

Investigation on Slagging Fouling Potential in Coal Blending for PLTU with PC Boiler with Droptube Furnace Method

Hariana, Fairuz Milky Kuswa, Dani Rudiana, Lan Marakkup
Tua Naingolan

Balai Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Desain, BPPT
E-mail: hariana@bppt.go.id¹

Abstract: The majority of power plants in Indonesia are Coal-Fired Power Plants (PLTU) which using coal as the main fuel. The coal used in the PLTU is coal that has been adjusted to the existing PLTU design. However, coal availability according to the initial design of the PLTU is running low and even almost non-existent. If the coal does not meet the PLTU design specifications is forced to be used as fuel, various problems will arise regarding to the capability and reliability of the power plant itself. Therefore, looking for coal alternatives that have similar specifications to the PLTU design is very important, to get these alternatives can be done by Blending coal from various specifications. The Blending product must be evaluated from various aspects, one of which is slagging and fouling. This research will focus on the aspects of slagging fouling resulting from the Blending of two different coals in terms of characteristics and specifications. Evaluation is carried out by taking samples and tested to make predictions based on AAS and AFT, burning in the Drop Tube Furnace (DTF), and performing SEM and XRD analysis of two coal Blending products. The results obtained are that the A and B Blending products are in an acceptable risk for direct testing on a larger scale (PLTU) or boiler simulator. However, Blending A has a greater potential for further research than Blending product B.

Keywords: Slagging, Fouling, Coal, Blending, Drop Tube Furnace

Abstrak: Mayoritas pembangkit listrik yang ada di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan bahan bakar utama batubara. Batubara yang digunakan pada PLTU merupakan batubara yang sudah disesuaikan dengan desain PLTU yang sudah ada. Namun demikian ketersediaan batubara sesuai desain awal PLTU sudah menipis bahkan hampir tidak ada. Jika batubara yang tidak sesuai spesifikasi desain PLTU dipaksa untuk dipakai menjadi bahan bakar, akan timbul berbagai macam masalah terkait usia pakai dan kehandalan dari pembangkit itu sendiri. Maka dari itu, mencari alternatif batubara yang memiliki spesifikasi mirip dengan desain PLTU menjadi sangat penting, untuk mendapatkan alternatif tersebut bisa dilakukan dengan cara mencampur (*Blending*) batubara dari berbagai spesifikasi. Produk *Blending* tersebut harus dievaluasi dari berbagai aspek yang salah satunya aspek *slagging* dan *fouling*. Penelitian ini akan fokus pada aspek *slagging fouling* yang dihasilkan dari hasil *Blending* dari dua batubara yang berbeda dari segi karakter dan spesifikasi. Evaluasi dilakukan dengan metode mengambil sampel dan diuji untuk melakukan prediksi berdasarkan AAS dan AFT, melakukan pembakaran di

Drop Tube Furnace (DTF), dan melakukan analisa SEM dan XRD terhadap dua produk *Blending* batubara. Hasil yang diperoleh adalah produk *Blending* A dan B masuk dalam risiko yang masih bisa diterima untuk uji dalam skala lebih besar (PLTU) secara langsung atau *boiler simulator*. Namun demikian, *Blending* A mempunyai potensi lebih besar untuk di lakukan penelitian lebih lanjut daripada produk *Blending* B.

Kata Kunci: *slagging, fouling, batubara, Blending, drop tube furnace*

I. PENDAHULUAN

Pembangkit listrik di Indonesia kebanyakan adalah pembangkit berbahan bakar batubara¹. Sebagian pembangkit tersebut telah berumur cukup tua dengan desain batubara yang memiliki spesifikasi tinggi. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut maka perlu dilakukan *Blending* diantara dua batubara atau lebih agar diperoleh batubara yang sesuai dengan spesifikasi pembangkit².

Hal umum yang harus dipenuhi diantaranya adalah nilai kalor, total sulfur, kadar air, total abu dan yang tak kalah penting adalah potensi *slagging* dan *fouling*. Potensi *slagging* dan *fouling* ini paling banyak ditentukan oleh komposisi bahan bakar disamping hal lainnya³. Potensi *slagging fouling* ini umumnya dicerminkan dari *Ash Fusion Temperatur* (AFT). Pada batubara produk *Blending* ini sifat AFT tidak linier dengan batubara penyusunnya⁴. Vuthaluru⁵ telah membuktikan dengan melakukan *Blending* antara batubara *lignite* dan *bituminous* dapat memperbaiki sifat *slagging fouling*. Banyak cara yang dipertimbangkan

¹ Deon Arinaldo and Julius Christian Adiatma, "Dinamika Batubara Indonesia : Menuju Transisi Energi Yang Adil" (Jakarta, 2019).

² Mohammad Zahari Sukimi Mat Zaid et al., "Coal Fired Power Plant: A Review on Coal Blending and Emission Issues," *AIP Conference Proceedings* 2062, no. 1 (January 2019): 20022, <https://doi.org/10.1063/1.5086569>.

³ N Hare, Mohammad Rasul, and Shadia Moazzem, "A Review on Boiler Deposition/Fouling Prevention and Removal Techniques for Power Plant," January 2010.

⁴ J.-R. Qiu et al., "The Influences of Mineral Behaviour on Blended Coal Ash Fusion Characteristics," *Fuel* 78, no. 8 (1999): 963-69, [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00005-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00005-8).

⁵ Hari B Vuthaluru and Dong-ke Zhang, "Effect of Coal Blending on Particle Agglomeration and Defluidisation during Spouted-Bed Combustion of Low-Rank Coals," *Fuel Processing Technology* 70, no. 1 (2001): 41-51, [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00130-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00130-8).

dalam menilai *slagging fouling* diantaranya komposisi abu dan menerapkan rasio-rasio, total abu, dan total sulfur dari batubara ⁶.

Metode lain untuk mengetahui karakteristik dari batubara adalah dengan melakukan pembakaran batubara dalam tungku atau boiler ⁷. Salah satu instrumen untuk melakukan uji pembakaran batubara adalah dengan menggunakan *Drop Tube Furnace* (DTF). Uji bakar dengan menggunakan DTF dilakukan dengan kondisi yang sangat mirip dengan kondisi boiler pada PLTU, dimana parameter terkait pembakaran diatur sedemikian rupa. Hasil pembakaran pada tungku DTF ini telah banyak diterima oleh stockholder yang ada di PLTU.

II. METODE

Penelitian ini bermaksud untuk membandingkan produk *Blending* batubara yaitu *Blend A* dan *Blend B* untuk mendapatkan kinerja PLTU yang terbaik. metode yang digunakan adalah prediksi berdasarkan hasil AAS, uji bakar pada DTF, dan pengamatan SEM dan XRD.

Pengujian karakteristik laboratorium difokuskan pada kandungan sulfur, *ash fusion temperature*, dan analisis komposisi abu. Dari hasil pengujian karakteristik ini dihitung prediksi *slagging* dan *fouling* berdasarkan analisa abu tersebut dengan rumusan sederhana yang biasanya dipakai seperti,

Rasio basa asam ⁸

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$$

Indeks *slagging* ⁹

$$R_s = \frac{B}{A} \cdot S$$

Rasio silika ¹⁰

$$Si_R = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \cdot 100$$

⁶ Mohammad Zahari Sukimi Mat Zaid et al., "Coal Combustion Analysis Tool in Coal Fired Power Plant for Slagging and Fouling Guidelines," *AIP Conference Proceedings* 2062, no. January (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5086575>.

⁷ Gengda Li et al., "Fine Particulate Formation and Ash Deposition during Pulverized Coal Combustion of High-Sodium Lignite in a down-Fired Furnace," *Fuel* 143 (2015): 430-37, <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.067>.

⁸ Babcock and Wilcox, *Steam Its Generation and Use*, 5th ed. (USA: McDermott Company, 2005).

⁹ Babcock and Wilcox.

¹⁰ E Raask, *Mineral Impurities in Coal Combustion: Behavior, Problems, and Remedial Measures* (United States: Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, 1985).

$$T_{AFI} = \frac{4 IT + HT}{5}$$

Fusibilitas ¹¹

$$R_f = \frac{B}{A} \cdot (Na_2O)$$

Indeks *fouling* ¹²

Tabel 1. Hasil Analisa Karakteristik Batubara *Blend A* dan *Blend B*

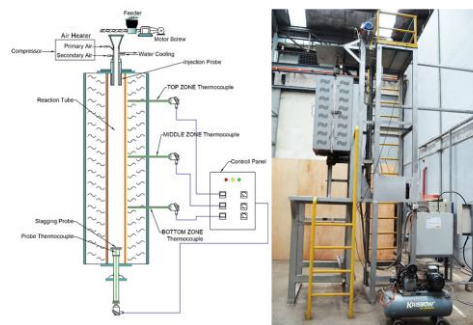
Karakteristik Sampel			<i>BlendA</i>	<i>BlendB</i>
Kadar abu	%	adb	6.30	4.15
Total sulfur	%	adb	0.54	0.41
Ultimate Analysis				
Karbon	%	adb	61.25	59.94
Hidrogen	%	adb	4.53	4.31
Nitrogen	%	adb	1.05	0.96
Oksigen	%	adb	26.34	30.25
Ash Fusion Temperature (Reducing)				
			<i>Blend A</i>	<i>Blend B</i>
<i>Deformation</i>			1120	1100
<i>Spherical</i>			1210	1110
<i>Hemisphere</i>			1230	1120
<i>Flow</i>			1260	1160
Ash Fusion Temperature (Oxidizing)				
<i>Deformation</i>			1180	1150
<i>Spherical</i>			1230	1170
<i>Hemisphere</i>			1260	1180
<i>Flow</i>			1280	1200
Kadar Abu				
SiO ₂			56.875	39.220
Al ₂ O ₃			14.435	11.015
Fe ₂ O ₃			6.200	12.870
CaO			6.495	19.225
MgO			2.330	6.440
TiO ₂			0.465	0.525
Na ₂ O			3.825	2.255
K ₂ O			0.790	0.850
Mn ₃ O ₄			0.062	0.130
P ₂ O ₅			0.219	0.207
SO ₃			8.065	7.050

Setelah dilakukan analisis karakteristik laboratorium, selanjutnya adalah uji pembakaran pada peralatan *Drop Tube Furnace (DTF)* yang

¹¹ Babcock and Wilcox, *Steam Its Generation and Use*.

¹² Babcock and Wilcox.

dioperasikan pada suhu 1175°C dengan oksigen berlebih sebanyak 5%. Pada saat uji pembakaran, diambil sampel dengan *panel probe* yang dimasukkan ke tungku pada area bersuhu 550°C dan 600°C selama 1 jam. Hasil abu yang menempel di *probe* kemudian diobservasi, diambil abunya, dan dibandingkan dengan tabel klasifikasi abu dari jon indeks ¹³.



Gambar 1. Alat Uji Bakar Batubara *Drop Tube Furnace* (DTF)

Setelah itu, abu yang diambil dari probe kemudian diamati lebih dalam dengan scanning electron microscope (SEM) JEOL JSM 6510-LA dilengkapi MOXTEL 550i thin film coated IXRF dispersive energy spectrometer dan dianalisis dengan x-ray diffraction (XRD) menggunakan Emyprean type bragg-brentano diffractometer dari Panalytical. Selanjutnya dari perhitungan prediksi, observasi probe, analisis SEM morfologi dan EDS, dan analisis XRD diambil kesimpulan mengenai kelayakan batubara tersebut.

III. HASIL

Dari hasil uji laboratorium yang ditunjukkan pada Tabel 1 didapatkan rasio-rasio prediksi *slagging fouling* yang dibandingkan dengan kriteria risiko dari berbagai referensi.

Tabel 2. Prediksi *Slagging* dan *Fouling* Berdasarkan Analisis Abu

Parameter	Blend A	Blend B	Referensi
Rasio B/A	0,27	0,82	B&W ¹⁴
Rasio Silika	79.1	50.44	Raask ¹⁵

¹³ E C Winegartner and Research Committee on Corrosion and Deposits from Combustion ASME, *Coal Fouling and Slagging Parameters* ([New York]: ASME, 1974).

¹⁴ Babcock and Wilcox, *Steam Its Generation and Use*.

¹⁵ Raask, *Mineral Impurities in Coal Combustion: Behavior, Problems, and Remedial Measures*.

Kresna Social Science and Humanities Research

Proceedings of the National Seminar on Research and Community
Service Dissemination for Sustainable Development
<https://doi.org/10.30874/ksshr.52>

Indeks <i>Slagging</i>	0,15	0,33	B&W ¹⁶
Fusibilitas	1148	1116	B&W ¹⁷
Besi/Kalsium	0.95	0.67	Bryers ¹⁸
Besi	6.20	12.87	Raask ¹⁹
Besi + Kalsium	12.70	32.10	Plaza ²⁰
Indeks <i>Fouling</i>	1.26	2.55	B&W ²¹
Na ₂ O pada abu	3.83	2.25	B&W ²²
Ratio Alkali	0.27	0.12	Raask ²³

Kriteria Risiko

 Rendah  Sedang  Tinggi

Selanjutnya, dilakukan pengamatan pada probe yang telah diuji bakar pada DTF. Pada gambar di bawah, probe paling kiri adalah probe yang baru keluar dari tungku DTF, sedangkan yang tengah adalah dalam proses pengambilan material yang menempel pada probe, dan untuk paling kanan adalah probe yang sudah diambil materialnya tampak tertinggal material yang menempel dengan kuat sehingga tidak bisa diambil.

¹⁶ Babcock and Wilcox, *Steam Its Generation and Use*.

¹⁷ Babcock and Wilcox.

¹⁸ R Bryer, "Fireside Slagging, Fouling, and High Temperature Corosion of Heat Transfer Surface Due to Impurities in Steam Raising Fuel," *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 29-120.

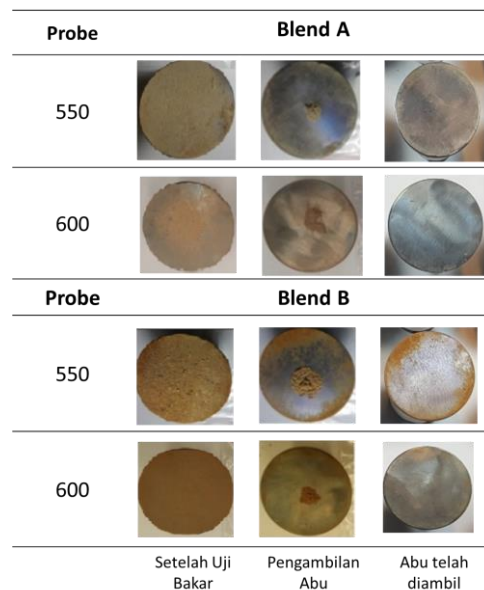
¹⁹ Raask, *Mineral Impurities in Coal Combustion: Behavior, Problems, and Remedial Measures*.

²⁰ Piotr Plaza et al., "Predicting Slagging/Fouling Propensities of Solid Fuels with the Aid of Experimental and Modelling Techniques," October 2010.

²¹ Babcock and Wilcox, *Steam Its Generation and Use*.

²² Babcock and Wilcox.

²³ Raask, *Mineral Impurities in Coal Combustion: Behavior, Problems, and Remedial Measures*.



Gambar 2. Probe Uji *Slagging Fouling*

Pada probe *Blend B* di probe suhu 550°C terlihat material abu lebih banyak, demikian pula pada saat dilakukan proses pengambilan debu yang menempel. Kejadian seperti ini diasumsikan untuk menggambarkan level risiko pada area ekonomizer sehingga tampak bahwa batubara *Blend B* lebih berisiko daripada *Blend A*.

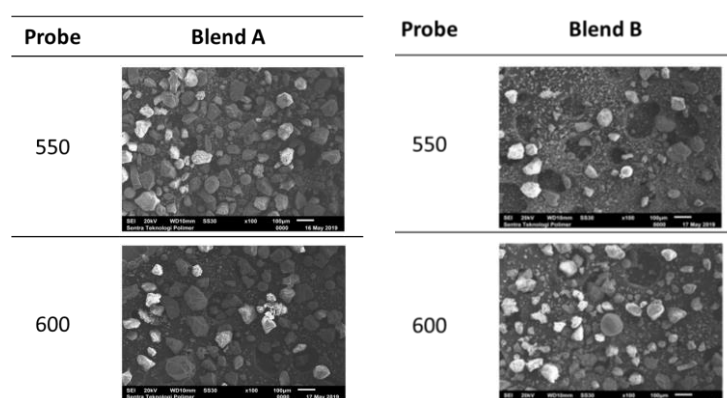
Hal yang serupa terjadi pada probe suhu 600°C, probe yang baru keluar dari DTF terdapat banyak sekali abu yang menempel pada permukaan probe. Proses pengambilan material debu yang tertinggal pada probe batubara *Blend B* lebih banyak dibandingkan dengan probe batubara *Blend A*. Hal ini juga menggambarkan level risiko pada area superheater pada PLTU superkritis.

Dari kedua probe ini ditunjukkan bahwa batubara *Blend B* lebih berisiko.

IV. MORFOLOGI/ELEMENT

Pengamatan terhadap hasil SEM ini berdasarkan literatur terdahulu²⁴. Diantara objek pengamatan adalah jenis abu, ukuran butir dan terdapatnya material yang melengket, serpihan dan bola-bola²⁵.

SEM MORFOLOGY



Gambar 3. Hasil SEM EDX Pembesaran 100x untuk Batubara *Blend A* dan *Blend B*

Dengan dasar pengamatan seperti diatas diperoleh bahwa *Blend A* (kalo gedhe gedhe kalo kecil kecil) lebih rendah risikonya dibandingkan dengan *Blend B*.

MINERAL / XRD

Dari hasil XRD dapat diketahui transformasi dari mineral saat perubahan temperatur selama proses pembakaran.

Blend A probe 550°C

²⁴ Roderick M Hatt, "Fireside Deposits in Coal-Fired Utility Boilers," *Progress in Energy and Combustion Science* 16, no. 4 (1990): 235–41, [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(90\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0360-1285(90)90032-X); Karin Laursen, Flemming Frandsen, and Ole Hede Larsen, "Ash Deposition Trials at Three Power Stations in Denmark," *Energy & Fuels* 12, no. 2 (March 1998): 429–42, <https://doi.org/10.1021/ef970106o>; Jianbo Li et al., "Characterisation of Ash Deposits on a Probe at Different Temperatures during Combustion of a Zhundong Lignite in a Drop Tube Furnace," *Fuel Processing Technology* 144 (2016): 155–63, <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.024>; Xuebin Wang et al., "The Ash Deposition Mechanism in Boilers Burning Zhundong Coal with High Contents of Sodium and Calcium: A Study from Ash Evaporating to Condensing," *Applied Thermal Engineering* 80 (2015): 150–59, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.051>.

²⁵ Raask, *Mineral Impurities in Coal Combustion: Behavior, Problems, and Remedial Measures*.

Tabel 3. Hasil XRD *Blend A* probe 550°C

No.	Compound Name	Chemical Formula	[%]
1	Quartz	O2 Si1	72
2	Calcium Sulfate	Ca (S O4)	15
3	Silicon Oxide	Si O2	2
4	Chloride Sulfur Oxide	S O2 Cl2	11

Probe ini didominasi oleh material berbasis *Silicon oksida* (SiO₂) atau Quartz sebanyak 72% dan juga silicon Oksid 2% dimana unsur ini mempunyai sifat yang tidak berbahaya kontribusinya terhadap *slagging* dan *fouling* bahkan akan berpengaruh positif. Unsur ini akan stabil sampai temperatur sekitar 570°C, dimana kemudian akan bertransformasi menjadi *high quartz*. Pada temperatur 876°C bertransformasi menjadi *Tridimite* dan pada temperatur 1400°C akan bertransformasi menjadi *Cristobalite*. Unsur *quartz* akan stabil di temperatur 1530°C. Masalah timbul jika unsur lain yang lebih dahulu mencair dan mengikat SiO₂ kemudian terpanaskan terus menerus. Itulah kewaspadaan yang mungkin tapi fokusnya pada unsur lain²⁶.

Sedangkan unsur yang lain lagi adalah Kalsium sulfat (CaSO₄) sebanyak 15%. CaSO₄ yang mungkin terjadi adalah reaksi antara CaO dan SO₂ atau memang adanya bentuk unsur CaSO₄. Proses reaksi terjadi di temperatur antara 800-1000°C ini dalam fase gas. Pada temperatur 1000-1200°C keatas SO₄ lepas dan bisa bereaksi dengan unsur lain seperti Si atau Al membentuk Ca₂AlSiO₇²⁷. Terdapat pula material pada fasa *Chloride Sulfur Oxide* (SO₂Cl₂) sebesar 11%, melihart komposisi penyusunnya mineral ini termasuk berbahaya untuk masalah *slagging fouling*.

Blend A probe 600°C

²⁶ A P Reifenstein et al., "Behaviour of Selected Minerals in an Improved Ash Fusion Test: Quartz, Potassium Feldspar, Sodium Feldspar, Kaolinite, Illite, Calcite, Dolomite, Siderite, Pyrite and Apatite," *Fuel* 78, no. 12 (1999): 1449-61, [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00065-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00065-4); Bryer, "Fireside Slagging, Fouling, and High Temperature Corosion of Heat Transfer Surface Due to Impurities in Steam Raising Fuel."

²⁷ Xiaobin Qi et al., "Effect of Bed Materials on Slagging and Fouling during Zhundong Coal Gasification," *Energy Exploration & Exploitation* 35 (April 2017): 014459871770008, <https://doi.org/10.1177/0144598717700082>.

Tabel 4. Hasil XRD *Blend A* probe 600°C

No.	Compound Name	Chemical Formula	[%]
1	Quartz high	O2 Si1	85
2	Calcium Sulfate	Ca (S O4)	15

Kandungan yang terdapat pada probe *Blend A* 600°C ditunjukkan pada Tabel 4. Komposisi utama dari probe ini adalah Quartz High sebesar 85% dan Kalsium sulfat 15%. Kedua sifat mineral ini telah dijelaskan pada sub bab sebelumnya

***Blend B* probe 550°C**

Tabel 5. Hasil XRD *Blend B* probe 550°C

No.	Compound Name	Chemical Formula	[%]
1	Quartz	Si3.00 O6.00	95
2	Calcium Sulfate	Ca (S O4)	5

Pada probe ini mineral Quartz 95% dengan penjelasan sama dengan probe sebelumnya. Sehingga dapat kita ambil kesimpulan bahwa pada probe batubara *Blend B* memiliki risiko rendah.

***Blend B* probe 600°C**

Mineral yang terdapat pada *Blend B* probe 600°C yang ditunjukkan pada Tabel 6 kandungannya persis sama dengan mineral yang terdapat pada probe 550°C, hanya saja komposisinya yang berbeda. Walaupun probe ini lebih berisiko dari *Blend B* probe 550, tetapi masih dalam batas aman.

Tabel 6. Hasil XRD *Blend B* probe 600°C

No.	Compound Name	Chemical Formula	[%]
1	Quartz	O2 Si1	84
2	Calcium Sulfate	Ca (S O4)	16

V. SIMPULAN

Berdasarkan tahapan evaluasi yang telah dilakukan terhadap produk *Blending* batubara *Blend A* dan *Blend B* dapat disimpulkan bahwa kedua jenis *blending* tersebut dapat dilakukan untuk *combustion test* pada skala lebih besar.

Meskipun secara prediksi berdasarkan ratio adalah termasuk berisiko tinggi, tetapi secara test DTF dengan melakukan pengamatan probe masih

Kresna Social Science and Humanities Research

Proceedings of the National Seminar on Research and Community
Service Dissemination for Sustainable Development
<https://doi.org/10.30874/ksshr.52>

masuk kategori rendah sampai menengah. Demikian pula untuk pembangunan berdasarkan elemen (SEM) maupun Mineral (XRD) diperoleh risiko yang rendah.

Hal yang perlu dicatat yaitu berdasarkan prediksi *slagging*, batubara *Blend A* mempunyai risiko yang lebih rendah dibandingkan batubara *Blend B*. Begitupula hasil pembakaran pada DTF dan hasil analisa SEM, batubara *Blend A* juga mempunyai potensi risiko *slagging* lebih rendah dibandingkan batubara *Blend B*. Sedangkan untuk hasil analisa XRD, batubara A mempunyai risiko lebih tinggi untuk probe suhu 550°C namun demikian probe suhu 600°C mempunyai risiko yang relatif sama.

VI. DAFTAR PUSTAKA

Arinaldo, Deon, and Julius Christian Adiatma. "Dinamika Batubara Indonesia : Menuju Transisi Energi Yang Adil." Jakarta, 2019.

Babcock and Wilcox. *Steam Its Generation and Use*. 5th ed. USA: McDermott Company, 2005.

Bryer, R. "Fireside Slagging, Fouling, and High Temperature Corosion of Heat Transfer Surface Due to Impurities in Steam Raising Fuel." *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 29-120.

Hare, N, Mohammad Rasul, and Shadia Moazzem. "A Review on Boiler Deposition/Fouilage Prevention and Removal Techniques for Power Plant," January 2010.

Hatt, Roderick M. "Fireside Deposits in Coal-Fired Utility Boilers." *Progress in Energy and Combustion Science* 16, no. 4 (1990): 235-41. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1285\(90\)90032-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1285(90)90032-X).

Laursen, Karin, Flemming Frandsen, and Ole Hede Larsen. "Ash Deposition Trials at Three Power Stations in Denmark." *Energy & Fuels* 12, no. 2 (March 1998): 429-42. <https://doi.org/10.1021/ef970106o>.

Li, Gengda, Shuiqing Li, Qian Huang, and Qiang Yao. "Fine Particulate Formation and Ash Deposition during Pulverized Coal Combustion of High-Sodium Lignite in a down-Fired Furnace." *Fuel* 143 (2015): 430-37. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.11.067>.

Li, Jianbo, Mingming Zhu, Zhezi Zhang, Kai Zhang, Guoqing Shen, and

Kresna Social Science and Humanities Research

Proceedings of the National Seminar on Research and Community
Service Dissemination for Sustainable Development
<https://doi.org/10.30874/ksshr.52>

Dongke Zhang. "Characterisation of Ash Deposits on a Probe at Different Temperatures during Combustion of a Zhundong Lignite in a Drop Tube Furnace." *Fuel Processing Technology* 144 (2016): 155–63. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.12.024>.

Plaza, Piotr, W Ferens, Anthony Griffiths, Nick Syred, and W Rybak. "Predicting Slagging/Fouling Propensities of Solid Fuels with the Aid of Experimental and Modelling Techniques," October 2010.

Qi, Xiaobin, Guoliang Song, Weijian Song, and Shaobo Yang. "Effect of Bed Materials on Slagging and Fouling during Zhundong Coal Gasification." *Energy Exploration & Exploitation* 35 (April 2017): 014459871770008. <https://doi.org/10.1177/0144598717700082>.

Qiu, J.-R., F Li, Y Zheng, C.-G. Zheng, and H.-C. Zhou. "The Influences of Mineral Behaviour on Blended Coal Ash Fusion Characteristics." *Fuel* 78, no. 8 (1999): 963–69. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00005-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00005-8).

Raask, E. *Mineral Impurities in Coal Combustion: Behavior, Problems, and Remedial Measures*. United States: Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC, 1985.

Reifenstein, A P, H Kahraman, C D A Coin, N J Calos, G Miller, and P Uwins. "Behaviour of Selected Minerals in an Improved Ash Fusion Test: Quartz, Potassium Feldspar, Sodium Feldspar, Kaolinite, Illite, Calcite, Dolomite, Siderite, Pyrite and Apatite." *Fuel* 78, no. 12 (1999): 1449–61. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00065-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00065-4).

Vuthaluru, Hari B, and Dong-ke Zhang. "Effect of Coal Blending on Particle Agglomeration and Defluidisation during Spouted-Bed Combustion of Low-Rank Coals." *Fuel Processing Technology* 70, no. 1 (2001): 41–51. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00130-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00130-8).

Wang, Xuebin, Zhaoxia Xu, Bo Wei, Lan Zhang, Houzhang Tan, Tao Yang, Hrvoje Mikulčić, and Neven Duić. "The Ash Deposition Mechanism in Boilers Burning Zhundong Coal with High Contents of Sodium and Calcium: A Study from Ash Evaporating to Condensing." *Applied Thermal Engineering* 80 (2015): 150–59. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.0>

Kresna Social Science and Humanities Research

Proceedings of the National Seminar on Research and Community
Service Dissemination for Sustainable Development
<https://doi.org/10.30874/ksshr.52>

51.

Winegartner, E C, and Research Committee on Corrosion and Deposits from Combustion ASME. *Coal Fouling and Slagging Parameters*. [New York]: ASME, 1974.

Zaid, Mohammad Zahari Sukimi Mat, Mazlan Abdul Wahid, Musa Mailah, Mohammad Amri Mazlan, and Aminuddin Saat. "Coal Combustion Analysis Tool in Coal Fired Power Plant for Slagging and Fouling Guidelines." *AIP Conference Proceedings* 2062, no. January (2019). <https://doi.org/10.1063/1.5086575>.

— — —. "Coal Fired Power Plant: A Review on Coal Blending and Emission Issues." *AIP Conference Proceedings* 2062, no. 1 (January 2019): 20022. <https://doi.org/10.1063/1.5086569>.