REKONDISI KINERJA OPERASI FIXED BED GASIFIER SEKAM PADI PT. NATIONAL CHAMPIGNON

Bambang Suwondo Rahardjo

Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi
BPPT Gedung II Lantai 22 Jl. M.H. Thamrin No.8 Jakarta 10340
E-mail: bamsr52@yahoo.com

Abstract

All this time, PT Natcham's gasifier only be used for synthetic gas production as fuel of 400 kW gas engine power generation for the mushroom industry's electricity needs while energy crisis. From now on, the application and development of biomass gasification technology is focused on synthetic gas production to be processed furthermore from gas to liquid (GTL) through Fischer-Tropsch synthesis process. H_2+CO contained in syngas product is low (average 20% of total producer gas) with H_2/CO ratio = 0.30–0.35. Produced synthetic gas composition more and less equal to the design maker of Peako – China that is feasible to be utilized as fuel for 400 kW gas engine power generation, but not meet yet specification requirements of syngas composition as gas feeding for Fischer-Tropsch synthesis process (Gas-To-Liquid, GTL). Installation of O_2 and steam injection system inside gasifier necessary to improve syngas quality, all at once N_2 content decreasing in the syngas, with the result of H_2/CO ratio >1 that will improve liquid product.

Kata kunci: *fixed-bed gasifier, gasification, rice husk, synthetic gas*

1. PENDAHULUAN

Selama ini, gasifier sekam padi PT. National Champignon (PT. Natcham) hanya digunakan untuk memproduksi gas sintetis (syngas) sebagai bahan bakar pembangkit listrik gas engine 400 kW keperluan listrik pabrik jamurnya sendiri ketika krisis energi.

Gasifier sekam padi terdiri dari 5 bagian utama, yaitu pengumpanan bahan bakar, *gasifier*, pembersihan produk syngas dan pembuangan abu. Masing-masing unit dilengkapi peralatan dengan rincian sebagai berikut. Pengumpanan bahan bakar meliputi peralatan *screw conveyor*, silo, dan *screw feeder*. Unit *gasifier* dilengkapi *air blower* dan *cyclone* di mana aliran produk syngas dan material umpan (sekam padi) berlawanan arah, sementara media gasifikasi (udara) berlawanan arah dengan material umpan. Pembersihan produk syngas menggunakan peralatan *water scrubber*, *electrostatic precipitator*, *root blower*, dan *gas holder*. Pembuangan abu terdiri dari *screw conveyor* dan penampung abu (*char*). Pemanfaatan produk syngas dilengkapi peralatan berupa pembangkit listrik gas engine 400 kW.

Sekam padi diumpankan ke dalam *gasifier* untuk diunggunkan hingga suhu sekitar 800°C

sehingga menghasilkan syngas sebagai bahan bakar gas engine.

Syngas yang keluar dari *gasifier* mempunyai suhu sekitar 750°C dilewatkan melalui pemisah siklon untuk membersihkan partikel kasar, kemudian didinginkan melalui serangkaian *ventury scrubber* dan menara pendingin. Syngas yang sudah bersih dan yang telah dingin dipompakan melalui *high voltage electrostatic precipitator* untuk menghilangkan partikel debu dan tar yang tersisa sebelum digunakan dalam *gas engine*.

Setelah terjalin kerjasama antara Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi (PTPSE), Kedeputan Teknologi Informasi Energi dan Material (TIEM), BPPT dan PT. National Champignon (PT. Natcham) No.: 43/PKS/BPPT–PT. Natcham/XI/2009 dan No.: BR/064/BPPT–NC/XI/09 tentang pengkajian dan pengembangan teknologi gasifikasi biomasa sebagai bahan bakar alternatif, maka pengkajian dan pengembangan teknologi gasifikasi biomasa diarahkan pada produksi syngas yang diolah lebih lanjut melalui proses sintesa *Fischer Tropsch* (*Gas To Liquid*, GTL) menghasilkan bahan bakar cair sintetis.

Sebagai tindak lanjut kerjasama tersebut di atas, perlu dilakukan langkah awal berupa kegiatan rekondisi operasi gasifier PT. Natcham di Wonosobo dalam menghasilkan syngas berdasarkan spesifikasi teknis *gasifier* Peako buatan China.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Gasifikasi adalah proses konversi bahan yang mengandung karbon dengan cara oksidasi parsial pada suhu tinggi menjadi gas. Gas yang dihasilkan disebut *gas producer* yang mengandung gas CO, H₂, dan CH₄. Gasifikasi umumnya terdiri dari 4 (empat) zona proses, yaitu pengeringan (>150°C), pirolisis (150°C<T<700°C), oksidasi (700°C<T<1500°C), dan reduksi (800°C<T<1000°C).

Pirolisis atau devolatilisasi adalah serangkaian proses fisik dan kimia terjadi secara lambat pada suhu <350°C dan secara cepat pada suhu >700°C. Komposisi produk gas yang tersusun merupakan fungsi suhu dan tekanan selama pirolisis berlangsung. Proses pirolisis dimulai pada suhu sekitar 230°C, ketika komponen yang tidak stabil secara termal, seperti lignin pecah dan menguap bersamaan dengan komponen lainnya. Produk cair yang menguap mengandung tar dan PAH (*polyaromatic hydrocarbon*). Produk pirolisis umumnya terdiri dari gas ringan (H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄), tar, dan arang.

Oksidasi adalah reaksi terpenting yang terjadi di dalam *gasifier* yang menyediakan seluruh energi panas yang dibutuhkan pada reaksi endotermik.

Oksigen yang dipasok ke dalam *gasifier* bereaksi dengan bahan yang mudah terbakar. Hasil reaksi tersebut adalah CO₂ dan H₂O yang secara berurutan direduksi ketika kontak dengan arang yang diproduksi pada pirolisis.

Gambar 1. Bagan *fixed-bed gasifier* dengan 4 (empat) zona proses

Reaksi pembakaran lain yang berlangsung adalah oksidasi hidrogen yang terkandung dalam bahan karbon membentuk *steam*.

Reduksi atau gasifikasi meliputi serangkaian reaksi endotermik yang disokong oleh panas yang diproduksi dari reaksi pembakaran. Produk yang dihasilkan adalah gas bakar, seperti H₂, CO, dan CH₄. Terdapat 4 (empat) reaksi umum yang terkait proses gasifikasi, yaitu:

- *Water-gas reaction* merupakan reaksi oksidasi parsial karbon oleh steam yang dapat berasal dari hasil pirolisis bahan bakar padat itu sendiri maupun dari uap air yang dicampur dengan udara dan uap yang diproduksi dari penguapan air.

- *Boudouard reaction* merupakan reaksi antara CO₂ yang terjadi di dalam gasifier dengan arang untuk menghasilkan CO.

- *Shift conversion* merupakan reaksi reduksi CO₂ oleh steam untuk memproduksi H₂. Reaksi ini dikenal sebagai water-gas shift yang menghasilkan peningkatan perbandingan H₂/CO₂ pada gas produser untuk pembuatan syngas.

- Methanation merupakan reaksi pembentukan gas CH₄.

Berdasarkan kecepatan gerakan aliran material unggun, gasifier terbagi menjadi 3 (tiga) jenis, yaitu *fixed bed gasifier*, *fluidized bed gasifier* dan *entrained bed gasifier*. Adapun penjelasan teknis mengenai masing-masing gasifier adalah sebagai berikut.

Fixed bed gasifier, satu tipe gasifikasi di mana material unggun (batubara/biomasa) pada posisi tetap dengan kecepatan fluidisasi <0,1 m/detik, konsumsi media gasifikasi rendah,

kapasitas pembangkitan listrik rendah, konversi karbon 60–70%, hasil samping berupa abu dan char. Arah bergerak aliran material umpan terhadap produk *syngas* ada yang searah (*co-current moving*) dan ada yang berlawanan (*counter-current moving*) (Chopra S., Jain A., 2007).

Fluidized bed gasifier, pada gasifikasi tipe ini material unggun (batubara/biomasa) bergerak menyerupai fluida dengan kecepatan fluidisasi 1~12 m/detik, konsumsi media gasifikasi menengah hingga tinggi, konversi karbon 95%, hasil samping berupa terak kering. Berdasarkan kecepatan gerakan aliran material unggun, sistem *fluidized bed* gasifikasi dibedakan menjadi *circulating fluidized bed* dan *bubbling fluidized bed*.

Entrained bed gasifier, berbeda dengan kedua tipe gasifikasi di atas material unggun (batubara) bergerak sangat cepat dengan kecepatan fluidisasi lebih besar dari 12 m/detik, konsumsi media gasifikasi tinggi, konversi karbon di atas 95%, hasil samping berupa terak (Van der Drift, et. al., 2004).

Gasifikasi biomasa lebih menguntungkan dibandingkan dengan pembakaran langsung, karena produk *syngas* lebih bersifat fleksibel yang dapat diarahkan menjadi bahan bakar gas pembangkit listrik *gas engine* (Jesper Ahrenfeldt, 2007) atau bahan baku industri kimia maupun bahan bakar cair sintesis yang memiliki nilai jual lebih tinggi.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di PT. National Champignon Wonosobo Jawa Tengah dengan memanfaatkan fasilitas *gasifier plant* sekam padi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.

Gambar 2. Gasifier sekam padi PT. Natcha Wonosobo, Jawa Tengah

3.1. Tujuan

Tujuan utama dari kegiatan penelitian ini adalah untuk melakukan rekondisi kinerja operasi *gasifier* PT. Natcham di Wonosobo dalam

menghasilkan *syngas* berdasarkan spesifikasi teknis *gasifier* Peako buatan China.

3.2. Bahan

Untuk melaksanakan penelitian diperlukan material sebagai berikut. Sekam padi sebagai bahan bakar yang diumpankan dari silo melalui *screw conveyor* ke dalam *gasifier*. Udara sebagai media gasifikasi yang diumpankan melalui *air blower* ke dalam *gasifier*.

3.3. Peralatan

Sistem pengumpanan bahan bakar terdiri dari *screw conveyor*, alat pengangkut sekam padi dari gudang ke silo, unit silo-nya sendiri, alat penampung sekam padi, dan *screw feeder*, alat pengumpan sekam padi dari silo ke dalam *gasifier*.

Sistem gasifikasi terdiri dari *Peako gasifier* buatan China, di mana aliran produk *syngas* dan material umpan berlawanan arah, sementara media gasifikasi (udara) berlawanan arah dengan material umpan, *air blower*, pengumpan media gasifikasi udara ke dalam *gasifier*; *cyclone*, pemisah produk *syngas* dengan padatan ikutan.

Sistem pembersihan produk *syngas* terdiri dari *water scrubber*, pembersih produk *syngas* menggunakan *water spray*.

Electrostatic precipitator, perangkat kolektor debu dan tar yang terikut dalam aliran produk *syngas* menggunakan kekuatan muatan induksi elektrostatis.

Peralatan pendukung lainnya terdiri dari *root blower*, alat pendorong produk *syngas* menuju *gas holder* (alat penampung produk *syngas*) dan alat pembangkit listrik *gas engine* 400 kW.

Gambar 3. Mesin pembangkit listrik bahan bakar gas (*gas engine*) 400kW

Sistem pembuangan abu yang terdiri dari *screw conveyor*, alat pengangkut abu dan penampung abu (char) dengan dimensi 5,25m x 4,70m x 4,00m.

3.4. Metode

Adapun tahapan kerja selama penelitian dapat diuraikan sebagai berikut.

- Pengumpulan data teknis spesifikasi *gasifier* Peako China berikut peralatan pendukung.
- Pengumpulan data teknis operasional baik dari produsen Peako China maupun PT. Natcham.
- Pengoperasian *gasifier*.
- Analisa komposisi (sekam padi, media gasifikasi udara, produk *syngas*) dan evaluasi data hasil analisa produk *syngas*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Penelitian

Tabel 1 dan Tabel 2 masing–masing berikut ini menunjukkan data hasil analisa komposisi dan sifat fisik sekam padi dan udara sebagai media gasifikasi, yang diperoleh dari PT. Natcham.

Tabel 1. Analisa komposisi dan sifat fisik sekam padi

Jenis Analisa	Komposisi (%w)
- Cellulose	35
- Hemicellulose	25
- Lignin	20
- Crude Protein	3
- Ash (Silica)	17
Analisa Proksimat	
- Zat terbang, VM	60,30
- Karbon padat, FC	17,00
- Abu	22,70
Analisa Ultimat	
- Karbon, C	29,33
- Hidrogen, H	3,90
- Oksigen, O	29,17
- Nitrogen, N	0,24
- Sulfur, S	0,16
- Air , H ₂ O	22,70
- Abu	14,50
Sifat Fisik Sekam Padi	
- Diameter, Ø	0,5 mm
- Densitas, ρ	300 kg/m ³
- Sphericity, φ	0,65
- Porositas	0,5

Tabel 2. Data sifat fisik udara

-Velocity, μ	: 1,84 10 ⁻⁶ N.det/m ²
-Densitas, ρ	: 1,16 kg/m ³
-Gravitasi, g	: 9,807 m/det ²

Tabel 3, Tabel 4, Tabel 5, Tabel 6 masing–masing menunjukkan data spesifikasi teknis peralatan dari sistem pengumpanan (*screw conveyor, silo, screw feeder*), sistem gasifikasi (*gasifier, air blower, cyclone*), sistem

pembersihan produk *syngas* (*water scrubber, electrostatic precipitator, root blower, gas holder*), dan sistem pembuangan abu (*screw conveyor, penampung abu/char*).

Tabel 3. Spesifikasi teknis peralatan sistem pengumpanan

Jenis Peralatan	Spesifikasi
Screw Conveyor	
-Diameter poros inchi	1,5
-Diameter casing inchi	6
-Panjang m	18
-Jarak ulir (pitch) cm	14
-Kecepatan putar rpm	600 – 800
-Daya motor kW	4
Silo	
-Dimensi cm	207 x 200 x 375
Screw Feeder	
-Laju umpan kg/jam	460 – 480
-Diameter poros inchi	1,5
-Diameter casing inchi	10
-Panjang m	18
-Jarak ulir (pitch) cm	22
-Kecepatan putar rpm	250 – 300
-Daya motor kW	2,2

Sumber: Peako, China

Tabel 4. Spesifikasi teknis peralatan sistem gasifikasi

Jenis Peralatan	Spesifikasi
Air Blower	
-Tekanan MPa	4,704
-Laju dorong m ³ /detik	0,4
-Kecepatan putar rpm	2900
-Daya motor kW	4
-Putaran motor rpm	2890
-Tegangan listrik Volt	380
-Arus listrik Ampere	8,2
Gasifier	
-Buatan	Peako–China
-Posisi pengukuran suhu dari dasar cm	80, 160, 340, 520, 700
-Posisi pengukuran tekanan dari dasar cm	250
Cyclone	
- Diameter ruang utama cm	70
- Tinggi cm	340
Inlet cm	35 x 15
-Diameter outlet gas cm	36
-Diameter outlet padatan inchi	6
-Putaran cyclone lock rpm	150

Sumber: Peako, China

Tabel 5. Spesifikasi teknis peralatan system pembersihan produk syngas

Jenis Peralatan	Spesifikasi	
Water Scrubber		
- Diameter poros	inchi	1,5
- Diameter casing	inchi	6
- Panjang	m	18
- Jarak ulir (<i>pitch</i>)	cm	14
- Kecepatan putar	rpm	600 – 800
- Daya motor	kW	4
Electrostatic Precipitator		
- Tinggi	cm	780
- Diameter	cm	175
- Suhu <i>inlet</i>	°C	28
- Suhu <i>outlet</i>	°C	34
- Tegangan listrik	kV	32 – 40
- O ₂ <i>setting</i>	%	1,5
- O ₂ <i>measured</i>	%	0,6 – 0,9
Root Blower		
- Laju alir produk	m ³ /meni	32,6
- Tekanan	KPa	9,8
- Kecepatan putar	rpm	1450
- Daya motor	kW	11
Gas Holder		
- Tekanan	mmH ₂ O	300
- Ukuran	cm	230 x 190

Sumber: Peako – China

Tabel 6. Spesifikasi teknis peralatan system pembuangan abu

Jenis Peralatan	Spesifikasi	
Screw Conveyor		
- Diameter poros	inchi	1,5
- Diameter casing	inchi	6
- Panjang	m	18
- Jarak ulir (<i>pitch</i>)	cm	14
- Kecepatan putar	rpm	200
- Daya motor	kW	4
Penampung Abu/Char		
- Ukuran	m	5,25 x 4,7 x 4

Sumber: Peako – China

Tabel 7 menunjukkan data hasil pengukuran laju aliran umpan sekam padi melalui screw feeder ke dalam gasifier yang dilakukan sebanyak 4 (empat) kali.

Tabel 7. Laju aliran sekam padi

Putaran	Massa	
	(kg/5 menit)	(kg/jam)
rpm		
200	29,91	358,92
250	29,74	356,88
300	37,98	455,76
350	44,26	531,12

Tabel 8 menunjukkan hasil analisa produk syngas menggunakan Gas Chromatograph (GC) yang dilakukan di PUSTEKLIM (Pusat Teknologi Limbah) Yayasan Dian Desa, Jl. Kaliurang Km 7 Gg. Jurug Sari IV/19, Bulak Sumur, Yogyakarta.

Tabel 8. Komposisi contoh produk syngas (media : udara)

Komponen	Sampel Produk Syngas (%)			
	1	2	3	4
H ₂	4.63	4.86	5.06	5.83
N ₂	63.29	62.63	62.26	59.47
CO	14.25	14.14	14.20	16.43
CH ₄	2.87	2.85	2.92	3.40
CO ₂	14.96	15.51	15.56	14.87
H ₂ /CO	0.325	0.344	0.357	0.355
%FT	18.88	19.01	19.26	22.26

Sumber: Pusteklim, Yogyakarta

Tabel 9 menunjukkan komposisi produk syngas menurut desain fabrikasi *gasifier* Peako, China.

Tabel 9. Komposisi produk syngas (*design*) (media udara)

Komponen	Komposisi, %	
	Batasan	Rata-rata
H ₂	3~9	6
CO	10~18	14
N ₂	50~60	55
CO ₂	10~20	15
CH ₄	2~6	4
HC lain	0.5~3	2
H ₂ O, dll	0.5~3	2

Sumber: Peako China

4.2. Pembahasan

4.2.1. Klasifikasi gasifier

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan pendekatan formula Arch dan Wen–Yu berikut di bawah ini (Dasappa, S., Paul et. al., 2004), maka untuk karakteristik gasifikasi sekam padi dengan udara sebagai media gasifikasi diperoleh:

$$A_r = 1260 \quad (A_r \text{ rendah})$$

$$U_{mf} = 0,025 \text{ m/detik}$$

$$A_r = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2}$$

$$U_{mf} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_g) g}{1650 \mu} \quad [A_r \text{ rendah}]$$

$$U_{mf} = \left\{ \frac{d_p (\rho_p - \rho_g) g}{24,5 \rho_g} \right\}^{1/2} \quad [A_r \text{ tinggi}]$$

Hasil *plotting* pada Gambar 4, menunjukkan bahwa gasifier Peako, Chin, termasuk jenis fixed bed gasifier yang beroperasi secara *up-draft counter-current moving mode* (Demirbas, A., 2002) (Gambar 5).

Gambar 4. Korelasi kecepatan udara (μ) dan *pressure drop* (ΔP , mm H₂O)

Gambar 5. Jenis *fixed bed gasifier*

4.2.2. Operasi gasifier

Pengoperasian *gasifier* diawali dengan pemanasan awal (*preheating*) selama 1 jam. Setelah kondisi operasi stabil pada suhu 750°C dan tekanan 1 atm dengan rasio udara sebesar 1,2 dan konversi karbon sebesar 75%, kemudian dilakukan pemeriksaan aliran produk *syngas*

dengan dibakar sampai menyala biru. Pemeriksaan melalui pembakaran dilakukan pada *gas sampling valve* ukuran 1/4" yang terpasang sebelum *gas stream* masuk *gas engine* sebagai titik pengambilan sampel produk *syngas*, seperti ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar 6. Produk *syngas* terbakar menyala biru (Lokasi *sampling*)

Gambar 7 menunjukkan proses pengambilan contoh (*sample*) menggunakan kantong *aluminium foil* dengan selang waktu selama 15 menit setiap *sampling*.

Gambar 7. Pengambilan contoh (*sample*) *syngas*

4.2.3. Komposisi produk *syngas*

Bilamana data hasil analisa produk *syngas* dari Tabel 8 dibandingkan dengan data Tabel 9, memperlihatkan komposisi produk *syngas* kurang lebih sama.

Kandungan H₂+CO dalam produk *syngas* masih rendah (rata-rata 20% dari total *gas producer*) dengan rasio H₂/CO yang dihasilkan sekitar 0.30–0.35 (Jeng-Chyan Muti Lin, 2006).

Kandungan N₂ dalam produk *syngas* sangat tinggi (rerata 61,91%), yang hanya mampu diturunkan hingga 20% menggunakan media gasifikasi campuran udara dan *steam* dengan perbandingan komposisi tertentu. Penurunan kandungan N₂ dalam produk *syngas* tidak dapat sepenuhnya mencapai spesifikasi produk *syngas* sebagai bahan baku proses sintesa *Fischer*

Tropsch (Gas To Liquid, GTL) (Mark J. Prins, 2005).

Injeksi *steam* yang terukur tidak berbanding lurus dengan injeksi udara pada efisiensi konversi karbon yang dihasilkan (Carlos, L., (2005).

Penambahan *steam* yang berlebih tetap tidak dapat menaikkan konversi karbon, sebaliknya penambahan udara ($N_2 = 79\%$, $O_2 = 21\%$) mengakibatkan kenaikan yang tajam pada efisiensi konversi karbon (Carlos, L., 2005).

4.2.4. Konsumsi bahan bakar

Menurut hasil perhitungan diperoleh bahwa untuk membangkitkan listrik sebesar 400 kW diperlukan bahan bakar sekam padi sebanyak 600 kg/jam dan konsumsi udara (ideal) sebagai media gasifikasi sebesar 720 kg/jam ($2100 \text{ m}^3/\text{jam}$).

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan mengenai rekondisi kinerja operasi *fixed bed gasifier* sekam padi PT. Natcham seperti diuraikan di atas dapat disimpulkan sebagai berikut.

Gasifier Peako, China milik PT. Natcham termasuk *fixed bed gasifier* yang beroperasi secara *up draft counter current moving mode*. Produk *syngas* dengan rasio $H_2/CO = 0.30-0.35$ digunakan sebagai gas umpan proses sintesa *Fischer Tropsch* akan menghasilkan produk cair yang relatif sedikit, sehingga diupayakan rasio H_2/CO lebih besar dari 1(satu) untuk meningkatkan perolehan produk cair.

Komposisi *syngas* yang dihasilkan kurang lebih sama dengan desain fabrikasi *gasifier* Peako, China telah layak dimanfaatkan sebagai bahan bakar gas pembangkit listrik *gas engine* 400 kW, namun belum memenuhi persyaratan spesifikasi komposisi *syngas* sebagai gas umpan proses sintesa *Fischer Tropsch (Gas To Liquid, GTL)*.

Konsumsi bahan bakar sekam padi dan media gasifikasi udara yang diperlukan pada proses gasifikasi menggunakan *fixed bed gasifier* masing-masing adalah 600 kg/jam dan 720 kg/jam ($2100 \text{ m}^3/\text{jam}$) untuk membangkitkan listrik 400 kW.

Perlu pemasangan sistem injeksi O_2 dan *steam* ke dalam *gasifier* untuk meningkatkan kualitas produk *syngas* sekaligus menurunkan kandungan N_2 agar memenuhi persyaratan spesifikasi gas umpan proses sintesa *Fischer Tropsch* untuk menghasilkan bahan bakar cair sintetis (*Gas To Liquid, GTL*).

DAFTAR PUSTAKA

Carlos, L., 2005. *High Temperature Air/Steam Gasification of Biomass in an Up-draft Fixed-bed type Gasifier*. Ph.D. thesis. Royal Institute of Technology, Energy Furnace and Technology, Stockholm, Sweden.

Chopra S., Jain A., 2007. *A Review of Fixed Bed Gasification Systems for Biomass*. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Invited Overview No. 5. Vol. IX. April, 2007.

Dasappa, S., Paul, P. J., Mukunda, H. S., Rajan, N. K. S., Sridhar, G., Sridhar, H.V., 2004. *Biomass gasification technology – a route to meet energy needs*. Current Science 87(7):908–916.

Demirbas, A., 2002. *Hydrogen Production from Biomass by the Gasification Process*, Energy Sources 24:59-68.

Jeng-Chyan Muti Lin, 2006. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*. Vol. 29, No. 3, pp. 557-562.

Jesper Ahrenfeldt, 2007. *Characterization of biomass producer gas as fuel for stationary gas engines in combined heat and power production*, Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, March 2007.

Mark Jan Prins, 2005. *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction, Chapter 1: Biomass Gasification*. Technische Universiteit Eindhoven, Proefschrift – ISBN 90–386–2886–2, 16 February 2005, p.3.

Mark Jan Prins, 2005. *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction. Chapter 6: Exergetic Optimization of a Production Process of Fischer–Tropsch Fuel from Biomass*. Published in Fuel Processing Technology 86 (4): 375–389.

Van der Drift, A., Boerrigter, H., Coda, B., Cieplik, M.K., Hemmes, K., 2004. *Entrained Flow Gasification of Biomass*. ECN–C–04–039, 27 April 2004, p.7–58.