

EVALUASI KINERJA KATALIS LIMONIT SOROAKO PROSES PENCAIRAN BATUBARA BANKO SELATAN

Lambok Hilarius Silalahi

Pusat Teknologi Konservasi dan Konversi Energi
Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi

Abstract,

Investigation of Limonite for catalyst on South Banko coal liquefaction were carried out under standard condition which has developed by BPPT. Limonite Soroako is a natural mineral that found at Nickel Mining on Soroako, South Sulawesi. Four samples of limonite was examined using 5L autoclave at our coal liquefaction laboratory in order to investigate their activities to produce high distillate yield at standard condition (450°C, 9MPa cold H₂). The results showed that limonite S99-E-MY gave a higher distillate yield than those of other limonite (difference about 10-30%daf coal or %bkta). Further investigations were conducted to compare with other catalysts: synthetic γ -FeOOH and pyrite (FeS₂). Again, the activity of limonite S99-E-MY was still superior compared to those of synthetic and pyrite catalysts. The yield difference was about 10-16%daf coal or %bkta). Experiment revealed that the factor of FeOOH critically affected the coal liquefaction reaction to improve the distillate yield and to reduce CLB yield. Besides, the representative of Co metal in the limonite ($\geq 5-10$ %bk) could give synergism effect with FeOOH to improve the activity of limonite.

Kata Kunci: γ -FeOOH, pyrite (FeS₂), limonite, soroako, coal liquefaction

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada saat pertama kali distudi oleh Bergius, teknologi Pencairan Batubara Muda seperti menjanjikan secercah pelita bagi penyediaan energi pengganti minyak bumi. Namun seiring waktu berjalan sampai abad ke-20 berakhir teknologi tersebut belum dapat dikomersialkan karena prosesnya belum efisien, memerlukan biaya yang sangat besar dan harga ekuivalen minyak yang masih di atas harga minyak mentah (US \$ 33/barrel). Namun demikian, inovasi dan pengembangan terhadap proses tersebut terus dilakukan dan salah satunya adalah menggunakan katalis yang murah serta mudah didapatkan dan aktif sehingga dapat menghasilkan yield distilat atau minyak yang maksimal dengan sedikit menghasilkan produk samping atau buangan.

Beberapa peneliti menganggap bahwa penggunaan katalis aktif dari golongan logam transisi seperti Ni-Mo, Co-Mo baik dengan support Al₂O₃ atau tidak merupakan katalis-katalis yang sesuai untuk memecah struktur batubara muda yang mempunyai rantai ikatan heteroatom dan cincin karbon, dimana yield distilat yang tinggi dapat diperoleh. Namun

demikian, katalis dari logam transisi umumnya didapat dengan harga yang sangat mahal dan tidak dapat dipergunakan secara berulang (*recycle*) serta keaktifan katalis setelah reaksi sangat jauh berkurang. Apabila katalis tersebut diterapkan pada skala komersial atau demonstrasi, maka buangan limbah padat setelah reaksi akan sangat besar. Sebagai ilustrasi, pabrik skala 12.000 ton/hari batubara kering bebas abu akan memerlukan katalis 120 ton/hari. Jumlah yang sangat besar tersebut jelas akan memberikan masalah bagi lingkungan.

Oleh karena itu, penggunaan katalis dasar besi (*iron-based catalysts*) merupakan suatu pemikiran untuk memperoleh efisiensi proses menuju tahap komersialisasi, karena katalis dasar besi dikenal sebagai katalis yang murah, mudah diperoleh dan dapat diambil kembali dan diaktifkan sebelum dipergunakan. Adapun untuk menambah daya aktif katalis, ditambahkan sulfur pada katalis dasar besi. Pemakaian katalis dasar besi dalam bentuk sistem atau kombinasi besi-sulfur telah banyak dikaji dan diterapkan.

Dari hasil penelitian terdahulu menggunakan autoclave 5 liter baik di laboratorium kami maupun di Takasago, Jepang telah menunjukkan bahwa katalis dasar besi limonit (α -FeOOH) mempunyai kemampuan yang hampir sama

dengan logam transisi dengan menghasilkan yield distilat yang banyak.

1.2. Permasalahan

Waktu reaksi yang optimum untuk suatu reaksi pencairan batubara muda sangat penting untuk distudi, agar perhitungan desain reaktor terhadap hasil atau yield produk yang dikeluarkan memerlukan strategi penentuan kondisi operasi.

1.3. Tujuan Riset

Riset dilakukan untuk mengetahui pengaruh waktu reaksi di dalam autoclave terhadap aktifitas limonit, yield distilat, CLB, H₂O, gas CO+CO₂, gas hidrokarbon C₁-C₄ dan gas H₂S.

Informasi di atas akan digunakan sebagai data masukan untuk mencoba katalis limonit pada skala proses yang lebih besar. Hasil optimum dari katalis limonit tertentu, dimana dipilih setelah diketahui jenis limonit yang paling aktif, akan dibandingkan dengan katalis pirit dan γ -FeOOH.

2. BAHAN DAN METODE

2.1. Bahan

2.1.1. Batubara

Batubara lignit yang dipergunakan berasal dari daerah Banko Selatan, Tanjung Enim-Sumatera Selatan.

Analisa elemen batubara Banko Selatan (BS) dan analisa abu terdapat pada tabel 1 dan tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 1

Jenis batubara	% bkta				
	C	H	S	N	O
BS	73,7	5,3	0,5	1,4	19,1

Tabel 2

Jenis batubara	Abu, % bk	Inorganik, mmol/kg bk			
		Fe	Mg	Na	Ca
BS	2,5	43	12	9	92

%bk: % berat kering

%bkta: % berat kering tanpa abu

2.1.2. Katalis Limonit

Katalis limonit Soroako (berikut dengan komposisi logam di dalamnya) yang diuji di dalam eksperimen ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3

Kode Limonit	%bk				% H ₂ O*
	T-Fe	Ni	Co	S	
S99-E-MY	45	1,6	10	0,15	37
S99-W-MB	51	1,3	0,05	0,17	50
S99-W-MY	53	0,6	0,02	0,15	55
S99-E-MS1	46	1,4	0,05	0,01	43

T-Fe: total besi di dalam limonit

* : Kandungan air di dalam sampel limonit

Kode limonit S99-E-MY mempunyai kandungan logam Co lebih besar dibandingkan dengan limonit yang lain. Total Fe untuk semua limonit tidak jauh berbeda. Demikian juga dengan kandungan Ni, kecuali untuk kode limonit S99-W-MY. Kandungan sulfur paling rendah secara signifikan ditemukan pada limonit dengan kode S99-E-MS1.

2.2. Metode Eksperimen dan Kondisi Reaksi

Seluruh eksperimen dilakukan di dalam autoclave 5 liter yang dilengkapi dengan pengaduk, aliran pipa gas reaktan dan sistem pemanas jaket. Keseluruhan operasi diatur melalui kontrol panel.

Adapun desain dari eksperimen adalah sebagai berikut:

Batubara	: 300 gram
Rasio PS/BS-bkta	: 2,0
Katalis (% BS-bkta)	: 1,0 basis Fe
Sulfur/Fe (mol/mol)	: 3
Temperatur (°C)	: 450
Tekanan awal H ₂	: 90 kg/cm ² G
Waktu reaksi	: 1 jam
Kecepatan pengaduk	: 500 rpm

Variabel proses yang dipergunakan adalah jenis katalis limonit. Pelarut yang dipergunakan untuk pencairan batubara adalah creosote oil.

Setelah umpan dimasukkan dan autoclave ditutup rapat, kemudian gas nitrogen dialirkan ke dalamnya sampai pada tekanan 30 kg/cm²G, ditahan dan selanjutnya dibuang. Pekerjaan ini dilakukan sebanyak 3 (tiga) kali dengan tujuan untuk mengurangi konsentrasi oksigen di dalam autoclave.

Setelah itu, gas hidrogen dialirkan ke dalam autoclave dan dilakukan seperti di atas sebanyak 3 kali untuk mengurangi konsentrasi gas nitrogen dan oksigen. Kemudian dilakukan tes kebocoran (*leak test*) dengan menyimpan gas hidrogen pada tekanan sekitar 180 kg/cm²G. Kondisi ini dibiarkan selama semalam dan besok pagi harinya dilihat apakah ada penurunan tekanan dan suhu. Kebocoran tidak terjadi, jika rasio tekanan terhadap suhu pada hari pengecekan adalah sama dengan rasio pada hari sebelumnya

(hari waktu pengisian hidrogen). Jika tidak ada kebocoran, maka secara perlahan-lahan aliran gas hidrogen dibuka sampai dengan tekanan 90 kg/cm²G. Kondisi pada tekanan tersebut adalah temperatur kamar. Pada saat temperatur reaksi mencapai 450°C, tekanan gas bisa mencapai 150-160 kg/cm²G.

Sebelum memulai pemanasan, aliran air ke pengaduk dijalankan, sabuk pengaduk dan tachometer (alat ukur kecepatan pengaduk) dipasang, kontrol panel dan semua valve dalam keadaan tertutup. Kemudian setelah dipastikan semua sudah terpasang dan siap, maka pemanasan autoclave dimulai dengan menekan tombol start pada kontrol panel.

Kecepatan pemanasan autoclave di Laboratorium Pencairan Batubara Muda-BPPT adalah 400°/jam. Pencatatan dilakukan mulai temperatur kamar sampai reaksi selesai. Setelah tercapai suhu 450°C, waktu reaksi mulai dihitung. Setelah reaksi selesai, pengaduk dibiarkan berputar dan segera udara dihembuskan dengan kencang melalui blower udara ke badan pemanas autoclave dan pada saat yang sama pemanas autoclave pada kontrol panel dimatikan. Kecepatan pendinginan adalah 300°/jam.

2.3. Metode Penambahan Katalis

Katalis di dalam reaksi ini ditambahkan tanpa melalui treatment awal. Katalis limonit yang diperoleh dari areal penambangan sudah berukuran lembut (sekitar 7-10µm).

Jumlah katalis yang ditambahkan dihitung berdasarkan basis % batubara bkta terhadap konsentrasi besi (Fe) di dalam limonit. Di dalam percobaan ini, katalis yang dipergunakan sebanyak 1% batubara bkta terhadap Fe.

Penambahan sulfur dalam bentuk elemen (bubuk) juga diperhitungkan dengan basis mol sebagai rasio sulfur terhadap Fe di dalam katalis limonit. Rasio S/Fe yang ditentukan adalah 3,0. Kondisi S/Fe = 3,0 berdasarkan percobaan terdahulu⁽⁷⁾ dapat menjaga konsentrasi H₂S selama reaksi konstan 0,1% volume.

2.4. Metode Pengambilan Produk

Setelah pendinginan reaktor atau autoclave mencapai suhu kamar atau suhu sekitar 50-60°C, dilakukan pengambilan produk hasil reaksi. Produk-produk yang diambil untuk dianalisa adalah gas dan minyak.

2.4.1. Analisa Gas

Untuk sistem reaksi menggunakan reaktor tipe mengalir, sampling gas yang dilakukan berbeda dibandingkan dengan sampling gas pada reaktor tipe *batch*.

Sampling gas dilakukan dengan mengalirkan gas dilewatkan gas meter untuk mengukur volume gas di dalam autoclave. Pengambilan sample gas dilakukan pada suhu kamar (atau pada sekitar 50-60°C) pada variasi tekanan 50, 30, and 10 kg/cm²G.

Ketiga sampel gas tersebut di atas dianalisa dengan menggunakan kromatografi gas. Gas hidrokarbon (C₁-C₄) dideteksi dengan menggunakan GC-FID (*gas chromatography-Flame Ionized Detector*). Sedangkan gas CO, CO₂, H₂ dan CH₄ dianalisa memakai GC-TCD (*gas chromatography-Thermal Conductivity Detector*). Gas H₂S diukur dengan menggunakan alat dragger (tabung kecil yang berisi zeolit penyerap gas H₂S).

2.4.2. Distilasi

Setelah selesai melakukan sampling gas, pada saat yang sama dapat dikerjakan persiapan alat-alat untuk distilasi. Distilasi dilakukan untuk memisahkan produk campuran cairan dan padatan hasil reaksi pencairan dengan berdasarkan perbedaan titik didih. Metode distilasi dalam eksperimen ini menggunakan ASTM-D1160.

Produk distilasi dibagi dalam tiga bagian titik didih. Titik didih dari suhu kamar sampai 180°C adalah minyak ringan (*light oil*, LO). Fraksi titik didih 180-420°C dinamakan minyak *recycle* (*recycle solvent*, RS) dan fraksi titik didih >420°C dinamakan residu (*coal liquid bottom*, CLB).

2.5. Perhitungan Yield Distilat dan Residu

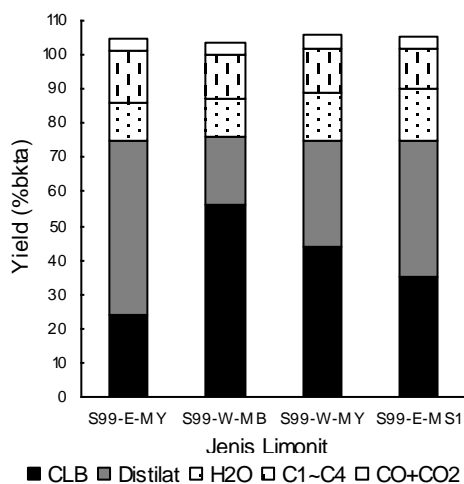
Di dalam reaksi pencairan batubara, hampir seluruh komponen organik batubara mengalami degradasi menjadi minyak ringan (LO), minyak menengah (RS), residu (CLB), gas (hidrokarbon, CO dan CO₂) dan air (H₂O). Sedangkan fraksi organik di dalam pelarut dan katalis tidak mengalami perubahan setelah melewati fase reaksi. Adapun berat komponen organik batubara adalah sama dengan berat batubara bebas abu dan air. Oleh karena itu, yield produk dari reaksi pencairan batubara dinyatakan sebagai %b-bkta (batubara-berat kering tanpa abu atau dalam istilah bahasa asing wt% on dafc, dry ash free coal).

Hasil distribusi produk seperti LO, RS (distilat) dan CLB dinyatakan berbeda satu dengan yang lainnya jika perbedaannya di atas 2% b-bkta. Untuk gas CO+CO₂ jika perbedaannya di atas 0,3% b-bkta dapat dikatakan signifikan. Sedangkan untuk H₂O dan gas hidrokarbon, perbedaan yang signifikan bila di atas 0,5% dan 2%b-bkta.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Variasi Katalis Limonit Terhadap Distribusi Yield Pencairan Batubara

Distribusi yield hasil pencairan batubara dari beberapa sampel limonit yang diperoleh dari lokasi yang berbeda dapat dilihat pada grafik 1 di bawah. Hasil percobaan menunjukkan bahwa limonit kode S99-E-MY mempunyai aktifitas yang paling tinggi dibandingkan dengan limonit yang lain karena mampu menghasilkan yield distilat lebih banyak (51%bkta) dan yield CLB yang lebih kecil (24%bkta). Hasil riset juga membuktikan bahwa yield H₂O, gas hidrokarbon (C₁~C₄) dan gas CO+CO₂ tidak terpengaruh oleh variasi limonit yang dipergunakan. Hal ini mengartikan bahwa fraksi-fraksi tersebut, kecuali distilat dan CLB, dipengaruhi oleh jenis batubara yang dicairkan.



Grafik 1. Distribusi Yield Hasil Pencairan Batubara Banko Selatan

Kemungkinan tentang keaktifan katalis limonit S99-E-MY yang relatif lebih tinggi dibandingkan yang lain dapat dijelaskan sebagai berikut:

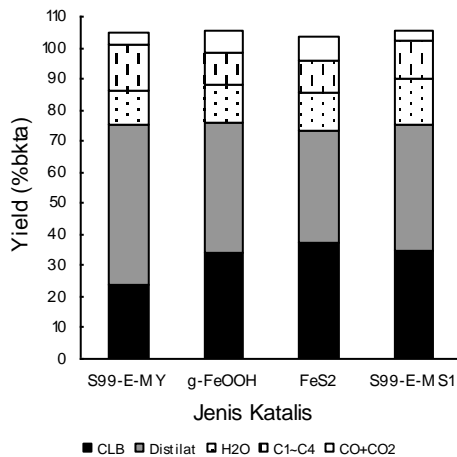
- Faktor struktur kompleks besi (Fe) sebagai α -FeOOH di dalam limonit sangat berpengaruh sekali terhadap distribusi yield distilat dan CLB. Hasil analisa XRD (tidak ditunjukkan) diperoleh bahwa besarnya peak struktur α -FeOOH di dalam limonit menurun dari S99-E-MY > S99-E-MS1 > S99-W-MY > S99-W-MB. Besarnya peak di dalam analisa mengindikasikan besarnya konsentrasi struktur atau senyawa tersebut. Kemungkinan unsur Fe membentuk senyawa kompleks lain juga ditemukan di dalam limonit, seperti NiFe₂O₄ dll.

- Pengaruh unsur logam selain besi (Fe) di dalam limonit juga berpengaruh terhadap aktifitas katalis. Melihat kandungan logam dan sulfur di dalam limonit pada tabel 3, kemungkinan pengaruh Co (Kobalt) untuk berperan sinergis dengan α -FeOOH dapat meningkatkan yield distilat dan menurunkan yield CLB. Kandungan kobalt di dalam S99-E-MY memang sangat signifikan perbedaannya dibandingkan dengan limonit yang lain. Akan tetapi, pengaruh kobalt untuk limonit yang lain dapat dikatakan tidak signifikan, dimana pada kandungan kobalt yang relatif sama, karena yield distilat dari S99-E-MS1 (40%bkta) jauh lebih besar dibandingkan dengan yield distilat dari S99-W-MB (20%bkta). Jadi, kemungkinan kombinasi senyawa kompleks yang dibentuk antara unsur Co dan Fe atau kemungkinan dengan logam yang lain sangat berperan sekali terhadap aktifitas katalis limonit Soroako.

Melihat kandungan unsur logam dan sulfur pada tabel 3 di atas, juga dapat diketahui bahwa unsur sulfur, Ni (nikel) dan atau Co (kobalt) dalam jumlah yang relatif kecil di dalam limonit tidak berpengaruh sekali terhadap aktifitas katalis limonit. Penjelasan tersebut dapat mengindikasikan bahwa sulfur di dalam limonit selama reaksi berlangsung tidak berkombinasi dengan senyawa α -FeOOH membentuk senyawa pirhotit (Fe_{1-x}S). Tetapi kemungkinan yang lain adalah sulfur akan berkontribusi membentuk gas H₂S atau tetap tertinggal sebagai abu katalis.

3.2. Perbandingan Distribusi Yield Pencairan Batubara Antara Limonit, γ -FeOOH Dan FeS₂

Untuk mengevaluasi keaktifan katalis limonit sebagai pengganti katalis dasar besi yang lain, maka percobaan pencairan batubara Banko Selatan dengan katalis γ -FeOOH dan FeS₂ dilakukan sebagai perbandingan. Hasil percobaan dengan ketiga katalis dasar besi yang berbeda dapat dilihat pada grafik 2 di bawah ini.



Grafik 2. Pengaruh Jenis Katalis Terhadap Distribusi Yield Hasil Pencairan Batubara Banko Selatan

Katalis γ -FeOOH dan FeS₂ yang dipergunakan di dalam percobaan ini mempunyai ukuran partikel rata-rata 0,5 μ m, dimana jauh lebih kecil dibandingkan dengan ukuran partikel rata-rata limonit. Namun demikian, ukuran partikel yang lebih kecil menghasilkan yield distilat lebih rendah dibandingkan dengan katalis yang berukuran partikel lebih besar, kecuali untuk katalis limonit S99-E-MS1. Dari grafik 1 terlihat bahwa yield distilat yang dihasilkan dari pencairan batubara Banko Selatan dengan limonit S99-E-MY lebih besar dibandingkan dengan katalis sintesis γ -FeOOH dan FeS₂ dan limonit S99-E-MS1. Demikian pula sebaliknya dengan yield CLB. Yield CLB yang dihasilkan dengan limonit S99-E-MS1 lebih rendah dibandingkan dengan ketiga katalis yang lain.

Rendahnya yield distilat dari katalis sintesis γ -FeOOH dibandingkan S99-E-MY di dalam percobaan ini memang di luar dugaan. Hasil pengamatan terhadap ukuran diameter kristal senyawa pirhotit (Fe_{1-x}S) yang terbentuk dari masing-masing katalis, dapat diketahui bahwa pada temperatur reaksi 450°C, diameter kristal katalis sintesis γ -FeOOH lebih kecil dibandingkan limonit maupun pirit (FeS₂), dimana kondisi tersebut akan berkontribusi pada tingginya dispersitas katalis ke dalam struktur batubara dan pelarut yang pada akhirnya akan meningkatkan yield distilat dan menurunkan yield CLB. Namun demikian hasil yang diperoleh sangat bertolak belakang.

Kemungkinan penjelasan tentang masalah ini adalah adanya logam Co di dalam limonit menimbulkan efek sinergis antara α -FeOOH dan Co, sehingga fraksi distilat dapat meningkat jumlahnya disamping fraksi CLB mengalami penurunan karena membentuk fraksi atau

komponen distilat tersebut. Kondisi ini dapat dibuktikan dengan membandingkan aktifitas katalis sintesis dengan limonit S99-E-MS1, dengan kandungan logam Co di dalam S99-E-MS1 relatif sangat kecil, dimana yield distilat dan CLB relatif hampir sama.

Faktor lain seperti tingkat dispersitas molekul atau kristal pirhotit selama reaksi ke dalam struktur fragmen batubara tidak dapat menjelaskan perbedaan yield antara sintesis γ -FeOOH dan limonit, karena ukuran partikel diameter katalis sintesis yang pada awalnya sudah sangat halus (*fine*).

Hasil percobaan juga mengkonfirmasi keunggulan katalis basis FeOOH terhadap katalis dasar besi konvensional FeS₂. Meskipun katalis FeS₂ berukuran lembut dan dibuat di dalam slurry dengan pelarut, yield distilat yang dihasilkan masih lebih rendah dibandingkan dengan katalis limonit. Disamping itu, kondisi tersebut dipengaruhi oleh ukuran kristal pirhotit yang dihasilkan dari katalis FeS₂ lebih besar pada temperatur reaksi (lihat grafik 3) sehingga yield distilat yang diperoleh lebih rendah dibandingkan dengan katalis limonit dan sintesis γ -FeOOH.

4. KESIMPULAN

Hasil percobaan terhadap limonit Soroako yang dimanfaatkan sebagai katalis reaksi pencairan batubara Banko Selatan menunjukkan hasil yang sangat memuaskan, dimana mineral limonit Soroako dapat dipergunakan sebagai katalis dengan yield distilat yang lebih bagus dibandingkan jika menggunakan katalis sintesis γ -FeOOH dan katalis dasar besi konvensional pirit (FeS₂).

Dari beberapa sampel limonit yang diperoleh dari lokasi yang berbeda di Soroako, menunjukkan bahwa limonit S99-E-MY merupakan limonit yang terbaik karena mampu memberikan yield distilat terbesar dan yield CLB terendah. Disamping itu, di dalam percobaan ini juga ditemukan bahwa variasi jenis limonit tidak berpengaruh terhadap yield H₂O, yield gas hidrokarbon dan yield CO+CO₂.

Pengaruh logam Co, yang secara alami terikat di dalam struktur limonit Soroako, ikut memberikan andil terhadap aktifitas katalis limonit tersebut. Pengaruh Co dapat dikatakan signifikan jika konsentrasi di dalam limonit \geq 5-10 %bk. Untuk konsentrasi di bawah 1%bk, logam Co belum mampu menciptakan efek sinergis dengan natural α -FeOOH.

Perbandingan aktifitas antara katalis limonit dengan katalis sintesis γ -FeOOH dan pirit (FeS₂) menunjukkan bahwa katalis limonit superior dibandingkan dengan kedua katalis lain. Khusus

di dalam komparasi dengan katalis sintetis, pengaruh logam Co seperti dijelaskan pada paragraf di atas ikut memberikan andil bagi meningkatnya aktifitas katalis limonit.

Di dalam riset ini diyakini bahwa senyawa FeOOH sangat berpengaruh kuat terhadap reaksi pencairan batubara agar yield distilat meningkat atau maksimum dan meminimalkan jumlah CLB atau residu. Hasil pengujian ini sangat bermanfaat bagi perkembangan proses pencairan batubara lignit ke arah komersial, dimana jumlah katalis yang diperlukan dan residu yang dihasilkan dapat berkurang sehingga proses dapat lebih efisien.

DAFTAR PUSTAKA

- Dasuki, A.S., "Cadangan Energi, Kebutuhan Energi, Dan Teknologi Masa Depan", Makalah untuk disampaikan pada diskusi ilmiah sehari dalam bidang teknologi masa depan yang ramah lingkungan di PLN LMK, 2000, 1-14.
- Weller, S. and Pelipetz, M.G., "Coal Hydrogenation Catalysts: Studies of Catalyst Distribution", *Industrial and Engineering Chemistry*, 43, 1951, 1243-1246.
- Ogawa, T., Stenberg, V.I., Montano, P.A., "Hydrocracking of Diphenylmethane. Roles of H₂S, Pyrrhotite and Pyrite", *Fuel*, 63, 1984, 1660.
- Stenberg, V.I., Ogawa, T., Willson, W.G., Miller, D.T., "Hydrocracking of Dipenylmethane. Roles of Hydrogen Sulfide and Pyrrhotite", *Fuel*, 62, 1983, 1487.
- Hei, R.D., Sweeny, P.G., Stenberg, V.I., "Mechanism of the Hydrogen-Sulphide-Promoted Cleavage of the Coal Model Compounds: Diphenyl ether, Diphenylmethane and Bibenzyl", *Fuel*, 62, 1983, 577.
- Kaneko, T., "Current Status of Catalyst Development for Brown Coal Liquefaction", NEDO-BPPT, Jakarta, 1997.
- Tim Pencairan Batubara Muda BPPT, Laporan Riset 1996, tidak dipublikasi.
- Mastral, A.M., Mayoral, M.C., Rivera, J. and Maldonado, F., "New Approach to Coal Structure through Its Evolution during Dry Catalytic Hydrogenation", *Energy and Fuels*, 11, 1997, 483-490.
- Zhou, P., Dermer, O.C. and Crynes, B.L., "Oxygen in Coals and Coal-Derived Liquids", in 'Coal Science', 3, Eds. Gorbaty, M.L., Larsen, J.W. and Wender, I., Academic Press., Orlando, 1984, 253-300.
- Redlich, P.J., Jackson, W.R. and Larkins, F.P., "Studies Related to the Structure and Reactivity of Coals: 15. Conversion Characteristics of A Suite of Australian Coals", 68, 1989, 231-237.
- Artanto, Y., "Konversi Batubara Peringkat Rendah Menjadi Minyak Mentah Sintetis: Pengaruh Temperatur pada Hidrogenasi Batubara Banko Selatan", Laporan Teknis, Kelompok Energi Fossil, Direktorat Teknologi Energi Konversi dan Konservasi-BPPT, 1999.