

Analisis Perubahan Mineral Selama Proses Pemanasan Briket Debu Nikel Pada Furnace 4 Yang Berada Di Perusahaan Pengolahan Industri Nikel

Mineralogical Analysis of Phase Changes During the Heating Process of Nickel Dust Briquettes in Furnace 4 of a Nickel Processing Industry

¹Salwa Mawa'ddah Sultan, ²A. Zulfikar Syaiful, ²Fitri Ariani

¹Mahasiswa Prodi Teknik Kimia, Universitas Bosowa

²Dosen Prodi Teknik Kimia, Universitas Bosowa

*Email : salwamawaddahsultan@gmail.com

ABSTRAK

Debu nikel yang dihasilkan dari proses pengolahan bijih nikel laterit masih mengandung unsur logam bernilai yang berpotensi untuk dimanfaatkan kembali melalui teknologi briketisasi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan mineral selama proses pemanasan briket debu nikel pada furnace 4 yang berada di perusahaan pengolahan industri nikel. Briket dibuat dari debu nikel dengan variasi bahan pengikat dan aditif, yaitu air, batubara, dan acrysol. Proses pemanasan dilakukan menggunakan muffle furnace secara bertahap pada suhu 200°C, 700°C, dan 1000°C. Karakterisasi mineral dan unsur dilakukan menggunakan X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), serta analisis unsur (Eltra), sedangkan sifat mekanik briket diuji melalui uji shatter dan uji abrasif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses pemanasan menyebabkan transformasi fasa mineral yang signifikan, ditandai dengan terbentuknya mineral yang lebih stabil seperti magnetit dan forsterit. Briket dengan penambahan batubara dan acrysol menunjukkan kekuatan mekanik dan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Penelitian ini membuktikan bahwa proses briketisasi dan pemanasan terkontrol dapat meningkatkan kualitas debu nikel sehingga layak dimanfaatkan kembali dalam proses peleburan nikel serta mendukung pengelolaan limbah industri yang berkelanjutan.

Kata Kunci : debu nikel, briket, transformasi mineral, pemanasan furnace, XRF.

ABSTRACT

Nickel dust generated from the processing of lateritic nickel ore still contains valuable metallic elements that have the potential to be reused through briquetting technology. This study aims to analyze mineralogical changes occurring during the heating process of nickel dust briquettes in Furnace 4 of a nickel processing industry. The briquettes were produced from nickel dust with variations of binders and additives, namely water, coal, and acrysol. The heating process was carried out using a muffle furnace with a stepwise temperature profile at 200°C, 700°C, and 1000°C. Mineralogical and elemental characterizations were performed using X-Ray Diffraction (XRD), X-Ray Fluorescence (XRF), and elemental analysis (Eltra), while the mechanical properties of the briquettes were evaluated through shatter and abrasive tests. The results indicate that the heating process induces significant mineral phase transformations, characterized by the formation of more stable mineral phases such as magnetite and forsterite. Briquettes containing coal and acrysol exhibited superior mechanical strength and thermal stability compared to other compositions. This study demonstrates that controlled briquetting and thermal treatment can improve the quality of

nickel dust, making it suitable for reuse in nickel smelting processes and supporting sustainable industrial waste management.

Keywords: nickel dust, briquette, mineral transformation, furnace heating, XRF.

PENDAHULUAN

Nikel merupakan salah satu logam strategis yang memiliki peranan penting dalam berbagai sektor industri, khususnya industri baja tahan karat, baterai kendaraan listrik, serta industri kimia dan elektronik. Seiring meningkatnya permintaan global terhadap nikel, Indonesia sebagai pemilik cadangan nikel terbesar di dunia memiliki posisi strategis dalam rantai pasok nikel global. Dalam proses pengolahan bijih nikel, terutama pada tahap pengeringan, kalsinasi, dan peleburan, dihasilkan limbah berupa debu nikel. Debu ini umumnya terakumulasi pada sistem pengendalian emisi seperti baghouse furnace. Meskipun dikategorikan sebagai limbah, debu nikel masih mengandung unsur logam bernilai seperti Ni, Fe, Mg, dan Si yang berpotensi untuk dimanfaatkan kembali. Salah satu metode yang dapat diterapkan untuk pemanfaatan kembali debu nikel adalah proses briketisasi. Melalui proses ini, debu nikel dipadatkan dengan bantuan bahan pengikat dan

aditif tertentu sehingga membentuk briket yang memiliki kekuatan mekanik dan stabilitas termal yang memadai. Briket tersebut kemudian dapat dipanaskan kembali di dalam furnace untuk mengalami transformasi mineral yang lebih stabil sebelum

dimasukkan kembali ke dalam proses peleburan.

Pemanasan briket debu nikel pada suhu tinggi dapat menyebabkan perubahan fasa mineral yang signifikan. Perubahan ini sangat berpengaruh terhadap fisik, mekanik dan reaktivitas briket selama proses lanjutan. Oleh karena itu, analisis perubahan mineral selama proses pemanasan menjadi penting untuk memahami karakteristik briket yang dihasilkan dan menentukan komposisi optimal yang dapat digunakan kembali dalam proses produksi nikel.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari tiga tahap, yaitu pembuatan briket, analisis dan uji briket. Dilaksanakan di laboratorium Plant Site (Process Technology) Di Perusahaan Pengolahan Industri Nikel.

A. Pembuatan Briket dari 4 macam komposisi:

• Komposisi Debu furnace + Air

1. Menggunakan debu furnace sebanyak 500gr.
2. Menambahkan air sebanyak 75ml.
3. Mencampurkan kedua bahan hingga homogen.
4. Membentuk briket dengan menggunakan pipa.
5. Memasukkan briket kedalam oven selama 1 jam untuk mengetahui moisture content.

6. Memasukkan briket kedalam muffle furnace selama 4 jam dengan temperature 200°C selama 30 menit, 700°C selama 3 jam dan 1000°C selama 30 menit.

7. Melakukan tahap uji analisis alat.

• **Komposisi Debu furnace + Batu bara + Acrysol**

1. Menggunakan debu furnace sebanyak 500gr.
2. Menambahkan batu bara 7,5gr.
3. Menambahkan acrysol sebanyak 75ml.
4. Mencampurkan ketiga bahan hingga homogen.
5. Membentuk briket dengan menggunakan pipa.
6. Memasukkan briket kedalam oven selama 1 jam untuk mengetahui moisture content.
7. Memasukkan briket kedalam muffle furnace selama 4 jam dengan temperature 200°C selama 30 menit, 700°C selama 3 jam dan 1000°C selama 30 menit.
8. Melakukan tahap uji analisis alat.

• **Komposisi Debu furnace + Acrysol**

1. Menggunakan debu furnace sebanyak 500gr.
2. Menambahkan acrysol sebanyak 75ml.
3. Mencampurkan kedua bahan hingga homogen.
4. Membentuk briket dengan menggunakan pipa.
5. Memasukkan briket kedalam oven selama 1 jam untuk mengetahui moisture content.
6. Memasukkan briket kedalam muffle furnace selama 4 jam dengan

temperature 200°C selama 30 menit, 700°C selama 3 jam dan 1000°C selama 30 menit.

7. Melakukan tahap uji analisis alat.

• **Komposisi Debu furnace + Batu bara + Air**

1. Menggunakan debu furnace sebanyak 500gr.
2. Menambahkan air sebanyak 75ml.
3. Mencampurkan kedua bahan hingga homogen.
4. Membentuk briket dengan menggunakan pipa.
5. Memasukkan briket kedalam oven selama 1 jam untuk mengetahui moisture content.
6. Memasukkan briket kedalam muffle furnace selama 4 jam dengan temperature 200°C selama 30 menit, 700°C selama 3 jam dan 1000°C selama 30 menit.
7. Melakukan tahap uji analisis alat.

B. Tahap Analisis Alat

1. Melakukan preparasi sampel briket.
2. Melakukan uji sampel briket di XRF dan Eltra
3. Menunggu hasil terbaca 10-20 menit.

C. Tahap Uji Briket

• **Uji Shatter**

1. Menimbang berat awal briket yang ingin diuji shatter.
2. Menjatuhkan briket dengan ketinggian 1,8 meter.
3. Mengambil briket yang telah dijatuhkan lalu ditimbang kembali.
4. Melakukan distribusi briket yang telah di uji shatter.

• **Uji Abrasif**

1. Menimbang berat awal briket yang akan di uji abrasif.
2. Memasukkan briket kedalam molen dengan waktu 15 menit.
3. Mengeluarkan briket dan ditimbang kembali sisa briket yang masih utuh.
4. Melakukan distribusi briket yang telah diuji abrasif dan toleransi lolos briket discreening 400 mesh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Debu nikel yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari sistem penangkap debu (baghouse) Furnace 4 pada perusahaan pengolahan industri nikel. Berdasarkan hasil karakterisasi awal, debu nikel masih mengandung unsur-unsur logam bernilai seperti nikel (Ni), besi (Fe), magnesium (Mg), dan silikon (Si) yang sebagian besar berada dalam bentuk oksida dan senyawa silikat. Kandungan besi dan silika yang dominan menunjukkan bahwa debu furnace merupakan hasil dari reaksi termal bijih nikel laterit selama proses pengolahan. Keberadaan nikel dalam jumlah yang masih signifikan mengindikasikan bahwa material ini berpotensi untuk dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku sekunder melalui proses briketisasi.

Ni	Fe	Co	MgO	SiO ₂	S/M	LOI
3,201	29,41	0,122	9,915	34,58	3,4865	2,4458

Proses briketisasi dilakukan dengan variasi bahan pengikat dan aditif, yaitu air, batubara, dan acrysol, yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan kestabilan briket selama pemanasan. Hasil pengujian moisture content menunjukkan bahwa setiap variasi

briket memiliki kadar air yang berbeda, di mana briket dengan kombinasi batubara dan acrysol memiliki kadar air tertinggi. Hal ini disebabkan oleh sifat acrysol yang mampu mengikat air dengan baik serta struktur pori briket yang lebih terbentuk. Perbedaan kadar air ini berpengaruh terhadap perilaku briket pada tahap pengeringan dan pemanasan awal, terutama dalam pembentukan pori dan kemungkinan terjadinya retakan mikro.

%Moist Briket			
Sampel	Berat awal	Berat akhir	%MC
C+Acrysol	55,38	40,16	27,48
C+Air	59,51	52,5	11,78
Acrysol	52,95	47,84	9,65
Air	68,09	63,67	6,49

Setelah melalui proses pemanasan bertahap pada suhu 200°C, 700°C, dan 1000°C, terjadi perubahan signifikan pada kandungan karbon dan sulfur dalam briket. Hasil analisis unsur menunjukkan bahwa kadar karbon dan sulfur mengalami penurunan drastis pada seluruh variasi briket. Penurunan karbon mengindikasikan bahwa karbon telah teroksidasi atau berperan sebagai agen pereduksi selama pemanasan, khususnya pada briket yang mengandung batubara. Sementara itu, penurunan kadar sulfur menunjukkan bahwa unsur tersebut telah terlepas dalam bentuk gas selama pemanasan, sehingga berpotensi meningkatkan kualitas briket hasil pemanasan untuk proses peleburan lanjutan.

Sampel	Carbon	Sulfur
C+Air	0,04	0,11
C+Acrysol	0,005	0,085
Air	0,015	0,08

Acrysol	0,00	0,08
---------	------	------

Hasil analisis X-Ray Fluorescence (XRF) menunjukkan bahwa komposisi oksida utama setelah pemanasan relatif tidak mengalami perubahan yang signifikan, namun terjadi redistribusi unsur dalam bentuk fasa mineral yang berbeda. Rasio SiO_2 terhadap MgO pada beberapa variasi briket mengalami perubahan, yang menunjukkan terbentuknya senyawa silikat baru. Kandungan nikel pada seluruh variasi briket tetap relatif stabil setelah pemanasan, menandakan bahwa proses briketisasi dan pemanasan tidak menyebabkan kehilangan nikel secara signifikan. Hal ini menjadi indikator penting bahwa briket hasil pemanasan masih layak digunakan kembali sebagai umpan dalam proses peleburan nikel.

Sampel	Ni%	Fe%	Co%	SiO ₂ %	MgO%	S/M	LOI%
C+Air	3,043	31,88	0,136	30,31	9,58	3,163	0,20
C+Acrysol	3,202	29,48	0,122	34,58	9,64	3,585	1,2276
Air	3,241	29,80	0,124	34,94	9,71	3,599	1,477
Acrysol	2,95	32,25	0,136	29,9	9,5	3,145	0,22

Pengujian nilai kalor menunjukkan bahwa briket dengan penambahan batubara memiliki nilai kalor yang lebih tinggi dibandingkan briket tanpa batubara, meskipun secara umum nilai kalor setelah pemanasan relatif rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar karbon telah bereaksi selama proses pemanasan. Nilai kalor residual tersebut menunjukkan bahwa fungsi utama briket bukan sebagai bahan bakar, melainkan sebagai media pembawa logam dan mineral yang siap diproses lebih lanjut dalam furnace.

Variasi sampel	Persentase batubara	Nilai kalor	Keterangan
Air	0%	94,53 kcal/kg	Kandungan volatil cukup tinggi, masih ada energi sisa.
Acrysol	0%	14,08 kcal/kg	Energi sangat rendah, dominan mineral
Air + batubara	1,5%	12,80 kcal/kg	Sangat kecil, hampir semua karbon sudah terbakar
Acrysol + batubara	1,5%	78,54 kcal/kg	Masih mengandung sisa bahan organik/karbon relatif

sifat mekanik briket melalui uji shatter dan uji abrasif menunjukkan bahwa seluruh variasi briket memiliki ketahanan yang cukup baik terhadap benturan dan gesekan. Briket dengan penambahan acrysol menunjukkan ikatan antarpartikel yang lebih kuat, sedangkan briket dengan penambahan batubara menunjukkan struktur pori yang lebih berkembang akibat reaksi termal. Meskipun tingkat abrasi pada briket yang mengandung batubara relatif lebih tinggi, nilai tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi industri. Kombinasi antara kekuatan mekanik yang memadai dan stabilitas termal yang baik menjadikan briket hasil pemanasan layak diproses lebih lanjut. Berikut hasil data uji shatter:

1. Data hasil uji shatter batubara+ acrysol

Berat awal= 90,13 gr

Berat setelah= 89,73 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25,4	89,73	99,56
Total	89,73	99,56

2. Data hasil uji shatter air

Berat awal= 132,79 gr

Berat setelah= 151,33 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25,4	131,43	98,87
+12,7	19,90	1,03
Total	151,33	100,00

3. Data hasil uji shatter batubara+ air

Berat awal= 130,77 gr

Berat akhir= 129,72 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25.4	129,72	99,20
Total	129,72	99,20

4. Data hasil uji shatter acrysol

Berat awal= 59,82 gr

Berat akhir= 59,73 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25.4	0,00	0,00
+12.7	9,96	16,75
+4.7498	33,58	56,47
+1.6764	10,62	17,86
+0.10414	5,12	8,61
+0.07366	0,13	0,22
-0.07366	0,05	0,08
Total	59,46	100,00

Berikut hasil data uji abrasif:

1. Data hasil uji abrasif air

Berat awal= 197,45 gr

Berat setelah= 194,04 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25.4	194,43	98,83
+12.7	0,00	0,00
+4.7498	0,37	0,19
+1.6764	1,78	0,90
+0,07366	0,52	0,26
-0,07366	0,07	0,04
Total	197,17	100,00

2. Data hasil uji abrasif

batubara+acrysol

Berat awal= 282,52 gr

Berat setelah= 253,86 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25.4	238,86	86,86
+12.7	15,04	5,47
+4.7498	2,75	1,00
+1.6764	2,59	0,94
+0,07366	12,59	4,58
-0,07366	0,32	0,12
Total	272,15	100,00

3. Data hasil uji abrasif acrysol

Berat awal=135,06 gr

Berat setelah= 132,62 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25.4	0,00	0,00
+12.7	1,95	1,48
+4.7498	35,19	26,69
+1.6764	34,86	26,44
+0.10414	47,26	35,84
+0.07366	10,03	7,61
-0.07366	2,58	1,96
Total	131,87	100,00

4. Data hasil uji abrasif batubara+air

Berat awal= 133,50 gr

Berat setelah= 130,66 gr

Ukuran fraksi (mm)	Berat distribusi (gr)	Persentase berat (%)
+25.4	10,00	7,58
+12.7	3,14	2,38
+4.7498	50,68	38,43
+1.6764	52,15	39,55
+0.10414	8,05	6,10
+0.07366	4,83	3,66
-0.07366	3,01	2,28
Total	131,86	100,00

1. Hasil unsur dan mineral yang ada didalam briket sebelum proses pemanasan Hasil analisis menunjukkan kandungan nikel (Ni) sebesar 3,201%, menandakan material ini cukup kaya nikel dan bernilai ekonomis. Besi (Fe) mencapai 29,41%, menjadi unsur dominan. Kobalt (Co) sebesar 0,122% meski kecil tetap penting sebagai logam strategis. Kandungan MgO sebesar 9,915% dan SiO₂ sebesar 34,58% mengindikasikan keberadaan mineral pengotor seperti

olivin, serpentin, atau kuarsa. Rasio SiO_2/MgO sebesar 3,4865 tergolong tinggi dan dapat memengaruhi efisiensi peleburan. Nilai LOI sebesar 2,4458% menunjukkan adanya bahan volatil seperti air terikat atau senyawa karbonat.

2. Hasil unsur dan mineral setelah proses pemanasan Setelah dilakukan proses pemanasan pada briket selama 4 jam di dalam muffle furnace, terjadi perubahan komposisi kimia yang menunjukkan adanya transformasi fase mineral dari debu furnace awal. Kandungan nikel (Ni) hanya berubah sedikit dengan kisaran 2,95–3,24% dibandingkan nilai awal 3,201%, menandakan bahwa Ni tetap stabil dalam bentuk oksida (NiO) atau spinel (NiFe_2O_4) yang tahan terhadap suhu tinggi. Kandungan besi (Fe) justru meningkat dari 29,41% menjadi sekitar 29,48–32,25%, kemungkinan akibat hilangnya komponen volatil selama pemanasan sehingga Fe tampak lebih tinggi dan terbentuk fase oksida seperti hematit (Fe_2O_3) atau magnetit (Fe_3O_4). Unsur kobalt (Co) juga relatif stabil dengan kisaran 0,122–0,136%, menunjukkan bahwa Co tetap berada dalam bentuk oksida atau spinel. Kandungan magnesita (MgO) berada pada rentang 9,5–9,9% dan tidak mengalami perubahan berarti, menandakan bahwa fase magnesita seperti periklas (MgO) dan forsterit (Mg_2SiO_4) tetap dominan. Sementara itu, kandungan silika (SiO_2) bervariasi antar sampel,

sebagian menurun hingga 29–30% dan sebagian meningkat hingga 34–35%. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian silika bereaksi dengan oksida logam membentuk fase silikat baru seperti forsterit (Mg_2SiO_4) dan fayalit (Fe_2SiO_4). Rasio SiO_2/MgO (S/M) yang berkisar antara 3,1–3,6 menunjukkan keseimbangan antara fase silikat dan oksida tetap terjaga. Nilai Loss on Ignition (LOI) menurun signifikan dari 2,4458% menjadi 0,20–1,47%, yang menandakan hilangnya air terikat dan bahan volatil selama pemanasan. Secara keseluruhan, proses pemanasan menyebabkan pembentukan fase oksida dan silikat yang lebih stabil, dengan unsur Ni, Fe, dan Co tetap berada dalam bentuk oksida, sedangkan MgO dan SiO_2 berperan dalam pembentukan fase silikat yang memperkuat kestabilan mineral pada briket hasil pemanasan.

3. Sifat fisik yang terbentuk pada masing-masing komposisi briket:

- Berikut tampak visual masing-masing briket dengan komposisi yang berbeda, terlihat pada komposisi air setelah dilakukan pengujian fisik, pada pengujian uji shatter hanya terdapat dua potongan pecahan pada screen 1 inch dan $\frac{1}{2}$ inch dan pada uji abrasif selama 15 menit terdapat berbagai potongan briket namun briket hampir tetap utuh discreen 1 inch. Dapat dilihat pada gambar



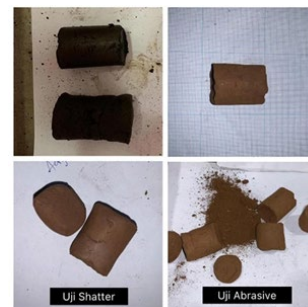
- Berikut tampak visual dari komposisi air+ batubara setelah dilakukan uji shatter briket utuh tanpa ada potongan dan pecahan briket utuh discreen 1 inch dan pada uji abrasive selama 15 menit terdapat beberapa potongan dan paling banyak discreen 0,066 inch (pecahan kecil). Dapat dilihat pada gambar



- Berikut tampak visual dari komposisi acrysol setelah dilakukan uji shatter briket langsung hancur beberapa bagian dan bahkan tidak ada pada screen 1 inch dan pada uji abrasive selama 15 menit briket sangat hancur paling banyak discreen 0,0041 inch (ukuran sangat halus setara dengan serbuk/ debu halus). Dapat dilihat pada gambar



- Berikut tampak visual dari komposisi acrysol+ batubara setelah dilakukan uji shatter briket tetap utuh tidak ada pecahan dan pada uji abrasive selama 15 menit terdapat beberapa bagian potongan briket, namun briket hampir utuh discreen 1 inch. Dapat dilihat pada gambar



4. Nilai kalor dari batubara dan briket perusahaan pengolahan industri nikel menggunakan batubara jenis hard coal dengan nilai kalori yang bervariasi tergantung pada spesifikasinya, namun umumnya batubara untuk aplikasi di industri seperti smelter memiliki nilai kalori tinggi, sekitar 5.300-7.000 kkal/kg. Setelah proses pemanasan, nilai kalor briket menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh kandungan batubara dan nilai LOI masing-masing sampel. Sampel Air dan Acrysol yang tidak mengandung batubara memiliki nilai kalor rendah, yaitu 94,53 dan 14,08 kkal/kg, karena energi yang tersisa hanya berasal dari sisa bahan volatil atau organik. Sementara itu, sampel C+Air dan C+Acrysol dengan tambahan batubara 1,5% memiliki nilai kalor teoritis sekitar 96 kkal/kg, namun secara aktual lebih rendah berdasarkan LOI karena

sebagian besar karbon telah teroksidasi selama pemanasan. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun penambahan batubara sedikit meningkatkan potensi energi, sebagian besar bahan briket tetap didominasi oleh komponen mineral yang tidak memberikan kontribusi panas signifikan.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari hasil analisis, dapat disimpulkan bahwa material memiliki kandungan nikel cukup tinggi yaitu 3,201%, sehingga berpotensi bernilai ekonomis. Unsur besi (Fe) menjadi komponen utama dengan kadar 29,41%, sedangkan kobalt (Co) meskipun kecil tetap berperan penting. Kandungan MgO dan SiO₂ yang cukup besar menunjukkan adanya mineral pengotor seperti olivin, serpentin, dan kuarsa. Nilai rasio SiO₂/MgO yang tinggi menunjukkan potensi pengaruh terhadap proses peleburan, sedangkan nilai LOI yang masih ada menandakan keberadaan air terikat dan bahan volatil dalam material awal.
2. Setelah proses pemanasan selama 4 jam, fase mineral mengalami perubahan dari oksida sederhana menjadi fase silikat dan oksida yang lebih stabil. Terbentuknya mineral seperti forsterit (Mg₂SiO₄), fayalit (Fe₂SiO₄), dan spinel (NiFe₂O₄) menunjukkan bahwa reaksi antar oksida dan silika terjadi selama

pemanasan. Perubahan ini membuat struktur briket menjadi lebih stabil, padat, dan tahan terhadap suhu tinggi.

3. Penambahan batubara pada Acrysol meningkatkan nilai kalor secara signifikan dibanding Acrysol murni. Namun penambahan batubara pada Air tidak memberikan efek besar terhadap nilai kalor, kemungkinan karena karbon bereaksi dengan oksida logam selama proses (tidak sepenuhnya terbakar menjadi energi). Jadi meskipun penambahan batubara pada briket tidak selalu berpengaruh dalam penambahan nilai kalor.
4. Setelah dilakukan pengujian fisik uji shatter dan uji abrasive briket yang paling tahan adalah variasi batubara+ acrysol.

DAFTAR PUSTAKA

- Ajagbe, C. A., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., Rahim, N. N. R. N. A., & Anguruwa, G. T. (2024). A review on biochar briquetting: Common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. *Journal of Cleaner Production*.
- Bajwa, D. S., Peterson, T., Sharma, N., Shojaeiarani, J., & Bajwa, S. G. (2018). *A review of densified solid biomass for energy production. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 296–305.

- Cong, H., et al. (2020). Co-combustion, co-densification, and pollutant emission characteristics of charcoal-based briquettes prepared using bio-tar as a binder. *Fuel*, 287, 119512.
- Dinesha, P., Kumar, S., & Yadav, A. (2019). Biomass briquetting: Technology and practices for sustainable energy production. *Renewable Energy*, 143, 1826–1835.
- Haryati, E., & Dahlan, K. (2023). Mineralogical characteristics of nickel laterite in the Buper area, Jayapura, Papua, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 2694, 020008.
- Indian Standard. (1981). IS 9963-1981: Determination of shatter index of iron ore lumps, sinters and pellets. Indian Standards Institution, Ores and Raw Material Sectional Committee, SMDC 16.
- Kambuna, B. N. H. (2018). Pengujian pengaruh temperatur dan waktu pemanasan terhadap nilai indeks shatter pelet debu pabrik feronikel. *Flywheel: Jurnal Teknik Mesin Untirta*, 4(2), 63–67.
- Kang, K., et al. (2019). Mechanisms of binder bonding in biomass briquettes: A review. *Fuel Processing Technology*, 191, 55–70.
- Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2020). Production and characterization of hybrid briquettes from corncobs and oil palm trunk bark under a low pressure densification technique.
- Permatasari, N. V., Kawigraha, A., Hapid, A., & Wibowo, N. (2023). Identifikasi perubahan mineral selama proses pemanasan pelet komposit nikel dengan analisis difraksi sinar X.
- Setyawan, H., & Prasetyo, D. (2020). Studi karakterisasi green pellet dari limbah debu nikel. *Jurnal Metalurgi*, 35(1), 45–53.
- Subagja, R., Prasetyo, A. B., & Sari, W. M. (2022). Upgrading of nickel content in limonitic laterite ores by pelletizing, reduction roasting, and magnetic separation. *Metalurgi. LIPI*.
- Sulaiman, A., Hartono, R., & Nurcahyono, A. (2021). Karakterisasi debu nikel hasil bag filter pada proses peleburan nikel laterit. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 17(2), 99–106.
- U.S. Geological Survey. (2023). Mineral commodity summaries 2023: Nickel. U.S. Department of the Interior.
- Yuliah, Y., Suryaningsih, S., & Ulfi, K. (2017). Penentuan kadar air hilang dan volatile matter pada bio-briket dari campuran arang sekam padi dan batok kelapa. *Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika*, 1(1), 51–57.

- Yumak, H., et al. (2010). Physical and mechanical properties of briquettes produced from biomass waste. *Fuel Processing Technology*, 91(8), 1030–1036.
- Zhuo, Y., Xie, Z., & Shen, Y. (2021). Studi model karbonisasi batubara peringkat rendah briket: Pengaruh bentuk briket. *Powder Technology*, 385, 120–130.