

PENGARUH PROSES HIDROTERMAL BATUBARA PERINGKAT RENDAH TERHADAP KOMPOSISI DAN SUHU TITIK LELEH ABU

Effect of Low Rank Coal Hydrothermal Process on Ash Composition and Fusion Temperature

DATIN F. UMAR, IKA MONIKA dan SUGANAL

Puslitang Teknologi Mineral dan Batubara
Jalan Jenderal Sudirman 623 Bandung 40211
Telp. (022) 6030483, Fax. (022) 6003373
e-mail: datin.umar@esdm.go.id

ABSTRAK

Hidrotermal (HT) merupakan proses untuk meningkatkan kualitas batubara peringkat rendah melalui penurunan kadar air pada suhu dan tekanan relatif tinggi (suhu 330°C dan tekanan ± 120 atm). Untuk mengetahui pengaruh proses HT terhadap komposisi dan titik leleh abu serta kecenderungan terhadap terjadinya *slagging* dan *fouling* pada boiler di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), maka dilakukan penelitian dengan menggunakan percontoh batubara yang berasal dari Samarinda, Tanjung dan Lahat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar oksida-oksida alkali seperti CaO, MgO, Na₂O dan K₂O mengalami penurunan. Kadar CaO batubara Samarinda sebelum proses HT 3,74% turun menjadi 2,24% setelah proses HT, sedangkan batubara Tanjung dari 1,59 menjadi 0,30% dan batubara Lahat dari 7,43 menjadi 6,68%. Kadar MgO dari 2,38 menjadi 0,57% untuk batubara Samarinda dan batubara Tanjung dari 7,13 menjadi 3,49% sedangkan batubara Lahat dari 4,06 menjadi 2,50%. Kadar Na₂O batubara Samarinda dari 0,79% sedikit meningkat menjadi 0,88% sedangkan batubara Tanjung dan Lahat masing-masing turun dari 3,01 menjadi 1,82% dan dari 1,09 menjadi 0,20%. Kadar K₂O batubara Samarinda turun dari 0,77 menjadi 0,17%, batubara Tanjung turun dari 0,61 menjadi 0,063% dan batubara Lahat dari 0,53 menjadi 0,13%. Suhu titik leleh (*flow temperature*) pada suasana reduksi batubara Samarinda meningkat dari 1.335 menjadi > 1.500°C, batubara Tanjung sedikit turun dari 1.275 menjadi 1.220°C sedangkan batubara Lahat meningkat dari 1.315 menjadi 1.335°C. Walaupun kadar oksida-oksida alkali yang berpengaruh terhadap terjadinya *slagging* dan *fouling* mengalami penurunan, namun menurut batasan yang ada baik sebelum maupun setelah proses HT masih termasuk ke dalam tipe yang sama. Berdasarkan titik leleh abu, kecenderungan terhadap terjadinya *slagging* batubara Samarinda dari tipe sangat tinggi sebelum proses menjadi tinggi setelah proses HT. Sedangkan batubara Tanjung dan Lahat tetap (sangat tinggi).

Kata kunci: batubara peringkat rendah, komposisi abu, suhu titik leleh abu, *slagging*, *fouling*.

ABSTRACT

Hydrothermal (HT) is a process to upgrade low rank coal through moisture removal at relatively high temperature and pressure (T 330°C and P ± 120 atm). To study the effects of the HT process on ash composition, ash fusion temperature and the tendency to slagging and fouling in a boiler at coal fired power station, a research was conducted by using coal samples from Samarinda, Tanjung and Lahat. Results indicate that the content of alkali oxides of CaO, MgO, Na₂O and K₂O decreased. The CaO content of Samarinda coal before process was 3.74% decreased to 2.24% after process, while Tanjung coal decreased from 1.59 to 0.30% and Lahat coal from 7.43 to 6.68%. MgO content decreased from 2.38 to 0.57% for Samarinda coal and Tanjung coal from 7.13 to 3.49% while Lahat coal from 4.06 to 2.50%. The Na₂O content of Samarinda coal from 0.79% slightly

increased to 0.88% while Tanjung and Lahat coal decreased from 3.01 to 1.82% and from 1.09 to 0.20%, respectively. The K_2O content of Samarinda coal decreased from 0.77 to 0.17%, Tanjung coal from 0.61 to 0.063% and Lahat coal from 0.53 to 0.13%. The melting point temperature (flow temperature) in the reduction condition of Samarinda coal increased from 1,335 to $> 1,500$ °C, Tanjung coal slightly decreased from 1,275 to 1,220 °C, while Lahat coal increased from 1,315 to 1,335 °C. Although the alkali oxides contents affect the tendency of slagging and fouling decreased, according to the existing limitation the category of both coals before and after HT process are still in the same level. Based on ash fusion temperature the tendency of slagging of the Samarinda coal was change from severe to high, while Tanjung and Lahat coals were not change (severe).

Keywords: low rank coal, ash composition, ash fusion temperature, slagging, fouling.

PENDAHULUAN

Semakin meningkatnya taraf hidup masyarakat Indonesia dari tahun ke tahun, maka kebutuhan akan energi terutama untuk listrik juga semakin meningkat. Konsumsi listrik pada tahun 2015 baru 910 kilowatt jam (kWh) per kapita, kemudian meningkat menjadi 1.084 kWh/kapita pada 2019. Peningkatan ini sejalan dengan rasio elektrifikasi yang juga menunjukkan kenaikan yang hampir menjangkau seluruh wilayah Indonesia. Rasionya dari 84,35% pada 2014 meningkat menjadi 98,89% pada 2019 dan ditargetkan pada tahun 2020 menjadi 100%.

Kebutuhan listrik tersebut pada tahun 2014 lebih dari setengahnya atau 52,87% dipenuhi oleh pembangkit listrik yang menggunakan batubara sebagai bahan bakarnya dan pada tahun 2019 meningkat menjadi 60,50% (Kanam, 2020). Dominasi penggunaan batubara sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik dibandingkan dengan bahan bakar lainnya di Indonesia disebabkan karena pembangkit listrik dengan batubara membutuhkan biaya investasi paling rendah serta biaya operasinya diketahui 30% lebih rendah dibandingkan sistem pembangkit listrik yang lain.

Sumber daya batubara Indonesia diperkirakan mencapai 151,3 milyar dan cadangan sekitar 39,8 milyar ton. Berdasarkan pembagian kualitas batubara berdasarkan kalori menurut KEPRES No. 13/2000 diperbaharui dengan Kepres No. 45/2003 tentang tarif atas jenis penerimaan negara bukan pajak yang berlaku pada Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral berkenaan dengan royalti, sumber daya batubara umumnya termasuk kalori menengah (59%), diikuti oleh batubara kalori rendah sebesar 31%, batubara kalori tinggi 7% dan kalori sangat tinggi sekitar 3% (Wafid, 2019).

Batubara kalori tinggi dan kalori menengah saat ini dialokasikan untuk ekspor, sementara penggunaan dalam negeri pada umumnya batubara kalori menengah. Batubara kalori rendah saat ini belum dapat dimanfaatkan secara optimal karena mempunyai keterbatasan, di antaranya karena tingginya kadar air. Kadar air yang tinggi baik air bawaan maupun air bebas akan menimbulkan masalah dalam proses pemanfaatannya, terutama jika digunakan sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Saat proses pembakaran, air dalam batubara akan mengurangi nilai kalor sehingga jumlah batubara yang diperlukan menjadi lebih besar. Konsekuensinya, ukuran boiler juga menjadi lebih besar (Zhan dkk., 2011). Penggunaan batubara peringkat rendah juga akan menghasilkan gas CO_2 yang lebih besar karena jumlah batubara yang dibakar juga besar. Gas CO_2 yang tinggi akan mempunyai dampak negatif terhadap lingkungan dengan timbulnya efek rumah kaca yang dapat menyebabkan pemanasan global (Charrière dan Behra, 2010).

Beberapa teknologi peningkatan kualitas (*upgrading*) untuk menurunkan kadar air batubara peringkat rendah telah diteliti dan dikembangkan (Umar, 2019). Alasan utama proses ini adalah untuk mengurangi ongkos yang berkaitan dengan pengangkutan, menanggulangi masalah penanganan dan meningkatkan efisiensi pembakaran.

Penelitian tentang peningkatan kualitas batubara peringkat rendah Indonesia telah dilakukan sejak tahun 2002 sampai sekarang, di antaranya teknologi *Upgraded brown coal* (UBC), pengeringan uap, *coal upgrading palm oil* (CUPO) dan hidrotermal. Penelitian umumnya membahas tentang penurunan kadar air dan peningkatan nilai kalori serta pengaruhnya terhadap sifat pembakaran

batubara setelah proses *upgrading* (Umar, 2016; Umar, Shimojo dan Madiutomo, 2018).

Proses hidrotermal (*hydrothermal process*) merupakan salah satu proses untuk meningkatkan nilai kalor batubara melalui penurunan kadar air. Proses ini dikembangkan oleh *Rosebud SynCoal Partnership* (RSCP) dan *US Department of Energy*, DOE, USA. Batubara dengan kadar air total (*total moisture*) 20-30% dan nilai kalor 8.000-9.000 Btu/lb dipanaskan pada temperatur 270-300°C dan tekanan 8-12 MPa menggunakan air sebagai media (Liu dkk., 2016).

Suhu dan tekanan yang tinggi, menyebabkan terjadinya pengeluaran air bebas, air bawaan, tar, hidrogen, CO₂, CO dan hidrokarbon. Tar yang keluar dari batubara akan menutupi pori-pori permukaan batubara yang terbuka karena proses pemanasan, sehingga air yang telah dikeluarkan tidak dapat terserap kembali oleh batubara tersebut (Wu dkk., 2015; Liao dkk., 2016).

Tulisan ini membahas tentang teknologi *upgrading* batubara peringkat rendah menggunakan proses hidrotermal (HT) untuk mengetahui pengaruhnya terhadap komposisi dan titik leleh abu batubara serta mempelajari potensi terjadinya *slagging* dan *fouling* yang ditimbulkan saat batubara digunakan sebagai bahan bakar pada PLTU sistem *pulverized coal combustion* (PCC).

Efektifitas penggunaan batubara untuk pembangkit listrik tergantung kepada banyak hal, dimulai dari kinerja seluruh peralatan pembangkitan, kualitas dan kuantitas batubara yang digunakan. Spesifikasi yang umum diberlakukan untuk PLTU antara lain adalah kadar air, nilai kalor dan indeks ketergerusan (*hardgrove grindability index*, HGI). Kuantitas dan karakteristik dari abu sisa pembakaran juga tidak dapat dipisahkan dan perlu untuk diperhatikan (Ma dkk., 2015).

Abu pembakaran batubara pada PLTU sistem PCC akan menimbulkan masalah yang dapat menurunkan efisiensi *boiler*. Di antaranya karena terjadinya *slagging* dan *fouling* yang merupakan fenomena menempel dan menumpuknya abu batu bara yang melebur pada pipa penghantar panas (*heat exchanger tube*) ataupun dinding *boiler*. Kedua hal ini

sangat serius karena dapat memberikan dampak yang besar pada operasional *boiler*, yaitu menurunkan kapasitas penyerapan panasnya yang ditandai dengan naiknya temperatur gas buang, sehingga akan menyebabkan terjadinya penurunan produksi uap dan efisiensi *boiler*. Fenomena menempelnya abu ini terutama dipengaruhi oleh suhu titik leleh abu (*ash fusion temperature*, AFT) dan unsur-unsur dalam abu. Evaluasi terhadap kemungkinan terjadinya *slagging* dan *fouling* dapat diketahui melalui perhitungan rasio terhadap beberapa unsur tertentu dalam abu (Yang dkk., 2019).

Abu sisa pembakaran batubara pada PLTU berupa abu terbang (*fly ash*) sekitar 75% dan abu bawah (*bottom ash*) sekitar 25%. Abu terbang memiliki bobot yang lebih ringan daripada abu bawah dan ukuran yang sangat kecil, yaitu pada kisaran 1 hingga 100 μm , dengan median 20-25 μm . Abu bawah adalah residu yang terkumpul di bagian bawah *boiler* selama proses pembakaran batubara, lebih berat dari abu terbang dan ukuran yang lebih besar seukuran pasir atau kerikil, dengan ukuran mulai dari 0,1 hingga 50 mm (Goodarzi, Huggins dan Sanei, 2008). Abu terbang ditangkap oleh perangkat pengontrol polusi *electrostatic precipitator* (ESP) atau *filter bag*, sedangkan abu bawah dikeluarkan melalui bagian bawah boiler.

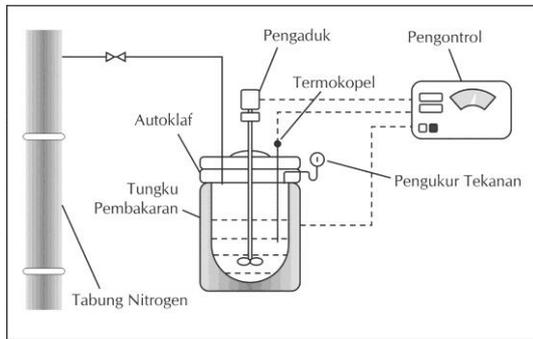
METODE

Batubara yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari beberapa lokasi endapan batubara yang ada di Indonesia, yaitu dari Samarinda, Kalimantan Timur, Tanjung, Kalimantan Selatan dan Lahat, Sumatera Selatan yang mempunyai kadar air yang relatif tinggi dan nilai kalor relatif rendah. Percontohan batubara dikeringkan, diremuk dengan menggunakan *jaw crusher*, sebagian berukuran < 8 mesh untuk proses *upgrading* dengan metoda HT dan sebagian lagi digiling sampai berukuran < 60 mesh kemudian diabukan untuk analisis komposisi dan titik leleh abu.

• Proses *upgrading*

Proses HT dilakukan dengan menggunakan batubara yang berukuran < 8 mesh. Proses dilakukan dengan mencampurkan batubara dan air (persen padatan 30%) kemudian dipanaskan

pada suhu 330°C dan tekanan sekitar 100-120 atm dengan menggunakan autoklaf selama 1 jam (Umar, Shimojo dan Madiutomo, 2018). Skema peralatan proses HT dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema peralatan proses HT (Yang dkk., 2019)

• Analisis komposisi abu batubara

Unsur-unsur atau komponen-komponen yang terdapat dalam batubara setelah dibakar akan terdeteksi sebagai oksida-oksida dari SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅, MnO₂ dan SO₃. Oksida-oksida tersebut dianalisis dengan cara mengabukan batubara terlebih dahulu, lalu dianalisis dengan metode gravimetri, spektrophotometri dan AAS tergantung pada oksida yang akan dianalisis. Kecenderungan untuk terjadinya *slagging* dan *fouling* dapat diketahui melalui evaluasi/perhitungan dari beberapa unsur tersebut di

atas dengan formula sebagaimana terlihat pada Tabel 1 (Yang dkk., 2019).

• Analisis titik leleh abu

Titik leleh abu (*ash fusion temperature, AFT*) batubara dilakukan dengan memanaskan percontoh abu yang dicetak menjadi kerucut (*cone*) menurut Standar ASTM D1857-04 (2013) dalam suasana reduksi. Perubahan profil kerucut tersebut diamati sehingga dapat diketahui pada suhu berapa terjadinya karakteristik pelunakan dan pelelehan abu. Perubahan bentuk akibat pemanasan ditunjukkan pada Gambar 2, yaitu:

- Suhu deformasi (*initial deformation, IT*): suhu saat terjadinya perubahan bentuk percontoh uji
- Suhu pelunakan (*softening temperature, ST*): suhu saat percontoh uji berubah bentuk menjadi *spherical* yaitu tinggi sama dengan diameter dasar piramida
- Suhu hemisfer (*hemispherical temperature, HT*): suhu saat percontoh uji berubah bentuk menjadi hemisphere dimana tinggi sama dengan 1/2 dari diameter dasar piramida
- Suhu leleh/flow (*fluid temperature, FT*): suhu saat percontoh uji meleleh dari kedudukannya atau tinggi sama dengan 1/3 bagian dari tinggi percontoh uji pada suhu hemisfer

Evaluasi kecenderungan terhadap terjadinya *slagging* dan *fouling* berdasarkan hasil uji titik leleh abu dapat dilihat pada Tabel 2 (Zhu dkk., 2019).

Tabel 1. Kecenderungan *slagging* dan *fouling* berdasarkan komposisi abu (Yang dkk., 2019)

Indeks	Persamaan	Tipe
Rasio basa/asam	$R_{b/d} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	< 0,6 rendah 0,6-2,0 sedang 2,0-2,6 tinggi > 2,6 sangat tinggi
Indeks <i>slagging</i>	$SI = R_{b/d} \times S_d$	< 0,6 rendah 0,6-40 tinggi > 40 sangat tinggi
Indeks <i>fouling</i>	$FI = R_{b/d} \times (K_2O + Na_2O)$	< 0,6 rendah 0,6-72 sedang > 72 rendah 66-72 sedang < 65 tinggi
Indeks <i>viscositas slag</i>	$SVI = \frac{SiO_2 \times 100}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO}$	

Tabel 3. Hasil analisis komposisi abu dan sulfur batubara sebelum dan setelah proses HT

Analisis	Samarinda		Tanjung		Lahat	
	Awal	HT	Awal	HT	Awal	HT
SiO ₂ , %	40,80	24,90	24,60	19,20	44,00	40,40
Al ₂ O ₃ , %	23,60	40,80	5,89	6,61	17,26	16,70
Fe ₂ O ₃ , %	22,00	20,6	44,9	63,77	15,97	24,8
K ₂ O, %	0,77	0,17	0,61	0,063	0,53	0,13
Na ₂ O, %	0,79	0,88	3,01	1,82	1,09	0,20
CaO, %	3,74	2,24	1,59	0,30	7,43	6,68
MgO, %	2,38	0,57	7,13	3,49	4,06	2,50
TiO ₂ , %	1,72	2,45	0,52	0,23	0,41	0,39
MnO, %	0,33	0,15	0,10	tt	0,07	0,12
P ₂ O ₅ , %	2,58	1,32	0,67	0,59	0,075	0,02
SO ₃ , %	0,42	2,62	9,01	2,9	5,89	6,71
Rasio basa/asam	0,45	0,36	1,85	2,67	0,47	0,60
Indeks <i>slagging</i>	0,20	0,14	0,32	0,52	1,20	1,19
Indeks <i>fouling</i>	0,35	0,32	5,56	4,85	0,51	0,12
Indeks viskositas <i>slag</i>	0,59	0,52	0,31	0,22	0,62	0,54
Sulfur, % basis kering	0,44	0,38	0,18	0,19	2,56	1,99

Dari ke-3 percontohan batubara yang diuji, indeks *slagging* dan *fouling* semuanya mengalami penurunan setelah proses HT. Namun demikian, kecenderungan terhadap terjadinya *slagging* dan *fouling* berdasarkan batasan yang tercantum pada Tabel 1, kecenderungan terhadap terjadinya *slagging* dan *fouling* batubara sebelum dan setelah proses HT batubara Samarinda dan Tanjung termasuk tipe rendah (indeks *slagging* <0,6), sedangkan batubara Lahat sebelum dan setelah proses HT termasuk tipe sedang (indeks *slagging* antara 0,6 dan 2,0).

Begitu pula dengan indeks *fouling*, batubara Samarinda dan Tanjung sebelum dan setelah proses HT termasuk tipe rendah, sedangkan batubara Lahat indeks *fouling* sebelum proses HT termasuk sedang, setelah proses HT menjadi rendah. Hasil ini tidak begitu berbeda dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Yang dkk. (2019) bahwa kadar unsur-unsur pembentuk *slagging* dan *fouling* menurun sehingga indeks *slagging* dan *fouling* juga menurun, namun tipe indeks *slagging* dan *fouling* tidak berubah.

• Pengaruh proses HT terhadap titik leleh abu

Titik leleh abu dipengaruhi oleh kandungan CaO, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ dalam abu batubara. Makin tinggi kadar CaO dan Fe₂O₃, makin rendah suhu titik leleh abu, sedangkan makin tinggi kadar Al₂O₃, makin tinggi pula titik leleh abu (Yang dkk., 2019).

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa suhu deformasi (IT) ketika percontohan abu batubara mulai berubah bentuk pada suasana reduksi, percontohan batubara Samarinda dan Tanjung mengalami kenaikan, sedangkan batubara Lahat sedikit turun. Meningkatnya suhu deformasi disebabkan oleh turunnya kadar CaO setelah proses HT. Batubara Lahat, suhu deformasi malah meningkat walaupun CaO dalam abu batubara mengalami penurunan. Hal ini disebabkan CaO dalam batubara tersebut pada suhu yang tinggi membentuk ikatan yang kuat dengan mineral-mineral lain dan juga sebagai akibat naiknya kadar Fe₂O₃ setelah proses HT sehingga suhu deformasi turun (Liu dkk., 2013).

Tabel 4. Hasil uji titik leleh abu batubara sebelum dan setelah proses HT

°C	Samarinda		Tanjung		Lahat	
	Awal	HT	Awal	HT	Awal	HT
Suhu deformasi (IT)	1.105	1.410	1.025	1.125	1.095	1.075
Suhu Pelunakan (ST)	1.170	> 1.500	1.110	1.155	1.175	1.135
Suhu hemisfer (HT)	1.200	> 1.500	1.120	1.165	1.195	1.175
Suhu leleh (FT)	1.335	> 1.500	1.275	1.220	1.315	1.335
Indeks <i>slagging</i>	1.151	1.428	1.075	1.144	1.139	1.127

Menurut batasan terhadap kecenderungan terjadinya *slagging* dan *fouling* yang tercantum pada Tabel 2, batubara Samarinda pada suhu deformasi (IT) dari tipe tinggi menjadi rendah, sedangkan batubara Tanjung dan Lahat termasuk tipe sedang sebelum dan setelah proses HT. Pada suhu pelunakan (ST), batubara Samarinda dari tinggi menjadi rendah sedangkan batubara Tanjung dan Lahat tetap tinggi. Indeks *slagging* batubara Samarinda dari sangat tinggi sebelum proses HT menjadi tinggi setelah proses. Sedangkan batubara Tanjung dan Lahat termasuk sangat tinggi sebelum maupun setelah proses HT.

KESIMPULAN

Proses hidrotermal (HT) yang dilakukan terhadap percontohan batubara Samarinda, Tanjung dan Lahat pada suhu 330°C dan tekanan 120 atm, mampu menurunkan kadar oksida-oksida alkali seperti CaO, MgO, Na₂O dan K₂O. Setelah proses HT, suhu titik leleh abu deformasi (IT) dan suhu pelunakan (ST) batubara Samarinda dan Tanjung meningkat sementara batubara Lahat mengalami sedikit penurunan. Berdasarkan hasil analisis komposisi abu, batubara Samarinda dan Tanjung tipe *slagging* dan *fouling* rendah, sedangkan batubara Lahat termasuk tipe sedang, baik sebelum maupun setelah proses HT. Berdasarkan suhu titik leleh abu, indeks *slagging* batubara Samarinda dari sangat tinggi menjadi tinggi sedangkan batubara Lahat dan Tanjung termasuk tipe sangat tinggi pada sebelum dan setelah proses HT.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kepala Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara (*tekMIRA*) atas terlaksananya penelitian ini. Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada rekan-rekan di laboratorium batubara yang telah membantu sehingga penelitian ini berjalan dengan baik dan lancar.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM D1857-04 (2013) "Standard test method for fusibility of coal and coke ash," in *Annual Book of ASTM Standards*. West Conshohocken: ASTM International.
- Charrière, D. dan Behra, P. (2010) "Water sorption on coals," *Journal of Colloid and Interface Science*, 344(2), hal. 460–467. doi: 10.1016/j.jcis.2009.11.064.
- Dexia, L., Zhijie, Z., Qinghua, G. dan Guangsu, Y. (2012) "Ash fusion and viscosity-temperature characteristics of Yulin coal," *Huagong Xuebao/CIESC Journal*, 63(1), hal. 9–17.
- Favas, G. dan Jackson, W. R. (2003) "Hydrothermal dewatering of lower rank coals. 2. Effects of coal characteristics for a range of Australian and international coals," *Fuel*, 82(1), hal. 59–69. doi: 10.1016/S0016-2361(02)00191-6.
- Goodarzi, F., Huggins, F. E. dan Sanei, H. (2008) "Assessment of elements, speciation of As, Cr, Ni and emitted Hg for a Canadian power plant burning bituminous coal," *International Journal of Coal Geology*, 74(1), hal. 1–12. doi: 10.1016/j.coal.2007.09.002.
- Kanam, S. H. (2020) "Electricity supply policy," in *CCT Seminar in Indonesia*. Jakarta: JCOAL & KESDM.
- Liao, J., Fei, Y., Marshall, M., Chaffee, A. L. dan Chang, L. (2016) "Hydrothermal dewatering of a Chinese lignite and properties of the solid products," *Fuel*, 180, hal. 473–480. doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.027.
- Liu, B., He, Q., Jiang, Z., Xu, R. dan Hu, B. (2013) "Relationship between coal ash composition and ash fusion temperatures," *Fuel*, 105, hal. 293–300. doi: 10.1016/j.fuel.2012.06.046.
- Liu, J., Wu, J., Zhu, J., Wang, Z., Zhou, J. dan Cen, K. (2016) "Removal of oxygen functional groups in lignite by hydrothermal dewatering: An experimental and DFT study," *Fuel*, 178, hal. 85–92. doi: 10.1016/j.fuel.2016.03.045.
- Ma, Y., Zhang, H., Yuan, Y. dan Wang, Z. (2015) "Optimization of a lignite-fired open pulverizing system boiler process based on variations in the drying agent composition," *Energy*, 81, hal. 304–316. doi: 10.1016/j.energy.2014.12.044.

- Umar, D. F. (2016) "Sifat pembakaran batubara hasil proses upgrading dengan teknologi hot water drying," in Santoso, B. et al. (ed.) *Prosiding Kolokium Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara 2016*. Bandung: Puslitbang tekMIRA, hal. 49–61.
- Umar, D. F. (2019) "Low rank coal upgrading," in *Prosiding MGEI 11th Annual Convention "Unlocking Concealed and Complex Deposits."* Bogor: Masyarakat Geologi Ekonomi Indonesia.
- Umar, D. F., Shimojo, M. dan Madiutomo, R. M. N. (2018) "Evaluation of combustion behaviour for Indonesian low-rank coals treated hydrothermally," *Indonesian Mining Journal*, 21(2), hal. 127–139.
doi: 10.30556/imj.Vol21.No2.2018.919.
- Wafid, M. (2019) "Country report-Indonesia," in *17th Afoc Council Meeting*. Langkawi: AFOC.
- Wu, J., Liu, J., Zhang, X., Wang, Z., Zhou, J. dan Cen, K. (2015) "Chemical and structural changes in XiMeng lignite and its carbon migration during hydrothermal dewatering," *Fuel*, 148, hal. 139–144.
doi: 10.1016/j.fuel.2015.01.102.
- Yang, M., Xie, Q., Wang, X., Dong, H., Zhang, H. dan Li, C. (2019) "Lowering ash slagging and fouling tendency of high-alkali coal by hydrothermal pretreatment," *International Journal of Mining Science and Technology*, 29(3), hal. 521–525.
doi: 10.1016/j.ijmst.2018.05.007.
- Zhan, X., Jia, J., Zhou, Z. dan Wang, F. (2011) "Influence of blending methods on the co-gasification reactivity of petroleum coke and lignite," *Energy Conversion and Management*, 52(4), hal. 1810–1814.
doi: 10.1016/j.enconman.2010.11.009.
- Zhu, C., Tu, H., Bai, Y., Ma, D. dan Zhao, Y. (2019) "Evaluation of slagging and fouling characteristics during Zhundong coal co-firing with a Si/Al dominated low rank coal," *Fuel*, 254, hal. 115730.
doi: 10.1016/j.fuel.2019.115730.