



DEVELOPMENT OF ALOE VERA-BASED DESULFURIZATION METHOD TO IMPROVE THE QUALITY OF SUMATRA'S COAL

Iqbal Hapsauqi¹⁾, Erda Rahmilaila Desfitri²⁾ Farrah Fadhillah Hanum^{1)*} dan Martomo Setyawan¹⁾

¹⁾Program Studi Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas

Ahmad Dahlan, Jl. Ringroad Selatan, Tamanan, Banguntapan, Bantul, D. I. Yogyakarta, Indonesia,

²⁾Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta,

Jl. Gajah Mada, Gunung Pangilun, Padang, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 Jan 2024,

Revised 16 Mar 2024,

Accepted 04 Apr 2024,

Available online 30 Apr 2024

Keywords:

- ✓ Aloe vera;
- ✓ Coal;
- ✓ Desulfurization;
- ✓ Leaching;
- ✓ Saponin

*corresponding author:

farrah.hanum@che.uad.ac.id

Phone: +62585602704861

<https://doi.org/10.31938/jsn.v14i2.699>

ABSTRACT

Coal is Indonesia's primary energy source, contributing approximately 65.5% to the total electricity production in 2021. The high sulfur gas emissions during the coal combustion have negatively impacted air quality and the surrounding ecosystem. Consequently, researchers have conducted numerous studies on reducing sulfur content in coal. This study specifically explores the impact of adding Aloe vera extract in desulfurization. Aloe vera contains saponin, a surfactant-like compound that can alter the surface properties of minerals in coal, making sulfur particles easier to eliminate. In the experiment, aloe vera extract was applied to coal with variations of 100, 200, and 300 mL. The mixture was stirred using a magnetic stirrer at 100 rpm for one hour. Subsequently, the coal was separated and analyzed for sulfur content, calorific value, and ash content. The research results indicated that adding Aloe vera extract significantly reduces sulfur content in coal, simultaneously improving the overall quality of the coal with a sulfur reduction ranging from 7% to 22%. Moreover, the process reduced the ash content in the coal. By harnessing the potential of Aloe vera as a natural desulfurizing agent, this study presents an innovative and environmentally friendly solution to mitigate hazardous gas emissions during coal combustion.

ABSTRAK

Pengembangan Metode Desulfurisasi Berbasis Lidah Buaya Dalam Meningkatkan Kualitas Batubara Sumatera

Batubara masih menjadi sumber utama energi di Indonesia, memberikan kontribusi sekitar 65,5% dari total produksi listrik pada tahun 2021. Tingginya emisi gas sulfur selama proses pembakaran batubara menyebabkan dampak negatif terhadap kualitas udara dan ekosistem sekitar. Oleh karena itu, penelitian mengenai metode pengurangan kandungan sulfur dalam batubara banyak dilakukan oleh peneliti. Studi ini membahas mengenai dampak penambahan ekstrak lidah buaya pada proses desulfurisasi. Lidah buaya mengandung saponin yang memiliki sifat surfaktan, yang dapat merubah sifat permukaan mineral dalam batubara. Ini dapat membuat partikel sulfur lebih mudah untuk dihilangkan. Lidah buaya dikontakkan dengan batubara dengan variasi 100, 200, dan 300 mL jumlah ekstrak lidah buaya. Campuran diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 100 rpm selama 1 (satu) jam. Batubara kemudian dipisahkan dan dianalisis kandungan sulfur, nilai kalori dan kadar abunya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan ekstrak lidah buaya secara signifikan mengurangi kadar sulfur dalam batubara, sekaligus meningkatkan kualitas batubara secara keseluruhan dengan penurunan kadar sulfur mencapai 7% hingga 22%. Selain itu, proses ini juga mengurangi kandungan abu dalam batubara. Dengan memanfaatkan potensi lidah buaya sebagai agen desulfurisasi alami, penelitian ini menjadi solusi inovatif dan ramah lingkungan untuk mengurangi emisi gas berbahaya selama pembakaran batubara.

Kata kunci: Batubara, Desulfurisasi, Lidah buaya, *Leaching*, Saponin

PENDAHULUAN

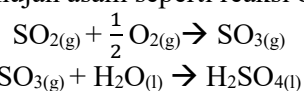
Batubara masih menjadi sumber energi utama dalam menghasilkan listrik di Indonesia. Menurut data dari Dewan Energi Nasional (DEN)

pada tahun 2021 porsi produksi listrik pembangkit berbahan bakar batubara adalah sekitar 65,5%. Hal ini berarti lebih dari setengah kebutuhan listrik di Indonesia masih dipasok oleh Batubara, diikuti oleh gas alam dan energi baru terbarukan



(EBT) (Dewan Energi Nasional, 2021). Meskipun pemerintah sedang berusaha mengembangkan EBT, namun posisi batubara sebagai sumber energi tidak akan tergantikan begitu saja. Seperti yang disampaikan oleh Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara (Ditjen Minerba) produksi listrik pembangkit berbahan bakar batubara masih akan tetap mendominasi pada masa mendatang, walaupun pangsa pasarnya terhadap total produksi listrik semakin menurun menjadi 41% pada tahun 2050 (Yasin *et al.*, 2021). Hal ini menunjukkan batubara akan tetap ada sebagai salah satu sumber energi fosil.

Tantangan utama penggunaan batubara sebagai bahan bakar adalah tingginya emisi gas-gas dari oksida sulfur (SO_x) selama pembakaran. Hal ini berpotensi merusak kualitas udara dan memberikan dampak negatif pada ekosistem sekitarnya. Kandungan SO_x dalam batubara dan abu batubara setelah pembakaran sangat bervariasi antara 0,27%-1,22% (Desfitri *et al.*, 2020; Suhat *et al.*, 2020; Talla *et al.*, 2014). Ketika batubara dibakar, belerang diubah menjadi gas SO_2 dan SO_3 yang dapat menyebabkan iritasi pada sistem pernafasan manusia. Emisi sulfur dioksida berkontribusi terhadap polusi udara dan dapat menyebabkan terbentuknya hujan asam. Ketika batubara dibakar, sulfur yang ada di dalamnya bereaksi dengan oksigen membentuk sulfur dioksida dan oksida sulfur lainnya (Müller *et al.*, 2013; Munawer, 2018). Gas SO_x ini dilepaskan ke atmosfer, berkontribusi terhadap polusi udara dan pembentukan hujan asam seperti reaksi berikut:



Efek bahaya yang ditimbulkan oleh kandungan SO_x pada batubara ini, penelitian tentang desulfurisasi batubara sudah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu, baik menggunakan zat kimia maupun dengan menggunakan bahan alam seperti minyak nabati, belimbing wuluh dan juga gel lidah buaya dengan berbagai metode. Desulfurisasi batubara dengan metode *leaching* menggunakan pelarut kalsium hipoklorit dilakukan dengan memvariasikan suhu menemukan hasil maksimal pada temperatur 60°C (Sulaiman & Setiawan, 2014). Desulfurisasi batubara menggunakan asam nitrat (HNO_3) dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi ditemukan bahwa semakin tinggi konsentrasi asam nitrat semakin tinggi sulfur yang dapat terikat dari batubara (Ardany, 2019). Desulfurisasi dan deashing menggunakan HCl dan NaOH juga pernah diteliti (Widodo *et al.*,

2019). Desulfurisasi batubara menggunakan ekstrak belimbing wuluh juga pernah diteliti oleh Balai Penelitian Teknologi Mineral Lampung dengan memvariasikan luas permukaan batubara dan waktu kontak pelindian (Amin *et al.*, 2019). Selain itu, daun petai cina juga pernah diteliti untuk dimanfaatkan sebagai media desulfurisasi (Sulaiman & Setiawan, 2014).

Dari perkembangan penelitian tentang desulfurisasi selama ini dapat diketahui bahwa desulfurisasi dapat dilakukan dengan penambahan pelarut berbahan kimia. Namun, hal ini dapat menimbulkan masalah baru dalam pengolahan pelarut yang digunakan. Pelarut seperti asam nitrat, natrium hidroksida, asam sulfat, asam klorida, dan asam hipoklorit dapat menimbulkan masalah baru bagi lingkungan. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan desulfurisasi dengan memanfaatkan bahan alam yang ramah lingkungan. Penelitian ini berfokus pada penerapan teknologi desulfurisasi batubara dengan menggunakan ekstrak lidah buaya. Lidah buaya mengandung saponin, yaitu kelompok senyawa alami kompleks dengan berat molekul besar yang mengandung aglikon dan satu atau lebih rantai gula/glikosida, baik steroid maupun triterpenoid, berdasarkan sifat kimianya.

Saponin mempunyai sifat yang dapat mengubah sifat permukaan mineral yang disukai air menjadi mineral yang kurang kompatibel dengan air dengan cara menurunkan tegangan permukaan, dan sebagai zat yang menstabilkan gelembung udara dalam air. Kadar saponin dalam gel lidah buaya menurut penelitian sebelumnya adalah 5,651% per 100 gram (Annisa *et al.*, 2013). Penelitian lain mengatakan bahwa lidah buaya mengandung 29 senyawa saponin termasuk steroid dan triterpenoid saponin (Akbari *et al.*, 2021).

Metode ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif dan ramah lingkungan untuk mengurangi emisi gas berbahaya selama pembakaran batubara terutama di Pulau Sumatera. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, tetapi juga untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan sektor energi di pulau ini. Dengan memanfaatkan potensi lidah buaya sebagai agen desulfurisasi alami, diharapkan dapat tercipta solusi yang berkelanjutan untuk memitigasi dampak lingkungan dari penggunaan batubara, sekaligus membantu mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan di Pulau Sumatera.

BAHAN DAN METODE

Bahan dan Alat

Dalam penelitian ini, digunakan sampel batubara yang berasal dari tiga provinsi berbeda di Pulau Sumatera, masing-masing diberi inisial BB-A, BB-B, dan BB-C. Ekstrak lidah buaya (*Aloe vera*) digunakan sebagai pelarut *leaching* untuk mengurangi kandungan sulfur. Alat yang digunakan melibatkan *magnetic stirrer*, *vacuum pump*, *beaker glass*, *volumetric glass*, *blender*, kertas saring, oven, *furnace*, dan neraca analitik. Selain itu, untuk analisis dilakukan dengan menggunakan kalorimeter PARR 6200 untuk menentukan nilai kalori dan *Furnace Infra-Red Sulphur (IRS) Leco* untuk analisis kandungan sulfur.

Metode

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu persiapan sampel, dilanjutkan dengan tahapan *leaching*, ekstrak *Aloe vera* akan dikontakkan dengan masing-masing sampel abu batubara. Hasil *leaching* akan dianalisis kadar total sulfur, nilai kalor, dan analisis proksimat yang dilakukan dengan merujuk pada metode *American Standar Testing and Material (ASTM)*.

Proses Leaching Sulfur Menggunakan Gel Lidah Buaya

Batubara ditimbang sejumlah 50 gram dan dicampur dengan gel lidah buaya dengan variasi 100, 200, dan 300 mL. Campuran tersebut diaduk menggunakan *magnetic stirrer* dengan kecepatan 100 rpm selama satu jam. Setelah proses pengadukan selesai, larutan dipisahkan dari padatan menggunakan kertas saring dan bantuan pompa vakum. Padatan yang dihasilkan dikeringkan pada suhu ruang hingga mencapai keadaan kering, yang ditandai dengan berat yang hampir konstan. Padatan yang telah kering dianalisis kadar abu, sulfur, dan kalorinya.

Analisis Kadar Abu

Penentuan kadar abu mengacu pada cara kerja yang ditetapkan oleh ASTM (D3174-11, 2020). Cawan dan tutupnya terlebih dahulu dikeringkan di dalam Oven pada suhu 105°C selama 15 menit. Setelah itu, cawan tersebut didinginkan dalam desikator selama 5 menit untuk siap dipakai. Cawan beserta tutupnya ditimbang dan dicatat beratnya sebagai m_1 . Batubara ditimbang sebanyak 1 g ke dalam cawan + tutupnya, dicatat sebagai m_2 . Cawan berisi batubara dimasukkan ke dalam *furnace*, lalu

dipanaskan secara bertahap sampai suhu mencapai 450-500°C dalam waktu 1 jam dan dilanjutkan memanaskan contoh batubara hingga suhu 700 sampai 750°C tercapai pada akhir jam kedua. *Furnace* dipanaskan pada suhu akhir untuk tambahan 2 jam. Cawan dikeluarkan dari tungku, ditempatkan di atas *plate* aluminium dan didinginkan selama 3 menit. Pendinginan dilanjutkan selama 5 menit dengan cara dimasukkan ke dalam desikator. Cawan ditimbang dan diulang kembali hingga sampai mencapai berat konstan ($\pm 0,001$ g) (dicatat sebagai m_3). Jumlah kadar abu dihitung dengan rumus berikut:

$$\% \text{ kadar abu} = \frac{(m_3 - m_1)}{(m_2 - m_1)} \times 100 \quad (1)$$

Keterangan:

m_1 = Berat awal cawan + tutupnya (g)

m_2 = Berat cawan + tutupnya + batubara (g)

m_3 = Berat cawan + tutupnya + abu (g)

Analisis Sulfur

Analisis sulfur dilakukan dengan mengacu ke ASTM (D4239-12, 2018) menggunakan alat *Furnace Total Sulphur Infra Red* dengan prinsip sampel batubara dipanaskan pada suhu tinggi dan dialiri gas O_2 (oksigen). Kandungan sulfur dideteksi oleh detektor IR dan muncul pada layar seperti pada Gambar 1.

Analisis Kalor

Sampel batubara yang sudah dipreparasi dimasukkan ke dalam kalori meter. Jumlah kalor atau nilai bakar dibaca pada layar alat. Prosedur ini mengacu pada standar ASTM (D5865-11a, 2019). Sampel sebanyak $1,0000 \pm 0,001$ g ditimbang menggunakan wadah cawan penguap. Gelas kimia dipasang ke pembawa sampel di antara *port* silinder. Kabel pemadam api dengan panjang standar dihubungkan ke terminal bom. Benang katun biasa diikat pada kawat pembakar sehingga ujung benang kapas menyentuh bagian atas sampel arang. Air sebanyak 5 mL ditambahkan ke bom. Bom dan isinya ditempatkan secara perlahan dengan oksigen hingga 25 atmosfer. Wadah kalorimeter diisi air dengan volume (atau massa) standar. Suhu air ini kira-kira 2 °C lebih rendah dari suhu jaket kalorimeter. Bom yang telah terpasang dimasukkan ke dalam bejana kalorimeter. Dipastikan tidak ada udara yang bocor. Elektroda dihubungkan dan tutupnya dipasang sehingga pengaduk dan alat sensor tepat pada posisinya.

Pengaduk dinyalakan, identitas sampel dimasukkan ke dalam mikroprosesor. Nilai total kalori (*calorific value*) terukur secara otomatis dan muncul pada layar, kemudian dicetak.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakterisasi Awal Batubara

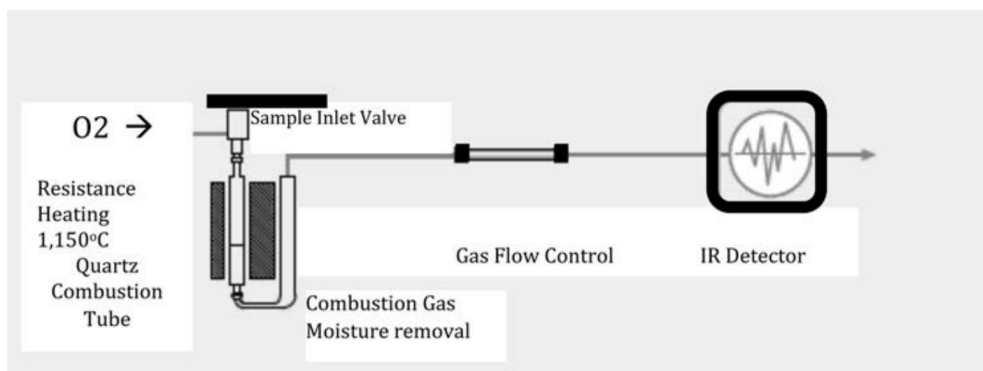
Kualitas ketiga sampel batubara yang berasal dari 3 (tiga) provinsi yang berada di Pulau Sumatera dikarakterisasi melalui parameter kadar sulfur, kadar abu, dan nilai kalori. Nilai masing-masing dari parameter tersebut bisa dilihat pada Tabel 1.

Pada Tabel 1 dapat dilihat bahwa kadar abu masih di atas 10%, sedangkan kadar sulfur untuk sampel BB-B dan BB-C masih di atas 3% dan untuk kalori berada di atas 5000 Kkal untuk ketiga sampel. Kandungan sulfur pada ketiga sampel ini hampir sama dengan kadar sulfur yang ada di daerah Cina Utara yang memiliki kandungan sulfur sekitar 0,19% sampai 7,69% (Wu *et al.*, 2022). Jika dibandingkan dengan kadar sulfur yang ada pada penelitian dampak kadar sulfur

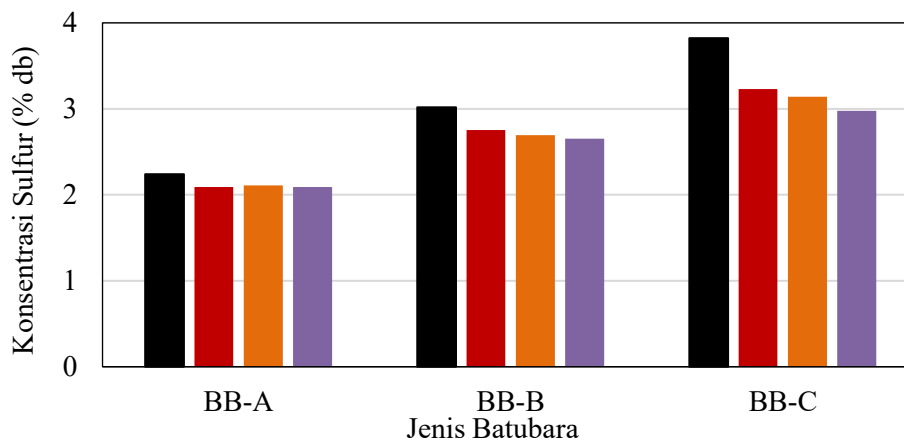
terhadap kualitas batubara di dataran delta, ketiga sampel ini memiliki kandungan yang lebih tinggi (Sari *et al.*, 2017). Dalam kegiatan komersial kandungan sulfur yang lebih dari 3% akan mempengaruhi nilai jual. Berdasarkan studi lapangan dari beberapa surveyor di Indonesia beberapa konsumen tidak mau menerima batubara yang memiliki kandungan sulfur lebih dari 3% karena akan berakibat buruk ke *boiller* dan lingkungan sekitar. Hal ini membuat harga batubara jatuh di pasaran. Oleh karena itu, perlu dilakukan desulfurisasi dengan bahan yang ekonomis seperti dengan memanfaatkan gel lidah buaya.

Tabel 1. Karakterisasi Awal Batubara

Parameter/Satuan	Kode Sampel		
	BB-A	BB-B	BB-C
Kadar Abu (%) db	10,65	18,49	12,43
Kadar Sulfur (%) db	2,24	3,02	3,82
Kalori (Kkal/Kg) db	6140	5882	6677



Gambar 1. Peralatan Penentuan Sulfur dengan Deteksi Inframerah (Sumber: ASTM D4239-12, 2018)



Gambar 2. Pengaruh Penambahan Gel Lidah Buaya Terhadap Nilai Sulfur

Pengaruh Gel Lidah Buaya Terhadap Sulfur

Dalam rangka menurunkan kadar sulfur yang ada di batubara dilakukan pencucian sulfur dengan penambahan lidah buaya dengan memvariasikan jumlah gel lidah buaya. Pengaruh penambahan lidah buaya terhadap kadar sulfur batubara dapat dilihat pada Gambar 2.

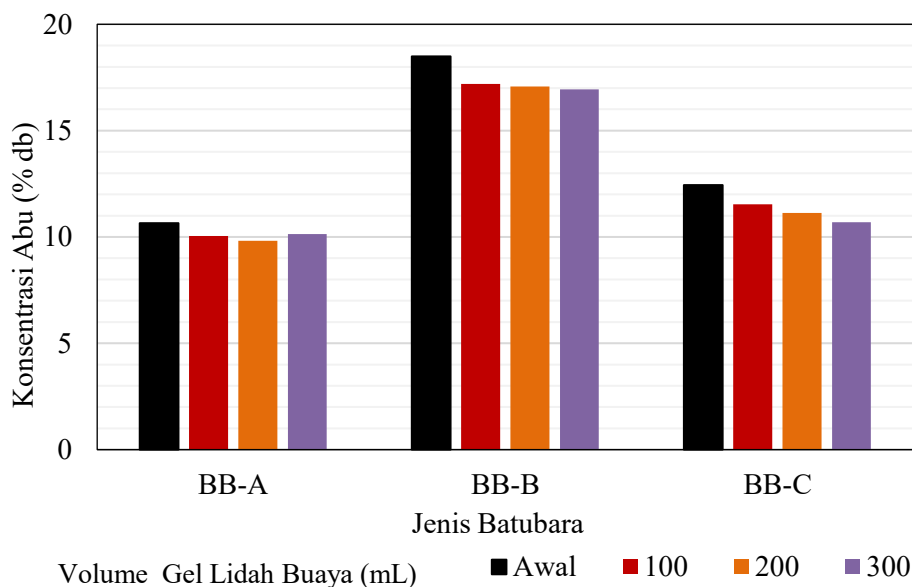
Pada Gambar 2. dapat dilihat pengaruh penambahan gel lidah buaya pada kadar sulfur tiap-tiap sampel. Sampel BB-A memiliki kandungan awal sulfur sejumlah 2,24%db, kemudian menurun hingga 2,09%dbb. Begitu juga dengan sampel BB-B yang memiliki kadar sulfur 2,66%db menurun dengan seiring dengan penambahan jumlah gel lidah buaya 100, 200, dan 300mL menjadi 2,75%db, 2,69%db dan 2,65%db. Sedangkan sampel BB-C yang awalnya memiliki kandungan sulfur 3,82%db menurun hingga 2,98%db dengan penambahan 300 mL gel lidah buaya. Persentase pengurangan kadar sulfur ini berkisar antara 7 sampai dengan 22%. Penurunan kadar sulfur ini dipengaruhi oleh kandungan saponin yang ada pada lidah buaya. Kerja permukaan dari larutan saponin memungkinkan untuk melepas pengotor sulfur yang terdapat pada batubara dari permukaan yang sedang dibersihkan dan mengemulsikannya, sehingga sulfur terlepas dari batubara (Kuntaarsa & Subagyo, 2019; 2020). Persentase penurunan ini memang masih rendah jika dibandingkan dengan desulfurisasi menggunakan HCl yang mampu menurunkan

hingga 54% (Maidi & Yunasril, 2020). Namun, penggunaan HCl dalam penurunan kadar sulfur membutuhkan biaya yang lebih tinggi. Selain itu, limbah dari pencucian dengan HCl ini juga dapat mempengaruhi kestabilan lingkungan (Hasan, 2006).

Kadar Abu

Kandungan abu yang tinggi dalam batubara dapat mempengaruhi nilai kalor saat pembakaran. Kandungan abu dan nilai kalori memiliki hubungan yang berbanding terbalik. Semakin tinggi kadar abu maka nilai kalori akan semakin rendah (Annisa, 2017; Jayanti *et al.*, 2007). Oleh karena itu, kandungan nilai abu dalam batubara sebaiknya memiliki nilai yang kecil. Dalam penelitian ini ditemukan bahwa penambahan gel lidah buaya juga dapat menurunkan kandungan abu seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Pada Gambar 3 dapat dilihat pengaruh penambahan lidah buaya terhadap kadar abu batubara. Batubara yang sudah di-*leaching* menggunakan gel lidah buaya memiliki konsentrasi lebih rendah dibandingkan dengan batubara awal. Hal ini membuktikan bahwa proses *leaching* batubara menggunakan gel lidah buaya dapat meningkatkan kualitas batubara secara keseluruhan. Hal ini juga selaras dengan penelitian yang dilakukan sebelumnya (Kuntaarsa & Subagyo, 2020).



Gambar 3. Pengaruh Gel Lidah Buaya Terhadap Kandungan Abu

Tabel 2. Pengaruh Gel Lidah Buaya terhadap Nilai Kalor

Kode Sampel	Nilai Kalor Batubara (Kkal/Kg) (db)			
	Penambahan Gel Lidah Buaya (mL)			
	Awal	100	200	300
BB-A	6140	5916	5933	5923
BB-B	5882	5687	5732	5723
BB-C	6677	6471	6521	6553

Pengaruh Penambahan Gel Lidah Buaya terhadap Nilai Kalor

Kualitas batubara ditentukan oleh nilai kalor yang dimiliki oleh batubara tersebut. Batubara yang memiliki nilai kalor yang tinggi banyak diminati oleh konsumen. Industri yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar memiliki nilai standar tertentu dalam penggunaan batubara. Nilai kalor batubara memberikan indikasi tentang seberapa efisien dan berpotensi sebagai sumber energi batubara tersebut. Secara umum, semakin tinggi nilai kalor, semakin baik kualitas batubara sebagai bahan bakar. Batubara dengan kandungan sulfur tinggi cenderung mempengaruhi nilai kalor. Sulfur dapat menghasilkan senyawa seperti sulfur dioksida (SO_2) selama pembakaran, yang dapat mengurangi efisiensi proses pembakaran. Senyawa SO_2 juga berkontribusi terhadap polusi udara dan dapat menyebabkan masalah kesehatan dan dampak negatif pada lingkungan. Batubara dengan kandungan sulfur rendah cenderung memberikan panas yang lebih bersih selama pembakaran. Pengurangan kandungan sulfur juga mengurangi emisi SO_2 , yang merupakan langkah positif untuk menjaga kualitas udara dan mengurangi dampak lingkungan negatif (Agung *et al.*, 2019; Dian *et al.*, 2021). Dalam penelitian ini ditemukan bahwa gel lidah buaya dapat berpengaruh terhadap nilai kalor seperti yang terlihat pada Tabel 2.

KESIMPULAN

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa penambahan gel lidah buaya secara signifikan dapat menurunkan kadar sulfur dalam batubara, juga dapat mempengaruhi kualitas batubara secara keseluruhan. Hal ini dapat dilihat dengan adanya penurunan nilai kadar abu dan nilai kalor pada batubara. Pengurangan kadar sulfur berkisar antara 7% hingga 22%, yang dianggap sebagai solusi inovatif dan ramah lingkungan untuk mengurangi emisi gas berbahaya selama

pembakaran batubara. Meskipun persentase pengurangan sulfur ini masih lebih rendah dibandingkan dengan metode desulfurisasi kimia, seperti HCl, tetapi penelitian ini menekankan keunggulan dari pendekatan alami menggunakan lidah buaya yang lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, metode ini diharapkan dapat membantu mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan di Pulau Sumatera, dengan mengurangi dampak lingkungan negatif dari penggunaan batubara sebagai sumber energi. Penelitian ini masih perlu dikembangkan untuk menentukan rasio pelarut dengan sampel yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Agung, N. M., Nugroho, W., & Hasan, H. (2019). Hubungan Kandungan Total Sulfur Terhadap *Gross Calorific Value* Pada Batubara PT. Carsurin Samarinda. *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 7(1), 1–8.
- Akbari, S., Abdurahman, N. H., Yunus, R. M., Alsaggaf, A. H. A., & Ahmed, N. (2021). LC-QTOF-MS Analysis of Phenolics and Saponins Extracted from *Aloe vera* Leaves via Microwave Technology in Optimal Condition. *South African Journal of Botany*, 139, 362–373. doi: 10.1016/j.sajb.2021.02.027.
- Amin, M., Birawidha D. V., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., Muttaqqi, M. A., & Prilitasari, N. M. (2019). Desulfurisasi Batubara Menggunakan Ekstrak Belimbing Wuluh (*Everrhoa Bilimbi* L). *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 16(2), 44–52. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v16i2.44-52>.
- Annisa, A. (2017). Diterminasi Seberapa Kuat Pengaruh Nilai Kandungan Abu Terhadap

- Nilai Zat Terbang Dan Nilai Kalori Dalam Persentasi. *Jurnal Geosapta*, 3(2).
- Annisa, F. P., Farid, M., & Laras, R. (2013). Efektivitas Lidah Buaya (*Aloe vera*) Di Dalam Mereduksi Formalin Pada Fillet Ikan Bandeng (*Chanos chanos* Forsk) Selama Penyimpanan Suhu Dingin. *Jurnal Pengolahan Dan Bioteknologi Hasil Perikanan*, 2(3), 21–30.
- Ardany, M. J. (2019). Desulfurisasi Batubara Menggunakan Kombinasi Asam Nitrat (HNO_3) dan Hidrogen Peroksida (H_2O_2) (Master's thesis). Teknik Kimia, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia.
- ASTM D3174-11. (2020). *Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, (Reapproved 2018), 1–5. doi: 10.1520/D3174-11.2.
- ASTM D4239-12. (2018). *Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High-Temperature Tube Furnace Combustion*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 12(c), 1–6. doi: 10.1520/D4239-12.2.
- ASTM D5865-11a. (2019). *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 11(c), 1–19. doi: 10.1520/D5865-11A.2.
- Dewan Energi Nasional. (2021). *Energi Outlook Indonesia 2022*. Jakarta, Indonesia: Author.
- Desfitri, E. R., Sutopo, U. M., Hayakawa, Y., & Kambara, S. (2020). Effect of Additive Material on Controlling Chromium (Cr) Leaching from Coal Fly Ash. *Minerals*, 10(6), 1–12. doi: 10.3390/min10060563.
- Dian, A., Syamsul, B., Fauzi, W., & Syamsul, H. (2021). Science and Technology Analisis Hubungan Kandungan Total Moisture, Total Sulphur. *Jurnal Tambora*, 5(3), 50–55.
- Hasan, A. (2006). Dampak Penggunaan Klorin. *Jurnal Teknologi Lingkungan P3TL-BPPT*, 7(1), 90–96.
- Jayanti, S., Maheswaran, K., & Saravanan, V. (2007). Assessment of the Effect of High Ash Content in Pulverized Coal Combustion. *Applied Mathematical Modelling*, 31(5), 934–953. doi: 10.1016/j.apm.2006.03.022.
- Kuntaarsa, A., & Subagyo, P. (2020). Desulfurisasi Batubara Dengan Metode Flotasi Menggunakan Gel Lidah Buaya. *Teknologi Technoscintia*, 12(2), 102–113. <https://doi.org/10.34151/technoscintia.v12i2.2380>.
- Kuntaarsa, A., & Subagyo, P. (2019). Pengaruh Laju Alir Udara Pada Desulfurasi Batubara Dengan Model Flotasi Dengan Menggunakan Gel Lidah Buaya. Simposium Nasional RAPI XVIII (pp. 386–391) Surakarta: Indonesia.
- Maidi, S., & Yunasril, Y. (2020). Desulfurisasi Batubara Dengan Metode Leaching Menggunakan Pelarut Asam Klorida (HCl). *Jurnal Bina Tambang*, 5(2), 218–227. <https://doi.org/10.24036/bt.v5i2.108021>.
- Müller, M., Schnell, W., & Scheffknecht, G. (2013). Modelling the Fate of Sulphur during Pulverized Coal Combustion under Conventional and Oxy-Fuel Conditions. *Energy Procedia*, 37, 1377–1388. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.014.
- Munawer, M. E. (2018). Human Health and Environmental Impacts of Coal Combustion and Post-Combustion Wastes. *Journal of Sustainable Mining*, 17(2), 87–96. doi: 10.1016/j.jsm.2017.12.007.
- Sari, Siska Linda, Mutia Armilia Rahmawati, Alan Triyoga, and Idar Wati. 2017. “Impact of Sulphur Content on Coal Quality at Delta Plain Depositional Environment: Case Study in Geramat District, Lahat Regency, South Sumatra.” *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology* 2(3):183. doi: 10.24273/jgeet.2017.2.3.301.
- Suhat, B., Widayat, A. H., & Anggayana, K. (2020). Studi Karakteristik Beberapa Batubara Indonesia Untuk Mendukung Prospek Pemanfaatannya. Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI (pp. 21–30). Jakarta, Indonesia.

- Sulaiman, F., & Setiawan, I. B. (2014). Desulfurisasi Batubara Bayah Dengan Metode Leaching Menggunakan Pelarut Kalsium Hipoklorit. 1–5.
- Talla, H., Amijaya, H., Harijoko, A., & Huda, M. (2014). Karakteristik Batubara Dan Pengaruhnya Terhadap Proses Pencairan. *Reaktor*, 14(4), 267-271. doi: 10.14710/reaktor.14.4.267-271.
- Widodo, S., Sufriadin, & Erwin, S. (2019). Desulfurisasi dan *Deashing* pada Batubara Menggunakan NaOH dan HCl sebagai *Leaching Agent*. *Jurnal Geomine*, 7(1), 67–79.
- Wu, M., Shen, J., Qin, Y., Qin, Y., Wang, X., & Zhu, S. (2022). Method of Identifying Total Sulfur Content in Coal: Geochemical and Geophysical Logging Data from the Upper Paleozoic in North China. *ACS Omega*, 7(49), 45045–56. doi: 10.1021/acsomega.2c05459.
- Yasin, C., Lesmana, B., Praditya, A., Ferlianta, W., Ariyanto, D., Handayani, R., Susilawati, S., Simatupang, G., Ampun, S., Lucia, A., Presetio, H., & Ambarsari, L. (2021). *Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara*. Jakarta, Indonesia: Direktorat Jenderal Mineral dan batubara.