

KARAKTERISTIK ABU BATUBARA TERHADAP INDEKS POTENSI PEMBENTUKAN *SLAG (SLAGGING)* PADA *BOILER* PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP

Jarot Wiratama^{1*}, Elisma², Yosa Megasukma¹ dan Aditya Denny Prabawa¹

¹ Teknik Pertambangan, Universitas Jambi, Jambi

² Farmasi, Universitas Jambi, Jambi

Corresponding author: jarot.mining@unja.ac.id

ABSTRAK: Pada pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), kualitas batubara yang berhubungan dengan karakteristik abu sangat diperhatikan. Karakteristik abu batubara yang tidak memenuhi kriteria dalam pembakaran menjadi permasalahan tersendiri pada sistem *boiler* PLTU karena dapat mengakibatkan pelelehan dan pengendapan pada tungku pembakaran, dimana pengendapan ini akan membentuk *slagging*. Pembentukan *slagging* akan mempengaruhi perpindahan panas serta penurunan efisiensi *boiler* sehingga implikasinya berpengaruh terhadap konsumsi jumlah bahan bakar yang digunakan. Indeks potensi pembentukan *slagging* dapat diketahui dengan integrasi hasil analisis *proximate*, *analisis ultimate*, *gas chromatography-mass spectrophotometer*). Metode yang dilakukan adalah menganalisa sampel batubara berdasarkan analisis *proximate* (kadar air, zat terbang, kadar abu, nilai kalori), analisis sulfur, analisis komposisi abu menggunakan *gas chromatography-mass spectrophotometer* (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO_2). Berdasarkan analisis komposisi abu, tipe abu termasuk tipe bituminus. Indeks *slagging* rasio asam basa dari ketiga sampel yang berasal dari Kabupaten Muaro Jambi, Jambi dapat disimpulkan sampel BA-1 memiliki indeks *slagging* (R_s)0,60. Sampel BA-2 memiliki indeks *slagging* (R_s)0,62. Sampel BA-3 memiliki indeks *slagging* (R_s)0,51. Dari nilai indeks *slagging* rasio asam basa, sampel batubara BA-1, BA-2, BA-3 memiliki potensi pembentukan *slagging* yang tergolong sedang, sehingga dapat berpotensi mengakibatkan penurunan perpindahan panas dan penurunan efisiensi *boiler*. Diharapkan, dengan adanya informasi indeks *slagging* ini dapat digunakan sebagai dasar bagi kedua belah pihak, yakni pihak perusahaan untuk senantiasa terus mengusahakan rekayasa kualitas batubara, salah satunya *blending* dan pihak PLTU secara reguler melakukan tindakan *scootblow* pada dinding sebelum pengendapan *slagging* menjadi sangat tebal dan berdampak pada penurunan efisiensi *boiler*.

Kata Kunci: Indeks *Slagging*, *Boiler*, rasio asam basa

ABSTRACT: At steam power plant (PLTU) utility, coal quality correlated with the characteristics of ash is very considered. The characteristics of coal ash which does not meet the criteria in combustion becomes problem in PLTU boiler because it can result melting and deposition in the furnace, where this deposition will form *slagging*. *Slagging* formation will affect heat transfer and decreasing boiler efficiency, so that the implications affect the consumption of the amount of fuel used. Potential index of *slagging* formation can be determined by the integration of *proximate analysis*, *ultimate analysis*, *gas chromatography –mass spectrophotometer*). The method used is analyzing coal samples based on *proximate analysis* (moisture content, ash content, volatile matter, calorie value, sulfur analysis, ash composition analysis using *gas chromatography- mass spectrophotometer* (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , TiO_2 , MnO_2)). Based on ash composition analysis, the type of ash classified bituminous type. *Slagging Index* using based acid ratio of three samples originating from Muaro Jambi District, Jambi, it can be concluded that BA-1 (R_s) 0,6, BA-2 (R_s) 0,62 and BA-3 (R_s) 0,51. Based on *slagging* index, coal samples BA-1, BA-2, BA-3 have the potential for *slagging* formation so that it can potentially result in decreasing heat transfer and boiler efficiency. Hopefully, with this *slagging* index formation can be used as basis for both parties, namely the company to always develop coal quality engineering, one of which is *blending* and Power plant regularly carries out *scootblow* on the wall before *slagging* deposition becomes very thick and has an impact on reduction in boiler efficiency.

Keyword : *Slagging Index*, *Boiler*, Base acid ratio

PENDAHULUAN

Pada perusahaan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), kualitas batubara yang akan digunakan menjadi parameter yang sangat diperhatikan. Pada proses pembakaran batubara di PLTU akan menghasilkan sejumlah abu sisa pembakaran yang cukup menjadi perhatian dalam penanganan abu. Karakteristik abu, terkait kadar abu dalam batubara akan mempengaruhi nilai kalor, yang apabila kadar abu tinggi maka nilai kalor akan turun dan sebaliknya kadar abu rendah nilai kalor akan tinggi. Abu dari pembakaran pada PLTU akan menghasilkan dua produk yaitu *bottom ash* (abu bawah) yang akan turun ke bagian bawah *boiler* PLTU dan *fly ash* (abu terbang) yang ke bagian atas *boiler* melalui cerobong asap. Selain kadar abu, komposisi abu itu sendiri yang merupakan produk dari sisa hasil pembakaran di PLTU juga sangat beragam, baik dari unsur penyusunnya dan juga kadarnya. Komposisi abu ini sangat tergantung pada peringkat serta kualitas batubaranya. Selain, berpengaruh pada nilai kalor, komposisi abu batubara dapat menyebabkan fenomena *slagging* pada pembakaran di PLTU. *Slagging* adalah pembentukan dari leburan atau endapan yang sebagian melebur pada dinding *furnace* atau permukaan konveksi yang bersentuhan langsung dengan panas. Dengan kata lain *slagging* adalah penempelan *ash* pada daerah radiasi (Huang, 1996). Proses *Slagging* terjadi pada bagian terdingin dari suatu *boiler*. Pada permukaan tersebut, *inorganic volatile* kondensat akan menempel dan membentuk deposit. Seiring berjalannya waktu, pengendapan ini akan semakin tebal.

Permasalahan utama pada *boiler* yang diakibatkan oleh pembentukan deposit yang semakin menebal pada permukaan media perpindahan panas adalah penurunan panas bahkan pengisolasian perpindahan panas dari *flue gas* menuju *steam* di dalam *heat exchange tube*. Keberadaan deposit *slagging* pada permukaan perpindahan panas akan menurunkan kapasitas penyerapan panas. Penurunan kapasitas penyerapan panas diindikasikan dengan naiknya *temperature flue gas*, sehingga akan menyebabkan penurunan produksi *steam* dan efisiensi *boiler*, sehingga implikasinya berpengaruh terhadap konsumsi jumlah bahan bakar yang digunakan. Selain itu, akibat proses *slagging* yang menempel pada dinding dan pipa *boiler* akan menyebabkan *boiler* dan pipa mengalami korosi, sehingga dapat memperpendek usia dinding dan pipa *boiler* (Seggiani dan Pannochia, 2003).

Berdasarkan penjelasan di atas maka perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengestimasi indeks potensi pembentukan *slag* (*slagging*) pada sampel batubara yang berasal dari Kabupaten Batanghari, Jambi

yang akan digunakan sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Dalam mencapai tujuan tersebut harus dilakukan analisis proximate, sulfur, *gas chromatography-mass spectrophotometer*. Diharapkan, dengan adanya informasi indeks *slagging* ini dapat digunakan sebagai dasar bagi kedua belah pihak, yakni pihak perusahaan untuk senantiasa terus mengusahakan rekayasa kualitas batubara sesuai dengan pemanfaatan konsumen, salah satunya *blending* dan disisi lain pihak PLTU harus memonitoring kualitas batubara yang ingin digunakan serta melakukan tindakan *scootblow secara reguler* pada dinding *boiler* sebelum pengendapan *slagging* menjadi sangat tebal dan berdampak pada penurunan efisiensi *boiler*.

METODE PENELITIAN

Kegiatan penelitian dilakukan secara bertahap. Tahapan yang dilakukan adalah studi literatur, pra – pengambilan sampel, pengambilan sampel, preparasi sampel, analisis sampel, pengolahan dan interpretasi data. Secara umum penelitian dilaksanakan di dua lokasi yaitu lokasi pengambilan sampel batubara dimana batubara tersebut akan digunakan oleh PLTU, yaitu perusahaan Batubara di Kabupaten Batanghari dan laboratorium untuk menganalisis parameter yang digunakan dalam penentuan indeks *slagging*. Laboratorium yang menjadi mitra pada kegiatan penelitian ini adalah Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara (tekMIRA), Bandung.

Pengambilan sampel batubara memperhatikan aspek-aspek genetik endapan batubara, maka dari itu sampel batubara diambil langsung pada endapan batubara (*insitu*), sampel yang diambil sebanyak 3 titik (BA-1, BA-2, BA-3). Pengambilan sampel didasari oleh kemenerusan batubara dan *liotype*, sehingga dapat mewakili karakter endapan batubara. Pengambilan sampel juga memperhatikan aspek variasi dan kenampakan makroskopis batubara, khususnya terkait dengan unsur – unsur *impurities* yang ada pada lapisan batubara. Setelah pengambilan sampel, dilakukanlah preparasi sesuai dengan analisis yang dilakukan. Pada analisis *ultimate*, sampel batubara yang telah dipreparasi melalui tahapan *grinding* dan *sieving*, dilakukan pemanasan untuk mendapatkan kadar *inherent moisture*, *ash content*, *volatil matter*. Standar yang digunakan (ASTM D 3173 2009) untuk penetapan kadar *moisture* (ASTM D 3174 2009) untuk *ash content* dan standar (ASTM D 3172 2009) untuk *volatil matter*. Khusus untuk kadar *fixed carbon* dilakukan perhitungan tersendiri yang didapat dari integrasi *data moisture*, *ash content*, dan *volatil matter* tersebut.

$$FC = 100\% - (M + VM + AC) \quad (1)$$

Keterangan :

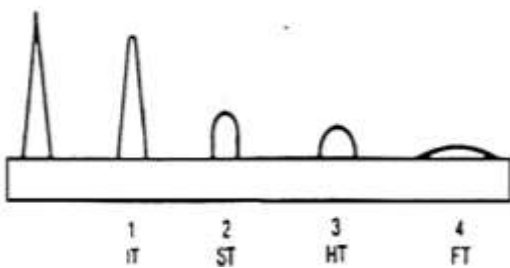
- FC = Fixed carbon (%)
- M = Moisture content (%)
- AC = Ash content (%)
- VM = Volatil Matter (%)

Analisis Sulfur / Belerang menggunakan Metode IR (*Infrared*) yaitu dengan cara membakar batubara di dalam *combustion tube furner* dengan temperatur 135° C dalam kondisi dialirkan oleh oksigen. Gas belerang oksida yang terbentuk diabsorpsi oleh *infrared* dan kadar sulfur akan ditampilkan dalam layar monitor (ASTM 4239 2010). Penetapan nilai kalor dilakukan dengan cara membakar batubara di dalam bom kalorimeter pada kondisi standar. Panas yang dihasilkan dihitung dengan kenaikan temperatur setelah pembakaran, dikurangi oleh beberapa nilai koreksi (ASTM D 5865 2010).

Untuk pengujian komposisi abu batubara digunakan peralatan *Gas Cromatography-Mass Spectrophotometer* (GCMS). Dari pengujian ini akan didapat kadar tiap tiap penyusun abu batubara, yang terdiri dari unsur ; SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂, MnO₂.

Ash Fusion Temperature

Pengujian suhu titik leleh abu batubara ini dilakukan dengan melelehkan abu pada rentang suhu 900°C - 1600°C. Abu di cetak dalam bentuk *cone* sehingga dapat diamati deformasi abu batubara tiap kenaikan 20°C. Deformasi abu batubara terdiri dari empat perubahannya itu *initial deformation* (ID), *sphere* (ST), *hemisphere* (HS), dan *flow* (FT) (Seggiani, 1999).



Gambar 1. Deformasi abu pengujian AFT

Klasifikasi Ash

Dikarenakan karakteristik dari *ash bituminous* dan lignit bervariasi secara signifikan, langkah pertama dalam menghitung indikasi *slagging* adalah menentukan jenis *ash*. Ash diklasifikasikan sebagai *bituminous* jika :

$$Fe_2O_3 > CaO + MgO \quad (2)$$

Sedangkan *ash* diklasifikasikan sebagai lignit jika :

$$Fe_2O_3 < CaO + MgO \quad (3)$$

Indeks Slagging

Ash Bituminous

Perhitungan *slagging* indeks (R_s) untuk karakteristik tipe *ash bituminous* dibawa ke perhitungan base untuk rasio asam dan persen berat pada *dry* basis dari sulfur dalam batubara (Pintana, 2014). Kandungan sulfur mengindikasikan jumlah besi yang muncul dalam bentuk *pyrite*. Perhitungannya sebagai berikut :

$$R_s = \frac{B}{A} \times S \quad (4)$$

Keterangan :

B = CaO + MgO + Fe₂O₃ + Na₂O + KO₂ =senyawa asam, %.

A = SiO₂ + Al₂O₃ + TiO₂ = senyawa basa, %.

S = % berat sulfur pada *dry* basis batu bara.

Klasifikasi potensi *slagging* (Pronobis, 2005) dengan menggunakan R_s adalah :

- R_s < 0.6 = Rendah
- 0.6 < R_s < 2.0 = Sedang
- 2.0 < R_s < 2.6 = Tinggi
- 2.6 < R_s = Tinggi sekali

Ash Lignit

Indeks *slagging* untuk karakteristik tipe *ash batubara lignit* berdasarkan temperatur pembentukan Ash ASTM, seperti dijelaskan sebelumnya bahwa temperatur fusibilitas mengindikasikan *range* dimana temperatur saat *plastis slag* mulai muncul. Indeks ini adalah rata-rata dari temperatur *Hemispherical Maximum* (HT) dan temperatur minimum awal pembentukan (IT) :

$$R_s^* = \frac{(\text{Max HT}) + 4(\text{Min IT})}{5} \quad (5)$$

Keterangan :

Max HT = Temperatur maksimum dari reduksi atau oksidasi *Hemispherical Softening*.

Min IT = Temperatur pembentukan (*Initial Deformation*) awal dari reduksi atau oksidasi yang terendah.

Klasifikasi potensi *slagging* dengan R_s(Pronobis, 2005)

- 2,450 < R_s* = Rendah
- 2,250 < R_s* < 2,450 = Sedang
- 2,100 < R_s* < 2,250 = Tinggi
- R_s* < 2,100 =Tinggi Sekali

Tabel 1. Standar Indeks *Slagging* dan *Fouling*

Faktor	Low	Medium	High	Very High
Base acid ratio (R)	< 0,5		> 0,5	
Bituminus				
<i>Slagging factor (Rs)</i>	< 0,6	0,6 – 2,0	2,0 – 2,6	> 2,6
<i>Fouling factor (Rf)</i>	< 0,2	0,2 – 0,5	0,5 – 1,0	>1,0
Lignit				
<i>Slagging factor (Rs)</i>	> 1340	1230 - 1340	1150 - 1230	<1150
<i>Fouling factor (Rf)</i>	<1,2	1,2 – 3,0	3,0 – 6,0	>6,0

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil analisis kualitas sampel batubara dengan melakukan pengujian analisis *proximate*, sulfur, penentuan nilai kalor, *gas chromatography –mass spectrophotometer* didapatkan kualitas batubara BA-1, BA-2, dan BA- 3 yang dapat dilihat pada Tabel 2. Kualitas batubara pada sampel BA -1, BA-2, dan BA-3 memiliki variasi perbedaan pada parameter *inherent moisture*, *ash content*,*volatil matter*, dan *calorie value* tetapi sangat tidak signifikan.

Tabel 2. Analisa *Proximate* Sampel BA-1, BA-2, dan BA -3.

No	Parameter	Sampel BA-1	Sampel BA-2	Sampel BA -3
1.	<i>Inherent Moisture</i> adb (%)	13,68	13,75	14,10
2.	<i>Ash Content</i> adb (%)	3,40	3,80	4,20
3.	<i>Volatil Matter</i> adb %	41,10	40,70	39,22
4.	<i>Fix Carbon</i> adb %	41,82	41,75	42,48
5.	<i>Calorific Value</i> (kcal/kg) %	4273,5	4394,5	4510,2

Karakteristik *ash* yang menjadi parameter adalah kadar dan komposisi *ash* itu sendiri. Kadar *ash* yang memenuhi kriteria ideal sebagai bahan bakar *boiler* yaitu 3 – 8 %. Pada tabel 2, sampel BA-1 , BA-2, dan BA-3 telah memenuhi kriteria tetapi tetap perlu dilakukan pengujian komposisi penyusun abu batubara untuk

mengetahui indeks deposisi *slagging* yang dapat mempengaruhi efisiensi dari *boiler*.

Selain karakteristik *ash*, Pada pemanfaatan batubara khususnya pembangkit listrik tenaga uap. Parameter yang juga menjadi pertimbangan adalah kadar *moisture*, dikarenakan kadar *moisture* yang tinggi akan dapat menurunkan suhu nyala batubara. Pada umumnya standar maksimum kadar *moisture* batubara yang digunakan pembangkit listrik tenaga uap di Indonesia diatas 15 %. Tetapi pada sebagian PLTU tetap menggunakan batubara yang kadar *moisture* diatas 15 %. Pengurangan kadar *moisture* dilakukan dengan memasang temperatur yang lebih tinggi pada *air heater* , walaupun PLTU harus menambah energi dibandingkan batubara yang sesuai dengan spesifikasi. Pada tabel 2. Terlihat bahwa *range moisture* batubara memiliki nilai dari (13,68 %- 14,10). Batubara pada sampel BA-1, BA-2, dan BA-3 masih memenuhi persyaratan sebagai bahan bakar PLTU.

Kandungan Sulfur

Kriteria sulfur memenuhi syarat untuk pemanfaatan batubara sebagai bahan bakar dimana kadar sulfur pada sampel BA-1. BA-2, dan BA-3 memiliki *range* dari 0,14-0,16 (Tabel 3). Dimana kadar sulfur yang tidak diperkenankan pada PLTU adalah 0,9 %. Keterkaitan antara potensi terbentuknya *slagging* sangat erat dengan nilai sulfur. Semakin tinggi nilai sulfur batubara maka terbentuknya *slagging* pada *boiler* juga semakin tinggi (Chen, 2010). Selain pemicu dari pengendapan *slag*, sulfur juga berpengaruh terhadap laju korosi yang ditimbulkan.

Tabel 3. Kandungan Sulfur Sampel BA-1,BA-2, dan BA-3.

No	Kode sampel	Kadar sulfur, %
1.	BA-1	0,14
2.	BA-2	0,16
3.	BA-3	0,14

Klasifikasi Tipe *Ash*

Pada penentuan indeks *slagging*, karakteristik dapat diestimasi berdasarkan suhu lebur abu (*ash fusion temperature*) dan komposisi *ash* batubara itu sendiri. Temperatur titik lebur abu yang rendah akan meningkatkan potensi terjadinya *slagging*. Sebelum dilakukan penentuan indeks *slagging*, dilakukan pula pengujian komposisi abu batubara yang akan digunakan untuk mengklasifikasikan tipe dari *ash*. Pengklasifikasian tipe ash didasari oleh rasio unsur –

unsur yang bersifat asam (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O) terhadap unsur unsur yang bersifat basa (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2). Apabila rasio antara kedua unsur ini meningkat maka potensi *slagging* pun juga akan meningkat. Pada pembentukan *slagging*, yang berpengaruh adalah CaO yang merupakan unsur – unsur yang mudah menempel di dinding pengantar panas boiler, dan Na_2O merupakan unsur yang menentukan ikatan ash yang menempel. Pengujian komposisi abu menggunakan *gas chromatography – mass spectrophotometer* dapat dilihat pada Tabel 4 dan klasifikasi ash pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengujian Komposisi abu

No	Komposisi Penyusun	Sampel BA -1	Sampel BA-2	Sampel BA-2
1.	SiO_2 (%db)	7,22	9,23	7,88
2.	Al_2O_3 (%db)	8,50	8,89	10,31
3.	Fe_2O_3 (%db)	39,58	41,60	39,20
4.	CaO (%db)	27,88	25,60	27,69
5.	MgO (%db)	6,54	5,50	4,32
6.	TiO_2 (%db)	2,50	1,85	2,23
7.	Na_2O (%db)	3,82	4,80	3,25
8.	K_2O (%db)	0,27	0,53	0,81
9.	Mn_3O_4 (%db)	0,05	0,10	0,12
10.	P_2O_5 (%db)	0,32	1,08	0,20
11	SO_3 (%db)	4,20	3,39	4,80

Tabel 5. Klasifikasi Tipe Abu

Kode Sampel	Fe_2O_3 (%db)	CaO (%db)	MgO (%db)	CaO (%db)+ MgO (%db)	Klasifikasi Tipe Ash
BA-1	39,58	27,88	6,54	34,42	ash bituminus
BA-2	41,60	25,60	5,50	31,01	ash bituminus
BA-3	39,20	27,69	4,32	32,01	ash bituminus

Berdasarkan analisis kandungan abu yang didasari oleh rasio Fe_2O_3 terhadap $CaO + MgO$. Tipe abu batubara pada sampel BA-1, BA-2, BA-3 adalah tipe ash bituminus. Perhitungan indeks *slagging* pada abu batubara yang bertipe bituminus dapat menggunakan rasio asam basa.

Indeks *Slagging*

Penentuan Indeks pembentukan slag (*slagging*) pada karakteristik abu batubara bertipe bituminus menggunakan rasio asam basa. Indeks *slagging* yang didapat dari rasio asam basa untuk sampel batubara BA-1, BA-2, dan BA-3 memiliki range dari (R_s) (0,51 – 0,60). Pada sampel BA-1 (R_s) 0,60, sampel BA-2 (R_s) (0,62), dan sampel BA- 3(R_s) (0,51). Nilai rasio asam basa (R_s) 0,5 – 0,7 diklasifikasikan sedang untuk potensi pembentukan slag (*slagging*). Potensi terjadinya *slagging* akan semakin tinggi apabila rasio asam basa semakin tinggi. Pada rasio asam basa, senyawa yang memiliki peranan penting adalah CaO karena CaO merupakan unsur yang paling mudah menempel di dinding penghantar panas boiler. Karena batubara memiliki potensi pengendapan slag walaupun tidak tinggi, maka penggunaan batubara dapat mempengaruhi efisiensi. Maka dari itu penting bagi perusahaan untuk senantiasa melakukan rekayasa kualitas batubara berdasarkan pemanfaatan dan pihak BLTU melakukan tindakan *scootblow* secara reguler pada dinding sebelum pengendapan *slagging* menjadi semakin tebal. Indeks *slagging* rasio asam basa dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil perhitungan Indeks *Slagging*

Nomor Sampel	<i>Slagging factor</i> (R_s)	Klasifikasi
BA- 1	0,60	Sedang
BA-2	0,62	Sedang
BA-3	0,51	Sedang

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis komposisi abu menggunakan Gas *Cromatography - mass spectrophotometer* tipe abu batubara termasuk tipe bituminus. Dari hasil analisis dan pengolahan data indeks *slagging* menggunakan rasio asam basa, dapat disimpulkan bahwa sampel BA-1 memiliki indeks *slagging* (R_s) 0,60, sampel BA-2 memiliki indeks *slagging* (R_s)0,62, dan sampel BA-3 memiliki indeks *slagging* (R_s) 0,51. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa sampel BA-1, sampel BA-2, dan sampel BA-3 diklasifikasikan sebagai sampel batububara dengan tingkat potensi pembentukan slag (*slagging*) sedang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Universitas Jambi yang telah memberikan hibah penelitian PNBB melalui Fakultas Sains dan Teknologi 2019.

DAFTAR PUSTAKA

Huang LY, Norman JS, Purkashanlana M, Williams A (1996) Prediction of ash deposition on superheater tubes from pulverized coal combustion. *75* : 271 -9.

Seggiani M, Pannocchia G (2003) Prediction of coal ash thermal properties using partial least – squares regression. *Ind Eng Chem Res* 42:4919 – 4926.

Seggiani M (1999) Empirical Correlations of the ash temperatures and temperature of critical viscosity for coal and biomass ashes. *78* : 1121-5.

Chen W, Xu R (2010) Clean Coal Technology Development in China. *Energy Policy*. 38 : 2125 -2126.

Pintana P, Tippayawong N (2014) Characterization of slag from combustion of pulverized lignite with high calcium content in utility boilers. *Energy Exploration and Exploitation*. 32 : 471-482.

Pronobis M (2005) Evaluation of the influence of biomass co – combustion on boiler furnace slagging by means of fussability correlations. *Biomass Bioenergy*. 28 : 375 – 83.