

PREDIKSI AWAL KOMPOSISI BLENDING BATUBARA DAN EFB UNTUK MEMINIMALISASI POTENSI SLAGGING FOULING PADA CO- FIRING PLTU DENGAN PC-BOILER

Hariana¹, Hanafi Prida Putra¹, Fairuz Milkiy Kuswa¹

¹ Balai Teknologi Bahan Bakar dan Rekayasa Disain, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi
Gedung 480 Kawasan Puspiptek, Setu – Tangerang Selatan 15314
Email: hariana@bppt.go.id

Abstrak

Pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batubara dapat menerapkan teknik co-firing biomassa untuk mendukung kebijakan energi nasional yang menargetkan bauran energi dari sektor EBT sebanyak 23% pada tahun 2025. Salah satu biomassa yang dapat dimanfaatkan untuk co-firing biomassa adalah tandan kosong (empty fruit bunch, EFB) yang potensinya sangat besar di Indonesia. Akan tetapi, tingginya kandungan alkali pada EFB membuat kecenderungan slagging dan fouling tinggi yang dapat mempengaruhi kinerja dan efisiensi pembangkit. Diperlukan seleksi awal untuk mengetahui kelayakan dan keamanan penggunaan bahan bakar blending untuk co-firing. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah dengan melakukan perhitungan prediksi potensi slagging dan fouling. Pada penelitian ini digunakan data sekunder dengan menggunakan data batubara yang berasal dari Kalimantan. Selanjutnya dilakukan perhitungan prediksi potensi slagging dan fouling untuk berbagai macam skenario blending batubara dan EFB. Dari perhitungan didapatkan skenario blending Batubara A dengan EFB sampai 15% dapat diprioritaskan sementara blending Batubara dengan EFB hanya sampai 5% yang dapat diprioritaskan. Sementara skenario blending lain yang berbasis Batubara A didapatkan 15 dari 18 skenario yang dapat diprioritaskan sementara blending berbasis Batubara B didapatkan 4 dari 18 skenario yang dapat diprioritaskan.

Kata kunci: *batubara; co-firing; empty fruit bunch; slagging; fouling*

Pendahuluan

Saat ini pembangkit listrik di Indonesia sebanyak lebih dari 60% didominasi oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dengan bahan bakar batubara (Arinaldo & Adiatma, 2019). Sementara itu, adanya tuntutan dari kebijakan energi nasional yang menargetkan bauran energi dari sektor energi baru terbarukan (EBT) sebanyak 23% di tahun 2025 membuat porsi pembangkit EBT harus ditambah (Perpres, 2017). Untuk mencapai target tersebut, pembangkit dapat menerapkan teknik pembakaran langsung maupun *co-firing* biomassa pada PLTU batubara (EBTKE, 2020). *Co-firing* biomassa merupakan pilihan yang relatif lebih murah dan tidak memerlukan investasi pembangkit listrik baru. Hal ini ditunjang oleh ketersediaan biomassa di Indonesia yang sangat besar terutama biomassa berbasis sawit, salah satunya adalah tandan kosong kelapa sawit (*empty fruit bunch*, EFB) yang belum dimanfaatkan secara bahan bakar. Saat ini luasan lahan sawit di Indonesia diperkirakan sebesar 12,76 juta hektar (Badan Pusat Statistik, 2018). Potensi biomassa EFB kering yang dapat dihasilkan oleh lahan sawit tersebut diperkirakan 19,65 juta ton per tahun dari rumus perhitungan oleh GAPKI (2016). EFB memiliki nilai kalor sekitar 3637,67 kkal/kg (Lahijani & Zainal, 2011), sehingga potensi dari biomassa EFB setara dengan pembangkit listrik bisa mencapai sebesar 2447,95 MW. Di samping potensi energi yang besar, ada tantangan untuk pemanfaatan EFB berupa potensi *slagging* dan *fouling* karena kandungan potasiumnya yang tinggi.

Kecenderungan *slagging* dan *fouling* yang tinggi dapat mengganggu kinerja dan efisiensi pembangkit (Wall et al., 1993). *Slagging* dan *fouling* umumnya disebabkan oleh komposisi abu dari bahan bakar yang dipergunakan. Dengan *co-firing* biomassa EFB maka abu alkali terutama potasium (K_2O) akan menunjukkan angka yang tinggi dimana batasan yang dianggap aman untuk evaluasi kandungan indeks alkali adalah di bawah 0,3 (Winegartner & ASME, 1974). Kandungan potasium dalam abu EFB dapat meleleh dan bereaksi dengan elemen lain pada suhu 500-600°C (Bryer, 1996).

Beberapa penelitian sebelumnya mengenai *co-firing* biomassa dengan menggunakan *pulverized coal boiler* (PC boiler) menunjukkan terjadi penurunan signifikan emisi hasil pembakaran untuk CO_2 , NO_x , dan SO_2 , selain itu terdapat kelebihan lain berupa stabilitas pembakaran yang lebih tinggi serta biaya produksi energi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan pembakaran batubara murni (Duan et al., 2015; Sahu et al., 2014). Jeong et al., (2019)

melakukan *co-firing* batubara bituminous dari Australia dengan campuran EFB bervariasi menggunakan *drop tube furnace* untuk uji pembakaran, dari hasil penelitian ini didapatkan komposisi *blending* untuk EFB sebanyak maksimum 15% sebagai komposisi optimal karena menghasilkan kecenderungan deposit abu yang rendah. Dengan rangkaian uji bakar *drop tube furnace* dapat diketahui potensi *slagging* dan *fouling* dari bahan bakar *blending co-firing*. Karena karakteristik batubara berbeda pada setiap daerah, perlu dilakukan kajian bahan bakar *blending co-firing* batubara dari Indonesia dengan EFB. Namun, karena banyaknya skenario operasi *blending* yang bisa dilakukan perlu dilakukan *screening* awal untuk menyeleksi bahan bakar *blending* yang diprioritaskan untuk diuji bakar pada *Drop Tube Furnace (DTF)*. Pada penelitian ini dilakukan seleksi untuk memperoleh komposisi bahan bakar skenario *blending* batubara dari Kalimantan dan EFB yang diprioritaskan dan masuk kategori aman untuk meminimalisasi potensi *slagging* dan *fouling* pada bahan bakar *co-firing* yang diumpankan ke PLTU dengan menggunakan perhitungan prediksi *slagging* dan *fouling*.

Metode Penelitian

Bahan

Penelitian ini menggunakan data sekunder dengan data batubara diperoleh dari penelitian Hariana et al., (2020). Batubara yang digunakan berasal dari berbagai tambang di Kalimantan. Dari hasil penelitian tersebut Batubara A dan B dapat digunakan sebagai *single coal* untuk bahan bakar pembangkit sementara Batubara C, D, dan E direkomendasikan untuk *blending* dengan batubara lain. Pada Tabel 1 diperlihatkan data karakteristik batubara yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Karakteristik batubara berbagai tambang di Kalimantan (Hariana et al., 2020)

Parameter	Batubara Origin				
	A	B	C	D	E
Kandungan Sulfur	0,25	0,55	0,49	0,31	0,10
Kandungan Abu	4,98	6,54	6,34	6,22	3,08
Kadar Abu					
SiO ₂	63,94	46,25	49,54	44,86	35,53
Al ₂ O ₃	29,42	21,36	19,50	20,11	8,42
Fe ₂ O ₃	2,55	11,08	11,98	7,41	21,75
CaO	1,14	6,06	5,22	10,58	23,05
MgO	0,25	4,35	3,89	2,97	9,78
TiO ₂	1,82	0,82	0,65	0,66	0,34
Na ₂ O	0,07	1,42	0,52	4,63	0,07
K ₂ O	0,14	1,10	1,55	1,14	0,36
Mn ₃ O ₄	0,01	0,12	0,18	0,04	0,27
P ₂ O ₅	0,16	0,31	0,29	0,45	0,09
SO ₃	0,28	6,91	6,48	6,98	0,22

Sementara data EFB didapatkan dari beberapa penelitian sebelumnya.

Tabel 2. Karakteristik EFB untuk perhitungan prediksi *slagging* dan *fouling*

Parameter	Jeong, 2019	Lahijani, 2011	Nigduangde, 2016	Madiyanon, 2013	Konsombon, 2011	Rata-rata
Kandungan Sulfur	0,03	0,66	0,07	1,10	1,20	0,61
Kandungan Abu	2,77	4,50	2,90	5,50	4,60	4,05
Kadar Abu						
SiO ₂	39,30	27,00	26,21	12,12	12,12	23,35
Al ₂ O ₃	9,22	0,97	3,11	0,26	0,26	2,76
Fe ₂ O ₃	31,82	3,00	3,21	0,00	6,45	8,90
CaO	4,52	8,00	12,54	9,65	9,65	8,87
MgO	3,09	4,80	3,24	1,90	1,90	2,99
TiO ₂	0,45	0,08	0,00	0,00	0,81	0,27
Na ₂ O	0,00	0,55	0,36	0,09	0,09	0,22
K ₂ O	5,33	44,00	47,21	55,48	55,48	41,50
Mn ₃ O ₄	0,00	0,11	0,00	0,00	0,35	0,09
P ₂ O ₅	3,01	3,60	1,21	3,58	3,58	3,00
SO ₃	3,26	2,70	0,00	1,66	1,66	1,86
Tidak terdeteksi	0,00	5,19	2,91	15,26	7,65	6,20

Untuk perhitungan prediksi *slagging* dan *fouling* Batubara A dan B akan digunakan sebagai batubara utama yang masing-masing akan dicampur dengan EFB 5%, 10%, dan 15% perbandingan massa kering (adb). Selanjutnya Batubara A dan B dicampur dengan Batubara C, D, dan E masing-masing dengan perbandingan massa 50:50 dan 80:20 yang selanjutnya dicampur dengan EFB 5%, 10%, dan 15% perbandingan massa kering (adb).

Perhitungan Prediksi Slagging dan Fouling

Prediksi *slagging* dan *fouling* diperoleh dari perhitungan sederhana yang sering digunakan antara lain, Rasio basa asam (Babcock and Wilcox, 2005)

$$\frac{B}{A} = \frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \tag{1}$$

Indeks *slagging* (Babcock and Wilcox, 2005)

$$R_s = \frac{B}{A} \cdot S \tag{2}$$

Rasio silika (Raask, 1985)

$$Si_R = \frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO} \cdot 100 \tag{3}$$

Fusibilitas (Babcock and Wilcox, 2005)

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

Pada penelitian ini perhitungan fusibilitas menggunakan *softening temperature* (ST) dimana pada suhu ini mulai terjadi pelelehan sebagai prediksi awal, perhitungan *softening temperature* menggunakan metode dari Yin (1998).

Indeks *fouling* (Babcock and Wilcox, 2005)

$$R_f = \frac{B}{A} \cdot (Na_2O) \tag{5}$$

Indeks alkali (Winegartner & ASME, 1974)

$$Total\ alk. = \frac{(Na_2O + 0.6589 K_2O) \times \% ash}{100} \tag{6}$$

Dari perhitungan kemudian dibandingkan dengan kriteria resiko masing-masing yang tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Kriteria resiko *slagging* dan *fouling*

No	Parameter	Kriteria Resiko				Referensi
		Rendah	Sedang	Tinggi	Parah	
Kriteria <i>slagging</i>						
1	Rasio B/A	< 0,4 or > 0,7		0,4 – 0,7		Babcock & Wilcox, 2005
2	Rasio silika	72 – 80	65 – 72	50 – 65	-	Raask, 1985
3	Indeks <i>slagging</i>	< 0,6	0,6 – 2,0	2,0 – 2,6	> 2,6	Babcock & Wilcox, 2005
4	Fusibilitas	> 1343	1232–1343	1149-1232	< 1149	Babcock & Wilcox, 2005
5	Besi/kalsium	< 0,3 or > 3,0		0,3 – 3,0		Bryers, 1996
6	Besi	3 – 8	8 – 15	15 – 23	> 23	Raask, 1985
7	Besi + kalsium	< 10 %		> 12%		Plaza, 2013
Kriteria <i>fouling</i>						
1	Indeks <i>fouling</i> , Rf Batubara abu bituminus	< 0,2	0,2 – 0,5	0,5 – 1	> 1	Babcock & Wilcox, 2005
2	Na ₂ O pada abu	< 2	2 – 6	6 – 8	> 8	Babcock & Wilcox, 2005
3	Indeks alkali	< 0,3	0,3 – 0,45	0,45 – 0,6	> 0,6	Winegartner, 1974

Setelah dibandingkan dengan kriteria resiko, kemudian dikuantifikasikan dengan memberikan nilai masing-masing kriteria resiko berdasarkan penelitian dari Sophia & Hasini (2017) dan Zaid et al. (2019) yaitu resiko rendah dengan nilai 0,0, resiko sedang dengan nilai 0,5, dan resiko tinggi dengan nilai 1,0 sehingga didapatkan skenario *blending* yang diprioritaskan untuk digunakan sebagai bahan bakar *co-firing*.

Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini skenario *blending* yang masuk prioritas dipertimbangkan untuk pengujian lebih lanjut adalah yang memiliki nilai total potensi *slagging* dan *fouling* sama dengan atau dibawah 5,0 dari total 10 parameter yang dihitung. Tabel 4 merupakan hasil perhitungan prediksi dari *blending* Batubara A dan Batubara B dengan EFB 5%, 10%, dan 15%. Dari enam skenario *blending*, ada empat yang dapat diprioritaskan yaitu *blending* Batubara A dengan variasi EFB 5%, 10%, 15%, dan *blending* Batubara B variasi EFB 5%. *Blending* Batubara B dengan EFB 10% dan 15% memiliki resiko tinggi untuk parameter indeks *fouling* dikarenakan rasio basa asam yang juga beresiko tinggi ditambah adanya kandungan Na₂O dan K₂O. Sementara kandungan besi yang cukup tinggi dari Batubara B membuat kriteria resiko yang bersangkutan dengan kandungan besi juga beresiko tinggi.

Tabel 4. Perhitungan prediksi *slagging* dan *fouling blending* Batubara A dan Batubara B dengan EFB

Parameter	Batubara A			Batubara B		
	EFB			EFB		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Kriteria slagging						
Rasio B/A	0,07 7	0,11 3	0,15 2	0,39 1	0,43 4	0,47 9
	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00
Rasio silika	92,8 3	91,4 2	89,9 5	67,7 6	67,2 3	66,6 9
	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50
Indeks <i>slagging</i>	0,02	0,03	0,14	0,22	0,24	0,28
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fusibilitas (ST)	1,47 6	1,44 1	1,43 6	1,27 1	1,26 5	1,25 9
	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50
Besi/kalsium	1,88	1,66	1,52	1,77	1,71	1,66
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Besi	2,87	3,18	3,50	10,9 7	10,8 6	10,7 5
	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50
Besi + kalsium	4,39	5,10	5,80	17,1 8	17,2 1	17,2 4
	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
Total nilai kriteria <i>slagging</i>	1,00	1,00	1,00	3,50	4,50	4,50
Kriteria fouling						
Indeks <i>fouling</i>	0,01	0,01	0,01	0,53	0,56	0,59
	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
Na ₂ O pada abu	0,08	0,08	0,09	1,36	1,30	1,24
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Indeks alkali	0,08	0,14	0,18	0,22	0,29	0,37
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
Total nilai kriteria <i>fouling</i>	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,50
Total nilai keseluruhan	1,00	1,00	1,00	4,50	5,50	6,00

Tabel 5 merupakan hasil perhitungan prediksi dari *blending* berbasis Batubara A. Dari 18 skenario *blending* didapatkan 15 skenario *blending* yang dapat diprioritaskan, sementara tiga skenario *blending* yang tidak diprioritaskan merupakan *blending* batubara perbandingan 50:50 antara Batubara A dan Batubara E dengan berbagai variasi *blending* EFB. Batubara E mengandung besi dan kalsium tinggi dengan komposisinya yang semakin banyak maka kecenderungan abu untuk skenario *blending* akan tinggi besi dan kalsium, ditambah lagi dengan EFB yang tinggi potasium. Hal ini secara langsung mempengaruhi rasio basa asam, rasio silika, fusibilitas, dan kriteria resiko yang bersangkutan dengan kandungan besi.

Tabel 6 merupakan hasil perhitungan prediksi dari *blending* berbasis Batubara B. Dari 18 skenario *blending* didapatkan 4 skenario *blending* yang dapat diprioritaskan yaitu *blending* Batubara B dan Batubara C dengan EFB maksimal 10%. Sementara skenario *blending* lain tidak diprioritaskan karena Batubara B memiliki kandungan besi

dan kalsium yang cukup tinggi jika *blending* dengan Batubara D yang memiliki kandungan kalsium dan sodium yang tinggi dan Batubara E yang memiliki kandungan besi dan kalsium yang tinggi ditambah lagi dengan EFB yang tinggi akan potasium maka di beberapa perhitungan parameter kriteria resikonya bernilai tinggi.

Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan prediksi *slagging* dan *fouling* untuk meminimalisasi potensi *slagging* dan *fouling* saat *co-firing* dilakukan berbagai skenario *blending* untuk bahan bakar *co-firing* PLTU antara batubara Kalimantan dengan EFB. Dari perhitungan didapatkan skenario *blending* Batubara A dengan variasi EFB sampai 15% dapat diprioritaskan, untuk skenario *blending* Batubara B dengan variasi EFB hanya sampai 5% yang diprioritaskan. Untuk skenario *blending* berbasis Batubara A dengan EFB, dari 18 skenario *blending* didapatkan 15 skenario yang dapat diprioritaskan. Untuk skenario *blending* berbasis Batubara B dengan EFB, dari 18 skenario *blending* didapatkan 4 skenario yang dapat diprioritaskan. Dari 23 skenario *blending* yang diprioritaskan dapat dipelajari lebih lanjut mengenai potensi *slagging* dan *fouling* dengan uji bakar menggunakan *drop tube furnace*.

Daftar Pustaka

- Arinaldo, D., & Adiatma, J. C. (2019). *Dinamika Batubara Indonesia : Menuju Transisi Energi yang Adil*. Badan Pusat Statistik. (2018). *Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2018*. Badan Pusat Statistik.
- Bryer, R. (1996). Fireside Slagging, Fouling, and High Temperature Corrosion of Heat Transfer Surface due to Impurities in Steam Raising Fuel. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29–120.
- Duan, L., Duan, Y., Zhao, C., & Anthony, E. J. (2015). NO emission during co-firing coal and biomass in an oxy-fuel circulating fluidized bed combustor. *Fuel*, 150, 8–13.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.110>
- EBTKE. (2020). *Terapkan Metode Co-Firing di PLTU, Ini Potensi Biomassa untuk Substitusi Batubara*.
<http://ebtke.esdm.go.id/post/2020/02/28/2490/terapkan.metode.co-firing.di.pltu.ini.potensi.biomassa.untuk.substitusi.batubara>
- Frandsen, F. (1997). *Empirical Prediction of Ash Deposition Propensities in Coal-Fired Utilities*.
- GAPKI. (2016). *Perkebunan Kelapa Sawit Industri Strategis Energi Terbarukan yang Berkelanjutan*.
<https://gapki.id/news/1944/perkebunan-kelapa-sawit-industri-strategis-energi-terbarukan-yang-berkelanjutan#>
- Hariana, Putra, H. P., & Kuswa, F. M. (2020). Pemilihan Batubara Kalimantan untuk PLTU dengan PC Boiler Menggunakan Tinjauan Potensi Slagging dan Fouling. *National Conference of Industry, Engineering, and Technology*.
- Jeong, T. Y., Sh, L., Kim, J. H., Lee, B. H., & Jeon, C. H. (2019). Experimental investigation of ash deposit behavior during co-combustion of bituminous coal with wood pellets and empty fruit bunches. *Energies*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/en12112087>
- Konsomboon, S., Pipatmanomai, S., Madhiyanon, T., & Tia, S. (2011). Effect of kaolin addition on ash characteristics of palm empty fruit bunch (EFB) upon combustion. *Applied Energy*, 88(1), 298–305.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.008>
- Kuprianov, V. I., Ninduangdee, P., & Suheri, P. (2018). Co-firing of oil palm residues in a fuel staged fluidized-bed combustor using mixtures of alumina and silica sand as the bed material. *Applied Thermal Engineering*, 144(August), 371–382. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.089>
- Lahijani, P., & Zainal, Z. A. (2011). Gasification of palm empty fruit bunch in a bubbling fluidized bed: A performance and agglomeration study. *Bioresource Technology*, 102(2), 2068–2076.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.101>
- Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Sungworagarn, S., Fukuda, S., & Tia, S. (2013). Ash and deposit characteristics from oil-palm empty-fruit-bunch (EFB) firing with kaolin additive in a pilot-scale grate-fired combustor. *Fuel Processing Technology*, 115, 182–191. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.05.018>
- Ninduangdee, P., & Kuprianov, V. I. (2016). A study on combustion of oil palm empty fruit bunch in a fluidized bed using alternative bed materials: Performance, emissions, and time-domain changes in the bed condition. *Applied Energy*, 176, 34–48. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.063>
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional. (n.d.). *Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional*.
- Plaza, P. P. (2013). *The Development of a Slagging and Fouling Predictive Methodology for Large Scale Pulverised Boilers Fired with Coal / Biomass Blends By*. 227.
- Raask, E. (1985). *Mineral impurities in coal combustion: behavior, problems, and remedial measures*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, DC. <https://www.osti.gov/biblio/5693722>
- Sahu, S. G., Chakraborty, N., & Sarkar, P. (2014). Coal–biomass co-combustion: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 575–586. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.106>
- Sophia, N. J., & Hasini, H. (2017). Investigation on Coal Slagging Characteristics and Combustion Behaviour in Furnace. *MATEC Web of Conferences*, 109, 1–6. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710905003>

- Wall, T. F., Bhattacharya, S. P., Zhang, D. K., Gupta, R. P., & He, X. (1993). The properties and thermal effects of ash deposits in coal-fired furnaces. *Progress in Energy and Combustion Science*, 19(6), 487–504. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90002-V](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90002-V)
- Winegartner, E. C., & ASME, R. C. on C. and D. from C. (1974). *Coal fouling and slagging parameters*. ASME.
- Yin, C., Luo, Z., Ni, M., & Cen, K. (1998). Predicting coal ash fusion temperature with a back-propagation neural network model. *Fuel*, 77(15), 1777–1782. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(98\)00077-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(98)00077-5)
- Zaid, M. Z. S. M., Wahid, M. A., Mailah, M., Mazlan, M. A., & Saat, A. (2019). Coal combustion analysis tool in coal fired power plant for slagging and fouling guidelines. *AIP Conference Proceedings*, 2062(January). <https://doi.org/10.1063/1.5086575>

Tabel 5. Perhitungan prediksi *slagging* dan *fouling* skenario *blending* berbasis Batubara A dengan EFB

Parameter	50A;50C			80A;20C			50A;50D			80A;20D			50A;50E			80A;20E		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Kriteria <i>slagging</i>																		
Rasio B/A	0,20 2	0,24 1	0,28 3	0,12 3	0,16 0	0,20 0	0,19 2	0,26 9	0,31 1	0,13 2	0,16 9	0,21 0	0,46 2	0,50 3	0,54 6	0,20 4	0,24 2	0,28 3
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
Rasio silika	80,9 9	80,0 1	79,0 0	88,0 4	86,8 0	85,5 2	81,3 8	79,4 3	78,4 1	87,9 1	86,6 7	85,3 7	62,6 7	62,3 7	62,0 6	79,6 9	78,8 0	77,8 7
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00
Indeks <i>slagging</i>	0,07 7	0,09 5	0,11 5	0,03 9	0,05 3	0,06 9	0,05 7	0,08 4	0,10 3	0,03 7	0,05 0	0,06 6	0,09 1	0,11 0	0,13 1	0,04 9	0,06 3	0,07 9
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fusibilitas (ST)	1.36 8	1.35 7	1.34 6	1.42 8	1.41 4	1.40 0	1.37 5	1.35 7	1.34 6	1.42 8	1.41 4	1.40 0	1.21 8	1.21 1	1.20 4	1.36 0	1.34 9	1.33 9
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,50
Besi/kalsium	2,12	1,98	1,86	2,02	1,84	1,71	0,85	0,87	0,88	1,14	1,12	1,11	1,00	1,00	1,00	1,15	1,13	1,12
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Besi	7,35	7,43	7,51	4,66	4,88	5,11	4,73	5,37	5,57	3,79	4,06	4,33	11,9 9	11,8 2	11,6 6	6,52	6,64	6,77
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00
Besi + kalsium	10,8 1	11,1 8	11,5 4	6,96	7,53	8,10	10,3 0	11,5 3	11,8 8	7,11	7,67	8,23	23,9 2	23,6 0	23,2 7	12,2 0	12,5 0	12,7 9
	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Total nilai kriteria <i>slagging</i>	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	5,50	5,50	5,50	3,00	2,00	2,50
Kriteria <i>fouling</i>																		
Indeks <i>fouling</i>	0,06	0,07	0,08	0,02	0,03	0,03	0,43	0,57	0,63	0,12	0,15	0,18	0,04	0,04	0,05	0,02	0,02	0,03
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Na ₂ O pada abu	0,29	0,29	0,28	0,16	0,17	0,17	2,23	2,14	2,03	0,94	0,91	0,87	0,08	0,08	0,09	0,08	0,08	0,09
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Indeks alkali	0,12	0,18	0,26	0,09	0,16	0,23	0,15	0,29	0,35	0,13	0,20	0,26	0,06	0,12	0,17	0,07	0,13	0,19
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total nilai kriteria <i>fouling</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,50	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total nilai keseluruhan	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	2,50	3,00	3,50	1,00	1,00	1,00	5,50	5,50	5,50	3,00	2,00	2,50

Tabel 6. Perhitungan prediksi *slagging* dan *fouling* skenario *blending* berbasis Batubara B dengan EFB

Parameter	50B:50C			80B:20C			50B:50D			80B:20D			50B:50E			80B:20E		
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Kriteria slagging																		
Rasio B/A	0,38 1	0,42 4	0,47 0	0,38 7	0,43 0	0,47 5	0,41 9	0,46 2	0,50 8	0,40 2	0,44 5	0,49 1	0,74 1	0,78 3	0,82 8	0,51 5	0,55 8	0,60 4
	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	1,00
Rasio silika	68,7 0	68,1 5	67,5 8	68,1 4	67,6 0	67,0 5	67,7 0	67,1 7	66,6 2	67,7 4	67,2 1	66,6 6	51,8 4	51,8 7	51,9 1	60,8 2	60,5 6	60,2 8
	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	11,0 0	1,00	1,00
Indeks <i>slagging</i>	0,20 0	0,22 4	0,25 1	0,21 0	0,23 4	0,26 1	0,18 4	0,20 7	0,26 3	0,20 4	0,22 8	0,25 4	0,25 2	0,27 7	0,30 5	0,24 1	0,26 5	0,29 2
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fusibilitas (ST)	1,26 9	1,26 4	1,25 8	1,27 0	1,26 5	1,25 9	1,27 0	1,26 4	1,25 8	1,27 1	1,26 5	1,25 9	1,14 2	1,13 9	1,13 6	1,20 2	1,20 0	1,19 8
	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Besi/kalsium	1,96	1,89	1,82	1,84	1,78	1,72	1,11	1,10	1,09	1,46	1,43	1,40	1,12	1,12	1,12	1,38	1,36	1,34
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Besi	11,4 0	11,2 7	11,1 4	11,1 4	11,0 3	10,9 1	9,23	9,21	9,19	10,2 8	10,2 0	10,1 3	16,0 4	15,6 6	15,2 9	13,0 0	12,7 8	12,5 7
	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50
Besi + kalsium	17,2 0	17,2 3	17,2 6	17,1 9	17,2 2	17,2 5	17,5 8	17,5 9	17,6 0	17,3 4	17,3 6	17,3 8	30,3 1	29,6 5	28,9 9	22,4 3	22,1 9	21,9 4
	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Total nilai kriteria <i>slagging</i>	3,50	4,50	4,50	3,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	4,50	5,00	5,00	5,00	5,50	5,50	5,50
Kriteria fouling																		
Indeks <i>fouling</i>	0,35	0,38	0,40	0,46	0,49	0,52	1,21	1,27	1,32	0,79	0,83	0,87	0,53	0,54	0,55	0,57	0,59	0,61
	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Na ₂ O pada abu	0,93	0,89	0,86	1,19	1,13	1,08	2,88	2,74	2,60	1,97	1,87	1,78	0,72	0,69	0,66	1,10	1,05	1,01
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Indeks alkali	0,20	0,27	0,35	0,21	0,29	0,36	0,31	0,38	0,45	0,26	0,33	0,40	0,12	0,18	0,24	0,18	0,25	0,31
	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
Total nilai kriteria <i>fouling</i>	0,50	0,50	1,00	0,50	0,50	1,50	2,00	2,00	2,50	1,00	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,50
Total nilai keseluruhan	4,00	5,00	5,50	4,00	5,00	6,00	6,50	6,50	7,00	5,50	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,50	6,50	7,00