fisis dan mekanis, sampel dengan performa paling optimum dipilih untuk tahap karakterisasi mikrostruktural lanjutan. Investigasi morfologi permukaan partikel dilakukan menggunakan instrumen *Scanning Electron Microscope* (SEM). Pengujian ini dilakukan bersamaan dengan analisis *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) yang bertujuan untuk mengidentifikasi komposisi elemen serta memetakan distribusi unsur kimia utama pada matriks material yang terbentuk selama proses *sintering*. Kombinasi kedua metode ini memberikan gambaran komprehensif

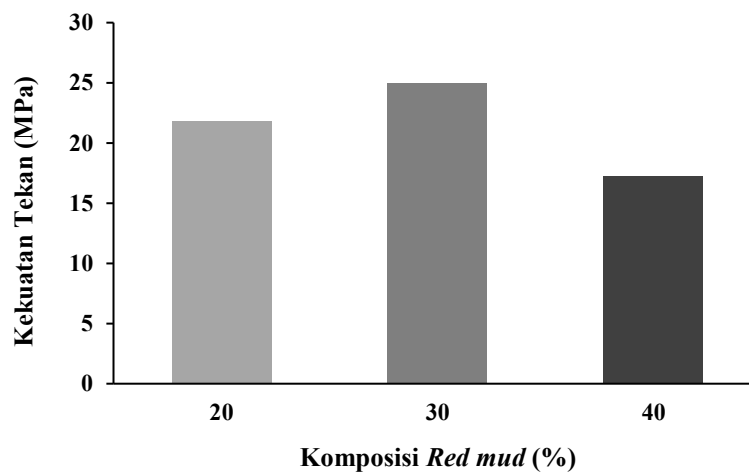
mengenai kualitas ikatan antar partikel dan homogenitas komposisi pada sampel terbaik.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian yang dilakukan yaitu pengujian mekanik berupa uji tekan, uji ketahanan termal dan pengujian SEM/EDS dan pengujian makro yang ditampilkan berupa grafik dan gambar berikut :

**Tabel 2.** Hasil rata-rata pengujian tekan

No	Komposisi Redmud (%)	Bahan					Rata – rata (MPa)
		1	2	3	4	5	
		1	20	24	23	20	
2	30	24	23	20	29	29	24,95 ± 3,53
3	40	12	14	21	23	17	17,26 ± 4,57

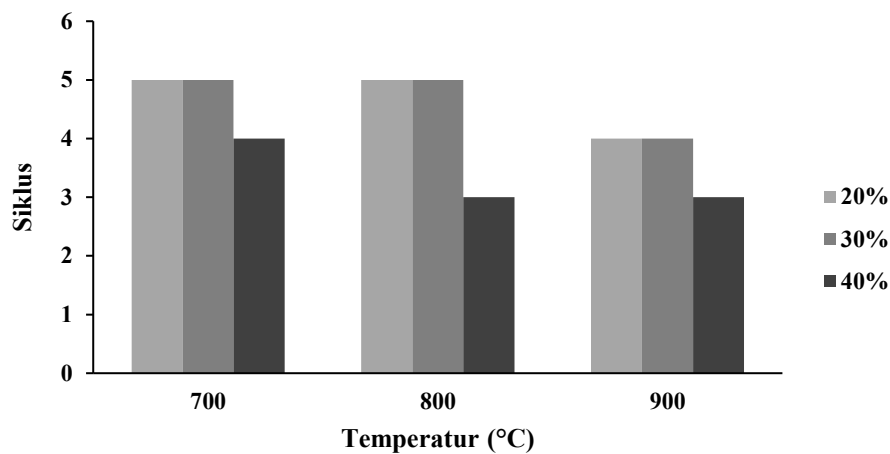


**Gambar 1.** Hasil uji tekan rata-rata

Berdasarkan hasil pengujian tekan memperlihatkan pada komposisi 30% *red mud* (RKP-2) menghasilkan kuat tekan tertinggi 24,95 MPa. Sebaliknya komposisi 20% *red mud* (RKP-3) memiliki kuat tekan 21,83 MPa. Komposisi 40% *red mud* (RKP-1) justru menurun menjadi 17,26 MPa.

**Tabel 3.** Hasil rata-rata siklus pengujian temperatur kejut

Temperatur (°C)	Komposisi Red Mud		
	20%	30%	40%
	<b>Jumlah Siklus</b>		
700	5	5	4
800	5	5	4
900	4	3	3



Gambar 2. Grafik hasil uji temperatur kejut



Gambar 3. Morfologi hasil uji makro (a) temperatur 700 °C pada siklus 5, (b) temperatur 800 °C pada siklus 5, dan (c) temperatur 900 °C pada siklus 4

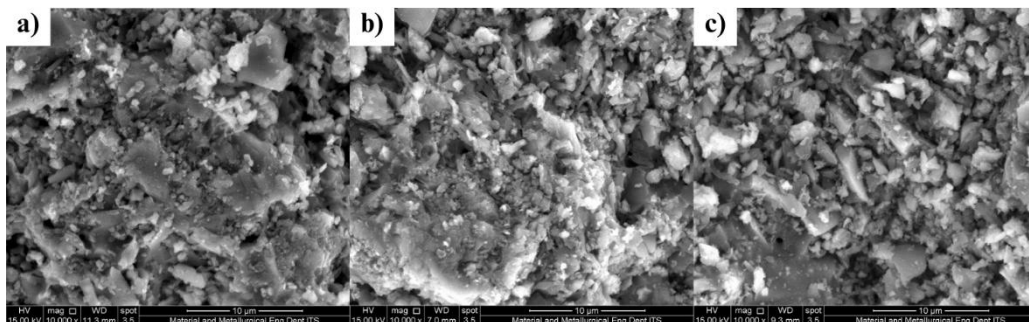
Hasil pengujian temperatur kejut (*thermal shock*) memperlihatkan bahwa sampel RKP-2 dan 3 (20%-30% *red mud*) mampu bertahan hingga 5 siklus pada suhu 700–800°C tanpa retak signifikan. Sedangkan komposisi RKP-1 (40% *red mud*) mengalami retak dan patah setelah 3–4 siklus. Hasil uji makro memperlihatkan warna bata refraktori berubah dari merah bata menjadi merah tua pekat seiring peningkatan *red mud*. Permukaan RKP-2 tampak halus, homogen, dan minim retakan, sedangkan RKP-1 menunjukkan permukaan kasar dan retak halus akibat penyusutan tidak seragam. Warna dan bentuk permukaan menjadi indikator keberhasilan proses *sintering* dan homogenitas pencampuran. Komposisi 30% menghasilkan densitas optimal serta kestabilan dimensi terbaik.

Tabel 4. Hasil rata-rata pengujian konduktivitas termal

No.	Komposisi Red Mud	Rata-rata (°C)		Konduktivitas Termal (J/mm °C)
		T1 (input)	T2 (output)	
1.	20%	428,4	185,6	31,84
2.	30%	447,2	210,8	32,95
3.	40%	433	193,8	32,52

Tabel 5. Berat atom (At%) sampel berdasarkan hasil uji EDS

Unsur	Komposisi Red Mud		
	20%	30%	40%
O	56,60%	54,00%	50,55%
Na	2,47%	3,41%	3,55%
Al	16,79%	16,31%	11,29%
Si	20,47%	23,51%	29,36%
K	0,76%	0,58%	-
Ca	-	0,40%	0,80%
Ti	0,77%	-	-
Fe	2,12%	1,78%	4,44%



Gambar 4. Hasil uji SEM (a) 20%, (b) 30% dan (c) 40%

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai pemanfaatan limbah *red mud* sebagai bahan baku refraktori dengan paduan kaolin, abu sekam, dan pasir kuarsa, dapat disimpulkan bahwa komposisi bahan memiliki pengaruh signifikan terhadap sifat termo-mekanik dan mikrostruktur material yang dihasilkan. Pengujian kuat tekan menunjukkan bahwa komposisi dengan 30% *red mud* (RKP-2) menghasilkan nilai tertinggi, yaitu 24,95 MPa, sementara komposisi 40% (RKP-1) justru mengalami penurunan menjadi 17,26 MPa akibat aglomerasi dan peningkatan porositas [3][6]. Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh [4] yang menyatakan bahwa kandungan  $Fe_2O_3$  dan  $Al_2O_3$  dalam *red mud* dapat meningkatkan sifat mekanik refraktori, namun dalam proporsi berlebih justru menurunkan performa material.

Pada pengujian ketahanan *thermal shock*, sampel dengan 30% *red mud* mampu bertahan hingga 5 siklus pada suhu 700°C dan 800°C, menunjukkan ketahanan termal yang baik. Sementara itu, komposisi 40% *red mud* hanya mampu bertahan 3–4 siklus sebelum mengalami retak. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi optimal *red mud* berada pada rentang 20–30%, di mana keseimbangan antara unsur Al, Si, dan Fe mendukung pembentukan mikrostruktur yang padat dan homogen

[7][8]. Penambahan abu sekam juga berperan dalam meningkatkan kekuatan mekanik dan mengurangi porositas, sebagaimana diungkap oleh [9]. Pengujian konduktivitas termal menunjukkan nilai yang relatif stabil pada ketiga variasi, yaitu sekitar 31–33 J/mm°C, dengan komposisi 30% *red mud* mencatat nilai tertinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa material refraktori yang dihasilkan memiliki sifat isolasi termal yang cukup baik, meskipun tidak terlalu dipengaruhi secara signifikan oleh variasi komposisi *red mud*.

Hasil karakterisasi SEM-EDS memperkuat temuan di atas. Komposisi 30% *red mud* menunjukkan mikrostruktur yang paling padat dan homogen, dengan distribusi unsur Al (20,18%), Si (30,28%), dan Fe (4,56%) yang seimbang. Sebaliknya, komposisi 40% *red mud* menunjukkan adanya aglomerasi, pori-pori besar, dan peningkatan kandungan Fe hingga 10,79%, yang menyebabkan penurunan kekuatan mekanik dan ketahanan termal [10][11]. Struktur yang tidak homogen ini juga teramati melalui uji makro, di mana sampel dengan 40% *red mud* menunjukkan permukaan kasar dan retak halus.

#### 4. KESIMPULAN

Komposisi 30% *red mud* merupakan formulasi optimum dalam paduan kaolin, abu sekam padi, dan pasir kuarsa, menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 24,95 MPa dan ketahanan kejut termal terbaik hingga lima siklus pada 800°C. Kombinasi kandungan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dan SiO<sub>2</sub> pada rasio yang seimbang menghasilkan pembentukan fasa mullite (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>) dan hercynite (FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) yang memperkuat struktur mikro serta meningkatkan stabilitas termal. Kelebihan *red mud* di atas 30% menyebabkan peningkatan kandungan Fe yang membentuk fasa konduktif, meningkatkan porositas, dan menurunkan kekuatan mekanik serta kemampuan isolasi termal. Penambahan 10% abu sekam padi dan pasir kuarsa terbukti memperbaiki densifikasi dan memperkuat isolasi panas melalui peningkatan kandungan silika amorf. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa limbah *red mud* dapat dimanfaatkan sebagai bahan refraktori berkelanjutan, mendukung konsep *waste-to-wealth* dan meningkatkan kemandirian industri bahan tahan api berbasis sumber daya lokal di Kalimantan Barat.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Power, M. Gräfe, and C. Klauber, “Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices,” *Hydrometallurgy*, vol. 108, no. 1, pp. 33–45, Jun. 2011, doi: 10.1016/j.hydromet.2011.02.006.
- [2] Y. Hua, K. V. Heal, and W. Friesl-Hanl, “The use of red mud as an immobiliser for metal/metalloid-contaminated soil: A review,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 325, pp. 17–30, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.073.
- [3] V. M. Sglavo *et al.*, “Bauxite ‘red mud’ in the ceramic industry. Part 1: thermal behaviour,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 20, no. 3, pp. 235–244, Mar. 2000, doi: 10.1016/S0955-2219(99)00088-6.
- [4] Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, and H. Wang, “Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 62, pp. 97–105, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2015.03.013.
- [5] D. Handoko and P. Pujarianto, “Pengaruh Komposisi Pasir Kuarsa Terhadap Sifat Bata Tahan Api (Firebrick) Berbahan Kaolin Dan Fly Ash,” *J. Mesin Nusantara*, vol. 7, no. 1, pp. 113–125, Jun. 2024, doi: 10.29407/jmn.v7i1.21978.

- [6] K. Kaya and S. Soyer-Uzun, "Evolution of structural characteristics and compressive strength in red mud–metakaolin based geopolymer systems," *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 6, pp. 7406–7413, May 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2016.01.144.
- [7] W. Wang, W. Chen, and H. Liu, "Recycling of waste red mud for fabrication of SiC/mullite composite porous ceramics," *Ceram. Int.*, vol. 45, no. 8, pp. 9852–9857, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.ceramint.2019.02.024.
- [8] M. V. Vasić, L. Radovanović, L. Pezo, and Z. Radojević, "Raw kaolinitic–illitic clays as high-mechanical-performance hydraulically pressed refractories," *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 148, no. 5, pp. 1783–1803, Mar. 2023, doi: 10.1007/s10973-022-11848-w.
- [9] C. Rodrigue Kaze *et al.*, "Synergetic effect of rice husk ash and quartz sand on microstructural and physical properties of laterite clay based geopolymer," *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 103229, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103229.
- [10] E. Atan, M. Sutcu, and A. S. Cam, "Combined effects of bayer process bauxite waste (red mud) and agricultural waste on technological properties of fired clay bricks," *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 103194, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103194.
- [11] D. Handoko, "Studi Pengaruh Penambahan Alumina (AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) Terhadap Sifat Mekanis dan Konduktifitas Panas Bahan Refraktori Paduan Kaolin dan Ash," *J. Mesin Nusantara*, vol. 8, no. 1, pp. 149–160, Jul. 2025, doi: 10.29407/jmn.v8i1.26047.