



Analisis Peran Na, K, Ca, dan Fe Terhadap Potensi Slagging dan Fouling pada Pembakaran Lignit, Sub-Bituminus, dan Ampas Tebu

Dhafin Umara^{1*}, Shofa Rijalul Haq¹, Rizki Khoiriah Nasution¹, Ratna Mustika Dewi², Muhammad Faiz Shafiyurrahman³

¹Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta dan Jl. Padjajaran Jl. Ring Road Utara No.104, Ngropoh, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283.

²Universitas Atma Jaya Yogyakarta dan Jl. Babarsari No.6, Janti, Caturtunggal, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281.

³Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta dan Jl. Padjajaran Jl. Ring Road Utara No.104, Ngropoh, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55283.

*dhafinumara@gmail.com

Abstract

Slagging and fouling are major operational challenges in the combustion of coal and biomass, as they reduce thermal efficiency and accelerate equipment degradation. This study aims to analyze the role of sodium (Na), potassium (K), calcium (Ca), and iron (Fe) in influencing slagging and fouling tendencies in three fuels: sub-bituminous coal, lignite, and sugarcane bagasse. The data were obtained from proximate, ultimate, and XRF analyses, followed by the calculation of several predictive indices, namely the Base-to-Acid Ratio (B/A), Bed Agglomeration Index (BAI), Slag Viscosity Index (Sr), Fouling Index (Fu), Dolomite Ratio (Dol), and Simplified Base/Acid Ratio (B/As). The results indicate that Na and K play a dominant role in increasing fouling propensity, while Ca and Fe contribute to enhancing ash thermal stability. Sub-bituminous coal exhibits the most stable behavior with $B/A = 0.49$, $Sr = 90.20$, and $Fu = 1.53$, indicating low slagging and moderate fouling potential. Lignite shows the highest reactivity toward deposit formation with $B/A = 8.77$, $BAI = 169.00$, and $Sr = 6.57$, reflecting the dominance of basic oxides ($Fe_2O_3 = 14.90\%$; $CaO = 8.57\%$) and a low ash fusion temperature. In contrast, sugarcane bagasse demonstrates intermediate behavior with $B/A = 0.58$, $Sr = 64.70$, and $Fu = 1.63$, influenced by its very high SiO_2 content (36.00%) and volatile alkalis such as K_2O (2.47%). Overall, the findings show that increasing basic oxides (CaO , Fe_2O_3) reduces slagging tendency, whereas the dominance of alkali oxides (Na_2O , K_2O) enhances fouling potential.

Keyword: Slagging, fouling, coal, biomass.

Abstrak

Fenomena slagging dan fouling merupakan kendala utama dalam proses pembakaran batubara dan biomassa yang dapat menurunkan efisiensi termal serta umur peralatan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran unsur natrium (Na), kalium (K), dan kalsium (Ca), serta besi (Fe) terhadap potensi slagging dan fouling pada tiga bahan bakar: batubara sub-bituminus, batubara lignit, dan ampas tebu. Data yang digunakan diperoleh dari hasil uji proksimat, ultimat, dan XRF, kemudian dihitung beberapa indeks prediktif yakni Base-to-Acid Ratio (B/A), Bed Agglomeration Index (BAI), Slag Viscosity Index (Sr), Fouling Index (Fu), Dolomite Ratio (Dol), dan Simplified Base/Acid Ratio (B/As). Hasil menunjukkan bahwa Na dan K berperan dominan dalam meningkatkan kecenderungan fouling, sedangkan Ca dan Fe berkontribusi pada kestabilan termal abu. Hasil menunjukkan batubara sub-bituminus memiliki nilai $B/A = 0,49$, $Sr = 90,20$, dan $Fu = 1,53$, mengindikasikan kecenderungan slagging rendah dan fouling moderat. Lignit menunjukkan karakter paling reaktif terhadap pembentukan kerak dengan $B/A = 8,77$, $BAI = 169,00$, dan $Sr = 6,57$, mencerminkan dominasi oksida basa ($Fe_2O_3 = 14,90\%$; $CaO = 8,57\%$) dan titik leleh abu yang rendah. Sebaliknya, ampas tebu memiliki kecenderungan menengah dengan $B/A = 0,58$, $Sr = 64,70$, dan $Fu = 1,63$, dipengaruhi oleh kandungan SiO_2 yang sangat tinggi (36%) serta alkali volatil seperti K_2O (2,47%). Hasil ini mengindikasikan bahwa peningkatan oksida basa (CaO , Fe_2O_3) menurunkan kecenderungan slagging, sedangkan dominasi alkali (Na_2O , K_2O) meningkatkan fouling.

Kata Kunci: Slagging, fouling, batubara, biomassa.

I. PENDAHULUAN

Batubara masih menjadi sumber energi dominan di Indonesia, khususnya untuk pembangkit listrik tenaga uap. Namun, proses pembakarannya sering menghadapi permasalahan teknis berupa pembentukan kerak padat (*slagging*) dan deposit abu halus (*fouling*) pada permukaan logam boiler akibat peleburan partikel anorganik pada suhu tinggi. Kondisi ini menyebabkan penurunan efisiensi perpindahan panas, peningkatan konsumsi bahan bakar, serta percepatan korosi

komponen logam [1]. Studi Wahyuni et al. (2016) pada abu batubara Paiton menunjukkan bahwa komposisi oksida utama seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , dan CaO memiliki pengaruh langsung terhadap sifat fusi abu, sehingga menentukan kecenderungan terbentuknya deposit selama pembakaran [2].

Salah satu upaya transisi menuju energi bersih adalah peningkatan memanfaatkan biomassa seperti ampas tebu sebagai bahan bakar substitusi karena sifatnya yang terbarukan dan *carbon-neutral* [3]. Namun

demikian, biomassa membawa tantangan baru dalam sistem pembakaran karena abu biomassa umumnya mengandung logam alkali (Na, K) dalam kadar tinggi, sementara kandungan oksida basa seperti CaO dan Fe₂O₃ lebih rendah dibanding batubara [4]. Perbedaan karakter mineral ini menyebabkan perubahan signifikan pada *Ash Fusion Temperature* (AFT) dan perilaku abu selama pembakaran [5].

Karakteristik mineralogi abu sangat menentukan potensi *slagging* dan *fouling* yang dapat muncul. Menurut Lachman *et al.* (2021), oksida basa seperti CaO, Fe₂O₃, dan MgO meningkatkan titik leleh abu karena membentuk senyawa silikat dan fosfat bertitik leleh tinggi [6]. Sebaliknya, oksida alkali Na₂O dan K₂O bereaksi dengan SiO₂ membentuk senyawa eutektik bertitik leleh rendah seperti Na₂SiO₃ dan K₂SiO₃, sehingga memperbesar risiko *slagging*. Hal serupa juga dijelaskan oleh Vassilev *et al.* (2010) yang menegaskan bahwa rasio oksida basa terhadap oksida asam merupakan parameter penting dalam menentukan kestabilan termal abu [4].

Untuk memprediksi kecenderungan *slagging* dan *fouling*, berbagai indeks empiris telah dikembangkan, seperti *Base-to-Acid Ratio* (B/A), *Bed Agglomeration Index* (BAI), *Slag Viscosity Index* (Sr), dan *Fouling Index* (Fu) [7]. Nilai-nilai tersebut diturunkan dari perbandingan komposisi oksida utama dalam

abu, dan digunakan secara luas dalam industri pembangkit sebagai alternatif cepat dari uji AFT laboratorium. Namun, studi oleh Garcia-Maraver *et al.* (2011) menegaskan bahwa sebagian besar indeks tersebut dikembangkan berdasarkan data batubara, sehingga penerapannya terhadap biomassa sering kali tidak akurat akibat perbedaan fasa mineral dan karakter volatil alkali [8].

Indonesia memiliki potensi bahan bakar padat beragam, mulai dari batubara peringkat rendah (lignit dan sub-bituminus) hingga residu pertanian seperti ampas tebu [9]. Batubara lignit umumnya memiliki kadar abu dan kelembapan tinggi dengan komposisi alkali signifikan, sedangkan batubara sub-bituminus lebih stabil secara mineralogi dan memiliki AFT lebih tinggi [10]. Di sisi lain, ampas tebu yang banyak digunakan pada industri gula mengandung kalium dan natrium tinggi yang berpotensi menyebabkan *fouling* berat pada sistem boiler [7]. Hal ini sejalan dengan temuan Said *et al.* (2023) bahwa biomassa dengan kandungan alkali signifikan memerlukan strategi pengelolaan pembakaran yang tepat untuk menghindari pembentukan deposit berlebih [11].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran unsur Na, K, Ca, dan Fe terhadap potensi *slagging* dan *fouling* pada pembakaran lignit, sub-bituminus, dan ampas tebu. Analisis dilakukan melalui

perhitungan indeks prediktif *slagging* dan *fouling* berdasarkan data hasil uji proksimat, ultimat, dan komposisi mineral abu. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkuat pemahaman mengenai perilaku termokimia bahan bakar padat berperingkat rendah dan biomassa lokal, serta menjadi acuan dalam optimasi operasi pembakaran dan pengendalian kerak di sistem termal membandingkan dengan SNI Biodiesel.

II. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan tiga jenis bahan bakar padat, yaitu batubara sub-bituminus, batubara lignit, dan ampas tebu. Sampel batubara diperoleh dari Daerah Lahat, Provinsi Sumatera Selatan, sedangkan ampas tebu berasal dari limbah proses penggilingan tebu pada industri gula di Daerah Madukismo, Yogyakarta.

Penelitian ini bersifat kuantitatif deskriptif-komparatif, dengan langkah awal yaitu Kompilasi data kimia bahan bakar dari hasil uji proksimat, ultimat, dan XRF. Selanjutnya dilakukan perhitungan indeks *slagging* dan *fouling* berdasarkan rumus empiris, klasifikasi tingkat potensi *slagging* dan *fouling* berdasarkan rentang nilai acuan dari literatur, serta analisis hubungan unsur Na, K, Ca, dan Fe terhadap indeks prediktif untuk mengidentifikasi unsur dominan penyebab kecenderungan *slagging* dan *fouling*.

Data hasil analisis laboratorium digunakan untuk menghitung berbagai indeks prediktif *slagging* dan *fouling* sebagaimana digunakan dalam studi oleh Lachman *et al.* (2021) [6] dan Jenkins *et al.* (1998) [7]. Nilai-nilai unsur Na, K, Ca, dan Fe menjadi fokus utama karena peranannya yang signifikan terhadap pembentukan *slag* dan deposit abu.

2.1. Pehitungan Indeks Prediktif

2.1.1. Indeks B/A

Indeks B/A pertama kali dikembangkan untuk batubara dan kemudian diadaptasi untuk biomassa [8]. Rasio ini membandingkan kandungan oksida basa terhadap oksida asam yang terdapat pada Persamaan 1.

$$\frac{B}{A} = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2} \dots\dots\dots (1)$$

Oksida basa (Fe_2O_3 , CaO, MgO, Na_2O , K_2O) menurunkan titik leleh abu karena membentuk senyawa eutektik bertitik leleh rendah. Sebaliknya, oksida asam (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) meningkatkan titik leleh abu [6]. Interpretasi nilai B/A tercantum pada Tabel 1. Klasifikasi B/A dan kecenderungan *slagging* diadaptasi berdasarkan rentang yang dilaporkan oleh Hariana *et al.* (2021) [12] dan Akar *et al.* (2009) [13].

Nilai B/A yang tinggi, yaitu lebih dari 0,7, menunjukkan bahwa abu batubara bersifat lebih basa dan cenderung mudah melebur pada rentang suhu sekitar 1200–1300 °C. Kondisi ini membuat abu

menjadi lengket sehingga berpotensi besar menimbulkan *slagging*, yaitu pembentukan kerak atau lelehan padat di dinding tungku pembakaran [6]. Sebaliknya, jika nilai B/A rendah, yaitu kurang dari 0,5, abu bersifat lebih asam dan memiliki titik leleh yang tinggi, umumnya di atas 1500 °C, sehingga

abu cenderung tetap kering dan tidak mudah menempel pada permukaan logam [4].

Batubara dengan kandungan tinggi CaO, Fe₂O₃, atau alkali (Na₂O, K₂O) biasanya punya kecenderungan *slagging* lebih besar. Pengaruh sifat asam atau basa dari unsur-unsur kimia yang terdapat pada batubara tercantum pada Tabel 2.

Tabel 1. Interpretasi Nilai B/A [12-13].

Nilai B/A	Klasifikasi	Kecenderungan <i>Slagging</i>
< 0,5	Asam	Rendah – abu bersifat non-lekat
0,5 – 0,7	Netral	Sedang
> 0,7	Basa	Tinggi – potensi <i>slagging</i> besar

Tabel 2. Relevansi Terhadap Unsur Kimia pada Batubara.

Unsur	Bentuk Oksida	Sifat	Pengaruh
Na, K	Na ₂ O, K ₂ O	Basa Kuat	Menurunkan titik leleh abu drastis
Ca, Mg	CaO, MgO	Basa Menengah	Menstabilkan abu tapi bisa mempercepat <i>slag</i>
Fe	Fe ₂ O ₃	Amfoter (tapi cenderung basa)	Memicu lelehan oksida pada suhu tinggi.
Si, Al	SiO ₂ , Al ₂ O ₃	Asam	Meningkatkan titik leleh abu, mencegah <i>slag</i>
Ti	TiO ₂	Asam Lemah	Kontributor kecil, tapi ikut dalam matriks abu

2.1.2 Nilai B/As

Simplified Base to Acid Ratio merupakan bentuk penyederhanaan dari rasio basa terhadap asam (*Base to Acid Ratio, B/As*) yang digunakan untuk menilai kecenderungan *slagging* pada abu batubara berdasarkan

komposisi kimia utamanya. Rasio ini berfokus pada empat oksida dominan, yaitu Fe₂O₃, CaO, SiO₂, dan Al₂O₃, yang paling berpengaruh terhadap titik leleh dan perilaku peleburan abu [14]. Dengan mengabaikan oksida minor seperti MgO, Na₂O, K₂O, dan

TiO₂, metode ini menjadi lebih cepat dan sederhana, sehingga sering digunakan dalam analisis awal atau *screening* kualitas batubara [15]. Nilai B/As dihitung dengan Persamaan 2.

$$B/As = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \dots \dots \dots (2)$$

Meskipun kandungan MgO dalam abu batubara umumnya lebih rendah dibandingkan oksida utama seperti SiO₂, Al₂O₃, CaO, dan Fe₂O₃, keberadaannya tetap memberikan pengaruh terhadap jaringan silikat dalam fase lelehan abu [16].

Nilai B/As < 0,75 umumnya menunjukkan bahwa abu didominasi oleh oksida asam sehingga memiliki kecenderungan *slagging* yang rendah. Pada rentang 0,75–1,00, komposisi oksida basa dan asam mulai seimbang, menunjukkan risiko *slagging* sedang karena sebagian komponen mineralnya mulai membentuk fase leleh pada temperatur menengah. Jika nilai B/As > 1,00, oksida basa seperti CaO, MgO, dan Fe₂O₃ menjadi dominan sehingga abu lebih mudah melebur dan membentuk kerak pada dinding tungku, menandakan potensi *slagging* tinggi [6].

2.1.3 Nilai BAI

Nilai BAI digunakan untuk menilai kecenderungan terjadinya aglomerasi atau penggumpalan partikel pada sistem

pembakaran *fluidized bed*, yang dapat menurunkan efisiensi operasi dan menyebabkan kerusakan pada tungku. Indeks ini dihitung menggunakan perbandingan antara kandungan oksida besi terhadap oksida alkali dalam abu [17]. *Bed Agglomeration Index* dihitung dengan Persamaan 3.

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{Na_2O + K_2O} \dots \dots \dots (3)$$

Nilai BAI yang rendah (<0,15) menunjukkan dominasi unsur Na dan K yang membentuk senyawa silikat bertitik leleh rendah seperti Na₂SiO₃ dan K₂SiO₃, sehingga abu mudah melebur dan partikel *bed* cenderung menggumpal. Sebaliknya, nilai BAI tinggi (>1) menandakan kandungan Fe₂O₃ yang cukup untuk menstabilkan abu dan meningkatkan titik lelehnya, sehingga risiko aglomerasi menjadi rendah [18].

2.1.4 Nilai Sr

Nilai Sr merupakan salah satu parameter empiris yang digunakan untuk memperkirakan kecenderungan *slagging*, yaitu pembentukan kerak leleh di zona suhu tinggi pada proses pembakaran batubara atau biomassa [6]. Indeks ini dihitung berdasarkan perbandingan antara kandungan oksida silika terhadap total oksida yang memengaruhi viskositas lelehan abu. Perhitungan dari nilai Sr dapat dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$Sr = \left(\frac{SiO_2}{SiO_2 + CaO + MgO + Fe_2O_3} \right) \times 100 \dots \dots \dots (4)$$

Nilai Sr mencerminkan keseimbangan antara oksida asam (SiO_2) yang meningkatkan viskositas lelehan dan oksida basa (CaO , MgO , Fe_2O_3) yang menurunkannya. Abu dengan Sr tinggi (>72) memiliki viskositas tinggi dan cenderung tidak mudah melebur, sehingga risiko *slagging* rendah. Nilai Sr sedang ($65-72$) menunjukkan kecenderungan *slagging* moderat, sedangkan Sr rendah (<65) menandakan abu bersifat lebih cair dan mudah membentuk kerak [6].

2.1.5 Nilai Fu

Nilai Fu adalah parameter empiris yang digunakan untuk memprediksi kecenderungan terjadinya *fouling*, yaitu pengendapan partikel abu halus dan kondensasi uap alkali pada permukaan perpindahan panas, khususnya di bagian *superheater* dan *economizer*. *Fouling* menyebabkan penurunan efisiensi perpindahan panas, peningkatan suhu gas buang, serta mempercepat korosi logam boiler. Nilai B/A menunjukkan keseimbangan antara oksida basa dan oksida asam dalam abu, sedangkan Na_2O dengan penambahan K_2O merepresentasikan kandungan total unsur alkali yang mudah menguap [6]. Nilai Fu dapat dihitung dengan Persamaan 5.

$$Fu = \frac{B}{A} \times (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \dots\dots\dots (5)$$

Nilai Fu yang tinggi menandakan kecenderungan *fouling* yang besar karena

kombinasi kandungan oksida basa tinggi dan volatilitas alkali yang menyebabkan pembentukan senyawa Na_2SO_4 , K_2SO_4 , dan KCl di permukaan perpindahan panas. Secara umum, $Fu < 0.6$ dikategorikan *low fouling*, $0.6-40$ *medium fouling*, dan > 40 *severe fouling* [8], [19].

2.1.6 Dolomite Ratio (Dol)

Dolomite Ratio (Dol) adalah salah satu indeks empiris yang digunakan untuk menilai stabilitas termal abu dan kecenderungan *slagging* pada proses pembakaran batubara maupun biomassa. Indeks ini menggambarkan proporsi oksida basa utama (CaO dan MgO) terhadap total oksida yang berperan dalam pembentukan lelehan abu [6]. Secara matematis, Dol dihitung dengan Persamaan 6.

$$Dol = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O}} \dots\dots\dots (6)$$

Nilai Dol yang tinggi menunjukkan bahwa abu mengandung dominasi oksida basa seperti CaO dan MgO , yang cenderung membentuk senyawa silikat bertitik leleh tinggi, misalnya CaSiO_3 dan MgAl_2O_4 . Hal ini menjadikan abu lebih stabil terhadap suhu tinggi dan mengurangi risiko *slagging*. Sebaliknya, nilai Dol rendah mengindikasikan dominasi unsur alkali (terutama K_2O) atau silika (SiO_2) yang membentuk eutektik leleh rendah, sehingga abu lebih mudah melebur dan menempel di dinding tungku [3]. Secara

umum, abu dengan $Dol > 0.25$ dikategorikan memiliki *slagging* rendah, $0.10 - 0.25$ menengah, dan < 0.10 tinggi [6].

2.2. Perlakuan Limbah Minyak Goreng

Bahan baku yang perlu digunakan yaitu, limbah minyak goreng bekas. Limbah minyak goreng bekas kemudian dilakukan penyaringan dan pengujian kadar *Free Fatty Acid* (FFA).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Laboratorium

Hasil analisis laboratorium diperoleh data uji proksimat, uji ultimat, dan uji XRF. Uji proksimat meliputi kadar air, kadar abu, *volatile matter*, *fixed carbon* dan nilai kalor yang tercantum pada Tabel 3. Uji ultimat meliputi unsur karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, dan oksigen yang tercantum pada Tabel 4, serta komposisi abu ditentukan melalui analisis *X-ray fluorescence* (XRF) yang tercantum pada Tabel 5, yang

selanjutnya dilakukan konversi unsur ke dalam bentuk oksida untuk memperoleh kadar Na_2O , K_2O , CaO , Fe_2O_3 , MgO , SiO_2 , Al_2O_3 , dan TiO_2 yang tercantum pada Tabel 6.

Hasil uji proksimat yang disajikan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa batubara sub-bituminus memiliki kadar air rendah (11,60%) dan kadar abu paling kecil (4,16%), dengan *volatile matter* 43,20% serta *fixed carbon* 41,03%. Nilai kalor mencapai 4.620 kal/kg, menandakan efisiensi pembakaran yang tinggi. Batubara lignit memiliki kadar air tertinggi (18,80%) dan kadar abu 13,20%, serta nilai kalor paling rendah (3.990 kal/kg), yang menunjukkan efisiensi termal rendah dan kecenderungan menghasilkan abu dalam jumlah besar. Sementara itu, ampas tebu menunjukkan kadar air paling rendah (8,36%) namun kadar abu tertinggi (14,70%) dan *volatile matter* yang sangat tinggi (58,60%), dengan nilai kalor 4.280 kal/kg. Kombinasi ini mengindikasikan reaktivitas tinggi namun kestabilan termal rendah.

Tabel 3. Hasil Pengujian Proksimat.

Sampel	Kadar Air (%)	Kadar abu (%)	Volatile matter (%)	Fixed carbon (%)	Kalor (kal/kg)
Sub-bituminus	11,60	4,16	43,20	41,03	4.620
Lignit	18,80	13,20	36,80	31,20	3.990
Ampas Tebu	8,360	14,70	58,60	18,40	4.280

Tabel 4. Hasil Pengujian Ultimat.

Kadar	Batubara Sub-bituminous (%)	Batubara Lignit (%)	Ampas Tebu (%)
Carbon	56,60	46,70	40,80
Hidrogen	5,84	4,92	5,30
Nitrogen	2,54	1,93	1,69
Sulfur	0,17	0,12	0,00
Oksigen	16,70	23,30	25,80

Tabel 5. Hasil Pengujian XRF.

Konsentrasi	Sub-bituminus (%)	Lignit (%)	Ampas Tebu (%)
Kalsium	0,18	6,13	5,51
Besi	0,03	10,40	7,95
Kalium	2,54	0,07	2,05
Natrium	0,00	0,00	0,27
Silika	2,15	0,79	16,80
Aluminium	1,21	0,46	1,39
Magnesium	0,13	0,39	0,37
Titanium	0,15	0,11	0,29

Tabel 4 memperlihatkan perbedaan komposisi unsur utama antar bahan bakar. Batubara sub-bituminus memiliki kandungan karbon tertinggi (56,60%), diikuti lignit (46,70%) dan ampas tebu (40,80%). Kadar hidrogen relatif serupa di ketiganya, sedangkan sulfur dan nitrogen rendah (<0,2%), menunjukkan risiko emisi gas NO_x dan SO₂ yang kecil. Ampas tebu tidak mengandung sulfur, namun memiliki kadar oksigen tertinggi (25,80%), yang meningkatkan reaktivitas pembakaran namun

menurunkan nilai energi per satuan massa [4], [7].

Hasil uji XRF yang ditampilkan pada Tabel 5 menunjukkan variasi komposisi anorganik antar bahan bakar. Batubara sub-bituminus memiliki kandungan silika (2,15%), aluminium (1,21%), dan kalium (2,54%) yang relatif tinggi, sedangkan unsur besi (0,03%) dan kalsium (0,18%) rendah. Lignit mengandung besi (10,4%) dan kalsium (6,13%) dalam jumlah tinggi, yang menunjukkan karakter abu bersifat basa. Sementara itu, ampas tebu memiliki silika

tertinggi (16,80%), diikuti oleh kalsium (5,51%), besi (7,95%), dan kalium (2,05%), menunjukkan abu yang kaya silikat dan berpotensi membentuk senyawa lelehan bertitik cair rendah.

3.2. Pembahasan

Identifikasi komposisi oksida utama perlu dilakukan sebelum berbagai indeks prediktif *slagging* dan *fouling* dianalisis, karena karakter mineral inilah yang menentukan perilaku abu selama pembakaran. Konversi dilakukan menggunakan faktor massa (*molecular weight ratio*) pada Persamaan 7.

$$\text{Kadar Oksida} = \text{Kadar Unsur} \times \frac{\text{Mr(oksida)}}{n \times \text{Mr(unsur)}} \dots (7)$$

Konversi ini menggunakan rasio massa molekul oksida terhadap unsur sebagai faktor pengali. Pendekatan ini juga digunakan dalam studi kimia abu biomassa dan batubara oleh Vassilev et al. (2010) [3] dan Jenkins et al. (1998) [7]. Konversi unsur anorganik ke bentuk oksida memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai proporsi oksida basa dan oksida asam yang berpengaruh langsung terhadap titik leleh abu, kestabilan termal, serta kecenderungan pembentukan kerak maupun deposit di permukaan *boiler*. Komposisi oksida tersebut menjadi fondasi perhitungan seluruh parameter evaluasi performa abu, seperti B/A, BAI, Sr, Fu, Dol,

dan B/As. Rangkuman komposisi oksida hasil konversi untuk ketiga bahan bakar disajikan pada Tabel 6.

Konversi unsur ke bentuk oksida pada Tabel 6 menunjukkan bahwa abu batubara sub-bituminus didominasi oleh oksida asam, yaitu SiO₂ (4,61%) dan Al₂O₃ (2,28%), dengan kandungan oksida basa CaO (0,25%) dan Fe₂O₃ (0,04%). Komposisi ini menandakan abu bersifat stabil dan memiliki titik leleh tinggi. Sebaliknya, abu pada lignit memiliki Fe₂O₃ (14,90%) dan CaO (8,57%), menandakan kecenderungan *slagging* akibat dominasi oksida basa. Ampas tebu memiliki karakter campuran, dengan SiO₂ sangat tinggi (36,00%) dan kandungan CaO (7,71%) serta Fe₂O₃ (11,40%) yang sedang, disertai K₂O (2,47%) cukup tinggi yang berpotensi menyebabkan *fouling*.

Meskipun nilai K₂O pada batubara sub-bituminus dan lignit relatif besar berdasarkan hasil konversi oksida, parameter ini tidak dijadikan faktor dominan karena perbedaan bentuk kimia (*speciation*) dan volatilitas kalium pada masing-masing bahan bakar. Pada batubara, kalium umumnya terikat dalam mineral aluminosilikat yang stabil seperti feldspar dan mineral lempung, sehingga bersifat *non-volatile* dan tidak mudah berpindah ke fase gas pada suhu operasi boiler [4]. Dalam kondisi ini, meskipun kadar K₂O relatif tinggi, kontribusinya terhadap

pembentukan deposit lebih kecil titik leleh abu dan meningkatkan dibandingkan oksida basa lain seperti CaO kecenderungan *slagging* [6]. dan Fe₂O₃, yang secara langsung menurunkan

Tabel 6. Konversi Unsur ke Bentuk Oksida

Bentuk Oksida	Sub-bituminus (%)	Lignit (%)	Ampas Tebu (%)
CaO	0,25	8,57	7,71
Fe ₂ O ₃	0,04	14,9	11,4 0
K ₂ O	3,06	0,09	2,47
Na ₂ O	0,00	0,00	0,36
SiO ₂	4,61	1,69	36,0 0
Al ₂ O ₃	2,28	0,87	2,62
MgO	0,21	0,64	0,62
TiO ₂	0,26	0,19	0,49

Sebaliknya, pada ampas tebu, meskipun nilai K₂O lebih kecil dibandingkan batubara, kalium berada dalam bentuk senyawa alkali yang mudah menguap, seperti garam organik kalium dan ion K⁺ bebas. Bentuk ini sangat reaktif selama tahap devolatilisasi, sehingga kalium mudah berpindah ke fase gas dan berkontribusi langsung terhadap pembentukan deposit *fouling* [4].

Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa keseimbangan antara oksida asam (SiO₂, Al₂O₃) dan basa (CaO, Fe₂O₃, K₂O) menjadi penentu utama kestabilan termal abu. Abu yang kaya oksida asam cenderung refraktori (tahan panas), sedangkan dominasi alkali dan

oksida basa memperbesar kemungkinan pembentukan *slag* dan deposit lengket.

Hasil perhitungan indeks prediktif *slagging* dan *fouling*, serta klasifikasinya pada Tabel 7 menunjukkan nilai B/A tertinggi pada batubara lignit (8,77), menandakan abu bersifat sangat basa dan mudah melebur. Nilai ini berkorelasi dengan Sr yang sangat rendah (6,57), menunjukkan viskositas abu rendah dan kecenderungan tinggi untuk membentuk kerak leleh pada dinding tungku. Kondisi tersebut umumnya terjadi pada batubara dengan kandungan alkali tinggi, seperti Na₂O dan K₂O, yang menghasilkan senyawa silikat bertitik leleh rendah (Na₂SiO₃, K₂SiO₃) [3], [6].

Tabel 7. Perbandingan Indeks Prediktif *Slagging* dan *Fouling*

Hasil Perhitungan Indeks Prediktif						
Sampel	B/A	BAI	Sr	Fu	Dol	B/As
Sub-Bituminus	0,49	0,01	90,20	1,53	0,04	0,07
Lignit	8,77	169,00	6,57	0,77	0,34	9,38
Ampas Tebu	0,58	4,02	64,70	1,63	0,13	0,51
Klasifikasi Tingkat Kecenderungan <i>Slagging</i> dan <i>Fouling</i>						
Sampel	B/A	BAI	Sr	Fu	Dol	B/As
Sub-Bituminus	Low	High	Low	Medium	Low	Low
Lignit	High	Low	High	Medium	Low	High
Ampas Tebu	Medium	Low	High	Medium	Low	Low

Sebaliknya, batubara sub-bituminus menunjukkan nilai B/A rendah (0,49) dan Sr tinggi (90,20), yang berarti abu bersifat lebih asam dan memiliki titik leleh tinggi ($>1.500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Hal ini menunjukkan bahwa abu sub-bituminus relatif stabil terhadap peleburan dan memiliki kecenderungan *slagging* rendah. Meskipun nilai BAI (0,01) tergolong rendah yang secara teoritis menunjukkan potensi aglomerasi, akan tetapi nilai Dol (0,04) yang kecil menandakan kandungan oksida basa yang rendah, sehingga kemungkinan aglomerasi di sistem *fluidized bed* masih terbatas. Secara umum, abu batubara sub-bituminus lebih aman untuk pembakaran pada temperatur tinggi karena dominasi oksida asam seperti SiO_2 dan Al_2O_3 [1].

Untuk ampas tebu, nilai B/A (0,58) dan Sr (64,70) menempatkannya pada kategori *slagging* dan *fouling* sedang. Kandungan tinggi K_2O dalam abu ampas tebu menyebabkan potensi *fouling* meningkat, tercermin dari nilai Fu (1,63), meskipun masih dalam batas moderat. Fenomena ini sejalan dengan karakteristik biomassa yang kaya unsur alkali, yang mudah menguap dan mengendap di permukaan pemanas, sehingga menurunkan efisiensi perpindahan panas [8], [19]. Nilai Dol (0,13) menunjukkan kandungan oksida basa sedang, menandakan abu cenderung semi-refraktori dan masih berpotensi melebur sebagian.

Perbandingan ketiga bahan menunjukkan bahwa lignit memiliki kecenderungan *slagging* tertinggi, sedangkan sub-bituminus paling stabil, dan ampas tebu

berada di tingkat menengah. Korelasi antar indeks menunjukkan tren umum bahwa peningkatan B/A dan kandungan alkali (Na, K) berbanding terbalik dengan Sr, sedangkan Fe_2O_3 dan CaO berperan menetralkan efek alkali dengan meningkatkan titik leleh abu.

Rekomendasi teknis yang dihasilkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pencampuran (*co-firing*) antara ampas tebu dan batubara sub-bituminus direkomendasikan dalam rasio 20–30% biomassa terhadap total bahan bakar untuk menetralkan efek alkali tinggi dan menjaga kestabilan termal abu.
2. Batubara lignit sebaiknya dibakar pada temperatur nyala di bawah 1200 °C atau menggunakan aditif penstabil seperti dolomit atau kaolin untuk menurunkan kecenderungan *slagging*.
3. Untuk bahan bakar dengan nilai $F_u > 1$, seperti ampas tebu, perlu dilakukan pengendalian *fouling* melalui penurunan suhu gas buang (<800 °C) atau penggunaan aditif berbasis CaO/MgO guna mengikat unsur alkali volatil.
4. Evaluasi rutin terhadap komposisi kimia abu dan nilai indeks prediktif direkomendasikan sebagai metode diagnosis cepat sebelum pembakaran bahan bakar padat dilakukan, agar operasi boiler dapat berjalan efisien dan aman.

IV. KESIMPULAN

Unsur Na dan K terbukti berperan dominan dalam meningkatkan risiko *slagging* dan *fouling*, sedangkan unsur Ca dan Fe berkontribusi terhadap peningkatan titik leleh abu dan kestabilan termal sistem pembakaran. Oleh karena itu, keseimbangan antara oksida basa dan asam menjadi faktor kunci dalam menentukan perilaku abu selama pembakaran. Berdasarkan evaluasi tersebut, rekomendasi teknis yang dapat diterapkan adalah penggunaan ampas tebu dalam skema *co-firing* bersama batubara sub-bituminus. Pencampuran ini berpotensi menurunkan reaktivitas alkali, menstabilkan karakter abu melalui peningkatan fraksi oksida asam, dan mengurangi risiko *fouling* maupun korosi pada permukaan perpindahan panas. Selain itu, perlu dilakukan pengendalian suhu operasi agar volatilitas akibat pembakaran dapat diminimalkan, serta penerapan *pretreatment* seperti *water washing* untuk mengurangi kandungan alkali pada biomassa. Dengan demikian, penerapan parameter kimia seperti B/A, Sr, dan F_u dapat dijadikan dasar ilmiah dalam optimasi desain, pengoperasian, serta pengendalian kerak pada sistem pembakaran batubara dan biomassa di industri energi.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Laboratorium Analisis Batubara dan

Laboratorium Terpadu UPNVYK, serta seluruh pihak yang telah memberikan dukungan teknis selama proses analisis proksimat, ultimat, dan XRF pada penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada program studi Teknik Pertambangan, yang telah menyediakan fasilitas dan arahan ilmiah dalam penyusunan penelitian ini. Dukungan data, waktu, serta bimbingan akademik dari Bapak Ir. Shofa Rijalul Haq, S.T., M.Eng., Ph.D, yang sangat membantu dalam menyelesaikan penelitian berjudul “Analisis Peran Na, K, Ca, dan Fe terhadap Potensi Slagging dan Fouling pada Pembakaran Lignit, Sub-bituminus, dan Ampas Tebu.”

Penulis juga berterima kasih kepada seluruh rekan dan teknisi laboratorium yang turut membantu proses pengujian dan pengolahan data, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Ghazidin *et al.*, “A comprehensive evaluation of slagging and fouling indicators for solid fuel combustion,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 40, p. 101769, May 2023, doi: 10.1016/J.TSEP.2023.101769.
- [2] T. Wahyuni, S. Suprpto, and D. Prasetyoko, “Pengaruh Suhu Fusi Terhadap Pembentukan Zeolit A Dari

Abu Layang Batubara Paiton: Kapasitas Penukar Kation (Ca²⁺),” *Akta Kim. Indones.*, vol. 1, no. 1, p. 42, 2016, doi: 10.12962/j25493736.v1i1.1429.

- [3] S. V. Vassilev, D. Baxter, and C. G. Vassileva, “An overview of the behaviour of biomass during combustion: Part I. Phase-mineral transformations of organic and inorganic matter,” *Fuel*, vol. 112, pp. 391–449, Oct. 2013, doi: 10.1016/J.FUEL.2013.05.043.
- [4] S. V. Vassilev, D. Baxter, L. K. Andersen, and C. G. Vassileva, “An overview of the chemical composition of biomass,” *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 913–933, May 2010, doi: 10.1016/J.FUEL.2009.10.022.
- [5] M. Rzychoń, A. Zogała, and L. Róg, “An interpretable extreme gradient boosting model to predict ash fusion temperatures,” *Minerals*, vol. 10, no. 6, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3390/min10060487.
- [6] J. Lachman, M. Baláš, M. Lisý, H. Lisá, P. Milčák, and P. Elbl, “An overview of slagging and fouling indicators and their applicability to biomass fuels,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 217, no. August 2020, 2021, doi: 10.1016/j.fuproc.2021.106804.

- [7] B. M. Jenkins, L. L. Baxter, T. R. Miles, and T. R. Miles, "Combustion properties of biomass," *Fuel Process. Technol.*, vol. 54, no. 1–3, pp. 17–46, Mar. 1998, doi: 10.1016/S0378-3820(97)00059-3.
- [8] A. García-Maraver, V. Popov, and M. Zamorano, "A review of European standards for pellet quality," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 12, pp. 3537–3540, Dec. 2011, doi: 10.1016/J.RENENE.2011.05.013.
- [9] L. Ifa, F. F. F. Faisal, and D. Sarmanto, "Pengaruh Ukuran Partikel Pada Analisis Moisture Batubara Jenis Low Rank Coal," *J. Geomine*, vol. 7, no. 2, pp. 87–91, 2019, doi: 10.33536/jg.v7i2.329.
- [10] N. A. A. Salmi Samsudin Abdul Aziz Hairuddin, Siti Ujila Masuri, "Developing Sub-Bituminous Coal Sintering Ratio for Predicting Coal Ash Slagging Factors," *Int. J. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 291–319, 2021, doi: <https://doi.org/10.14716/ijtech.v12i4.4892>.
- [11] N. F. Said, V. Yuliana, M. B. Budiono, and S. A. Susilo, "Pembuatan dan Karakterisasi Briket Bio-Coal Berbahan Campuran Limbah Batubara dan Biomassa Rumput Melalui Proses Karbonisasi," *Akta Kim. Indones.*, vol. 8, no. 2, p. 111, 2023, doi: 10.12962/j25493736.v8i2.19181.
- [12] Hariana, "Ash Evaluation of Indonesian Coal Blending for Pulverized Coal-Fired Boilers", *Journal of Combustion*, 2021.
- [13] G. Akar, V. Arslan, M. E. Ertem, and Ü. Ipekoglu, "Relationship between ash fusion temperatures and coal mineral matter in some turkish coal ashes," *Asian J. Chem.*, vol. 21, no. 3, pp. 2105–2109, 2009.
- [14] E. Raask, *Mineral impurities in coal combustion: behavior, problems, and remedial measures*. Washington SE - xxi, 484 pages : illustrations ; 24 cm: Hemisphere Pub. Corp., 1985. doi: LK - <https://worldcat.org/title/10229580>.
- [15] S. A. Benson and P. L. Holm, "Comparison of inorganic constituents in three low-rank coals," vol. 24:1, 1985, doi: 10.1021/i300017a027.
- [16] W. Xuan, J. Zhang, and D. Xia, "The influence of MgO on the crystallization characteristics of synthetic coal slags," *Fuel*, vol. 222, pp. 523–528, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.FUEL.2018.02.197.
- [17] D. F. Umar *et al.*, "Torrefaction of rice husk as preparation of coal-biomass co-firing and its propensity on ash deposition," *Rud. Geol. Naft. Zb.*, vol. 39, no. 4, pp. 125–136, 2024, doi:

10.17794/rgn.2024.4.10.

- [18] S. T. Mac an Bhaird, E. Walsh, P. Hemmingway, A. L. Maglinao, S. C. Capareda, and K. P. McDonnell, “Analysis of bed agglomeration during gasification of wheat straw in a bubbling fluidised bed gasifier using mullite as bed material,” *Powder Technol.*, vol. 254, pp. 448–459, 2014, doi: 10.1016/j.powtec.2014.01.049.
- [19] T. R. Miles, J. Miles T R, L. L. Baxter, R. W. Bryers, B. M. Jenkins, and L. L. Oden, “Alkali deposits found in biomass power plants: A preliminary investigation of their extent and nature. Volume 1,” United States, 1995. doi: 10.2172/251288.