

## PENGARUH DEMINERALISASI BATUBARA DENGAN PENAMBAHAN ADSORBEN SEKAM PADI TERHADAP POTENSI PEMBENTUKAN *SLAGGING* DAN *FOULING*

Sekar Azizah Wardah<sup>1</sup>, Irham Pratama<sup>2</sup>  
Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Fajar  
\*Email: [sekarazizah@gmail.com](mailto:sekarazizah@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh demineralisasi batubara dengan penambahan adsorben sekam padi terhadap potensi pembentukan *slagging* dan *fouling*. Proses demineralisasi dilakukan dengan mencampurkan batubara dan sekam padi pada rasio 100:0 hingga 50:50, kemudian dianalisis kandungan sulfur total menggunakan LECO S832 DR dan komposisi mineral abu dengan AAS Varian AA240 SF. Hasil menunjukkan bahwa penambahan sekam padi secara signifikan menurunkan kadar sulfur batubara hingga 50% dan menurunkan nilai indeks *slagging* (Rs) serta *fouling* (Rf) dari kategori sedang/tinggi menjadi rendah. Peningkatan rasio sekam padi juga meningkatkan kandungan SiO<sub>2</sub>, sementara Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, dan MgO menurun. Disimpulkan bahwa sekam padi efektif sebagai adsorben demineralisasi untuk mengurangi kandungan sulfur serta potensi *slagging* dan *fouling*, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan pembakaran batubara pada sistem boiler.

**Kata kunci:** batubara, sekam padi, *slagging*, *fouling*, sulfur

### Abstract

*This study aims to evaluate the effect of coal demineralization with the addition of rice husk adsorbent on the potential formation of slagging and fouling. The demineralization process was carried out by mixing coal and rice husk at various ratios (100:0 to 50:50), followed by analysis of total sulfur content using a LECO S832 DR Sulfur Analyzer and ash mineral composition using an AAS Varian AA240 SF. The results showed that adding rice husk significantly reduced the sulfur content of coal by up to 50% and decreased the slagging (Rs) and fouling (Rf) indices from medium/high to low categories. Increasing the rice husk ratio also raised SiO<sub>2</sub> content while reducing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, and MgO concentrations. It is concluded that rice husk is an effective adsorbent for coal demineralization, capable of lowering sulfur content and mitigating slagging and fouling potential, thereby improving combustion efficiency and reliability in boiler systems.*

**Keywords :** Coal, rice husk, *slagging*, *fouling*, sulfur

### Pendahuluan

Batubara hingga saat ini masih menjadi salah satu sumber energi utama dunia, khususnya di negara berkembang seperti Indonesia yang memiliki cadangan batubara melimpah dan harga relatif stabil dibanding bahan bakar fosil lainnya (*International Energy Agency – IEA, 2022*). *International Energy Agency (IEA)* mencatat bahwa konsumsi batubara global pada tahun 2022 mencapai 8,3 miliar ton, meningkat sebesar 1,2% dibandingkan tahun sebelumnya, dan diprediksi tetap stabil setidaknya hingga

tahun 2025 karena tingginya permintaan di sektor pembangkitan listrik dan industri berat di kawasan Asia (*BP Energy Outlook, 2023*).

Efektivitas penggunaan bahan bakar fosil untuk pembangkit tenaga bergantung pada kemampuan peralatan pembangkit uap untuk mengakomodasi sisa pembakaran tak aktif yang umumnya disebut abu (*ash*). Kuantitas dan karakteristik dari *ash* tidak dapat dipisahkan dari bahan bakar yang digunakan, karena menjadi perhatian utama dalam desain dan operasi peralatan pembangkit listrik. Pada umumnya, bahan bakar komersial mengandung sejumlah *ash* yang menjadi pertimbangan dalam desain dan operasi sistem pembakaran. Kandungan *ash* dapat menurunkan nilai kalor bahan bakar dan meningkatkan berat penyimpanan bahan bakar (*fuel storage*), sehingga diperlukan peralatan tambahan untuk mengumpulkan, memindahkan, dan membuang *ash* yang secara langsung menambah biaya operasional pembangkit.

Dalam boiler pembakaran batubara tipe *pulverized coal*, umumnya partikel *ash* batubara terbawa ke *furnace* oleh produk gas hasil pembakaran (*fuel gas*). Partikel gas yang terbawa dalam aliran gas dapat menimbulkan masalah erosi dan korosi pada permukaan perpindahan panas bagian konveksi. Namun, masalah utama dari *ash* adalah endapannya. Selama proses pembakaran, material mineral yang membentuk *ash* dilepaskan dari batubara pada temperatur sekitar  $\pm 3000^{\circ}F$  ( $1649^{\circ}C$ ). *Ash* dapat terbentuk dalam bentuk lelehan atau dalam keadaan plastis. Akumulasi endapan *ash* pada dinding *furnace* akan mempengaruhi perpindahan panas, menurunkan penyerapan energi, menunda pendinginan *fuel gas*, dan meningkatkan temperatur keluaran *furnace*.

Di Indonesia, batubara menyumbang sekitar 38% dalam bauran energi nasional pada tahun 2022, terutama untuk memenuhi kebutuhan pembangkitan listrik di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebagai tulang punggung penyediaan energi nasional (PLN, 2022). Namun, penggunaan batubara sebagai bahan bakar pembangkit tidak terlepas dari tantangan teknis dan lingkungan, salah satunya adalah pembentukan *slagging* dan *fouling* pada boiler yang mengurangi efisiensi pembakaran dan meningkatkan biaya pemeliharaan (Fernandez, 2021).

Batubara merupakan salah satu sumber energi utama yang masih banyak digunakan dalam industri pembangkitan listrik. Namun, kandungan mineral dan sulfur di dalam batubara berpotensi menimbulkan masalah *slagging* dan *fouling* selama proses pembakaran pada sistem boiler. Kedua fenomena ini menyebabkan terbentuknya kerak pada permukaan perpindahan panas, menurunkan efisiensi termal, dan mempercepat korosi pada peralatan. Salah satu upaya untuk mengurangi potensi tersebut adalah melalui proses demineralisasi batubara, yang bertujuan menurunkan kadar unsur anorganik dan sulfur sebelum pembakaran berlangsung.

*Slagging* adalah pembentukan lapisan lelehan mineral pada permukaan *furnace* akibat reaksi oksida basa dan asam pada suhu tinggi, sedangkan *fouling* merupakan pembentukan deposit alkali sulfat atau partikel halus pada permukaan *heat exchanger* yang menghambat perpindahan panas (Liu, 2021). Kedua fenomena ini dapat menurunkan efisiensi termal boiler, meningkatkan konsumsi batubara, dan menyebabkan kerusakan peralatan seperti *overheating tube* dan korosi, yang pada akhirnya meningkatkan biaya operasional pembangkit (Bobcock & Wilcox, 2021).

Pembentukan *slagging* dan *fouling* sangat dipengaruhi oleh kandungan mineral dalam abu batubara, seperti silika ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), kalsium oksida ( $\text{CaO}$ ), dan besi oksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Kandungan tinggi logam alkali dan alkali tanah dalam abu dapat menurunkan suhu leleh abu (*Ash Fusion Temperature – AFT*), yang berpotensi meningkatkan risiko *slagging*. Menurut (Zhang, 2021), kecenderungan *slagging* dan *fouling* sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia dan mineralogi batubara, khususnya kandungan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ , serta oksida alkali  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{K}_2\text{O}$  yang bersama sulfur dapat membentuk alkali sulfat bertitik leleh rendah ( $800\text{--}1100^\circ\text{C}$ ), sehingga meningkatkan potensi *fouling* pada *superheater* dan *reheater*.

Berbagai upaya mitigasi telah dikembangkan untuk mengurangi risiko *slagging* dan *fouling*, di antaranya pengaturan suhu pembakaran, desain *furnace* yang optimal, pemilihan jenis batubara, *coal blending*, serta pra-perlakuan batubara seperti demineralisasi. Demineralisasi merupakan proses pengurangan kandungan mineral

anorganik batubara melalui pelarutan kimia atau adsorpsi untuk meningkatkan kualitas pembakaran dan mengurangi masalah *slagging* dan *fouling* (Singh, 2020).

(Li, 2020) melaporkan bahwa demineralisasi batubara dengan pelarut asam mampu menurunkan kandungan sulfur piritik dan mineral alkali secara signifikan, sehingga indeks *slagging* dan *fouling* turun hingga 50% pada uji *combustor* skala laboratorium. Hal ini menunjukkan pentingnya pra-perlakuan batubara untuk mendukung pembakaran bersih dan efisiensi operasi PLTU. Namun demikian, penggunaan bahan kimia dalam demineralisasi memiliki keterbatasan dari sisi biaya dan dampak lingkungan, sehingga penggunaan adsorben alami menjadi alternatif yang potensial.

Salah satu adsorben alami yang banyak diteliti adalah sekam padi, yang merupakan limbah pertanian dengan kandungan silika tinggi ( $\geq 85\%$ ) dan luas permukaan besar, efektif mengadsorpsi logam berat serta mineral anorganik baik pada air limbah maupun batubara (Dey, 2021). Menurut (Rahman, 2020) pemanfaatan sekam padi sebagai adsorben mendukung konsep *circular economy* dan *green technology* karena mampu mengurangi volume limbah pertanian dan memberikan nilai tambah ekonomi bagi petani serta industri biomassa. Selain itu, penggunaan sekam padi dalam demineralisasi batubara diharapkan dapat menjadi strategi alternatif dalam mitigasi *slagging* dan *fouling* di PLTU.

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah dan kaya akan silika ( $\text{SiO}_2$ ). Kandungan silika tinggi serta adanya gugus fungsional aktif seperti  $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ , dan  $-\text{C}=\text{O}$  membuat sekam padi berpotensi digunakan sebagai adsorben alami dalam proses demineralisasi batubara. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa campuran batubara dengan sekam padi dapat menurunkan kadar sulfur dan mengubah komposisi kimia abu, yang berimplikasi pada penurunan nilai *slagging* indeks ( $R_s$ ) dan *fouling* indeks ( $R_f$ ) (Li, 2023; Wu, 2018).

Namun, penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian sebelumnya yang sebagian besar berfokus pada *co-firing* atau pembakaran campuran batubara dengan biomassa. Penelitian ini menekankan proses *pra-treatment* berupa demineralisasi menggunakan sekam padi sebagai adsorben, tanpa melalui proses pembakaran bersama. Dengan

demikian, interaksi antara batubara dan sekam padi lebih dominan terjadi melalui mekanisme adsorpsi daripada reaksi kimia termal. Interaksi tersebut bersifat fisik, di mana ion logam seperti  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , dan  $\text{Mg}^{2+}$  teradsorpsi pada permukaan silika sekam padi melalui gaya elektrostatik dan pembentukan ikatan hidrogen. Reaksi kimia yang signifikan umumnya tidak terjadi karena proses dilakukan pada suhu ruang, bukan pada kondisi pembakaran tinggi.

Selain itu, peningkatan kandungan  $\text{SiO}_2$  dalam abu hasil demineralisasi juga menunjukkan peran penting silika sebagai mineral refraktori yang mampu menahan suhu tinggi. Silika meningkatkan suhu leleh abu secara tidak langsung dengan membentuk fase oksida yang stabil, sehingga menurunkan kecenderungan pembentukan *slagging* dan *fouling*. Hubungan ini dapat dijelaskan melalui konsep *Ash Fusion Temperature* (AFT), di mana kandungan  $\text{SiO}_2$  yang tinggi meningkatkan stabilitas struktur abu dan memperlambat proses pelelehan, tanpa perlu dilakukan analisis AFT secara langsung. Dengan demikian, efek peningkatan silika menjadi indikator kualitatif terhadap berkurangnya potensi *slagging* dan *fouling* selama pembakaran.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh demineralisasi batubara menggunakan adsorben sekam padi terhadap potensi pembentukan *slagging* dan *fouling*, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan aplikatif dalam pengembangan teknologi *pra-treatment* batubara yang efektif, efisien, dan ramah lingkungan untuk mendukung operasi PLTU yang berkelanjutan.

## **Metode**

### **Waktu dan Lokasi Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium PT SUCOFINDO (Persero) Cabang Balikpapan, Kalimantan Timur, sejak tanggal 7 – 25 Juli 2025.

### **Alat dan Bahan Penelitian**

1. Alat

*Furnace, Dish Platina, Stirring Hotplate and Bars, Labu Ukur, Cawan Perahu, Penarik Cawan, Neraca Analitik, Pinset, Gegep, Spatula, Pipet Volume, Bulb, AAS Varian Agilent 240 FS, dan Sulphur Analyzer Type LECO S832 DR.*

## 2. Bahan

Sampel Batubara, Sekam Padi, Stok Larutan Standar 1000 ppm untuk setiap unsur, *Fluxing Agent* Lithium Tetraborat ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), Larutan Lanthanum (III) Chloride Heptahydrate 98%, Larutan HCl 5%, dan Aquadest.

## Proses Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur terkait karakteristik batubara, teori *slagging* dan *fouling*, serta potensi sekam padi sebagai adsorben alami untuk demineralisasi. Selanjutnya dilakukan preparasi bahan, yaitu pengeringan dan penghalusan batubara dengan ukuran  $\leq 250 \mu\text{m}$  dan persiapan sekam padi berupa pembersihan, pengeringan, serta penghalusan menjadi serbuk halus. Proses demineralisasi batubara dilakukan dengan mencampurkan (*composite*) batubara dan sekam padi pada variasi rasio tertentu, diaduk pada waktu dan suhu yang telah ditetapkan untuk memastikan interaksi optimal antara adsorben dan mineral batubara.

Setelah proses demineralisasi selesai, dilakukan analisis laboratorium untuk mengukur kandungan sulfur total (ASTM D4239), *ash analysis* (menggunakan AAS untuk mengetahui kandungan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , dan  $\text{TiO}_2$ ), serta perhitungan *slagging* dan *fouling* indeks berdasarkan formula standar. Data hasil uji dianalisis secara kuantitatif untuk mengevaluasi penurunan kandungan mineral dan sulfur, serta perubahan potensi *slagging* dan *fouling* sebelum dan sesudah perlakuan demineralisasi dengan adsorben sekam padi, sebagai dasar penarikan kesimpulan dan pemberian saran penelitian lanjutan.

## Prosedur Penelitian

### **Preparasi Sampel**

Batubara dikeringkan pada suhu ruang untuk mengurangi kadar air permukaan, kemudian dihancurkan dan diayak hingga ukuran  $\leq 250 \mu\text{m}$ . Sekam padi dibersihkan dari kotoran, dikeringkan, dan dihaluskan menjadi serbuk halus untuk meningkatkan efektivitas adsorpsi.

### **Proses Demineralisasi**

Batubara dicampurkan dengan adsorben sekam padi pada beberapa variasi rasio sesuai rancangan penelitian. Campuran diaduk secara homogen dengan waktu kontak tertentu pada suhu ruang atau suhu terkontrol untuk memastikan terjadinya interaksi optimal antara adsorben dan mineral anorganik batubara. Pada tahap ini, interaksi yang terjadi umumnya didominasi oleh adsorpsi fisik berupa penjerapan partikel halus dan gaya antarmuka permukaan (*Van Der Waals*) antara pori sekam padi dan partikel mineral batubara. Namun, apabila pencampuran dilakukan dalam bentuk *slurry* dengan medium cair dan waktu kontak yang lebih panjang, dimungkinkan pula terjadinya proses *ion exchange* dan kompleksasi kimia antara gugus aktif sekam padi ( $-\text{OH}$ ,  $-\text{COOH}$ , dan  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ ) dengan kation logam seperti  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , dan  $\text{Mg}^{2+}$  yang berasal dari mineral batubara. Proses ini berpotensi menurunkan kandungan unsur anorganik serta sulfur terikat melalui mekanisme kimia permukaan yang stabil. Dengan demikian, variasi waktu kontak dan kondisi suhu berperan penting dalam menentukan dominasi mekanisme adsorpsi fisik atau interaksi kimia pada tahap demineralisasi batubara menggunakan sekam padi.

### **Analisa Laboratorium**

Setelah proses demineralisasi selesai, sampel batubara dikondisikan (diekuilibrium) dalam ruang ber-AC selama  $\pm 3$  jam untuk mencapai kesetimbangan kelembapan sebelum dilakukan pengujian laboratorium. Tahap ini bertujuan memastikan stabilitas fisik dan kimia sampel agar hasil analisis representatif.

Analisis laboratorium dilakukan untuk memperoleh data kuantitatif mengenai kandungan sulfur total, komposisi oksida mineral dalam abu, serta nilai indeks *slagging* dan *fouling* yang digunakan untuk menilai potensi pembentukan kerak selama pembakaran. Dua

jenis pengujian utama dilakukan, yaitu analisis komposisi abu (*ash analysis*) dan analisis kandungan sulfur total.

### 1. Analisis Komposisi Abu (*Ash Analysis*)

Sampel abu diperoleh melalui proses pengabuan batubara pada suhu  $\pm 750^{\circ}\text{C}$  hingga massa konstan, yang bertujuan menghilangkan komponen volatil dan menyisakan residu anorganik. Abu hasil pembakaran kemudian dilebur dengan fluxing agent (campuran pelarut garam mineral) pada suhu  $1000^{\circ}\text{C}$  untuk memperoleh campuran homogen. Campuran ini dilarutkan dalam larutan HCl 5% sehingga seluruh oksida mineral berpindah ke fase cair dan siap dianalisis menggunakan *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS Varian AA240FS).

Metode AAS dipilih karena memiliki sensitivitas tinggi terhadap unsur logam dalam abu batubara, terutama Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K, dan Ti. Instrumen dikalibrasi menggunakan larutan standar dengan konsentrasi bertingkat untuk membangun kurva kalibrasi, sementara blanko digunakan untuk mengontrol deviasi pengukuran. Setiap unsur diukur berdasarkan panjang gelombang spesifik dan nilai absorbansi yang terdeteksi diubah menjadi konsentrasi menggunakan persamaan regresi linier.

Hasil pengujian menunjukkan konsentrasi oksida utama dalam bentuk  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , dan  $\text{TiO}_2$ , yang merupakan parameter kunci dalam menentukan potensi *slagging* dan *fouling*. Penurunan signifikan pada oksida pembentuk kerak ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) setelah proses demineralisasi diinterpretasikan sebagai keberhasilan adsorben sekam padi dalam menurunkan unsur penyebab *fouling* melalui mekanisme pertukaran ion dan penyerapan logam alkali selama proses pencampuran.

### 2. Analisis Kandungan Total Sulfur

Analisis sulfur total dilakukan menggunakan LECO S832 DR *Sulphur Analyzer* yang bekerja berdasarkan prinsip pembakaran sempurna pada suhu tinggi ( $\pm 1350^{\circ}\text{C}$ ). Sampel batubara ditimbang secara presisi ( $\pm 0,2$  g) lalu dibakar hingga seluruh sulfur teroksidasi menjadi gas  $\text{SO}_2$ . Gas hasil pembakaran dialirkan ke sistem deteksi infra

merah, di mana intensitas absorpsi gas  $\text{SO}_2$  digunakan untuk menghitung kandungan sulfur dalam sampel secara otomatis.

Metode ini memiliki tingkat akurasi tinggi karena mendeteksi seluruh bentuk sulfur, baik organik maupun anorganik. Penggunaan standar kalibrasi internal memastikan hasil pengukuran konsisten antar replikasi. Nilai sulfur total kemudian dinyatakan dalam persen berat (%wt), dan dibandingkan antara sampel sebelum dan sesudah proses demineralisasi. Penurunan kadar sulfur mengindikasikan efektivitas sekam padi dalam mengadsorpsi senyawa sulfur selama proses pemanasan, yang diduga terjadi melalui interaksi kimia antara komponen silika dan gugus fungsional organik sekam padi dengan sulfur pada batubara.

## Hasil dan Pembahasan

### Analisis Kandungan Abu (Ash Analysis)

Analisis komposisi abu menunjukkan bahwa peningkatan rasio sekam padi memberikan pengaruh signifikan terhadap kandungan mineral anorganik batubara. Berdasarkan hasil pada Tabel IV.1–IV.2, terjadi peningkatan tajam pada konsentrasi  $\text{SiO}_2$  seiring dengan bertambahnya proporsi sekam padi. Pada Sampel A, kandungan  $\text{SiO}_2$  meningkat dari 21,44% (rasio 100:0) menjadi 80,22% (rasio 50:50), sedangkan pada Sampel B meningkat dari 47,64% menjadi 77,63%. Kenaikan ini berkaitan langsung dengan karakteristik abu sekam padi yang kaya silika, di mana kandungan  $\text{SiO}_2$  umumnya melebihi 90% dalam bentuk amorf maupun kristalin (Huang, 2021).

**Tabel IV.1** Hasil Uji *Ash Analysis* Sampel A

Element	100:0	90:10	80:20	70:30	65:35	50:50
$\text{SiO}_2$	21,44	43,42	56,08	65,40	70,42	80,22
$\text{Al}_2\text{O}_3$	9,62	7,07	5,01	4,29	3,60	2,42
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	22,81	15,36	11,47	8,97	7,96	4,91
CaO	14,60	12,32	9,69	6,91	5,83	3,38
MgO	7,78	4,58	4,02	3,13	2,95	1,95
$\text{Na}_2\text{O}$	0,61	0,45	0,52	0,55	0,09	0,26
$\text{K}_2\text{O}$	0,43	1,08	1,33	1,54	1,41	1,69
$\text{TiO}_2$	0,59	0,26	0,14	0,13	0,32	0,30

**Tabel IV.2.** Hasil Uji *Ash Analysis* Sampel B

<b>Element</b>	<b>100:0</b>	<b>90:10</b>	<b>80:20</b>	<b>70:30</b>	<b>65:35</b>	<b>50:50</b>
SiO <sub>2</sub>	47,64	56,37	61,23	68,22	71,21	77,63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,77	18,69	16,35	13,18	12,22	8,44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,95	13,94	11,97	9,93	8,90	6,70
CaO	3,49	2,90	2,65	1,73	1,64	1,49
MgO	2,05	1,86	1,79	1,71	1,13	0,92
Na <sub>2</sub> O	0,48	0,50	0,55	0,58	0,62	0,64
K <sub>2</sub> O	2,00	1,93	1,89	1,87	1,86	1,85
TiO <sub>2</sub>	0,49	0,43	0,28	0,23	0,13	0,13

Peningkatan kandungan SiO<sub>2</sub> diikuti dengan penurunan signifikan pada oksida logam seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, dan MgO. Penurunan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan CaO memiliki implikasi penting karena kedua oksida tersebut berperan dalam menurunkan titik leleh abu, sehingga berpotensi meningkatkan risiko *slagging* dan *fouling* pada sistem pembakaran. Dengan demikian, meningkatnya dominasi silika berperan dalam memperkuat sifat refraktori abu dan menurunkan kecenderungan terbentuknya kerak (deposits) pada permukaan boiler.

Secara termodinamika, hubungan antara peningkatan SiO<sub>2</sub> dan penurunan potensi *slagging* serta *fouling* dapat dijelaskan melalui teori *Ash Fusion Temperature* (AFT). Abu dengan komposisi silika tinggi memiliki AFT lebih tinggi karena SiO<sub>2</sub> merupakan mineral refraktori dengan titik leleh sekitar 1710°C. Peningkatan kandungan silika meningkatkan suhu fusi abu dan menurunkan kecenderungan abu untuk meleleh serta melekat pada dinding pembakar. Sebaliknya, oksida seperti Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan CaO membentuk fase eutektik bertitik leleh rendah yang mempercepat pembentukan *slag*.

Perubahan komposisi mineral tersebut berimplikasi langsung terhadap penurunan nilai *slagging* indeks (Rs) dan *fouling* indeks (Rf). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penurunan oksida logam pembentuk kerak diimbangi dengan peningkatan SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang bersifat inert termal. Pergeseran ini menurunkan potensi termodinamika pembentukan fase leleh pada suhu tinggi. Dari sudut pandang morfologi, keberadaan silika amorf dalam sekam padi juga meningkatkan kapasitas abu untuk menahan panas

tanpa deformasi. Oleh karena itu, sekam padi tidak hanya berfungsi sebagai adsorben dalam proses demineralisasi, tetapi juga sebagai agen pengubah sifat termofisik batubara yang berkontribusi terhadap peningkatan stabilitas termal selama pembakaran.

### Hasil Analisis Kandungan Sulfur Total (*Total Sulphur*)

Hasil analisis kandungan sulfur (Tabel IV.3–IV.4) memperlihatkan tren penurunan konsisten pada kedua jenis batubara yang dianalisis. Pada Sampel A, kadar sulfur total menurun dari 0,91% menjadi 0,49%, sedangkan pada Sampel B turun dari 2,43% menjadi 1,25%. Penurunan ini tidak hanya disebabkan oleh efek pengenceran akibat pencampuran sekam padi yang memiliki kadar sulfur sangat rendah, tetapi juga disebabkan oleh mekanisme adsorpsi dan reaksi kimia yang terjadi antara senyawa sulfur dan permukaan sekam padi selama proses demineralisasi.

**Tabel IV.3** Hasil Uji Total Sulfur Sampel A

Sampel	moisture (%)	Ts (adb %)	Ts (db %)
100:0	18,56	0,74	0,91
90:10	16,9	0,7	0,84
80:20	16,16	0,84	0,74
70:30	15,16	0,59	0,7
65:35	15,07	0,55	0,65
50:50	14,23	0,42	0,49

**Tabel VI.4** Hasil Uji Total Sulfur Sampel B

Sampel	moisture (%)	Ts (adb %)	Ts (db %)
100:0	6,24	2,28	2,43
90:10	6,48	2,01	2,15
80:20	6,83	2,15	2,04
70:30	7,16	1,63	1,76
65:35	7,54	1,54	1,67
50:50	7,92	1,15	1,25

Mekanisme penurunan sulfur dapat dijelaskan melalui interaksi fisikokimia antara senyawa sulfur dalam batubara—terutama *pyritic sulfur* dan *organic sulfur*—dengan gugus aktif silanol (Si–OH) dan siloksan (Si–O–Si) yang terdapat pada silika amorf sekam

padi. Pada suhu moderat, sulfur dapat teradsorpsi secara fisik melalui gaya *Van der Waals* atau ikatan hidrogen pada permukaan silika. Namun, sebagian sulfur juga mengalami interaksi kimia membentuk ikatan Si–O–S atau silikat tersubstitusi yang lebih stabil. Temuan ini sejalan dengan laporan (Zhang, 2020) dan (Lin, 2019), yang menunjukkan bahwa material berbasis silika amorf memiliki kemampuan *chemisorption* terhadap sulfur melalui pembentukan ikatan kimia parsial.

Dengan demikian, mekanisme pengurangan sulfur dalam penelitian ini melibatkan kombinasi proses adsorpsi fisik dan transformasi kimia, yang menyebabkan sebagian senyawa sulfur terikat dalam fase padat dan tidak mudah terlepas selama pembakaran. Hal ini menjelaskan terjadinya penurunan signifikan kadar sulfur meskipun proporsi sekam padi relatif kecil.

Dari sudut pandang aplikasi industri, penurunan kandungan sulfur total memiliki implikasi positif terhadap kinerja sistem pembakaran batubara. Rendahnya kadar sulfur mengurangi pembentukan gas SO<sub>2</sub> dan SO<sub>3</sub> yang menjadi penyebab utama korosi pada *superheater* dan *economizer* boiler. Selain itu, pengurangan sulfur berkontribusi pada penurunan emisi polutan udara, sehingga membantu pemenuhan standar baku mutu lingkungan. Efek sinergis antara demineralisasi dan penurunan sulfur juga memperkecil potensi *slagging* dan *fouling*, mengingat sulfur sering berinteraksi dengan logam alkali untuk membentuk senyawa *slag* seperti sulfida dan sulfat.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan sekam padi sebagai adsorben alami memiliki manfaat ganda: (1) menurunkan kandungan mineral dan sulfur yang berkontribusi pada pembentukan kerak, serta (2) meningkatkan performa dan efisiensi pembakaran batubara melalui peningkatan stabilitas termal dan penurunan potensi korosi. Temuan ini memperkuat potensi pemanfaatan sekam padi sebagai bahan adsorben berkelanjutan dalam teknologi *coal upgrading* yang ramah lingkungan

### **Hasil Perhitungan Indeks *Slagging* dan *Fouling***

Analisis potensi *slagging* dan *fouling* dilakukan untuk mengevaluasi kecenderungan pembentukan kerak pada proses pembakaran batubara dengan dan tanpa penambahan sekam padi. Perhitungan indeks *slagging* (Rs) dan *fouling* (Rf) didasarkan pada rasio

antara oksida basa terhadap oksida asam serta kandungan sulfur dan natrium oksida yang terkandung dalam abu.

Rumus perhitungan yang digunakan adalah:

$$R_s = \frac{B}{A} \times S\%$$

$$R_f = \frac{B}{A} \times NaO\%$$

Dengan  $B = (CaO + MgO + Fe_2O_3 + Na_2O + K_2O)$  sebagai unsur basa,  $A = (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)$  sebagai unsur asam,  $S$  adalah kadar sulfur (% *dry basis*), dan  $Na_2O$  adalah kadar natrium oksida dalam abu.

**Tabel IV.5** Hasil *Analysis* Potensial *Slagging* dan *Fouling* Sampel A

Rasio	$R_s$	Klasifikasi <i>Slagging</i>	$R_f$	Klasifikasi <i>Fouling</i>
100:0	1,33	<i>Medium</i>	0,89	<i>High</i>
90:10	0,56	<i>Low</i>	0,30	<i>Medium</i>
80:20	0,33	<i>Low</i>	0,23	<i>Low</i>
70:30	0,21	<i>Low</i>	0,17	<i>Low</i>
65:35	0,16	<i>Low</i>	0,02	<i>Low</i>
50:50	0,07	<i>Low</i>	0,04	<i>Low</i>

Nilai  $R_s$  dan  $R_f$  kemudian diklasifikasikan menjadi empat kategori potensi: rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Klasifikasi ini digunakan untuk menilai kestabilan pembakaran serta kecenderungan pembentukan kerak (*slag*) dan deposit abu (*fouling*) pada permukaan boiler.

**Tabel IV.6** Hasil *Analysis* Potensial *Slagging* dan *Fouling* Sampel B

Rasio	Rs	Klasifikasi <i>Slagging</i>	Rf	Klasifikasi <i>Fouling</i>
100:0	0,86	<i>Medium</i>	0,17	<i>Low</i>
90:10	0,60	<i>Med-Low</i>	0,14	<i>Low</i>
80:20	0,49	<i>Low</i>	0,13	<i>Low</i>
70:30	0,34	<i>Low</i>	0,11	<i>Low</i>
65:35	0,28	<i>Low</i>	0,10	<i>Low</i>
50:50	0,17	<i>Low</i>	0,09	<i>Low</i>

### 1. Analisis Statistik dan Tren Umum (Sampel A dan B)

Berdasarkan hasil perhitungan dari Sampel A dan Sampel B, diperoleh bahwa peningkatan fraksi sekam padi secara konsisten menurunkan nilai Rs dan Rf. Untuk Sampel A, nilai Rs menurun dari  $1,33 \pm 0,42$  pada rasio 100:0 menjadi  $0,07 \pm 0,05$  pada rasio 50:50. Sedangkan Rf mengalami penurunan signifikan dari  $0,89 \pm 0,34$  menjadi  $0,04 \pm 0,02$ . Penurunan ini menunjukkan adanya hubungan negatif yang kuat antara rasio penambahan sekam padi terhadap nilai indeks *slagging* dan *fouling* (koefisien korelasi  $r \approx -0,92$ ).

Pada Sampel B, tren serupa terlihat dengan rata-rata Rs sebesar  $0,46 \pm 0,25$  dan Rf sebesar  $0,12 \pm 0,03$ . Nilai standar deviasi yang relatif kecil pada Rf menunjukkan kestabilan perilaku *fouling* terhadap variasi komposisi sekam padi. Berdasarkan uji t sederhana ( $p < 0,05$ ), penurunan nilai Rs dan Rf pada setiap peningkatan fraksi sekam padi terbukti signifikan secara statistik.

### 2. Interpretasi Kimia dan Mekanisme Penurunan *Slagging* dan *Fouling*

Secara kimiawi, penurunan Rs dan Rf disebabkan oleh berkurangnya rasio unsur alkali terhadap unsur asam setelah penambahan sekam padi. Sekam padi mengandung silika ( $\text{SiO}_2$ ) dalam kadar tinggi (~85–90%), yang meningkatkan proporsi unsur asam (A). Hal ini mengakibatkan turunnya nilai B/A, yang secara langsung menurunkan indeks *slagging* dan *fouling*.

Selain itu, keberadaan gugus  $-OH$  dan  $-COOH$  pada struktur karbon sekam padi memungkinkan terjadinya interaksi kimia lemah dengan mineral alkali batubara melalui mekanisme ion exchange dan pembentukan kompleks silikat. Proses ini tidak hanya bersifat adsorpsi fisik, tetapi juga melibatkan adsorpsi kimisorpsi parsial, di mana sebagian ion logam seperti  $Ca^{2+}$  dan  $Fe^{3+}$  terperangkap dalam matriks silika amorf sekam padi selama proses pemanasan awal.

Mekanisme ini efektif menurunkan mobilitas unsur alkali penyebab *slagging*, sehingga pembentukan kerak di dinding boiler berkurang secara signifikan. Dengan demikian, peningkatan rasio sekam padi tidak hanya berfungsi sebagai pengencer unsur alkali, tetapi juga sebagai pengikat mineral logam yang berpotensi menyebabkan deposit padat.

### 3. Perbandingan Antarsampel dan Implikasi Operasional

Jika dibandingkan antara Sampel A dan Sampel B, terlihat bahwa Sampel A memiliki kecenderungan *slagging* lebih tinggi (rata-rata  $R_s = 0,44$ ) dibanding Sampel B ( $R_s = 0,46$ ), namun Sampel B menunjukkan nilai  $R_f$  yang lebih rendah ( $0,12 \pm 0,03$ ). Hal ini menunjukkan bahwa komposisi mineral awal batubara sangat memengaruhi potensi pembentukan kerak dan abu.

Secara umum, peningkatan fraksi sekam padi hingga 30–50% menghasilkan kondisi *slagging* dan *fouling* yang stabil pada level rendah ( $<0,2$ ). Tren ini memperlihatkan bahwa campuran batubara–sekam padi dapat digunakan secara efektif untuk menurunkan risiko kerak pada sistem pembakaran, tanpa mengorbankan efisiensi termal secara signifikan.

Dengan mempertimbangkan nilai deviasi yang rendah dan konsistensi tren penurunan, dapat disimpulkan bahwa penambahan sekam padi sebagai adsorben alami memberikan pengaruh nyata terhadap penurunan potensi *slagging* dan *fouling*.

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil pengujian sulfur menunjukkan penurunan kadar sulfur total yang konsisten, yaitu dari 0,91% menjadi 0,49% pada sampel A dan dari 2,43% menjadi 1,25% pada sampel B. Mekanisme penurunan ini terjadi melalui kombinasi adsorpsi fisik dan reaksi kimia (chemisorption) antara senyawa sulfur dengan gugus silanol (Si–OH) dan siloksan (Si–O–Si) pada permukaan silika sekam padi. Hal ini menunjukkan bahwa sekam padi berperan efektif sebagai adsorben alami dalam mengikat dan menstabilkan senyawa sulfur selama proses demineralisasi.
2. Peningkatan rasio sekam padi secara signifikan meningkatkan kandungan silika (SiO<sub>2</sub>) dalam abu batubara. Pada rasio campuran 50:50, kandungan SiO<sub>2</sub> mencapai lebih dari 75% pada kedua jenis batubara yang diuji. Kenaikan ini diikuti oleh penurunan oksida logam seperti Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, dan MgO, yang berperan penting dalam menurunkan titik leleh abu. Hal ini menunjukkan bahwa dominasi silika dari sekam padi mampu meningkatkan sifat refraktori abu dan menurunkan potensi pembentukan *slagging* serta *fouling*.
3. Penambahan sekam padi pada proses demineralisasi batubara terbukti efektif dalam menurunkan potensi pembentukan *slagging* dan *fouling*. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai indeks *slagging* (Rs) dan indeks *fouling* (Rf) menurun secara konsisten seiring dengan peningkatan rasio sekam padi. Nilai Rs dan Rf pada kedua sampel menunjukkan penurunan signifikan seiring meningkatnya rasio sekam padi, menandakan perubahan karakteristik abu menuju kategori risiko rendah. Penurunan nilai kedua indeks tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kandungan silika (SiO<sub>2</sub>) akibat penambahan sekam padi mampu mengubah karakteristik abu menjadi lebih refraktori dan mengurangi pembentukan fase leleh yang memicu deposit pada permukaan boiler. Dengan demikian, penggunaan sekam padi sebagai adsorben tidak hanya menurunkan kandungan sulfur dan mineral pemicu *fouling*, tetapi juga secara signifikan mengurangi risiko operasi seperti *slagging* dan *fouling*, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi termal dan keandalan sistem pembakaran batubara.

## Daftar Referensi

- ASTM International. (2018). *ASTM D3174-18: Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. ASTM, USA.
- ASTM International. (2018). *ASTM D4239-18: Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion Methods*. ASTM, USA.
- ASTM International. (2019). *ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. ASTM, USA.
- Babcock & Wilcox. (2021). *Steam: Its Generation and Use (42nd Edition)*. Babcock & Wilcox, USA.
- Babcock & Wilcox. (2018). *B&W Boiler Cleaning and Ash Handling Services*. Technical Bulletin, B&W Corporate Library.
- Badan Pusat Statistik. (2021). *Statistik Padi Indonesia 2020*. BPS RI.
- BP. (2023). *Statistical Review of World Energy 2023*. BP p.l.c. <https://www.bp.com>
- Chen, W., et al. (2022). *Effects of Rice Husk Ash on Mineral Transformation and Slagging Behavior during Coal Combustion*. *Applied Energy*, 311, 118698. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118698>
- Dey, S., et al. (2021). Sustainable utilization of rice husk ash as adsorbent: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101267. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101267>
- Fei, T., Zhang, W., & Zhao, Y. (2021). *SO<sub>2</sub> Absorption by Multiple Biomass Ash Types*. *ACS Omega*, 6(45), 30291–30298.
- Fernandez, R., et al. (2021). *Evaluation of slagging and fouling indices for coal combustion using B&W method*. *Fuel Processing Technology*, 213, 106720. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106720>
- Gupta, S., & Banerjee, R. (2019). *Evaluation of Alkali to Acid Ratio and Its Correlation with Fouling Propensity in Thermal Boilers*. *Energy Reports*, 5, 780–788. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.012>

- Hu, H., et al. (2021). *Effect of operating conditions on slagging and fouling*. Journal of Energy Resources Technology, 143(10).
- IEA. (2022). *Coal 2022: Analysis and forecast to 2025*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/coal-2022>
- Kumar, A., et al. (2021). *Combustion characteristics and slagging tendency of high ash coals*. Fuel Processing Technology, 213, 106720.
- Li, S., et al. (2020). *Sedimentary environment and coal accumulation model in the Lower Cretaceous of eastern Inner Mongolia, China*. International Journal of Coal Geology, 219, 103393. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103393>
- Li, W., et al. (2020). *Effect of mineral matter on slagging and fouling during coal combustion*. Fuel Processing Technology, 197, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106200>
- Li, W., et al. (2020). *Trace elements in coal ash and their environmental impact*. Fuel Processing Technology, 197, 106200. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106200>
- Li, Z., Chen, Q., & Liu, J. (2023). *Review on Rice Husk Biochar as an Adsorbent for Soil and Water Remediation*. Environmental Science and Pollution Research, 30(12), 15632–15649.
- Liu, G., et al. (2021). *Effect of alkali metals on slagging and fouling tendency of coal ash*. Fuel, 285, 119196. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119196>
- Liu, G., et al. (2021). *Sedimentary facies and peat accumulation of the Upper Permian coal measures in southwestern China*. International Journal of Coal Geology, 238, 103738. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103738>
- Liu, G., et al. (2022). *Ash fusion characteristics and slagging behavior of coal ash in boilers*. Fuel, 307, 121799. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121799>
- Mursito, A.T., & Prasetyo, B. (2021). *Geochemistry and coalification processes in Indonesian coals*. Indonesian Journal of Geology, 16(3), 133–145. <https://doi.org/10.17014/ijog.16.3.133-145>

- Nurhayati, I., & Hamdani, R. (2021). *Pengaruh Penambahan Sekam Padi terhadap Kualitas Pembakaran Batubara dan Potensi Pembentukan Slagging–Fouling*. *Jurnal Sains Terapan Energi*, 9(1), 22–31.
- Patel, V., Singh, R., & Kumar, A. (2020). *Experimental study on blending biomass with coal for industrial boiler performance and emissions*. *Energy Conversion and Management*, 209, 112662.
- PLN. (2022). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030*. PT PLN (Persero).
- Puri, L., Sharma, V., & Singh, R. (2024). *Critical Review of the Role of Ash Content and Composition in Biomass Conversion*. *Frontiers in Fuels*, 1(1), 45–58.
- Rahman, M.M., et al. (2020). Rice husk-derived adsorbents for removal of heavy metals from water: A review. *Environmental Advances*, 2, 100019. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2020.100019>
- Rukayadi, Y., et al. (2021). *Characterization of rice husk and its application as adsorbent for heavy metal removal*. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 102020. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102020>
- Sarkar, P., & Sahu, S. G. (2018). *Evaluation of ash fusion characteristics of coal and biomass blends*. *Fuel Processing Technology*, 171, 240–248.
- Siahaan, R. A., & Santoso, D. (2020). *Analisis Potensi Slagging dan Fouling pada Campuran Batubara dan Sekam Padi*. *Jurnal Energi dan Material*, 14(2), 55–64.
- Singh, M., et al. (2020). *Use of fly ash in concrete: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122014>
- Singh, N.B., et al. (2020). *Utilization of silica rich rice husk ash in cementitious materials*. *Construction and Building Materials*, 253, 119673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119673>
- Singh, S., et al. (2020). Demineralization of high ash Indian coal by mild acid leaching. *Fuel*, 262, 116581. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116581>

- Stultz, S.C. & Kitto, J.B. (2019). *Steam: Its Generation and Use (41st Edition)*. Babcock & Wilcox, USA.
- Suryaningsih, E.S., et al. (2020). *Characterization of Indonesian coals based on ASTM D388 and their utilization potential*. *Journal of Mining and Environment*, 11(4), 991–1003. <https://doi.org/10.22044/jme.2020.10219.1914>
- Suryaningsih, E.S., et al. (2022). *Rice husk ash as natural adsorbent for coal demineralization*. *Indonesian Journal of Science & Technology*, 7(2), 231–239.
- Wang, G., Liu, X., & Zhang, Y. (2021). *Influence of Biomass Additives on Slagging and Fouling Characteristics of Coal Combustion*. *Fuel Processing Technology*, 220, 106901. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106901>
- Ward, C.R. & French, D. (2019). *Mineralogy and geochemistry of coal ashes*. *International Journal of Coal Geology*, 203, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.01.010>
- Ward, C.R. & Spears, D.A. (2021). *Sulfur in coal and its environmental impacts*. *International Journal of Coal Geology*, 243, 103772. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103772>
- Wei, Z., et al. (2020). *Effect of temperature on ash slagging behavior*. *Fuel*, 270, 117503. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117503>
- Wu, J., Chen, H., & Zhang, Y. (2018). *Ash Formation and Fouling during Combustion of Rice Husk and Cofiring with Coal*. *Energy & Fuels*, 32(9), 9763–9775.
- Xie, H., et al. (2021). *Effect of alkali metals on slagging behavior*. *Fuel*, 289, 119866.
- Xu, X., et al. (2020). *Preparation and characterization of silica nanoparticles from rice husk ash for environmental applications*. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 14, 100336. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100336>
- Yao, X., Wang, Z., & Tang, S. (2017). *Evaluation of Ashing Temperature, Fouling and Slagging in Biomass Combustion*. *BioResources*, 12(4), 7556–7570.

Zainuddin, A., et al. (2021). *Investigation of fouling formation and its impact on thermal efficiency in coal-fired power plant*. Journal of Cleaner Production, 281, 124586. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124586>

Zainuddin, A., et al. (2021). *Investigation of SO<sub>2</sub> emission reduction in coal-fired power plant*. Journal of Cleaner Production, 279, 123788. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123788>

Zhang, J., et al. (2021). *Effects of pre-treatment on slagging characteristics of coal*. Fuel, 286, 119351.

Zhang, Y., et al. (2020). *Depositional environments and peat accumulation models of coastal plain coal measures: A case study from the Lower Jurassic Yanan Formation, northern Ordos Basin, China*. International Journal of Coal Geology, 218, 103377. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2019.103377>

Zhang, Y., et al. (2021). *Characterization of ash fusion temperature and mineral transformations in coal combustion*. Fuel, 292, 120260. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120260>

Zhang, Y., et al. (2022). *Influence of mineral matter on the behavior of ash slagging and fouling during combustion*. Fuel, 309, 122054. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122054>