

Black Liquor sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan dari Industri Pulp dan Kertas

Rahmat Hidayat¹, M.Ikhwan Syahtaria¹

¹Energy Security Department, Defense Management Faculty, Indonesia Defense University, Central Jakarta, Indonesia

Email : rhidayat.app@gmail.com, syahtaria90@gmail.com

Abstrak: Kebutuhan energi industri pulp dan kertas mengalami pertumbuhan dengan rata-rata 2,49% per tahun dari 108,5 juta SBM pada tahun 2018 menjadi 135,4 juta SBM pada tahun 2027 sehingga industri pulp kertas dikategorikan sebagai industri dengan pemakaian energi yang lumayan besar. Oleh karena itu diperlukan sebuah metode terbaru dalam penggunaan teknologi pada industri tersebut sehingga dapat menghasilkan efisiensi tinggi yang pada akhirnya mampu mengurangi pemakaian energi. Hingga saat ini lindi hitam (*black liquor*) dari pabrik pulp kertas di Indonesia pada belum banyak digunakan secara optimal sebagai bahan bakar boiler. Upaya pemanfaatan *black liquor* dan penggunaan teknologi yang efisien di industri pulp kertas mampu membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil serta dapat mereduksi emisi dari bahan bakar berbasis fosil. Panas pembakaran *black liquor* mencapai 13,8 MJ/kg pada proses *recovery boiler*. Dengan metode gasifikasi, energi yang diproduksi akan lebih tinggi karena dapat menghasilkan bahan bakar dan gas sintetis. *Black liquor* juga dapat menjadi sumber energi berkelanjutan yang diunggulkan, karena dapat dimanfaatkan untuk pembuatan gas hidrogen, biobriket, maupun untuk efisiensi energi pada industri pulp dan kertas.

Kata Kunci : Black Liquor, Pulp dan Kertas, Energi Terbarukan

Abstract: The energy needs of the pulp and paper industry increase by an average of 2.49% per year, from 108.5 million BOE in 2018 to 135.4 million BOE in 2027, so that it is an industry with quite large energy consumption. Therefore, it is necessary to innovate the use of technology with high efficiency so as to reduce energy use. Until now, black liquor from pulp and paper mills in Indonesia has generally not been utilized optimally as boiler fuel. Efforts to utilize black liquor and apply efficient technology in the pulp and paper industry can help reduce dependence on fossil fuels and reduce emissions from fossil fuels. The heat of combustion of black liquor reaches 13.8 MJ/kg in the recovery boiler process. With a gasification system, energy productivity will be higher because it can produce fuel and synthetic gas. Black liquor is also a superior source of sustainable energy because it can be

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2023, Vol. 4, No. 2, pp 108 – 117

Received : 21 Maret 2023

Accepted : 29 Mei 2023

Published : 20 Juli 2023



Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

used to produce hydrogen gas, biobriquettes, and improve energy efficiency in the pulp and paper industry.

Keywords: Black Liquor, Pulp and Paper, Renewable Energy

1. Pendahuluan

Pemakaian energi dewasa ini terus mengalami peningkatan dengan jumlah permintaan energi sebesar 45% dengan rerata 1.6 % per tahun hingga tahun 2030 di seluruh dunia berlandaskan data yang dihimpun oleh IEA (*International Energy Agency*). Adapun energi yang bersumber dari fosil merupakan sumber utama dalam menyokong permintaan energi tersebut yakni sebesar 80%. Hal ini mendasari untuk ditemukannya sumber energi lain yang dapat mengisi permintaan energi tersebut sebagai alternatif energi yang dikenal dengan energi terbarukan (Susantini & Oktariani, 2021).

Industri pulp dan kertas merupakan industri dimana hasil produksinya terus mengalami peningkatan, yakni sekitar 2,49% tiap tahunnya. Peningkatan jumlah industri tentunya juga diikuti dengan peningkatan jumlah limbah, yang mana akan meningkatkan risiko kerusakan lingkungan. Hal ini akan mempengaruhi kualitas air tanah yang akan berkurang jika limbah dibuang ke sungai. Industri kertas banyak menggunakan bahan baku dari kayu, selulosa dan kertas bekas. UU No. 32 tahun 2009 merupakan peraturan yang mengatur industri pulp dan kertas untuk lebih berupaya meningkatkan pengelolaan lingkungannya. Penerapan sistem manajemen lingkungan dan didukung oleh pencapaian kinerja lingkungan diharapkan mampu memberikan inovasi dalam pengelolaan lingkungan pada perusahaan sehingga meningkatkan citra perusahaan, mengurangi dampak lingkungan yang negatif, efisiensi proses, dan pemenuhan persyaratan (Erwin, 2021).

Proses kraft merupakan salah satu sektor yang menggunakan gas alam dalam jumlah besar di industri pulp, terutama *lime kiln* pada unit pemulihan kimia. Tidak seperti metode pembuatan pulp konvensional, kraft proses pulping memiliki beberapa keunggulan. Pertama, proses tersebut dapat menghasilkan pulp yang sangat kuat, mentolerir berbagai spesies kayu, dan memungkinkan untuk merecover 96% hingga 98% dari bahan kimia alkali yang digunakan. Uap yang dihasilkan selama proses *recovered* kimia juga dapat digunakan untuk produksi listrik dan pengeringan pulp dan kertas. Pemulihan bahan kimia alkali menghasilkan lindi hitam (*black liquor*) sebagai produk sampingan dalam proses pembuatan pulp kraft. Proses kraft pada *pulping* menggunakan serpihan kayu sebagai bahan baku utamanya dan bahan kimia alkalin sebagai pelengkap untuk menghilangkan lignin, melalui proses ramah lingkungan sehingga dapat berkontribusi terhadap pengurangan gas rumah kaca (Kim et al., 2019).

Black liquor merupakan limbah dari industri kertas. Kandungan yang terdapat dalam *Black liquor* berupa air, bahan anorganik kimia pemasak berupa garam-garam sodium, 50% lignin serta bahan organik lainnya yang dipisahkan dari pulp selama proses cooking dan washing. Komponen organik menyusun sebanyak 60% dari total padatan *black liquor* (Hamsar et al., 2019). Tabel 1 menampilkan komposisi unsur *black liquor*.

Tabel 1.

Komposisi Unsur *Black Liquor* dari Proses Kraft (Verrill, 2007), (Energy & Technology, 2002)

| Primary Elements | Content (%) |
|--------------------------------|--------------------|
| Carbon (C) | 35.0 |
| Hydrogen (H) | 3.3 |
| Oxygen (O) | 35.7 |
| Sodium (Na) | 19.7 |
| Potassium (K) | 1.6 |
| Sulfur (S) | 4.0 |
| Minor Elements | Content |
| Calcium (Ca) | 600 ppm |
| Aluminum (Al) | 50 ppm |
| Silica (Si) | 700 ppm |
| Iron (Fe) | 150 ppm |
| Carbonate (CO ₃ 2-) | 8% |
| Sulfate (SO ₄ 2-) | 3 % |

Lignin dan karbohidrat dari serpihan kayu, karbon dan oksigen komponen Menyusun sebanyak 77,7%, diikuti oleh natrium yang berasal dari bahan kimia alkali sebanyak 19,7%. Di antara komponen-komponen ini, natrium, sulfat, karbonat, kalsium, aluminium, dan silika berkontribusi pada pembentukan kristalisasi *fouling* dan kerak dalam pipa ketel (Bajpai, 2014). Kandungan senyawa organik (lignin) memberikan nilai kalor yang tinggi pada *Black Liquor* sehingga memberikan pengaruh pada *recovery boiler* (Jusuf et al., 2019). Pada pabrik pulp dengan kapasitas produksi 5 juta ton/tahun dapat menghasilkan 8,5 juta ton *black liquor* atau setara 2,55 juta kilo liter minyak mentah. Panas pembakaran *black liquor* mencapai 13,8 MJ/kg pada proses *recovery boiler* (Firmansyah et al., 2022). Dengan sistem gasifikasi, produktivitas energi akan lebih tinggi karena dapat menghasilkan bahan bakar dan gas sintetis. *Black liquor* juga menjadi sumber energi berkelanjutan yang diunggulkan, karena dapat di untuk pembuatan gas hidrogen (Roy Ghatak, 2006), biobriket (Susantini & Oktariani, 2021), maupun untuk efisiensi energi pada industry pulp dan kertas (Kim et al., 2019).

Black liquor dibuat dengan proses pemanasan liquor yang mengandung bahan organik dari kayu (terutama lignin) dan bahan kimia anorganik yang digunakan untuk delignifikasi. Dalam proses Kraft, penambahan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium sulfida (Na₂S) ke dalam serpihan kayu menghasilkan ekstraksi lignin dan hemiselulosa dari fraksi selulosa yang tidak larut (Heeres et al., 2018). *Black liquor* keluar dari proses pemasakan dengan kandungan padatan 15-18%. *Black liquor* yang keluar dari proses penguapan, memiliki kandungan padatan sekitar 70-83% (Muweke & Petrusson, 2019). Bagian anorganik (sekitar 45% massa kering *black liquor*) terdiri dari natrium karbonat dan natrium sulfat. Hal ini dikarenakan kehadiran bahan anorganik, nilai kalor untuk *lower heating value* (LHV) per ton padatan *black liquor* yakni sebesar 12,3 MJ/kg (Naqvi et al., 2012). Sebuah pabrik pulp menghasilkan 1,7–1,8 ton padatan kering *black liquor* per ton pulp dan mewakili energi potensial sebesar 250–500 MW per pabrik yang menghasilkan 1.000–2.000 ADt pulp per hari (Larson et al., 1998). Kandungan energi *black liquor* dari berbagai jenis bahan baku dan proses *pulping* yang berbeda ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2.

Kandungan Energi *Black Liquor* dari Berbagai Jenis Bahan Baku dan Proses *Pulping* yang Berbeda
(Syamsudin & Rizaluddin, 2021)

| Pulping Process | Feedstock | Proximate analysis (%) | | | Ultimate analysis (%) | | | | HHV (MJ/kg) |
|-----------------|------------------------|------------------------|-----------------|--------------|-----------------------|------|------|------|-------------|
| | | Ash | Volatile matter | Fixed carbon | C | H | N | S | |
| Kraft | Pine & spruce | 35.93 | 56.92 | 7.15 | 30.67 | 3.74 | 0.67 | 0.00 | 14.51 |
| Kraft | Reed | 24.39 | 50.00 | 25.61 | 33.76 | 4.15 | 0.38 | 0.95 | 13.35 |
| Soda | Wheat straw | 26.74 | 54.43 | 11.65 | 39.84 | 3.03 | 0.31 | 0.64 | 9.70 |
| Soda | Wheat straw | 20.63 | 65.98 | 13.39 | 39.05 | 4.54 | 1.00 | 0.78 | 14.43 |
| NSSC | Broadleaf wood | 24.17 | 50.62 | 25.21 | 36.32 | 3.43 | 0.04 | 5.45 | 14.98 |
| NSSC | Recycle paper and wood | 23.27 | 66.19 | 10.54 | 38.30 | 4.74 | 0.39 | 0.00 | 15.71 |

Berdasarkan penjelasan uraian di atas, penulisan jurnal ini bertujuan untuk mengkaji potensi *black liquor* sebagai energi terbarukan dari Industri pulp dan paper dengan melakukan *review* terhadap beberapa jurnal ilmiah sehingga diharapkan memberikan pengetahuan kepada peneliti selanjutnya mengenai *black liquor*.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam karya ini adalah pendekatan kualitatif, yaitu studi literatur. Jenis studi kepustakaan merupakan rangkaian tindakan yang meliputi cara pengumpulan data kepustakaan, membaca dan mencatat, serta mengorganisasikan sumber penelitian untuk jenis penelitian ini (Sutton & Austin, 2015). Studi pustaka juga termasuk dalam penelitian dan dapat digolongkan sebagai kegiatan ilmiah karena pengumpulan data dilakukan sesuai rencana berupa metodologi penelitian (Melfianora, 2019). Proses yang telah diselesaikan adalah: (1) konseptualisasi masalah, (2) pencarian literatur, (3) telaah data, dan (4) analisis dan interpretasi hasil (Prastiwi, Winiarti, Frecilia, 2014)

Pada langkah analisis, terdapat tahapan mencari persamaan (membandingkan); inkonsistensi (kontras); mengungkapkan pendapat (mengkritik); membuat perbandingan (sintesis) dan memberikan ringkasan singkat (summarize) (Xiao & Watson, 2019). Sumber yang digunakan dalam metode studi pustaka adalah artikel jurnal, makalah, tesis, disertasi, jurnal dan/atau hasil konferensi, website; media massa, website pemerintah, internet dan sebagainya yang relevan dan memiliki validitas yang jelas.

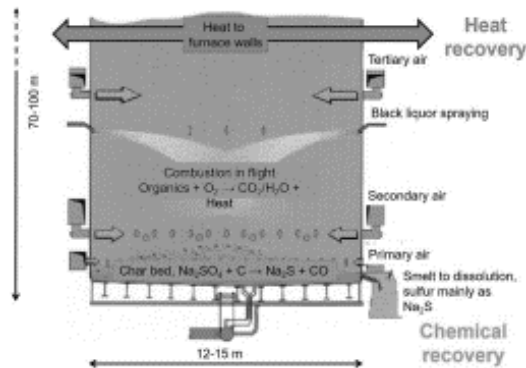
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Gasifikasi Black Liquor

Gasifikasi adalah proses perubahan bahan bakar padat menjadi gas yang mudah terbakar (CO , CH_4 , H_2) selama pembakaran dengan suplai udara terbatas, yaitu 20% hingga 40% dari

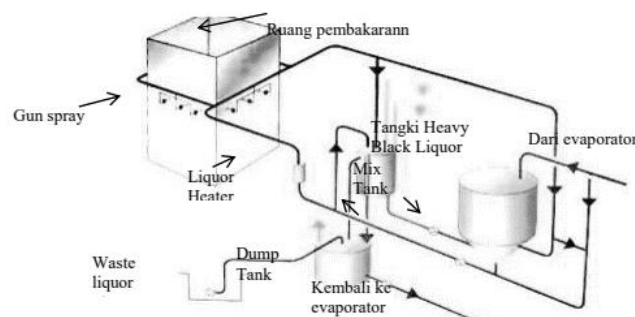
3.2. Black Liquor sebagai Energi Bahan Bakar untuk Recovery Boiler

Tujuan dari pengoperasian *recovery boiler* adalah untuk memulihkan bahan kimia yang dikonsumsi melalui oksidasi reaksi bahan organik termasuk *black liquor*, dengan tujuan untuk mereduksi Na_2SO_4 , dan untuk mendapatkan panas yang dihasilkan dari proses tersebut. *Recovery Boiler* beroperasi dengan menggunakan bahan bakar *black liquor*.



Gambar 2. Proses Recovery Boiler pada Lower Furnace (Kim et al., 2019)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2, level udara primer terletak dekat dengan bagian bawah tungku dan memainkan peran penting dalam menurunkan ketinggian area pembakaran ke *char bed*. Udara sekunder berkisar antara 4-5 m di atas permukaan udara primer dan berkontribusi pada pembakaran bahan yang mudah menguap yang mengandung *black liquor*. Udara tersier sekitar 3-5 m di atas sekunder tingkat udara dan memainkan peran penting dalam meminimalkan udara sumber polusi udara dengan membakar *black liquor* hampir menyeluruh. Meskipun kandungan lignin tinggi dalam *black liquor*, nilai kalor per ton padatan *black liquor* relatif rendah. Sebagai perbandingan, nilai kalor dari lignin adalah 25 MJ/kg sampai 26 MJ/kg, sedangkan selulosa dan hemiselulosa 16 MJ/kg sampai 18 MJ/. Kandungan lignin yang tinggi dari *softwoods* akan menghasilkan nilai kalor total yang lebih tinggi. Adapun nilai kalor yang dihasilkan selama pembakaran proses *black liquor* adalah sekitar 14,5 MJ/kg pada *higher heating value* dan 12,3 MJ/kg pada *lower heating value* untuk 80% kandungan padatan *black liquor* (Kim et al., 2019).



Gambar 3. Aliran Bahan Bakar pada Recovery Boiler (Sefitrah & Rizal, 2015)

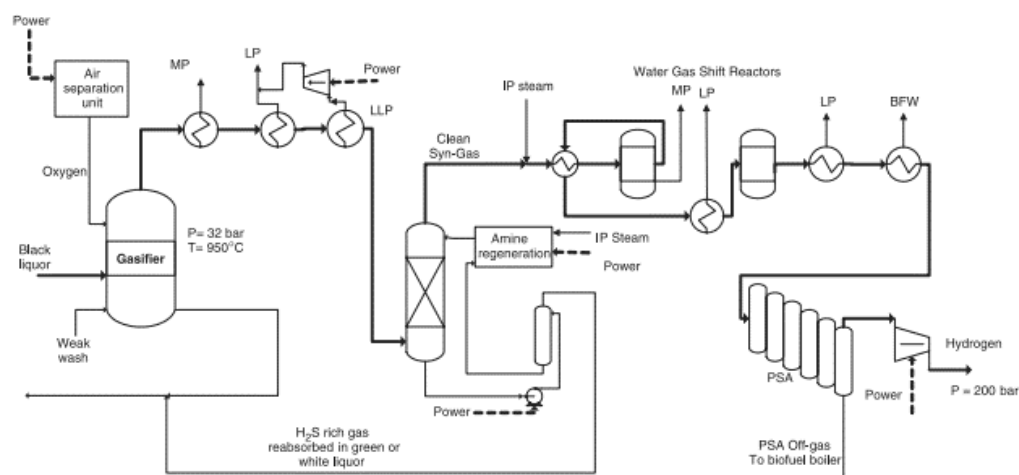
Gambar 3. Di atas memperlihatkan sistem untuk menyuplai bahan bahan bakar *black liquor* yang akan digunakan pada Recovery Boiler. Pertama kali *heavy black liquor* dialirkan dari *evaporator*

menuju tangki penampungan. *Black liquor* kemudian dipompakan secara langsung maupun tidak langsung ke alat pemanas bahan bakar (*heater*) untuk selanjutnya salurkan ke nozel pada dinding tungku *recovery boiler*. Sebagian *black liquor* masuk ke tangki pencampuran dan kembali ke tangki penampungan dan dipompakan kembali ke heater menuju nozel. Selanjutnya cairan *black liquor* pada *dump tank* kembali disirkulasikan ke bagian evaporator (Sepfitrah & Rizal, 2015).

3.3. Black Liquor untuk Produksi Gas Hidrogen

Penelitian (Roy Ghatak, 2006) melakukan elektrolisis *black liquor* yang berupa limbah dari industri kertas, dilakukan dan dibandingkan dengan elektrolisis air alkali. Efisiensi energi hidrogen ditemukan di kisaran 84-97% sedangkan dalam kondisi yang sama basa elektrolisis air tidak dapat memberikan efisiensi lebih dari 66%. Evolusi hidrogen dalam elektrolisis *black liquor* bahkan mungkin terjadi pada potensi antar elektroda 1,17V tetapi dalam elektrolisis air alkali tidak ada produksi hidrogen pada potensial elektroda 1,31V. Sebanyak 28-46 mg/mg hidrogen dihasilkan, pada anoda selama proses elektrolisis *black liquor*. Hal ini terjadi karena *black liquor* memiliki nilai kalor yang baik sehingga memiliki potensi yang signifikan untuk meningkatkan efisiensi energi pada keseluruhan proses.

Selanjutnya (Andersson & Harvey, 2006) memproduksi gas hidrogen dari lindi hitam sebagai energi yang ramah lingkungan. Produksi hidrogen akan menghasilkan pengurangan emisi CO₂ bersih terbesar dan dapat mengurangi Emisi CO₂ sebesar 8% jika diterapkan di semua pabrik pulp kimia. Peningkatan terkait biofuel dan listrik konsumsi daya masing-masing adalah 5% dan 1,7%. Hasilnya menunjukkan bahwa hidrogen yang dihasilkan dari lindi hitam yang digasifikasi memiliki potensi besar untuk menurunkan emisi CO₂. Kemungkinan untuk menangkap dan menyimpan CO₂ dalam proses produksi meningkatkan potensi penurunan emisi CO₂ secara signifikan. Penangkapan CO₂ dihitung untuk produksi hidrogen dan produksi metanol. Penangkapan CO₂ juga dimungkinkan untuk boiler BLGCC dan boiler Tomlinson.



Gambar 4. Diagram Alir Produksi Hidrogen dari Black Liquor (Andersson & Harvey, 2006)

Pada Gambar 4 di atas menunjukkan model diagram alir untuk produksi hidrogen dari gasifikasi lindi hitam yang dikembangkan menggunakan perangkat lunak Hysys. Untuk komposisi gas dari unit gasifikasi, data dari Berglin digunakan. Untuk proses hilir, teknologi yang digunakan

secara komersial diasumsikan. Flowsheet proses yang dipilih diilustrasikan pada Gambar. 4. Setelah gasifikasi dan pemulihan panas, H₂S dihilangkan dalam penyerap MDEA (*Methyl Diethanol Amine*), dikarenakan katalis-Cu dari reaktor pada *low temperature gas water* tidak toleran terhadap unsur belerang. Syngas kemudian dialirkan ke dalam dua reaktor air-gas untuk mencapai konversi CO maksimum. Hidrogen murni direcover dalam unit PSA (*Pressure Swing Absorption*). Off-gas dari unit PSA dibakar untuk memulihkan energi untuk memproduksi uap. Aliran kaya H₂S diserap kembali dalam *white liquor* dan digunakan kembali dalam proses pembuatan pulp (Andersson & Harvey, 2006).

(Nong et al., 2016) melakukan penelitian untuk menghasilkan hidrogen, lignin dan natrium hidroksida dari *Pulping Black Liquor* melalui metode Elektrolisis. Reaktor elektrolitik kationik merupakan perangkat kunci dalam system ini. Reaktor terdiri dari ruang anoda besar, yang dilengkapi dengan pelat katoda. seluas 20 cm² pertukaran kationik membran (CEM) digunakan sebagai membran pemisahan. Tegangan kerja adalah 4 V, yang mana menghasilkan arus rata-rata 100 mA. Dalam proses elektrolisis tersebut, air (dengan beberapa elektrolit tambahan) dimasukkan ke dalam reaktor sehingga menghasilkan gas hidrogen dan gas oksigen masing-masing di ruang katoda dan anoda (Nong et al., 2014). Perlakuan terhadap 1000 mL *black liquor* (122 g/L kandungan padat) menghabiskan sebesar 345,6 kJ energi listrik, dan menghasilkan 30,7 g natrium hidroksida, 0,82 g gas hidrogen, dan 52,1 g padatan biomassa. Oleh karena itu, rasio pemulihan unsur natrium dan padatan biomassa masing-masing adalah sebesar 80,4% dan 76%. Pengolahan *black liquor* dengan elektrolisis merupakan teknologi ramah lingkungan khususnya dapat menjadi proses alternatif dalam mengatasi masalah lingkungan dari limbah pulping pada pabrik skala kecil (Jonathan Voss, 2019).

3.4. Black Liquor sebagai Bahan Pembuatan Biobriket

Susantini (2021) melakukan pembuatan biobriket dari *sludge* dengan campuran *black liquor* dan tempurung kelapa. Dalam penelitian ini, rasio bahan baku digunakan sebagai variabel independen, sedangkan tetap variabel adalah waktu pengeringan biobriket. Penelitian ini menggunakan nilai kalor, kadar air dan kadar abu sebagai indikator kualitas biobriket. Pembuatan biobriket ini menggunakan enam variasi komposisi dengan lumpur sebagai material dominan. Nilai kalor, kadar abu dan kadar air biobriket ini akan dibandingkan dengan batubara. Itu nilai kalor biobriket dengan variasi 60% *sludge*- 5% *black liquor* minuman keras 35% tempurung kelapa (variasi F) memiliki nilai kalor tertinggi, yaitu 4543 kal/g. Nilai 4543 kal/g ini lebih tinggi dari standar menurut Permen ESDM No.47/2006, dimana standar dalam Permen ESDM No.47/2006 adalah 4400 kal/g. Untuk kadar air, variasi F memiliki kadar air terendah yaitu 54,59%. Selain itu, kadar abu biobriket yang dihasilkan juga paling rendah yaitu 5,74% (Susantini & Oktariani, 2021).

Syamsudin (2017) meninjau potensi pemanfaatan limbah padat lumpur IPAL dan *black liquor* dari industri pulp dan kertas sebagai bahan bakar dalam bentuk biobriket yang menghasilkan pembakaran yang efisien, seragam dalam bentuk dan ukuran sehingga mempermudah penanganan dan jalannya proses pembakaran. Potensi energi pada lindi hitam banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar substitusi pada unit boiler. Pada pabrik skala kecil, lindi hitam hanya dibuang saja tanpa pemulihan bahan kimia karena nilainya yang tidak ekonomis lagi. Lindi hitam mengubah energi kimia yang dikandungnya menjadi energi panas melalui proses pembakaran yang menghasilkan abu inorganik dan gas. Penambahan lindi hitam dapat meningkatkan kualitas pembakaran biobriket yang

dihasilkan berupa meningkatnya nilai panas, kekuatan tekan dan menurunnya kadar abu, serta menurunnya emisi pembakaran (Syamsudin et al., 2007).

Pratiwi (2012) juga menggunakan *black liquor* untuk memperbaiki sifat fisik briket batubara. Hasil penelitian briket batubara dengan tambahan *Black Liquor* paling baik adalah briket dengan perbandingan komposisi 100 gr batubara : 50 gr *black liquor* yang dapat menghasilkan kualitas briket dengan nilai kalor sebesar 6032 cal/gr, nilai IM sebesar 5,05 %, kandungan abu sebesar 14,51 %, nilai VM sebesar 45,55 %, dan nilai FC sebesar 36,26 % (Pratiwi et al., 2012).

4. Kesimpulan

Black liquor dapat menjadi sumber energi berkelanjutan yang diunggulkan, karena dapat dimanfaatkan untuk pembuatan gas hidrogen, biobriket, maupun untuk efisiensi energi pada industri pulp dan kertas. *Black liquor* mempunyai nilai energi sebesar 9,7 sampai 15,71 MJ/kg sehingga *black liquor* sering dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar pada proses *recovery boiler*.

Daftar Pustaka

- Andersson, E., & Harvey, S. (2006). System analysis of hydrogen production from gasified black liquor. *Energy*, 31(15), 3426–3434. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.015>
- Bajpai, P. (2014). Black Liquor Gasification. In *Black Liquor Gasification*. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-12854-1>
- Energy, D. O. F., & Technology, F. (2002). *K UNGL Black Liquor Combustion in Kraft Recovery Boilers-Numerical Modelling Doctoral thesis by Reza Fakhrai Black Liquor Combustion in Kraft Recovery Boilers-Numerical Modelling Doctoral thesis by Reza Fakhrai Department of Material Science and Engineeri* (Issue May).
- Erwin. (2021). Implementasi Sistem ISO 14001 dalam Mendukung Pencapaian Kinerja Keberlanjutan Perusahaan di Industri Manufaktur Pulp dan Kertas di Indonesia. *Research Paper*, 3(2), 17–24.
- Firmansyah, A., Achmad, D., Fauzi, N., Fardiansyah, M. I., Rizaldi, R., Pradana, A., & Vokasi, F. (2022). *Industri Pulp Dan Kertas Sebagai Sumber Energi*. 4(1), 20–27.
- Hamsar, H., Helwani, Z., & Bahruddin, B. (2019). Simulasi Termodinamika Gasifikasi Black Liquor Pabrik Pulp Larut Kraft Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Sains Dan Teknologi*, 16(2), 48. <https://doi.org/10.31258/jst.v16.n2.p48-53>
- Heeres, A., Schenk, N., Muizebelt, I., Bles, R., De Waele, B., Zeeuw, A. J., Meyer, N., Carr, R., Wilbers, E., & Heeres, H. J. (2018). Synthesis of Bio-aromatics from Black Liquors Using Catalytic Pyrolysis. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(3), 3472–3480. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03728>
- Jonathan Voss. (2019). © 2019. This manuscript version is made available under the Elsevier user license <https://www.elsevier.com/open-access/userlicense/1.0/>. *Researchgate*, 95616(509), 1–21.
- Jusuf, P. G., Purwono, S., & Tawfiequrahman, A. (2019). Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan” Permodelan Ekstraksi Lignin Mentah dari Black Liquor dengan Metode Asidifikasi pada pH Rendah. *Jurusan Teknik Kimia, April*, 1–1.
- Kim, C. H., Lee, J. Y., Park, S. H., & Moon, S. O. (2019). Global trends and prospects of black liquor as bioenergy. *Palpu Chongi Gisul/Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper Industry*, 51(5), 3–15. <https://doi.org/10.7584/JKTAPPI.2019.10.51.5.3>
- Larson, E. D., Consonni, S., & Kreutz, T. G. (1998). Preliminary economics of Black liquor gasifier/gas turbine cogeneration at pulp and paper mills. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*, 3(April 2000), 255–261. <https://doi.org/10.1115/98-GT-346>
- Melfianora. (2019). Penulisan Karya Tulis Ilmiah dengan Studi Literatur. *Open Science Framework*, 1–3.
- Muweke, K., & Petrusson, F. (2019). *Modelling Methanol Content in Condensates From a Black Liquor*

Evaporation Plant A case study of the SCA Östrand pulp mill.

- Naqvi, M., Yan, J., & Dahlquist, E. (2010). Black liquor gasification integrated in pulp and paper mills: A critical review. *Bioresource Technology*, 101(21), 8001–8015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.013>
- Naqvi, M., Yan, J., & Dahlquist, E. (2012). Energy conversion performance of black liquor gasification to hydrogen production using direct causticization with CO₂ capture. *Bioresource Technology*, 110, 637–644. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.070>
- Nong, G., Chen, S., Xu, Y., Huang, L., Zou, Q., Li, S., Mo, H., Zhu, P., Cen, W., & Wang, S. (2014). Artificial photosynthesis of oxalate and oxalate-based polymer by a photovoltaic reactor. *Scientific Reports*, 4(SREP03572), 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep03572>
- Nong, G., Zhou, Z., & Wang, S. (2016). Generation of hydrogen, lignin and sodium hydroxide from pulping black liquor by electrolysis. *Energies*, 9(1). <https://doi.org/10.3390/en9010013>
- Prastiwi, Winiarti, Frecilia, Y. (2014). No Title. https://widuri.raharja.info/index.php?title=Literature_review
- Pratiwi, R. A., Utama, R. N., & Said, M. (2012). Pengaruh Penambahan Black Liquor Terhadap Sifat Fisik Briket Batubara. *Jurnal Teknik Kimia*, 18(4), 39–48.
- Roy Ghatak, H. (2006). Electrolysis of black liquor for hydrogen production: Some initial findings. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(7), 934–938. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.07.013>
- Sepfitrah, & Rizal, Y. (2015). Analisis Electrostatic Precipitator (Esp) Untuk Penurunan Emisi Gas Buang Pada Recovery Boiler. *Jurnal APTEK*, 7(1), 53–64. www.flowvision-energy.com
- Susantini, N. M., & Oktariani, R. (2021). Pemanfaatan Sludge dengan Campuran Black Liquor dan Tempurung Kelapa sebagai Bahan Pembuatan Biobriket. *Journal of Applied Science (Japps)*, 3(1), 011–019. <https://doi.org/10.36870/japps.v3i1.227>
- Sutton, J., & Austin, Z. (2015). Qualitative reserch: data collection, analysis, and managment. *The Canadian Journal of Hospital Pharmacy*, 68(3), 226–231.
- Syamsudin, Purwanti, S., & Rostika, I. (2007). Pemanfaatan Campuran Limbah Padat dengan Lindi Hitam dari Industri Pulp dan Kertas sebagai Bahan Biobriket. *Buletin Selulosa*, 42(2), 68–75.
- Syamsudin, & Rizaluddin, A. T. (2021). Review on renewable energy sources based on thermal conversion in the pulp and paper industry. *Proceedings The SATREPS Conference*, 3(1), 37–46. <https://publikasikr.lipi.go.id/index.php/satreps/article/view/639>
- Verrill, C. L. (2007). Evaporation principles and black liquor properties. *TAPPI Kraft Recovery Course 2007*, 1, 151–170.
- Xiao, Y., & Watson, M. (2019). Guidance on Conducting a Systematic Literature Review. *Journal of Planning Education and Research*, 39(1), 93–112. <https://doi.org/10.1177/0739456X17723971>