

Optimalisasi Mutu Batubara Indonesia: Kajian Metode dan Potensi dalam Peningkatan Nilai Kalori Batubara

Optimizing the Quality of Indonesian Coal: A Study of Methods and Potential to Increase the Calorific Value of Coal

Annisa Vada Febriani, Farrah Fadhillah Hanum*, Martomo Setiawan and Jaka Kuncara

Magister Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri Universitas Ahmad Dahlan, Kab. Bantul, Yogyakarta, 55191, Indonesia

Artikel histori :

Diterima 12 Januari 2024
Diterima dalam revisi 15 Maret 2024
Diterima 16 Maret 2024
Online 22 Maret 2024

ABSTRAK: Tingginya cadangan *Low Rank Coal (LRC)* Indonesia menjadi masalah dalam proses pemanfaatannya. Batubara kualitas rendah memiliki nilai kalori yang cukup rendah sehingga apabila dimanfaatkan akan memberikan dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan. Sehingga perlu dilakukan pemanfaatan guna meningkatkan kualitas *LRC*. Salah satunya melalui program hilirsasi teknologi peningkatan nilai kalori batubara dengan metode pengeringan yang di rancang oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia. Teknologi pengeringan batubara ini terbagi menjadi empat kategori yaitu mekanis, evaporasi, non-evaporasi dan pirolisis. Dari semua teknologi tersebut terdapat 2 metode yang dapat meningkatkan nilai kalori paling tinggi yaitu *slurry dewatering (UBC)* yang dapat meningkatkan sebesar ± 3000 kcal/g kalori dan *Encol/LFC* sebesar ± 4200 kcal/g kalori. Metode *slurry dewatering (UBC)* menjadi metode yang lebih ekonomis jika dibandingkan dengan *Encol/LFC*. Namun tergantung kepada produk yang diinginkan. Berbagai teknologi peningkatan nilai kalori terus dikembangkan di Indonesia salah satunya adalah teknologi *UBC (Upgrading Brown Coal)* dan teknologi *CDB (coal dry briquette)*. Selain itu pemanfaatan *LRC* bersama biomassa juga dilakukan baik secara langsung ataupun diolah menjadi *biocoal* dalam proses pemabakara di PLTU atau sering disebut *co-firing*.

Kata Kunci: batubara; nilai kalori; *upgrading* ;teknologi; pengeringan

ABSTRACT: Indonesia's high reserves of *Low Rank Coal (LRC)* are a problem in the utilisation process. Low quality coal has a fairly low calorific value so that if utilised it will have a negative impact on the environment and health. So it is necessary to utilise it to improve the quality of *LRC*. One of them is through the downstream technology programme to increase the calorific value of coal by drying the programme designed by the Indonesian Ministry of Energy and Mineral Resources. This coal drying technology is divided into four categories, namely mechanical, evaporation, non-evaporation and pyrolysis. Of all these technologies, there are 2 methods that can increase the highest calorific value, namely *slurry dewatering (UBC)* which can increase by ± 3000 kcal / calorie and *Encol / LFC* by ± 4200 kcal / calorie. The *slurry dewatering (UBC)* method is the more economical method when compared to *Encol/LFC*. However, it depends on the desired product. Various calorific value improvement technologies that continue to be developed in Indonesia include *UBC (Upgrading Brown Coal)* technology and *CDB (coal dry briquette)* technology. In addition, the use of *LRC* together with biomass is also carried out either directly or processed into *biocoal* in the firing process at the PLTU or often called *co-firing*.

Keywords: coal; calorific value; *upgrading* ;technology; drying

1. Pendahuluan

Batubara sebagai salah satu sumber daya alam yang penting dan melimpah di Indonesia serta banyak dimanfaatkan dalam industri. Batubara merupakan sedimen organik yang mudah terbakar dengan komposisi utama berupa oksigen, hidrogen dan karbon. Saat ini batubara masih menjadi salah

saty bahan bakar fosil yang banyak digunakan karena harganya yang relatif murah (Jaya et al., 2020). Batubara diklasifikasikan menjadi empat kelas yaitu *Antrasit, Bituminous, Subbituminous, Lignite* (Erik dan Sancar, 2010). Indonesia banyak menggunakan batubara sebagai bahan bakar dan bahan baku di beberapa industri yang sebagian besar adalah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU)

* Corresponding Author: -; fax : -
Email: farrah.hanum@che.uad.ac.id

sebagai sumber energinya. Batubara produksi Indonesia dipasarkan tidak hanya untuk keperluan dalam negeri, namun juga ke luar negeri (ekspor). Hal ini dilakukan apabila kebutuhan batubara dalam negeri sudah terpenuhi. Beberapa negara tujuan ekspor batubara Indonesia adalah Tiongkok, India, Filipina, Jepang, Malaysia, Korea Selatan, Vietnam, Taiwan, Thailand, dan Bangladesh (Setiawan et al., 2023). Meskipun memiliki cadangan batubara yang melimpah namun sebagian besar cadangan batubara Indonesia tersebut adalah batubara kualitas rendah (Fadhilla & Nazarudin, 2023).

Batubara kualitas rendah atau yang sering disebut dengan *Low Rank Coal (LRC)* adalah batubara dengan nilai kalori ≤ 5100 kcal/kg, batubara kualitas sedang 5100-6100 kcal/kg, batubara kualitas tinggi 6100-7100 kcal/kg dan batubara kualitas sangat tinggi >7100 kcal/kg (Wibowo dan Jaka., 2020). *LRC* dianggap sebagai bahan bakar berkualitas rendah untuk pembakaran karena kandungan bahan mineralnya yang tinggi, kadar air yang tinggi, dan nilai kalori yang rendah. Sebagai *LRC*, batubara lignit dan sub-bituminus memiliki komposisi dan struktur molekul yang berbeda, yang tidak hanya berhubungan dengan tingkat batubara tetapi juga wilayah geologi (Zhang et al., 2020). *LRC* beberapa negara juga memiliki ciri atau karakteristik sendiri. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 mengenai ciri batubara peringkat rendah di beberapa negara. Sifatnya yang beragam dari *LRC* yang ditemukan di beberapa negara ini mengharuskan pengering *LRC* dilakukan sesuai dengan sifat spesifiknya *LRC* untuk memastikan kinerja pengering yang optimal (Osman et al., 2011).

Tabel 1. Ciri Batubara Peringkat Rendah Beberapa Negara

Negara	Nilai Kalori (MJ/kg)	Sulfur (% daf)	Ash (% db)
Australia	5-14	0,1-5	0,5-13
Bulgaria	5-14	3-11	28-58
Dakota Utara	16	0,48	7
Hongaria	6-15	0,8-5	18-40
Indonesia	21-23	0,5-4	2-8
Jerman	7-12	0,4-4	5-11
Montana	24-25	0,48	7
Polandia	7-22	0,5-7	8-40
Republik Ceko	9-19	0,7-9	7-44
Turki	20-28	1,8-14	3-20
Wyoming	17-22	0,2-1,2	4-12

Sumber:(Osman et al., 2011)

Nilai kalori batubara itu sendiri penting dalam proses pembakaran di boiler. Karena nilai kalori yang tinggi menunjukkan kandungan energi yang tinggi dalam batubara tersebut serta menggambarkan gabungan pembakaran dari hidrogen, karbon, sulfur dan nitrogen yang berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran di boiler. Terdapat beberapa parameter yang mempengaruhi nilai kalori batubara antara lain (a) *moisture* (air *inheren* dan air total) yang tinggi menimbulkan permasalahan dalam penanganan batubara terutama pada saat pengangkutan,

penyimpanan, penghancuran, dan pembakaran. (b) *ash content* (kadar abu) yang tinggi menyebabkan sejumlah besar mineral tidak terbakar pada saat pengabuan batubara, sehingga menghambat proses pembakaran dan menghasilkan nilai kalori yang lebih rendah. (c) *Volatil meter* (zat terbang) akan mengganggu proses pembakaran apabila kadarnya tinggi karena *volatile meter* mengandung gas yang mudah terbakar seperti karbon monoksida dan metana. Semakin tinggi kandungan zat yang mudah menguap maka semakin cepat batubara terbakar. (d) *fixed carbon* merupakan komponen utama pada batubara. Sehingga semakin tinggi kandungan *fixed carbon* maka nilai kalori yang dikandung batubara akan semakin tinggi juga. (e) Total sulfur, Semakin tinggi angka sulfur total maka semakin rendah nilai kalori batubara tersebut. Belerang merupakan salah satu komponen utama konsumsi bahan bakar. Kandungan sulfur yang tinggi dapat mempengaruhi lingkungan (Fadhili dan Anshori.,2019; Huseini dkk.,2018; Nuhardin, 2021; Musadamba et al., 2022).

Di Indonesia sendiri *LRC* seperti lignit dan sub-bituminus, umumnya mempunyai kandungan air yang cukup tinggi (30-50%). Kadar air yang tinggi menurunkan nilai kalori batubara sehingga kurang diminati dan sulit dipasarkan. Faktanya, Indonesia memiliki cadangan batubara jenis ini yang cukup banyak seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan batubara kualitas rendah juga memiliki kecenderungan untuk terbakar secara spontan sehingga perlu penanganan khusus pada saat penyimpanan atau pengangkutannya. (ESDM, 2021; Bendiyasa & Prasetya, 2019).

Tabel 2 Cadangan Batubara Indonesia berdasarkan nilai kalori

Kualitas	Sumber daya (Jt Ton) terverifikasi	Cadangan (Jt Ton) terverifikasi
Kalori Rendah	22.942,93	8.914,00
Kalori sedang	55.435,17	14.761,21
Kalori tinggi	11.250,32	1.593,88
Kalori sangat tinggi	2.449,70	558,25
Jumlah	92.078,11	25.827,34

Sumber: (ESDM, 2021)

Pemanfaatan batubara dengan kalori rendah memiliki dampak negatif yang signifikan terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Saat batubara kalori rendah dibakar, emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂) dan sulfur dioksida (SO₂) dilepaskan ke atmosfer, berkontribusi pada pemanasan global dan polusi udara. Pencemaran udara yang dihasilkan dari pembakaran batubara dapat menyebabkan masalah kesehatan serius, termasuk gangguan pernapasan dan penyakit jantung (Jaya & Soegondo, 2016). Selain itu, penggunaan batubara kalori rendah juga memperkuat ketergantungan pada sumber energi fosil, menghambat kemajuan teknologi energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Proses penambangan batubara juga

dapat merusak ekosistem lokal, seperti hutan dan lahan pertanian, dengan penebangan hutan dan penggalian lahan (Sutrisno et al., 2021).

Sumber daya batubara Indonesia yang relatif tinggi dan kualitas cadangan batubara yang buruk tentunya mempunyai potensi yang besar untuk dimanfaatkan guna meningkatkan kualitasnya untuk memenuhi kebutuhan pasar. Direktorat Jendral Mineral dan Batubara Indonesia terus mendorong keberlanjutan industri batubara di era transisi energi, melalui program hilirisasi Batubara. Salah satu program hilirisasi tersebut adalah teknologi peningkatan nilai kalori Batubara dengan metode pengeringan (ESDM, 2022).

Sejumlah teknologi telah digunakan untuk meningkatkan nilai kalori batubara atau melakukan *upgrading* batubara dengan berbagai metode. Oleh karena itu, paper review ini menggunakan metode sistematis review untuk mengumpulkan sejumlah paper guna menganalisis metode-metode yang telah diterapkan. Analisis ini bertujuan meningkatkan potensi pemanfaatan *low rank coal* di Indonesia, sejalan dengan roadmap pengembangan dan pemanfaatan batubara yang telah ditetapkan oleh Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral pada tahun 2020.

2. Teknologi Peningkatan Nilai Kalori Batubara

Pengeringan atau pengurangan kadar air menjadi konsep dasar pada proses *upgrading* batubara. Sehingga selain meningkatkan nilai kalori batubara juga meningkatkan efisiensi pembakaran (Yusnitati, 2011). Suhu dan tekanan menjadi parameter utama dalam proses *upgrading* melalui pengeringan batubara. Proses *upgrading* terbagi menjadi empat kategori, yaitu mekanis (*pressed dewatering*), evaporasi, non-evaporasi dan pirolisis (Namiki Toru, 2018; Rao et al., 2015). Beberapa penelitian mengenai teknologi peningkatan nilai kalori batubara melalui proses pengeringan telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu seperti yang dapat dilihat pada Tabel 2.

2.1 Mekanis (*pressed dewatering*)

Proses ini terjadi pada suhu rendah dan tekanan tinggi serta melibatkan metode *dewatering* mekanis. Karena air tidak dapat sepenuhnya dihilangkan dari struktur batubara maka dilakukan pemanasan bersamaan untuk meningkatkan efisiensi *dewatering*. Selain tekanan, beberapa proses memerlukan pengolahan lebih lanjut, yaitu penghancuran, yang bertujuan untuk memperkecil ukuran pori batubara dan mengontrol reabsorpsi air. Contohnya adalah proses *MTE* dan proses *Coldry* (Namiki Toru, 2018).

Ekspresi Termal Mekanis (MTE), sesuai dengan namanya, *MTE* melibatkan pemerasan air keluar dari lignit menggunakan energi mekanik, biasanya pada tekanan 13-25 MPa dan suhu dalam kisaran 150-200 °C, dan tekanan bejana dihasilkan secara autogen, sehingga air tetap berada di dalam lignit keadaan cair dan tidak menguap. *Cooperative Research Centre for Clean Power from Lignite (CRCCPL)* melaporkan keberhasilan uji coba proses revolusioner pengeringan batubara coklat yang dapat mengurangi emisi

rumah kaca dari pembangkit listrik hingga sepertiga atau lebih. Teknologi *MTE CRC* menghilangkan lebih dari 70% emisi gas rumah kaca dari pembangkit listrik. Air dari batu bara coklat yang ditemukan di Victoria dan Selatan Australia, menghasilkan penghematan rumah kaca yang sangat besar ketika batu bara kering dibakar di pembangkit listrik (Pikon' & Mujumdar, 2006).

Proses ini diadakan di bawah tekanan balik yang cukup untuk mencegah penguapan, memastikan bahwa air dihilangkan dengan kekuatan mekanis. Oleh karena itu, dibandingkan dengan teknik pengeringan evaporatif, kebutuhan energinya rendah. Selain itu, air panas yang dinyatakan dapat digunakan untuk pemanasan batch lignit berikutnya, sehingga meningkatkan efisiensi energi. Perkiraan kebutuhan energi untuk proses *MTE* adalah sekitar 20% dari jumlah tersebut diperlukan dalam proses evaporasi tanpa pemulihan panas (Clayton et al., 2006). Namun khususnya pada pengotor dalam air produk, karena faktor kualitas air seperti keasaman air (kira-kira pH 4) dan tingginya konsentrasi bahan organik dan padatan terlarut, air tidak cocok untuk digunakan tanpa remediasi. Oleh karena itu, diperlukan serangkaian langkah remediasi seperti netralisasi pH, koagulasi dan flokulasi, osmosis balik, pertukaran ion, penguraian biologis dan kimia dilaguna dan bioreaktor, serta pengendapan. Langkah-langkah remediasi yang diperlukan pada akhirnya akan bergantung pada penggunaan air produk yang dipilih (Allardice et al., 2004). Penelitian terdahulu pernah dilakukan oleh Namiki Toru tahun 2018 mengenai *upgrading* batubara menggunakan metode *MTE*. Hasil yang diperoleh menunjukkan penurunan yang cukup signifikan pada kadar air dan kadar abu disertai dengan peningkatan >2000 kcal/kg pada nilai kalori batubara.

Proses lainnya, yaitu *coldry*, metode ini didasarkan pada pelepasan uap air dalam batubara, dengan memulai reaksi eksotermik, akibat abrasi partikel karbon secara bersamaan. Hasilnya adalah produk terkonsentrasi dalam bentuk pelet yang dipadatkan, yang tahan lama, mudah disimpan dan diangkut, serta memiliki nilai energi yang serupa dengan batubara hitam, sekaligus mengurangi emisi CO₂ secara signifikan dibandingkan dengan bentuk batubara coklat aslinya. Keuntungan dari proses ini antara lain meningkatkan nilai kalori lignit hingga 200–250 %, menurunkan kadar abu, proses besuhu rendah sehingga memerlukan limbah panas sebesar 40 °C yang bersumber dari pembangkit listrik di lokasi yang sama, tekanan operasi yang rendah sehingga kebutuhan energi lebih rendah (Krawczykowska & Marciniak-Kowalska, 2012).

2.2 Evaporasi

Metode ini terjadi pada suhu tertentu dalam kondisi udara terbatas. Saat dipanaskan, pori-pori batubara terbuka. Sehingga air yang terkandung dalam pori-pori karbon keluar selama proses evaporasi. Selain itu, nilai kalori batubara yang tinggi menunjukkan rendahnya kadar air batubara tersebut (Ningsih et al., 2020). Teknologi evaporasi terjadi dengan memanaskan batubara hingga suhu < 200°C (Umar & Setiawan, 2022).

Tabel 1. Beberapa metode dari teknologi pengeringan batubara

Metode	Bahan	Analisis Awal	Hasil	Konsumsi Energi	Referensi
Mekanis					
<i>MTE</i>	Lignit Victoria	Kadar air 60%	Kadar air 27.5 %	Kecil	(Namiki Toru,2018)
<i>Coldry</i>	Lignit Victoria	Kadar air 60%	Kadar air 12 %	Besar	
Evaporasi					
<i>Slurry Dewatering (UBC)</i>	Batubara kualitas rendah; Minyak pelumas bekas	Kalori 3177.76 cal/g <i>Moisture 33.17% adb</i> <i>Volatil Matter 33.17% adb</i> <i>Ash 29.12% adb</i>	Hasil paling optimal (100:50) (<i>adb</i>) Kalori 6343.92 cal/g <i>Moisture 1.35%</i> <i>Volatile Matter 69.71%</i> <i>Ash 22,55%</i>	Sedang	(Putri dan Fadhillah.,2020)
<i>Syncoal</i>	Batubara Rosebud	Kalori 4780 cal/g kadar air 25% S 0.77 %	Kalori 6700 cal/g Kadar air <1% S <0.3 %	Besar	(Namiki Toru,2018)
Non-Evaporasi					
<i>Heat Water treatment (HWT)</i>	Batubara kualitas rendah	Kalori 5886.53 cal/g <i>Moisture 10.06% adb</i> <i>Volatil Matter 41.4% adb</i> <i>Ash 7.01% adb</i>	Hasil paling optimal (175 °C): Kalori 7143.05 cal/g <i>Moisture 3.15% adb</i> <i>Volatile Matter 36.4% adb</i> ; <i>Ash 6.11% adb</i>	Sedang	(Ningsih dan Huda., 2015)
<i>Dewatering Hidrotermal (HTD)</i>	Batubara Palembang	Kalori 4392 kcal/g <i>Moisture 37,56 %</i> <i>Volatil matter 37,24 %</i> <i>Ash 1,8 %</i> <i>Fixed carbon 23,4 %</i>	Kalori 5300 kcal/g <i>Moisture 10%</i> <i>Volatil matter 45%</i> <i>Ash 3,8%</i> <i>Fixed carbon 38 %</i>		(Efendi et al., 2020)
Pirolisis					
<i>Encol (LFC)</i>	Batubara <i>Buckskin</i>	Kalori 4527 cal/g Kadar air 30% S 0.5% VM 30%	<i>Process derived fuel (PDF)</i> Kalori 4527 cal/g Kadar air 30% S 0.5 % VM 24% <i>Coal derived liquids (CDL)</i> Nilai kalori 8800 cal/g Kadar air 0.8% S 0.7%	Besar	(Namiki Toru,2018)

Lanjutan Tabel 3

BCD (<i>Brown Coal Densification</i>)	Batubara coklat Morwell; Batubara hitam Tarong	Batubara coklat Morwell: <i>Moisture</i> 59,3% wb <i>Volatile matter</i> 49,2% db <i>Fixed carbon</i> 48,8% db <i>Ash</i> 2,4% db <i>Sulfur</i> 0,3% db <i>GSE</i> 27,2 MJ/kg daf	<i>Densified brown coal:</i> <i>Moisture</i> 15,9% adb <i>Volatile matter</i> 48,9% db <i>Fixed carbon</i> 49,1% db <i>Ash</i> 2,4% db <i>Sulfur</i> 0,3% db <i>GSE</i> 27,2 MJ/kg daf <i>NWSE</i> 22,0 MJ/kg	(Johns et al., 1989a)
		<i>NWSE</i> 8,4 MJ/kg Batubara hitam Tarong: <i>Moisture</i> 5,2% adb <i>Volatile matter</i> 29,7% db <i>Fixed carbon</i> 40,9% db <i>Ash</i> 29,4% db <i>Sulfur</i> 0,42% db <i>GSE</i> 31,98 MJ/kg daf <i>NWSE</i> 21,3 MJ/kg		

Metode berlandaskan pada kontak antar lignit dengan media pemanas yaitu: pemanasan tidak langsung, contohnya *steam tube dryer* dan pemanasan langsung, contohnya *vapor fluidized bed dehydration* dan *flash heating*. Penguapan akan terjadi selama proses evaporasi berlangsung, sedangkan reaksi kimia tidak akan terjadi (Namiki Toru, 2018). Berbagai metode *Upgrading* Batubara dengan proses evaporasi telah banyak dikembangkan, diantaranya ialah:

Proses *STD (steam tube dryer)* dikembangkan pertama kali di Jepang oleh Tsukishima Kikai untuk *dewatering* batubara, namun kini ditargetkan pada batubara termal yang digunakan dalam pembangkit listrik, dan untuk PLTU batubara baru dan yang sudah beroperasi serta terintegrasi. Untuk mengeringkan batubara *STD* menggunakan sisa uap bertekanan dari pembangkit listrik. Sehingga diharapkan dapat meningkatkan efisiensi konsumsi batubara serta mengurangi emisi CO. Proses ini pada dasarnya adalah proses pengeringan pemanasan tidak langsung, yang dapat mengurangi jumlah gas buang. Mekanisme prosesnya mirip dengan *kiln* (tempat pembakaran), sehingga batubara masuk ke dalam *shell* dan uap panas masuk melalui *tube*. Pada pembangkit listrik pra-pengeringan *STD* sudah tersedia dan yang diusulkan, sistem *IGCC*, dan gasifikasi untuk menghasilkan *SNG* (Hartiniati dan Helmi Najamuddin., 2012).

Karena *STD* memiliki struktur yang sederhana, maka mampu memproses berkapasitas tinggi dalam ukuran besar. Pengereng tidak memerlukan perawatan dan dapat terus beroperasi selama kurang lebih satu tahun. Selain itu,

prosesnya juga sederhana, cukup mengatur kadar air bahan baku dan mengontrol sumber panas. Pengolahan gas buang pada pengering tabung uap bersifat kompak, sehingga gas buangnya sangat rendah. Pengereng tabung uap banyak digunakan dalam industri baja untuk pengeringan batubara dan produksi kokas (Sojitz Corporation, 2011).

Steam Drying atau pengeringan batubara dengan uap merupakan teknologi yang menawarkan, selain pengurangan bahaya kebakaran dan ledakan, juga meningkatkan efisiensi termal. Selain itu, batubara yang dikeringkan dengan uap tampaknya kurang rentan terhadap pembakaran spontan karena reaktivitasnya yang menurun terhadap oksigen di atmosfer. Penggunaan uap super panas sebagai media pengeringan menarik perhatian luas dalam beberapa aplikasi, seperti pengolahan pulp kertas, bahan bakar, dan bahan makanan (Chen et al., 2000).

Proses *UBC (Upgrading Brown Coal)* merupakan suatu metode penghilangan uap air yang terkandung dalam batubara melalui proses penguapan. Proses ini sangat sederhana karena tekanan dan suhu pengoperasian yang rendah. Pada suhu rendah dan tekanan rendah, pelepasan air pada batubara belum sempurna, sehingga ditambahkan bahan aditif untuk mengurangi kadar air pada poros (pori-pori) Batubara dan membentuk hidrofobisitas sehingga batubara tidak banyak mengandung air (Umar, 2010). Penelitian terdahulu mengenai *UBC* pernah dilakukan oleh Putri dan Fadhillah tahun 2020 pada Tabel 3 tentang peningkatan kualitas batubara *low calorie* menggunakan minyak pelumas melalui *UBC*. Dalam penelitian ini lakukan variasi komposisi campuran antara batubara dengan minyak

pelumas nekas untuk mengetahui campuran yang paling optimal. Hasil penelitian diperoleh kenaikan nilai kalori batubara adalah 99,6% atau >3000 kcal/kg yang diikuti dengan penurunan kadar air dan kadar abu pada batubara 100 gr: 50 ml minyak pelumas bekas.

Masalah terbesar dalam mengembangkan teknologi reformasi pretreatment adalah biaya, efektivitas, dan apakah pembakaran spontan dapat ditekan secara efektif. UBC tampaknya berhasil karena prosesnya bersuhu relatif rendah dan menurunkan biaya dengan mendaur ulang minyak berat, air, dan air yang digunakan dalam proses tersebut. Namun, akibatnya, prosesnya menjadi rumit dan menjadi batubara asli. Kandungan emisi CO₂ diyakini tidak mengalami penurunan signifikan karena komposisi unsurnya tidak berubah. Sementara nitrogen atmosfer dan Studi proses kualitatif lignit menggunakan pelarut pada suhu 380 ~ 440°C menunjukkan hasil yang baik di mana jumlah karbon dioksida yang dihasilkan, yaitu 97% berat dari gas buang sebelum reformasi, menurun sekitar 79% berat setelah perawatan, yang dinyatakan sebagai 20% berat (Sato et al., 2004; Jaya, D. 2017).

Superheated steam fluidized bed drying (SSFBD) atau Pengerinan lapisan terfluidisasi uap super panas yang menggunakan uap super panas untuk memfluidisasi dan memanaskan batubara coklat, dan membawa air yang diuapkan secara bersamaan. Setelah pengeringan, uap buangan dengan air yang diuapkan digunakan kembali dengan cara yang efisien secara energi, misalnya, memanaskan penukar panas yang tertanam di dalam unggun terfluidisasi dengan kompresi ulang uap mekanis atau pemanasan awal udara terfluidisasi menggunakan panas dari kondensasi uap air (Taechapairoj dkk., 2003).

Pengeringan dengan uap super panas menawarkan keuntungan dibandingkan pengeringan udara panas: (I) energi yang dipasok ke pengering dapat dikurangi secara ekonomis dengan mendaur ulang uap buangan dalam loop tertutup, (II) energi dari uap buangan yang dihasilkan dari penguapan uap air di dalam padatan dapat dipulihkan diperoleh kembali dan digunakan di bagian lain, (III) lingkungan polusi atau emisi bau ke atmosfer dapat dihilangkan karena pengeringan terjadi di ruang tertutup tanpa udara (Taechapairoj dkk., 2003).

Syncoal merupakan suatu metode upgrading Batubara dengan Pengeringan, eliminasi air kapiler, pemutusan gugus karboksil, serta pemisahansulfur pirit melalui *Vibrating Fluidized Bed* (VFB). *syncoal* adalah produk berkualitas tinggi dengan kadar air kurang dari 5 %, kandungan sulfur 0,5 %, kadar abu sekitar 9% dan nilai kalor sekitar 11,800 Btu per pon Ada tiga langkah utama dalam proses *syncoal* yaitu perlakuan panas batubara dalam atmosfer inert, pendinginan gas inert dari batubara panas dan menghilangkan mineral abu (Sheldon dkk., 1997).

Pengeringan evaporatif memerlukan lebih banyak energi untuk menguapkan air dan hal ini menyebabkan emisi yang lebih tinggi CO₂ per unit energi yang berguna. Namun, kompresi ulang uap dan kondensasi, seperti yang dilakukan dalam proses *Steam Fluidized Bed Drying*, dapat

memulihkan sebagian besar energi evaporasi (Tunggal et al., 2021).

2.3 Non-evaporasi

Proses ini dilakukan pada kondisi di atas tekanan uap jenuh dan menghilangkan air tanpa menguapkannya, sehingga lebih hemat energi dibandingkan metode evaporasi. Namun, karena dilakukan pada suhu dan tekanan tinggi, sebagian batubara dapat terurai dan biaya peralatan yang digunakan dapat meningkat. digunakan (Namiki Toru, 2018). Berbagai metode *Upgrading* Batubara dengan proses non-evaporasi telah banyak dikembangkan, diantaranya ialah:

Fleissner merupakan penguapan dan pengeringan dengan menurunkan tekanan, setelah terlebih dahulu memanaskan batubara pada tekanan tinggi menggunakan uap air jenuh. Proses ini menghasilkan material bongkahan keras yang mengandung 10% atau kurang kelembapan, dan memiliki daya pemanasan sekitar 10.000 Btu per pon. Ia juga menyala dengan baik dalam keadaan menggumpal, mudah digiling, dan membentuk bubuk bahan bakar yang sangat baik. Proses ini diujicobakan di Victoria dan Australia Selatan dan hampir diterapkan secara komersial untuk memasok Kereta Api Australia Selatan sebelum diperkenalkannya lokomotif diesel (Willson et al., 1997; Namiki Toru, 2018).

Dewatering Hidrotermal (HTD) adalah proses non-evaporasi untuk mengeringkan batubara coklat dengan kadar air tinggi. Dalam prosesnya, batubara coklat mentah digiling dan dibubur dengan air dan kemudian bubur batubara coklat dipanaskan hingga suhu 300 °C di bawah tekanan yang cukup untuk mencegah penguapan. Kemudian, dengan fungsi pendinginan dan penurunan tekanan, kelebihan air dapat dikeluarkan dari bubur produk. Selama proses ini, beberapa unsur anorganik yang larut dalam air juga dihilangkan, sehingga mengurangi masalah pembentukan endapan abu dalam sistem pembakaran dan pencairan. Sedangkan untuk batubara coklat dengan kadar air tinggi, *slurry* batubara hasil *upgrade* yang diperoleh dari proses HTD memiliki kandungan energi lebih besar dibandingkan batubara bentuk padat dan lebih mudah diangkut (Favas & Jackson, 2002). Terjadi perubahan struktur batubara selama proses pemanasan dimana penguraian gugus karboksil, pelepasan air yang melekat, reduksi gas kompleks hidrogen dan oksigen, serta aromatisasi (Chen dan Agarwal., 2000; Ge dkk., 2015; Liao dkk., 2016; Rao dkk., 2015).

Investigasi sebelumnya terhadap HTD yaitu prosesnya yang sangat terkonsentrasi pada padatan HTD produk batubara, dengan sedikit rincian yang diberikan mengenai sifat-sifat air limbah. Pengetahuan tentang jenis dan konsentrasi komponen air limbah HTD dan ketergantungannya pada proses kondisi diperlukan sehingga desain proses terkait dan prosedur manajemen pabrik dapat dikembangkan. Sebelumnya ditemukan beberapa senyawa pada air limbah HTD yaitu sebagian besar mengandung fenol, benzena tersubstitusi, alkana, siklopentanon, asam karboksilat, dan senyawa lainnya (Racovalis et al., 2002).

Heat Water Treatment (HWT) adalah metode dimana batubara (yang dihaluskan) diolah dengan uap dan bubur air pada suhu (300 °C - 400 °C) dan tekanan (30-50 atm) untuk menghilangkan uap air tanpa menguapkannya. Temperatur yang tinggi menyebabkan sebagian batubara terurai, dan zat seperti tar yang dihasilkan oleh proses ini melapisi bagian dalam batubara. Ini mencegah penyerapan air baru dan mencegah pembakaran spontan. HWT-cs (*Heat Water Treatment-coal slurry*) merupakan salah satu metode konstruksi yang menerapkan proses HWD (Namiki Toru, 2018).

K-Fuel adalah merek dagang terdaftar dari *Ever-green Energy, Inc.* (sebelumnya *KFx*). Proses *K-Fuel* menggunakan panas dan tekanan untuk secara fisik dan kimia mengubah batubara dengan kadar air tinggi dan *BTU* rendah menjadi bahan bakar yang lebih hemat energi dan beremisi lebih rendah. Metode memanaskan batubara bernilai rendah dalam suhu tinggi (204- 260 °C) dan memberi tekanan hingga 2,7-3,4 MPa menghilangkan kandungan air lebih dari 50% secara permanen dan meningkatkan input energi bahan bakar. Manfaat tambahan yang penting dari teknologi ini adalah dapat menghilangkan sejumlah besar merkuri dan kotoran lainnya sehingga mengurangi emisi sulfur dioksida dan nitrogen oksida (Willson et al., 1997).

Penelitian terdahulu mengenai metode non-evaporasi pernah dilakukan oleh Ningsih dan Huda di tahun 2015 dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh tekanan terhadap karakteristik batubara pada kondisi non-evaporasi dengan variasi suhu. Dari hasil penelitian diketahui bahwa setiap kenaikan tekanan berpengaruh terhadap perubahan karakteristik, *moisture*, dan nilai kalori batubara. Terjadi perubahan juga pada *volatile meter* dan *ash conten* namun tidak begitu signifikan. Tekanan paling optimal pada 150 bar karena mampu menurunkan kandungan *moisture* hingga 68,69% dan peningkatan nilai kalori sampai dengan 16,89% atau >1000 kcal/kg batubara.

Pengeringan non-evaporasi dengan menghilangkan air dari batubara coklat dalam bentuk cair menghemat panas laten penguapan dan mengurangi emisi CO₂. Selain itu, beberapa bahan anorganik yang terlarut dalam air dihilangkan secara bersamaan, sehingga mengurangi pengotoran abu dalam boiler selama pembangkitan listrik. Namun pengolahan air limbah akan menjadi masalah serius mengingat perlindungan lingkungan (Zhu et al., 2019).

2.4 Pirolisis

Proses pirolisis adalah proses dekomposisi (penguraian) kimia yang melibatkan pemanasan tanpa adanya oksigen. Produk dari proses ini adalah CO, CO₂, CH₄, H₂, dan gas-gas hidrokarbon ringan. Gas yang dihasilkan bervariasi tergantung bahan bakunya. Proses pirolisis batubara menggunakan gas inert (N₂ atau He) atau zat pereduksi (gas H₂). Proses ini menyebabkan batubara terurai sehingga menghasilkan gas, produk cair (tar), serta residu berupa arang dan abu. Banyaknya residu yang dihasilkan kurang lebih 50% dari berat batubara tersebut (Andayani.,2019). Selama proses pirolisis baik penguapan maupun reaksi kimia

akan terjadi pada saat proses. Contohnya adalah proses *encoal* dan BCD (*Brown Coal Densification*) (Chen et al., 2020; Namiki Toru,2018).

Pengaruh suhu terhadap distribusi produk pirolisis terjadi dalam tiga tahap yaitu Suhu di bawah 350-400 °C merupakan dekomposisi termal tingkat pertama, yang mana rantai hidrogen diputus dan molekul-molekul yang terikat secara non-kovalen menguap. Pada suhu antara 400-700 °C, terjadi dekomposisi primer, meningkatkan aromatik terhidrogenasi, CH₄, dan CO₂. Suhu di atas 700 °C menghasilkan CO dan H₂ (Rumbino Yusuf.,2016). Metode -metode yang menggunakan prinsip pirolisis diantaranya ialah:

ENCOAL/LFC merupakan pirolisis moderat dengan mengalirkan gas panas kesisi berbentuk piringan putar (*rotarion disk*) untuk menghasilkan Batubara kering dan minyak berat. Produk dari proses *ENCOAL* ialah *Coal Derived Liquid (CDL)* dan *Process Derived Fuel (PDF)*. *PDF* adalah bahan bakar dengan kelembapan rendah, sulfur rendah, dan nilai kalor tinggi yang komposisi dan sifat penanganannya mirip dengan batubara bitumen. *CDL* adalah cairan hidrokarbon berat rendah sulfur yang dapat digunakan sebagai bahan bakar industri. Pada proses *ENCOAL*, batubara umpan dikeringkan terlebih dahulu. Suhu selanjutnya dinaikkan pada tahap kedua hingga suhu mendekati 550 °C selama periode mendekati 1 jam, yang menghasilkan reaksi dekomposisi yang membentuk produk baru. Dekomposisi kimia (gasifikasi ringan) menghasilkan gas melalui reaksi perengkahan dari batubara umpan. Padatan yang diubah secara kimia didinginkan dan diproses lebih lanjut untuk membuat *PDF*. Gas didinginkan dengan mengembunkan produk cair sebagai *CDL* dan gas sisadibakar dalam proses untuk menghasilkan panas. Gas digunakan sebagai sumber panas untuk proses. Namun salah satu masalah utama dalam penanganan produk *PDF* ialah pembakaran spontan (Shamsi et al., 2004).

BCD (Brown Coal Densification) adalah kombinasi proses mekanis, transformasi alami dari batubara coklat menjadi setara batubara hitam. Proses ini awalnya dikembangkan oleh Universitas Melbourne dan CRA pada awal tahun 1980-an untuk mengubah bubur air batubara coklat Victoria menjadi bahan yang dikenal sebagai batubara coklat padat (Johns et al., 1989). Dalam prosesnya, batubara coklat mentah dipecah menjadi partikel-partikel kecil dengan ukuran 5-10 µm dan kemudian air keluar dari batubara coklat karena gangguan fisik dan runtuhnya struktur pori batubara. Batubara coklat menjadi bubur yang dibentuk oleh kelembapan yang melekat. Kemudian bubur tersebut siap diekstrusi menjadi pelet atau balok dengan dimensi yang diinginkan, yang kemudian dikeringkan menggunakan udara sekitar dengan bantuan aliran udara untuk membentuk produk. Batubara coklat yang dipadatkan memiliki nilai kalori basah bersih yang jauh lebih besar dibandingkan batubara coklat mentah yang diolah. Proses BCD merupakan teknologi yang menjanjikan dan hemat energi untuk mengeringkan Batubara coklat, sekaligus mengurangi emisi CO₂ secara signifikan dibandingkan

dengan batubara coklat mentah yang diolah (Johns et al., 1989).

Berdasarkan analisis metode dari berbagai prinsip teknologi peningkatan kualitas batubara tersebut (*upgrading coal*). Proses *upgrading* yang paling banyak dilakukan di Indonesia adalah *slurry dewatering (UBC)*. Namun pemanfaatan teknologi ini tergantung kepada kebutuhan dan produk apa yang diinginkan dari proses *upgrading* itu sendiri (Afin & Kiono, 2021).

Dari Tabel 3 dapat diketahui bahwa terdapat 2 metode yang dapat meningkatkan nilai kalori paling tinggi yaitu *slurry dewatering (UBC)* dapat meningkatkan sebesar ± 3000 kcal/g kalori dan *Encol/LFC* sebesar ± 4200 kcal/g kalori. Dari kedua metode tersebut *slurry dewatering (UBC)* menjadi metode yang lebih ekonomis jika dibandingkan dengan *Encol/LFC*. Namun tergantung kepada produk yang diinginkan.

3. Potensi pengembangan di Indonesia

Pengembangan dan eksploitasi batubara kualitas rendah masih menjadi tantangan bagi Indonesia. Meskipun batubara telah digunakan sebagai modal utama pembangunan, sumber energi utama pembangkit listrik dan sumber mata uang nasional, permasalahan lingkungan hidup masih menghambat pemanfaatannya secara efektif. Hal ini dikarenakan proses pembakaran Batubara secara langsung yang menimbulkan emisi CO₂ dan perubahan iklim. Oleh karena itu program hilirisasi menjadi solusi yang diambil pemerintah dengan tujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan dan pengembangan batubara di Indonesia (Yana et al., 2021).

Program hilirisasi batubara yang dirancang oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral terdiri atas program pengembangan dan pemanfaatan batubara. Dalam program pengembangan batubara kualitas rendah terdapat beberapa teknologi hilirisasi yang salah satunya ialah *upgrading* batubara (ESDM, 2022).

Upgrading batubara menjadi salah satu solusi dalam pemanfaatan batubara batubara kalori rendah. Program ini terpilih sebagai salah satu program utama pada Peta Jalan Peningkatan Nilai Ekonomi LRC. Hal ini harus didukung dengan perolehan teknologi pengolahan batubara yang kompetitif dari segi perbandingan keekonomian dan produksi, serta dukungan kebijakan dan insentif. Dari sisi teknologi, Lembaga Litbang ESDM telah mengembangkan dua teknologi pengolahan batubara hingga tahap pilot plant, yaitu teknologi *UBC (Upgrading Brown Coal)* dan teknologi *CDB (coal dry briquette)* (ESDM, 2021).

Teknologi *CDB* telah dikembangkan tekMIRA untuk implementasi penuh (menyempurnakan) teknologi *UBC*, yang memerlukan rantai proses yang panjang sehingga biaya operasionalnya tinggi. Hasil dari proses *CDB* dapat berupa briket maupun bubuk. Teknologi ini dapat meningkatkan nilai kalori batubara >5300 kal/g dan menurunkan kandungan air dari 45-65% menjadi 10-15%. Proses *UBC* lebih kompleks dan membutuhkan media, sedangkan proses

CDB lebih sederhana dan tidak memerlukan media sehingga biaya prosesnya jauh lebih murah. Namun batubara produk *UBC* dapat disimpan dalam waktu lama dan diangkut (diekspor) dalam jarak jauh (Permana Darsa, 2011).

Peta jalan pengembangan batubara melalui pengolahan batubara terbagi menjadi tiga bagian yaitu: (1) Strategi bagian pertama (2021-2025) adalah mempersiapkan modernisasi produksi batubara melalui pembuatan database, sistem informasi, karakterisasi dan deliniasi wilayah potensial; (2) Strategi bagian kedua (2026-2030) strategi program bertujuan untuk mengembangkan pengolahan batubara untuk mengoptimalkan penggunaan batubara kalori rendah. Tujuan yang dimaksudkan pada bagian ini adalah membangun pabrik pengolahan batubara yang sudah berproduksi komersial untuk mendukung optimalisasi penggunaan batubara kalori rendah; (3) Strategi bagian ketiga (2031-2045), diambil strategi untuk mengoptimalkan penggunaan batubara berkalori rendah melalui teknologi pengolahan batubara. Fase ini bertujuan untuk mendukung pabrik pengolahan batubara yang ada dalam mengoptimalkan batubara berkalori rendah (ESDM, 2021).

Sedangkan dalam program pemanfaatan batubara kualitas rendah terdapat beberapa teknologi hilirisasi seperti, *co-firing* biomassa, *blending coal*, penerapan IGCC dan CCS yang salah satu tujuannya ialah menurunkan emisi CO₂ (ESDM, 2022). Hal ini berhubungan dengan penyampaian Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Arifin Tasrif mengatakan dalam diskusi panel "*The Road to COP26: Identifikasi Generasi Muda Indonesia Untuk Memerangi Perubahan Iklim dan Mendukung Energi Bersih*" nol emisi akan tercapai pada tahun 2060. Program NZE berkomitmen terhadap pembangunan dan industri negara untuk mencapai nol emisi CO₂ pada tahun 2050 (Zahira & Fadillah, 2022).

Selain itu, LRC juga dapat dimanfaatkan sebagai campuran bahan bakar alternatif seperti campuran biomassa-batubara atau biasa disebut briket *biocoal* yang antara lain mendukung peningkatan penggunaan biomassa sebagai sumber bahan bakar baru terbarukan. Pada tahun 2025, penggunaan EBT akan mencapai 23% dari distribusi energi seluruh negeri, dan pada tahun 2050 diperkirakan akan meningkat menjadi 31%. Oleh karena itu, penggunaan briket *biochar* sejalan dengan strategi distribusi energi nasional. Saat ini, salah satu penerapan briket *biochar* yang paling besar adalah untuk *co-firing* PLTU (ESDM, 2021).

Salah satu strategi percepatan pemanfaatan EBT (Energi Baru Terbarukan) adalah perluasan pembangkit listrik tenaga biomassa (PLTBm) secara masif melalui program *co-firing*. Metode ini digunakan di beberapa negara, terutama negara-negara yang telah menerapkan kebijakan untuk memanfaatkan EBT dengan lebih baik. Selain itu, *co-firing* juga dapat mengurangi penggunaan energi fosil dan mendukung upaya pengurangan gas rumah kaca (Rizqi dkk., 2022).

4. Kesimpulan

Dari hasil analisis studi berbagai metode peningkatan nilai kalori batubara melalui proses pengeringan dan potensi pengembangan serta pemanfaatan batubara di Indonesia dapat disimpulkan bahwa *Low Rank Coal (LRC)* dapat ditingkatkan nilai kalori melalui berbagai metode yang sesuai dengan karakteristik dari batubara dan kebutuhannya. Salah satunya adalah *slurry dewatering (UBC)* dapat meningkatkan sebesar ± 3000 kcal/g kalori dan *Encol/LFC* sebesar ± 4200 kcal/g kalori.

Di Indonesia teknologi peningkatan nilai kalori *LRC* yang sedang dikembangkan adalah teknologi *UBC* dan teknologi *CDP*. Metode *upgrading UBC* ini menghasilkan produk berupa batubara untuk kelistrikan dan industri sedangkan *CDP* akan menghasilkan briket batubara-biomassa dan briket terkarbonasi. Teknologi tersebut masih terus dikembangkan untuk memperoleh teknologi yang paling efisien dalam peningkatan nilai kalori batubara sesuai dengan peta jalan pengembangan batubara yang telah diranjang oleh kementerian ESDM. Selain itu, untuk mendukung program *Net Zero Emission (NZE)* di Indonesia juga *LRC* bersama biomassa dimanfaatkan langsung ataupun diolah menjadi *biocoal* dalam proses pembakaran di PLTU atau sering disebut *co-firing*.

Daftar Pustaka

- Afin, A. P., & Kiono, B. F. T. (2021). Potensi Energi Batubara serta Pemanfaatan dan Teknologinya di Indonesia Tahun 2020–2050: Gasifikasi Batubara. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 2(2), 122–144. <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.11429>
- Andayani, R. (2019). Pengaruh Temperatur Dan Peringkat Batubara Terhadap Konsentrasi Produk Gas Dalam Proses Pirolisis Batubara. *TEKNIKA: Jurnal Teknik*, 6(1), 92-101. <http://dx.doi.org/10.35449/teknika.v6i1.107>
- Arisandy, A. A., Nugroho, W., & Winaswangusti, A. U. (2017). Peningkatan Kualitas Batubara Sub Bituminous Menggunakan Minyak Residu Di Pt. X Samarinda, Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, 5, (1), 1-6 <http://dx.doi.org/10.30872/jtm.v5i1>
- Bendiyasa, I. M., & Prasetya, A. (2019). Pelindian Neodymium dari Magnetik Coal Fly Ash menggunakan Asam Asetat sebagai Pelarut. *Eksergi*, 16(2), 42-46. <https://doi.org/10.31315/e.v16i2.3027>
- Chen, Z., Wu, W., & Agarwal, P. K. (2000). Steam-drying of coal. Part 1. Modeling the behavior of a single particle. *Fuel*, 79(8), 961-974. www.elsevier.com/locate/fuel
- Chen, Z., Wang, D., Li, C., Yang, H., Wang, D., Lai, D., Yu, J., & Gao, S. (2020). A tandem pyrolysis-upgrading strategy in an integrated reactor to improve the quality of coal tar. *Energy Conversion and Management*, 220, 1-6 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113065>
- Clayton, S. A., Scholes, O. N., Hoadley, A. F. A., Wheeler, R. A., McIntosh, M. J., & Huynh, D. Q. (2006). Dewatering of biomaterials by mechanical thermal expression. *Drying Technology*, 24(7), 819–834. <https://doi.org/10.1080/07373930600733093>
- Efendi, M. A. A., Nurhadi, N., & Phiciato, P. (2020). The effects of hydrothermal dewatering on Indonesia lignite characteristics for fixed-bed gasification. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 40(2), 146–154. <https://doi.org/10.1080/19392699.2017.1383245>
- Erik, N. Y., & Sancar, S. (2010). Relationships between coal-quality and organic-geochemical parameters: A case study of the Hafik coal deposits (Sivas Basin, Turkey). *International Journal of Coal Geology*, 83(4), 396–414. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.05.007>
- ESDM (2021). Buku Road Map Pengembangan dan Pemanfaatan Batubara. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral; Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-buku-road-map-pengembangan-dan_pemanfaatan-batubara.pdf
- ESDM (2022). Inisiatif Kebijakan Kementerian ESDM Khususnya di Industri Batubara dalam Mendorong Prinsip Keberlanjutan di Era Transisi Energi. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral; Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara www.esdm.go.id
- Fadhilla, P. N., & Nazarudin, S. (2023). Peranan Gasifikasi Batubara Menjadi Dimetil Eter (DME) dalam Bauran Energi Baru dan Kontribusinya pada Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 4(2), 83–96. <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.17420>
- Fadhili, M. A., & Ansosry, A. (2019). Analisis Pengaruh Perubahan Nilai Total Moisture, Ash Content dan Total Sulphur Terhadap Nilai Kalori Batubara Bb-50 Di Tambang Banko Barat Pt. Bukit Asam, Tbk. Tanjung Enim Sumatera Selatan. *Bina Tambang*, 4(3), 54-64. <https://doi.org/10.24036/bt.v4i3.105999>
- Favas, G., & Jackson, W. R. (2003). Hydrothermal dewatering of lower rank coals. 1. Effects of process conditions on the properties of dried product. *Fuel*, 82(1), 53-57. www.fuelfirst.com
- Ge, L., Zhang, Y., Xu, C., Wang, Z., Zhou, J., & Cen, K. (2015). Influence of the hydrothermal dewatering on the combustion characteristics of Chinese low-rank coals. *Applied Thermal Engineering*, 90, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.015>
- Hartiniati (2007). Slurry Dewatering Process To Improve Quality Of Lowgrade Coal. *The Journal For Technology And Science*, 18 (4), 110-115 <http://dx.doi.org/10.12962/j20882033.v18i4.163>
- Hartiniati dan Najamuddin, H. (2012). Pengujian Steam Tube Dryer Untuk Meningkatkan Kalori Batubara Pilot Plant Test Of Steam Tube Dryer For Increasing Of Coal Calorie. *Jurnal energi dan lingkungan*, 8 (2), 59-63 <https://doi.org/10.29122/elk.v8i2.4247>

- Huseini, F., Solihin, S., & Pramusanto, P. (2018). Kajian Kualitas Batubara Berdasarkan Analisis Proksimat, Total Sulfur dan Nilai Kalor Untuk Pembakaran Bahan Baku Semen di PT Semen Padang Kelurahan Batu Gadang, Kecamatan Lubuk Kilangan, Kota Padang Provinsi Sumatera Barat. *Prosiding Teknik Pertambangan*, 668-677. <http://dx.doi.org/10.29313/pertambangan.v0i0.13420>
- Jaya, D. (2017). Dewatering batubara Jorong, Kalimantan Selatan dengan menggunakan minyak goreng bekas dan minyak tanah. *Eksergi*, 14(2), 35-39. <https://doi.org/10.31315/e.v14i2.2140>
- Jaya, D., & Soegondo, E. (2016). Pemanfaatan CPO (Crude Palm Oil) Untuk Desulfurisasi Pada Batubara Menggunakan Metode Flotasi. *Eksergi*, 13(2), 27-32. <https://doi.org/10.31315/e.v13i2.1699>
- Jaya, D., Widayati, T. W., Mustika, R. Y., & Suwardi, H. N. A. (2020). Enhancing coal tailing quality by Flotation Method using Biosurfactant from Lerak (Sapindusrarak De Candole). *Eksergi*, 17(1), 20-27. <http://eprints.upnyk.ac.id/id/eprint/23339>
- Johns, R. B., Chaffee, A. L., Harvey, K. F., Buchanan, A. S., & Thiele, G. A. (1989). The conversion of brown coal to a dense, dry, hard material. *Fuel processing technology*, 21(3), 209-221. [https://doi.org/10.1016/0378-3820\(89\)90050-7](https://doi.org/10.1016/0378-3820(89)90050-7)
- Krawczykowska, A., & Marciniak-Kowalska, J. (2012). Problems of water content in lignites-methods of its reduction. *AGH Journal of Mining and Geoengineering*, 36(4), 57-65. <https://bibliotekanauki.pl/articles/348585>
- Liao, J., Fei, Y., Marshall, M., Chaffee, A. L., & Chang, L. (2016). Hydrothermal dewatering of a Chinese lignite and properties of the solid products. *Fuel*, 180, 473–480. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.04.027>
- Musademba, D., Simbi, D. J., & Kuipa, P. K. (2022). Acid Tar Waste Beneficiation Through Blending with Coal. *Eksergi*, 19(2), 77-81. <https://doi.org/10.31315/e.v19i2.6346>
- Namiki Toru (2018). Teknologi Pengolahan Lignit. Departemen Promosi Komersialisasi Yasuo Otaka. Japan Coal Energy Center, 19(5), 19-22 <https://www.jcoal.or.jp/publication/journal/>
- Nuhardin, I. (2021). Analisa Pengaruh Ask Content Terhadap Nilai Kalor Batubara Pada PT. Tribhakti Inspektama Samarinda. *Jurnal Pendidikan Dan Teknologi Indonesia*, 1(6), 243–246. <https://doi.org/10.52436/1.jpti.52>
- Ningsih, Y. B., & Huda, M. (2015). Pengaruh Tekanan (Evaporasi Dan Non Evaporasi) Pada Proses Pengeringan Batubara Terhadap Karakteristik Batubara. *Seminar Nasional Added Value of Energy Resources (AVoER) ke-7*. 260-277
- Ningsih, R. R., Handayani, H. E., Suherman, A., Syarifudin, S., & Rohma, S. (2020). Pengaruh suhu pemanasan pada proses upgrading batubara dengan penambahan sarang lebah terhadap karakteristik batubara. Universitas Sriwijaya. *Jurnal Geosapta*, 6(2), 111-116. <https://garuda.kemdikbud.go.id/documents/detail/2046202>
- Osman, H., Jangam, S. V., Lease, J. D., & Mujumdar, A. S. (2011). Drying of low-rank coal (LRC)-A Review of recent patents and innovations. *Drying Technology*, 29(15), 1763–1783. <https://doi.org/10.1080/07373937.2011.616443>
- Permana, D. (2011). Peluang dan tantangan peningkatan nilai tambah batubara. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, 7(1), 1-13. <https://jurnal.tekmira.esdm.go.id/index.php/minerba/article/view/838>
- Pikon', J., & Mujumdar, A. (2006). Drying of Coal. In *Handbook of Industrial Drying, Third Edition*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420017618.ch43>
- Putri, R. Z., & Fadhilah, F. (2020). Peningkatan Kualitas Batubara Low Calorie Menggunakan Minyak Pelumas Bekas Melalui Proses Upgrading Brown Coal. *Bina Tambang*, 5(2), 208-217. <https://doi.org/10.24036/bt.v5i2.108004>
- Racovalis, L., Hobday, M. D., & Hodges, S. (2002). Effect of processing conditions on organics in wastewater from hydrothermal dewatering of low-rank coal. *Fuel*, 81(10), 1369-1378. <http://www.fuel>
- Rao, Z., Zhao, Y., Huang, C., Duan, C., & He, J. (2015). Recent developments in drying and dewatering for low rank coals. *Progress in Energy and Combustion Science* 46, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.09.001>
- Rizqi D. Hamdan., dkk (2022). Kajian Potensi Bambu untuk Mendukung Penerapan Co-firing pada Pembangkit Listrik Jawa Bali. *Jurnal pengabdian kepada masyarakat* 7(1), 2613–9960. <https://doi.org/10.12962/j26139960.v7i1.277>
- Rumbino, Y. (2016). Kinetika Pirolisis Batubara Lignite Menggunakan Analisa Termogravimetry. *Prosiding Semnas Hasil Penelitian*. 592-598 <https://web.archive.org/web/20180411111324/http://ojs.unmas.ac.id/index.php/pros/article/viewFile/348/310>
- Sato, Y., Kushiya, S., Tatsumoto, K., & Yamaguchi, H. (2004). Upgrading of low rank coal with solvent. *Fuel Processing Technology*, 85(14), 1551–1564. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2003.10.023>
- Setiawan, A., Puteri, M. K., & Pasalli, Y. R. (2023). Peramalan puncak produksi dan umur cadangan batubara di Indonesia. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 19(2), 83–93. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol19.No2.2023.1302>
- Shamsi, A., Shadle, L. J., & Seshadri, K. S. (2004). Study of low-temperature oxidation of buckskin subbituminous coal and derived chars produced in ENCOAL process. *Fuel Processing Technology*, 86(3), 275–292. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.03.007>
- Sheldon, R. W. (1997). *Rosebud SynCoal Partnership, SynCoal {reg_sign} demonstration technology update*

- (No. CONF-970121-Vol. 2). National Mining Association, Washington, DC (United States). <https://www.osti.gov/biblio/682307>
- Sojitz (2011). Tsukishima Kikai Launch Project to Promote Greenhouse Gas Reducing Technologies-NEDO Selects Proposal for Promoting Technologies to Prevent Global Warming. <https://www.sojitz.com/en/news/2011/08/20110831.php>
- Sutrisno, A. T., Hanita, M., & Yoesgiantoro, D. (2021). Analisis Resources Nationalism pada Kebijakan Sektor Pertambangan Batubara terhadap Ketahanan Energi Indonesia Pertambangan Batubara terhadap Ketahanan Energi Indonesia. *Jurnal Kajian Stratejik Ketahanan Nasional* 4 (2), 29-42
- Taechapairoj, C., Dhuchakallaya, I., Soponronnarit, S., Wetchacama, S., & Prachayawarakorn, S. (2003). Superheated steam fluidised bed paddy drying. *Journal of food Engineering*, 58(1), 67-73.
- Umar, D. F., & Setiawan, L. (2022). Peningkatan kualitas batubara peringkat rendah dengan cara menurunkan kadar air melalui proses evaporasi. *Jurnal Teknologi Mineral Dan Batubara*, 18(3), 145-155. <https://doi.org/10.30556/jtmb.Vol18.No3.2022.1324>
- Umar Fatia Datin (2010). Pengaruh Proses Upgrading Terhadap Kualitas Batubara Bunyu Kalimantan Timur. Seminar Rekayasa Kimia Dan Proses. ISSN:1411-4216, 1-11 <http://eprints.undip.ac.id/19449/>
- Wibowo, S. A., & Windarta, J. (2020). Pemanfaatan batubara kalori rendah pada PLTU untuk menurunkan biaya bahan bakar produksi. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 1(3), 100-110. <https://doi.org/10.14710/jebt.2021.10029>
- Willson, W. G., Walsh, D., & Irwin, W. (1997). Overview of low-rank coal (LRC) drying. *Coal Preparation* 18 (1-2), 1-15. <https://doi.org/10.1080/07349349708905135>
- Yana, S., Nizar, M., & Yulisma, A. (2021). Prospek Utama Pengembangan Energi Terbarukan Di Negara-Negara ASEAN. *Jurnal Serambi Engineering*, 6(2). 1702 – 1720 <http://www.erranet.org/OtherActivitie>
- Yustanti, E. (2012). Pencampuran Batubara Coking Dengan Batubara Lignite Hasil Karbonisasi Sebagai Bahan Pembuatan Kokas. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah. Journal of Waste Management Technology*, 15, 15-30
- Yusnitati, Y. (2011). Evaluasi Kinerja Proses Peningkatan Mutu Batubara (Coal Upgrading) Melalui Pengujian Berbagai Batubara Peringkat Rendah Dari Kalimantan. *Jurnal Energi dan Lingkungan (Enerlink)*, 7(2), 65-70. <https://doi.org/10.29122/elk.v7i2.4233>
- Zahira, N. P., & Fadillah, D. P. (2022). Pemerintah Indonesia menuju target net zero emission (nze) tahun 2060 dengan variable renewable energy (vre) di Indonesia. *Jurnal Ilmu Sosial*, 2(2), 114-119. <https://ejournal.penerbitjurnal.com/index.php/socialscience/issue/view/4>
- Zhang, X. Y., Wang, R. Y., Ma, F. Y., Wei, X. Y., & Fan, X. (2020). Structural characteristics of soluble organic matter in four low-rank coals. *Fuel*, 267, 1-7 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117230>
- Zhu, C., Xie, Q., Zhong, J., Guo, H., & Zhang, Y. (2019). Effects of hydrothermal treatment on oxygen functional groups and pyrolysis characteristics of a vitrinite-rich low rank coal. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 14(3), 1-13 <https://doi.org/10.1002/apj.2302>