

KAJI TEORETIK KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CAMPURAN BATUBARA-AIR (CBA)

Aryadi Suwono
Jurusan Mesin, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung

Ringkasan. Melalui analisis termodinamika, karakteristik pembakaran campuran batubara-air (CBA) dengan contoh batubara dari Bukit Asam Tanjung Enim telah dikaji. Pengaruh konsentrasi terhadap nilai kalor ditunjukkan serta dibandingkan dengan bila batubara dari jenis standar. Demikian pula pengaruh suhu gas buang pembakaran terhadap kalor pembakaran dibahas.

1. Pendahuluan

Batubara merupakan salah satu sumber energi yang banyak terdapat di bumi Indonesia. Pemakaian batubara sebagai sumber energi alternatif semakin meningkat dengan adanya kebijaksanaan pemerintah untuk melakukan diversifikasi energi nasional^[1,2].

Salah satu masalah yang membuat keterbatasan penggunaan batubara adalah transportasi batubara dari penambangan ke pengguna. Teknik transportasi batubara yang dikenal dan digunakan dewasa ini adalah, melalui jalan kereta api, menggunakan truk, dengan konveyor, melalui sungai, dengan pemipaan, dan melalui transmisi listrik setelah dikonversi di mulut tambang dalam bentuk energi listrik.

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa transportasi secara umum melalui sistem pipa merupakan yang termurah dibandingkan jenis angkutan darat lainnya, apalagi untuk jarak jauh, kontinu dan kapasitas angkut besar. Keuntungan lain dari sistem perpipaan adalah dampak negatif pada lingkungan jauh lebih kecil di bandingkan dengan modus angkutan lain.

Tabel 1
Perbandingan Sistem Transportasi^[3].

Jenis Angkutan	Satuan	Biaya
	(c\$ /ton - mile)	
	Rerata	Kisaran
Rel KA	1,8	0,8 - 3,5
Truk	10,5	6,0 - 14,5
Konveyor	11,0	8,0 - 12,5
Pipa	1,2	1,0 - 3,0

Dari peluang tersebut, amat wajar bila cukup banyak pakar^[4-7] melakukan pengkajian secara mendalam kemungkinan untuk menerapkan sistem transportasi dengan pemipaan untuk batubara dengan melarutkannya terlebih dahulu dengan bahan bakar minyak (*Coal Oil Mixture* atau *COM*) atau dengan air (*Coal Water Mixture* atau *CWM*).

Dalam kajian terdahulu^[4], telah ditelaah hasil penelitian pendahuluan tentang komposisi, sifat reologi, stabilitas dan karakteristik aliran campuran batubara air (CBA atau CWM) untuk berbagai konsentrasi khusus untuk batubara PT. Bukit Asam, Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Penelitian tersebut dilakukan baik secara teoritik maupun eksperimental.

Dalam makalah ini akan diketengahkan hasil kaji teoritik karakteristik pembakaran dari CBA dengan komposisi batubara dan kisaran konsentrasi yang sama dengan kajian terdahulu meliputi,

- nilai kalor dan kalor pembakaran
- suhu nyala
- komposisi gas pembakaran

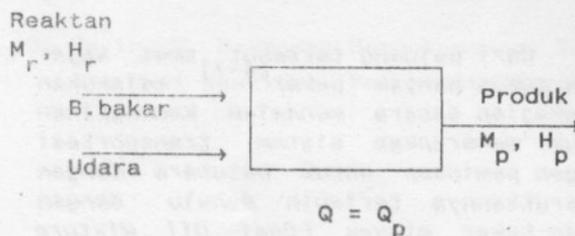
Untuk tujuan prediksi ini, sebuah paket program komputer telah disusun. Meskipun kesahihan hasil prediksi masih perlu diteliti melalui pengujian eksperimental, akan tetapi informasi yang telah diperoleh dapat dipakai sebagai gambaran yang baik tentang kemungkinan pengumpanan langsung CBA sebagai bahan bakar.

2. Teori Dasar Proses Pembakaran

2. 1. Proses Pembakaran Ideal

Untuk berbagai tujuan seperti penentuan nilai kalor suatu bahan bakar atau penaksiran suhu nyala maksimum (adiabatik), anggapan bahwa proses pembakaran berlangsung secara ideal (reaksi stoichiometrik, tak berdisosiasi, tekanan/volume konstan) akan banyak membantu. Terutama untuk tujuan penyederhanaan dalam perhitungan.

Untuk banyak penerapan, umumnya proses pembakaran berlangsung lebih mendekati tekanan konstan, untuk proses demikian neraca energi dapat digambarkan secara skematik seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.



Gb. 1. Kalorimeter gas tekanan konstan.

Untuk kondisi tersebut neraca persamaan neraca energi dapat ditulis sebagai,

$$Q = H_p - H_r \quad (1)$$

di mana Q dan H masing-masing adalah laju kalor dan entalpi. Indeks p dan r masing-masing mewakili produk pembakaran

dan reaktan, yang bila komposisi tingkat keadaan masing-masing dikalikan laju kalor pembakaran dapat ditotal. Karena umumnya data sifat termodinamik dari unsur-unsur yang terlibat dalam suatu reaksi kimia dinyatakan

sebagai besaran molal yang berlaku pada tingkat keadaan acuan ($P_o = 1$ ata, $T_o = 25$ C), Pers. (1) dapat ditulis dalam bentuk analisis laju mol bahan-bakar dan waktu sama sebagai,

$$Q_p = \sum_i x_i \{ \hat{h}_{pi}(T) + \hat{h}_{opi} \} - \sum_j y_j \{ \hat{h}_{oj} \}$$

di mana x_i dan y_j masing-masing fraksi laju mol dari unsur dalam reaktan terhadap laju mol bahan bakar. Sedangkan h adalah entalpi jenis, sehingga, satuan kalor pembakaran, Q_p , dapat dinyatakan sebagai $kJ/(kgmol^p b.b)$ atau $Btu/(lbmol^p b.b)$ atau h_o menyatakan entalpi pembentukan jenis.

Dengan pendekatan reaksi pembakaran ideal, semua unsur baik dalam reaktan maupun produk pembakaran menjadi ideal gas, sehingga perhitungan menjadi sederhana.

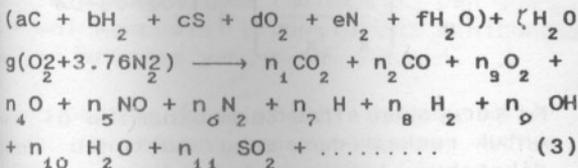
Dalam kondisi sebenarnya, sifat gas buang selain tergantung pada jenis bahan bakar juga merupakan fungsi suhu pembakaran. Hal ini sebagai akibat kemungkinan berlangsungnya proses disosiasi dari unsur produk, yang dalam pendekatan ideal reaksinya dianggap sebagai reaksi stoichiometrik. Oleh karena itu, pendekatan ideal hanya dapat digunakan sebagai pendekatan lazimnya hanya untuk perhitungan neraca kalor (HHV maupun LHV).

2. 2. Pendekatan Proses Pembakaran

2.2.1. Proses disosiasi

Meskipun analisis yang akan digunakan merupakan berlaku untuk reaksi secara umum namun untuk tujuan penyederhanaan analisis akan diketengahkan khusus untuk reaksi pembakaran CBA,

Persamaan reaksi pembakaran dengan oksidan udara dari 1 mol batubara yang dicampur dengan air sehingga menghasilkan CBA dengan konsentrasi batubara basis massa z dapat ditulis sebagai,

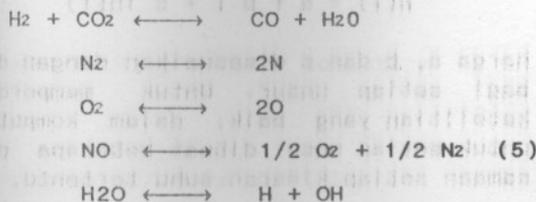


analisis akan didasarkan pada basis mol CBA, dengan demikian,

$$a + b + c + d + e + f + \zeta = 1 \quad (4)$$

koefisien reaksi ζ ditentukan oleh besarnya konsentrasi batubara melalui konversi jumlah mol untuk tiap mol batubara. Munculnya berbagai unsur dalam gas produk akibat berlangsungnya proses disosiasi (penguraian) dari unsur yang lazim ditampilkan dalam reaksi ideal. Jumlah komponen yang mungkin muncul dalam produk pembakaran sebenarnya dapat lebih banyak, tetapi hasil komputasi dengan menyertakan secara lengkap komponen tambahan yang mungkin muncul seperti C, NO_x, SO_x, dsb, ternyata untuk banyak tujuan dan kisaran kondisi yang lazim terjadi dalam proses konvensional jumlahnya dapat diabaikan.

Dalam analisis, hanya kesebelas unsur dalam gas pembakaran seperti ditunjukkan dalam Pers. (3) akan dilibatkan dalam komputasi. Untuk menyelesaikan analisis termodinamika reaksi pembakaran yang berlangsung, diperlukan pengetahuan mengenai semua reaksi disosiasi yang mungkin berlangsung pada tingkat keadaan gas pembakaran, yaitu



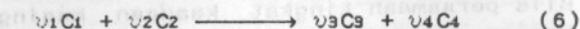
Untuk mencari komposisi kesetimbangan akibat berlangsungnya banyak reaksi yang mungkin terjadi pada suatu kondisi tertentu tersebut, jelas memerlukan penggunaan komputer. Karena untuk setiap unsur dapat dituliskan sebuah persamaan kekekalan atom, maka jumlah persamaan kesetimbangan harus sama dengan banyaknya unsur yang ditinjau dikurangi banyaknya elemen dasar yang terkandung.

Di dalam analisis, untuk jumlah unsur dalam Pers. (3), diperlukan enam enam reaksi kesetimbangan dan lima persamaan untuk kekekalan yakni C, H, O, N, S. Dengan kata lain diperlukan 11 persamaan untuk menyelesaikan 11 parameter yang tak diketahui.

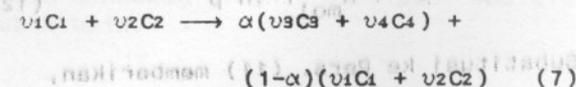
2.2.2. Potensial Elektrokimia

Jumlah mol setiap unsur (n_1, n_2, \dots) dapat ditentukan dari keseimbangan kimia dari persamaan reaksi kimia (5) pada tingkat keadaannya (suhu dan tekanan).

Untuk sebuah persamaan reaksi stoikiometrik sembarang,



Reaksi untuk setiap tahap dapat dinyatakan sebagai,



dimana α menyatakan derajat reaksi, sedangkan C_1, \dots, C_4 menyatakan unsur-unsur pokok dan ν_1, \dots, ν_4 adalah koefisienstoikiometrik. Derajat disosiasi menyatakan fraksi produk yang pada suatu kondisi akan terurai menjadi reaktan.

Pada tekanan dan suhu konstan, keseimbangan termodinamika suatu proses reaksi dapat dinyatakan dengan fungsi Gibbs minimum, atau

$$dG_{p,T} = 0 \quad (8)$$

Untuk sistem yang bereaksi,

$$dG_{T,P} = \sum \mu_i dn_i \quad (9)$$

di mana μ dan dn masing-masing adalah potensial elektrokimia dan perubahan jumlah mol dari unsur.

Karena ν_1, \dots, ν_4 adalah konstan, penerapan pada persamaan reaksi (7), akan memberikan,

$$\begin{aligned} dn_1 &= -\nu_1 d\alpha \\ dn_2 &= -\nu_2 d\alpha \\ dn_3 &= \nu_3 d\alpha \\ dn_4 &= \nu_4 d\alpha \end{aligned} \quad (10)$$

Penerapan Pers. (8) dan (9) dengan Pers. (10) menjadi,

$$(\mu_1 \nu_1 + \mu_2 \nu_2 - \mu_3 \nu_3 - \mu_4 \nu_4) d\alpha = 0$$

atau,

$$\mu_1 \nu_1 + \mu_2 \nu_2 = \mu_3 \nu_3 + \mu_4 \nu_4 \quad (11)$$

Bila persamaan tingkat keadaan masing-masing unsur didekati dengan gas sempurna dapat ditunjukkan bahwa,

$$\mu = \mu^\circ + R_{\text{mol}} T \ln p \quad (12)$$

Substitusi ke Pers. (11) memberikan,

$$R_{\text{mol}} T (\nu_3 \ln p_3 + \nu_4 \ln p_4 - \nu_1 \ln p_1 - \nu_2 \ln p_2) = -\Delta G_T$$

atau,

$$\ln \frac{p_3^{\nu_3} p_4^{\nu_4}}{p_1^{\nu_1} p_2^{\nu_2}} = -\frac{\Delta G_T^\circ}{R_{\text{mol}} T} = \ln K_p \quad (13)$$

di mana

$$-\Delta G_T^\circ = \nu_1 \mu_1^\circ + \nu_2 \mu_2^\circ - \nu_3 \mu_3^\circ - \nu_4 \mu_4^\circ$$

karena untuk gas sempurna perbandingan tekanan parsial unsur terhadap total tidak lain adalah fraksi mol. Pers. (13) dapat ditulis dalam bentuk

$$K_p = \left(\frac{x_3^{\nu_3} x_4^{\nu_4}}{x_1^{\nu_1} x_2^{\nu_2}} \right)_p^{p^{\nu_1 + \nu_2 - \nu_3 - \nu_4}}$$

K_p merupakan sifat termodinamika untuk reaksi dan suhu tertentu diketahui besarnya. Sehingga perhitungan balik besaran α dapat dilakukan.

3. Penyusunan Program Komputer

Karena banyaknya unsur yang terlibat dalam reaksi pembakaran dan proses perhitungan yang sifatnya kompleks yaitu pada proses perhitungan nyala, maka untuk prediksi karakter pembakaran berbagai jenis batubara CBA telah disusun sebuah program komputer berbasis PC. Dengan memanfaatkan semua sifat termodinamika dipelembungkan dalam perhitungan ke dalam program untuk kisaran tingkat keadaan yang luas, putasi yang lazimnya bersifat dapat dilakukan dengan cepat.

Untuk mengurangi jumlah memori data sifat termodinamika dari unsur yang diperlukan dalam perhitungan yang lazimnya dinyatakan dalam literatur dinyatakan dalam bentuk tabel, digunakan dalam bentuk persamaan. Untuk jenis basis mol setiap unsur dinyatakan dalam bentuk,

$$\hat{h}(T) = a + bT + c \ln(T)$$

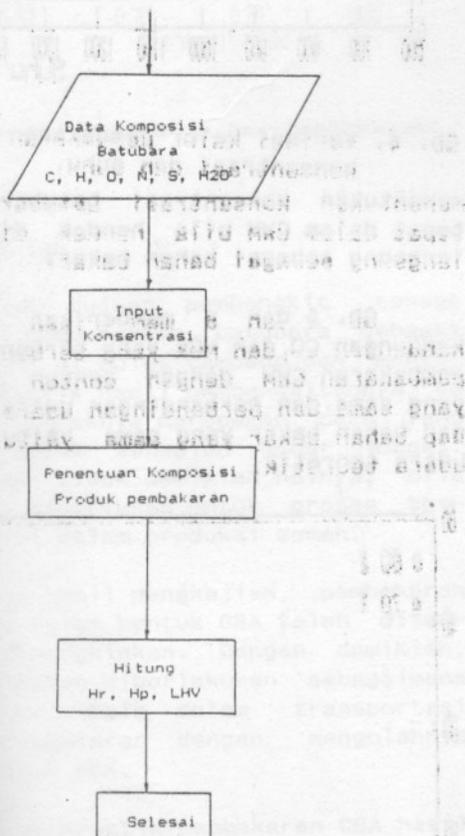
harga a , b dan c disesuaikan dengan data untuk setiap unsur. Untuk memperoleh ketelitian yang baik, dalam komputasi untuk setiap unsur dibuat beberapa persamaan untuk kisaran suhu tertentu.

Demikian pula untuk, harga konstanta kesetimbangan, diterapkan konstanta berikut;

$$i) = \exp \left[\alpha/T + (\beta + \gamma/T) \ln(T) + \delta \right] \quad (16)$$

Beberapa besaran utama yang dapat mencerminkan karakteristik pembakaran seperti nilai kalor, kalor pembakaran, suhu nyala maksimum (adiabatik) dan jumlah mol komposisi produk dapat dihitung dengan program yang telah disusun.

Secara garis besar diagram alir untuk penentuan besaran-besaran nilai kalor rendah, kalor pembakaran, suhu nyala maksimum ditunjukkan dalam Gb. 2.



Gb. 2. Diagram-alir komputasi.

Campuran Batubara-air (CBA)

Berbagai bentuk CBA telah diusulkan dalam rangka menanggulangi masalah

transportasinya, akan tetapi secara garis besar dapat dikelompokkan dalam dua kategori, yaitu

- transportasi CBA dengan proses dehidrasi
- transportasi CBA untuk langsung pembakaran

Untuk kedua kategori tersebut berbagai teknik penyiapan CBA telah mulai dikembangkan yang mempunyai konsekuensi pada perancangan sistem pemipanya. CBA yang disiapkan melalui pencampuran langsung air dan serbuk batubara, menuntut penyaluran dilakukan dengan kecepatan diatas harga kritisnya untuk menghindari pengendapan dalam sistem pemipaan. Teknik lain dalam penyiapan CBA adalah dengan memakai bahan aditif untuk pencegahan pengendapan. Pengembangan CBA butiran kasar dengan terlebih dahulu melakukan pengolahan terhadap batubara sedemikian rupa sehingga air pelarut tak menyerap ke dalam butiran batubara juga mulai mendapat perhatian [8,9].

Sebagaimana karakteristik alirannya, karena komposisi unsur dalam batubara sangat bersifat lokal maka karakteristik pembakaran CBA selain akan sangat dipengaruhi oleh konsentrasi juga akan tergantung dari asal penambangan dari batubara. Dalam Tabel 2 ditunjukkan komposisi unsur dalam batubara Bukit Asam serta perbandingannya dengan beberapa jenis batubara yang telah diketahui komposisinya. Dapat dilihat bahwa batubara Bukit Asam (contoh yang dipakai) lebih mendekati lignit meskipun sedikit lebih baik.

Tabel 2
Komposisi Unsur Dalam Batubara*

Unsur	Antrasit	Bitumin	Lignit	Bukas
C	83.9	80.7	42.4	54.2
H ₂	5.8	9.0	5.6	3.9
O ₂	1.4	4.8	4.8	9.1
N ₂	2.6	2.2	1.4	1.9
S	0.7	1.8	0.7	1.4
H ₂ O	2.5	3.3	24.8	23.6
Abu	3.1	3.1	9.3	7.8

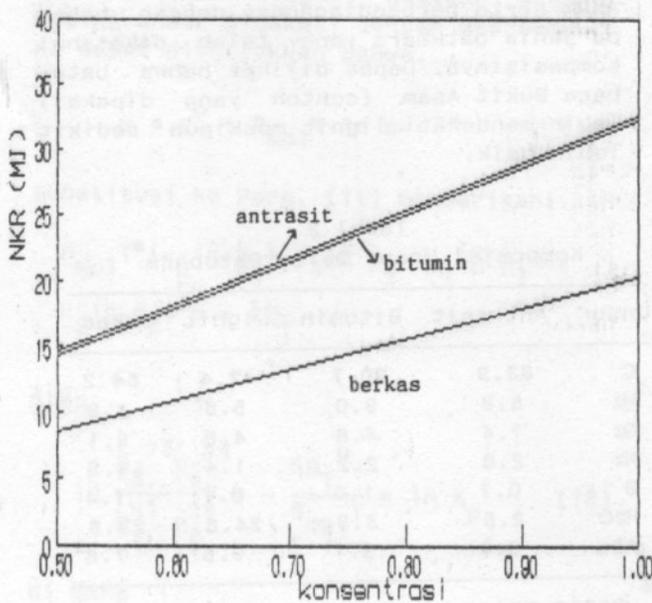
* basis massa
Bukas = Bukit Asam

4. Karakteristik Pembakaran CBA

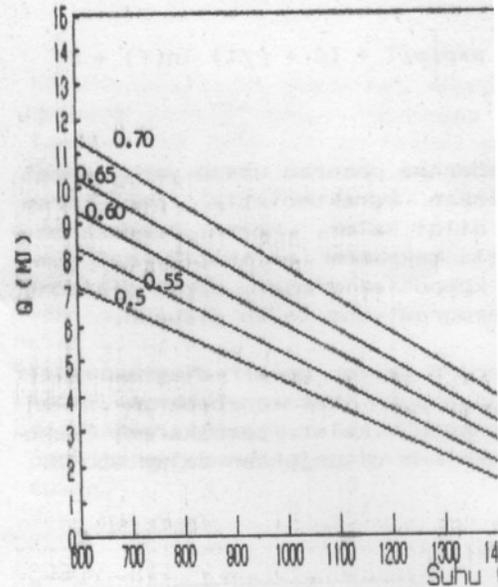
Dalam Gb. 3 ditunjukkan hasil perhitungan yang diperoleh dari penerapan program komputer untuk variasi harga nilai kalor rendah CWM sebagai fungsi konsentrasi batubara. Dapat dilihat bahwa antara CWM dari batubara bituminus dan antrasit, harga nilai kalor rendah tidak jauh berbeda. Tidak demikian halnya dengan CWM dari contoh batubara Bukit Asam yang kualitasnya kurang baik. Namun bila dibandingkan dengan batubara jenis lignit masih lebih baik.

Gb. 4 menunjukkan variasi kalor pembakaran, untuk berbagai suhu produk pembakaran (flue gas) untuk beberapa harga konsentrasi dari CWM dengan batubara Bukit Asam dan 125% udara teoritik. Dapat dilihat bahwa besarnya kalor pembakaran menurun dengan semakin tingginya suhu dan berharga nol pada suhu nyalanya.

Suhu nyala menurun dengan semakin rendahnya konsentrasi batubara. Dalam praktek hanya suhu nyala yang lebih tinggi dari suhu sulut (ignition) saja yang mempunyai arti. Harga suhu sulut perlu ditentukan melalui pengujian dan informasi ini sangat penting untuk



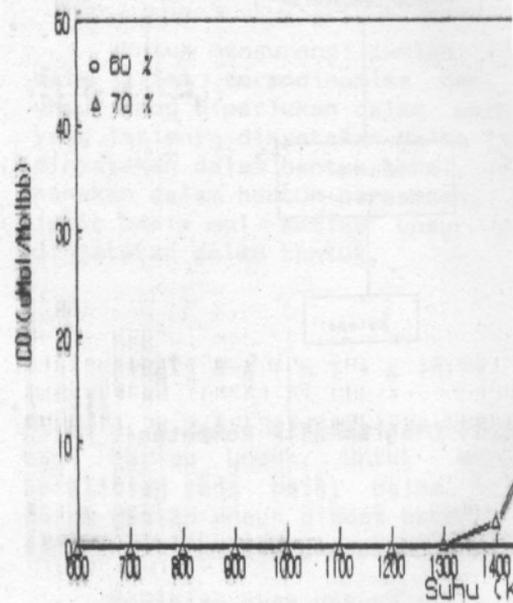
Gb. 3. Nilai kalor rendah CBA.



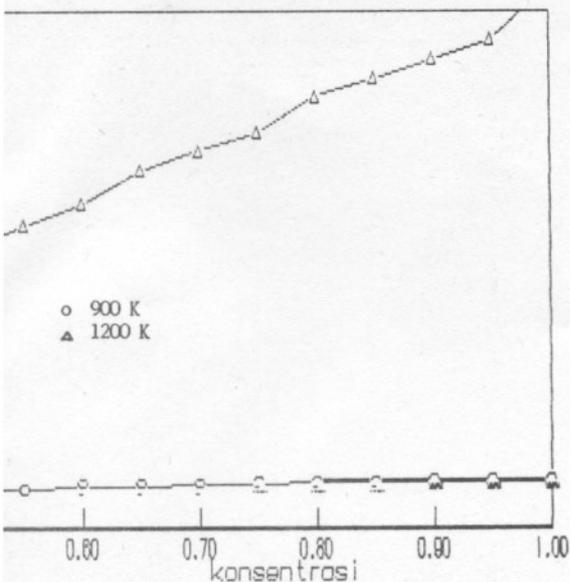
Gb. 4. Variasi kalor pembakaran konsentrasi dan suhu.

menentukan konsentrasi batubara tepat dalam CWM bila hendak di langsung sebagai bahan bakar.

Gb. 5 dan 6 memberikan kandungan CO, dan NOX yang terbentuk pembakaran CWM dengan contoh yang sama dan perbandingan udara dapat bahan bakar yang sama yaitu udara teoretik.



Gb. 5. Kadar CO dalam gas pembakaran



6. Kadar NOX dalam gas pembakaran.

kesimpulan

Untuk tujuan pembangkit tenaga listrik, pemanfaatan batubara sebagai bahan bakar di mulut tambang dan menyalaan listrik hasil pembangkitannya ke permukaan nampaknya merupakan cara yang baik untuk sebagian besar lokasi. Tetapi tidak demikian halnya, bila batubara diperlukan untuk proses tersebut seperti dalam produksi semen.

Dari hasil pengkajian, pembakaran batubara dalam bentuk CBA telah ditunjukkan dimungkinkan. Dengan demikian, batubara dapat diperlakukan sebagaimana baik dalam transportasi maupun pembakaran dengan mengolahnya dalam bentuk CBA.

Karakteristik pembakaran CBA hasil analisis termodinamika, masih perlu diteliti kesahihannya dan diperbaiki dengan kaji eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

Ginjar Kartasmita, Energi di Tahun 2000, bahan Penyajian Ceramah HUT - ITB ke 30, 1989.

2. Ambiyo Mangunwijaya, Kebijakan Energi, Kursus Singkat Energi, PAU-ITB, Maret, 1990.
3. Boustead, I., and G. F. Hancock, Handbook of Industrial Energy Analysis, Ellis Horwood, New York, 1979.
4. Suwono, A and Purwasasmita, M., Preparation of Stable Coal Water Mixture, Interim Report, IUC-ES-ITB, 1989.
5. Suwono, A., M. Purwasasmita and Sutrisno, Experimental Study on Rheological and Flow Characteristics of Coal Water Mixture, Mesin, vol. 6, 1, 1990.
6. Hashimoto, N., Coal Water Slurry Fundamental Characteristics and Pilot Plant Scale Preparation, World Congress of Chem. Engng, Tokyo, 1986.
7. Wasp, J. Edward, Kenny P. John, and Gandhi L. Ramesh, Solid-Liquid Flow Slurry Pipeline Transportation, Gulf Publishing Company, Houston, 1979.
8. Benson, R.S., Advanced Engineering Thermodynamics, Pergamon Press, Oxford, 1977.
9. Kuo, K.K., Principles of Combustion, J. Wiley & Sons, New York, 1976.
10. Reynolds, W.C. and Perkins, H.C., Engineering Thermodynamics, McGraw-Hill, New York, 1977.
11. Perry, R.H. and Chilton, C.H., Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, New York, 1973.
12. Adiga, K.C., Pithapurwala, Y.K., Shah, D.O., and Moudgil, Coal Slurries in Mixed Liquid Fuels: Rheology and Ignition Characteristics, Fuel Proc. Tech., 15, 1, 1987.
13. Morgan, M.E., Roberts, P.A., Coal Combustion Characterization Studies at the International Flame Research Foundation, Fuel Proc. Tech., 15, 1, 1987.
14. Kurimsky, E., Effect of H/C Ratio on Coal Ignition, Fuel Proc. Tech., 19, 2, 1988.