PEMANFAATAN GASIFIKASI BATUBARA UNTUK UNIT PENGERINGAN TEH

Ari Susandy Sanjaya, Suhartono, Herri Susanto
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10, Labtek X, Bandung – 40132
Tlp. (022) 2500989 ext. 405
E-mail: dajeere@yahoo.com

Abstrak

Kenaikan harga bahan bakar minyak untuk industri pada awal 2006 telah mendorong berbagai pemikiran dan upaya pemanfaatan bahan bakar alternatif. Sebuah unit gasifikasi telah dipasang di pabrik teh sebagai penyedia bahan bakar alternatif. Unit gasifikasi tersebut terdiri dari gasifier, pendingin, pembersih gas dan blower. Unit gasifikasi ini ditargetkan untuk dapat menggantikan konsumsi minyak bakar 70 L/jam. Gasifier dirancang untuk kapasitas 120 kg/jam batubara, dan memiliki spesifikasi sebagai berikut: downdraft gasifier, diameter tenggorokan 40 cm, diameter zona reduksi 80 cm. Bunker di bagian atas gasifier memiliki kapasitas sekitar 1000 kg batubara agar gasifier dapat dioperasikan selama 8 jam tanpa pengisian-ulang. Bahan baku gasifikasi yang telah diuji-coba adalah batubara kalori rendah (4500 kcal/kg) dan limbah kayu (4000 kcal/kg). Gas produser (hasil gasifikasi) dibakar pada burner untuk memanaskan udara pengering teh sampai temperatur target 102 °C. Pembakaran gas produser ternyata menghasilkan api biru pucat yang mungkin disebabkan oleh rendahnya kalor bakar gas dan tingginya udara-lebih. Temperatur udara pengering hasil pemanasan dengan api gas produser hanya mencapai 96 °C. Dan untuk mencapai temperatur udara pengering 102 °C, burner gas produser harus dibantu dengan burner minyak 15 L/jam. Jadi operasi dual fuel ini dapat memberi penghematan minyak bakar 78%.

Kata kunci: Minyak bakar, Gas produser, Downdraft gasifier, Dual fuel, Kalor bakar, Burner

Abstract

Anticipating the rise of fuel oil, the management of a tea plantation and drying plant has considered to substitute its oil consumption with producer gas (gaseous fuel obtained from gasification process). A tea drying unit normally consumes 70 L/h of industrial diesel oil and is operated 10 hours per day. The gasification unit consisted of a down draft fixed bed gasifier (designed capacity of about 100 kg/h), gas cooling and cleaning systems. The gas producer was delivered to the tea processing unit and burned to heat the drying air. Low calorific value coal (4500 kcal/kg) and wood waste (4000 kcal/kg) have been used as fuel. The gasification unit could be operated as long as 8 hours without refueled since the coal hopper on the top part of gasifier has a capacity of 1000 kg. Sometimes, the gasification process must be stopped before coal completely consumed due to ash melting inside the gasifier. Combustion of producer gas produced a pale-blue flame, probably due to a lower calorific value of the producer gas or too much excess air. Temperature of heating-air heated by combustion of this producer gas was only up to 96 °C. To achieve the target temperature of 102 °C, a small oil burner must be operated at a rate of about 15 L/h. Thus the oil replacement was about 78%.

Keywords: Fuel oil, Producer gas, Downdraft gasifier, Dual fuel, Calorific value, Burner

1. Pendahuluan

Perkembangan dunia industri di Indonesia berjalan dengan cepat dan membawa dampak pada perekonomian, lapangan kerja dan peningkatan devisa negara. Industri yang berkembang kebanyakan menggunakan bahan bakar minyak dan gas alam, akan tetapi seiring makin mahalannya harga bahan bakar minyak dan gas di Indonesia, perlu dicari satu alternatif, yang memberikan harga lebih murah. Indonesia merupakan negara yang kaya akan sumber daya alam. Salah satu sumber daya alam tersebut adalah batubara. Selama beberapa dasawarsa terakhir kebutuhan bahan bakar di Indonesia bergantung pada minyak bumi dan kini persediaan minyak bumi sudah mulai menipis.

Pemanfaatan batubara sebagai sumber energi alternatif, telah memperoleh perhatian besar di Indonesia. Batubara mempunyai potensi sebagai bahan baku kimia, yang diantaranya dapat dilakukan melalui proses gasifikasi (Groeneveld, 1980). Proses gasifikasi merupakan salah satu proses konversi batubara, khususnya batubara berkualitas rendah. Produk gasifikasi disebut juga gas produser, mengandung CO, H₂, dan CH₄, serta gas-gas inert CO₂, H₂O, dan N₂. Gas-gas H₂ dan CO merupakan komponen utama gas sintesis yang selanjutnya dapat diolah menjadi berbagai bahan kimia, misal metanol dan gasolin.

Batubara merupakan salah satu alternatif energi yang murah, harga batubara yang dijual di pasaran berkisar antara Rp 250/kg-600/kg, atau berkisar antara 0,05-0,10 Rp/kcal (Susanto, 2005). Ditinjau dari segi ekonomi, lebih menguntungkan bila dibandingkan dengan harga BBM (minyak solar dan minyak diesel untuk industri) per 1 Juni 2006, berkisar antara 5850-5950 Rp/L atau berkisar antara 0,66-0,67 Rp/kcal.

Salah satu pemanfaatan gas hasil gasifikasi adalah sebagai pemanas udara pengering pada pabrik pengolahan teh (Suhartono, 2006). Sampai saat ini sumber energi termal dalam pengelolaan teh masih sangat tergantung pada minyak bakar, solar dan *Industrial Diesel Oil*. Pengembangan gasifikasi batubara diharapkan menjadi salah satu solusi bagi industri perkebunan teh di dalam negeri untuk bisa lebih menghemat pengeluaran atau efisiensi biaya produksinya. Rasio konsumsi solar dalam pengeringan teh hijau berkisar 0,7-0,9 L/kg teh produk, sedangkan kebutuhan energi pengeringan teh hitam sebesar 0,35-0,50 L/kg teh produk. Temperatur yang dibutuhkan untuk proses pelayuan teh hitam 100 °C, sedangkan temperatur untuk teh hijau sekitar 80 °C. Kenaikan harga bahan bakar minyak mengakibatkan peningkatan biaya produksi teh, terutama pada biaya

pengolahannya sampai pada proses pengeringan atau pelayuan daun teh.

Penelitian ini merupakan kegiatan operasional untuk uji coba pemanfaatan unit gasifikasi batubara pada sistem pengeringan teh dan karakterisasi burner gas produser. Unit gasifikasi dirancang untuk mengolah batubara 120 kg/jam yang diharapkan dapat mengganti minyak bakar 70 L/jam. Gasifier yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *downdraft gasifier*, dengan diameter tenggorokan 40 cm, diameter bunker 1 m, dan tinggi total 3 meter. Bunker mampu menampung 1000 kg batubara. Batubara diperoleh dari pusat penjualan di Cirebon, dengan nilai kalori sekitar 5000 kcal/kg. Medium penggasifikasi yang digunakan adalah udara, tekanan operasi atmosferik dan abu yang dihasilkan dalam keadaan kering. Unit gasifikasi ini juga dicoba dengan kayu limbah penebangan pohon.

Keterbatasan fasilitas pengukuran mengakibatkan perlunya dilakukan simulasi untuk mengetahui komposisi gas produser dan temperatur hasil gasifikasi, simulasi dilakukan dengan menetapkan temperatur di gasifier 850 °C, dengan *wall heat loss* 0 dan 10%. Simulasi pembakaran gas produser dilakukan dengan memvariasikan *heat loss* pembakaran dan *excess air*.

Penelitian ini dilengkapi dengan uji pembakaran gas produser untuk memahami karakteristiknya. Uji pembakaran gas produser tersebut dilakukan dengan cara menggunakan campuran gas yang dibakar pada burner yang akan dibuat peta kestabilan. Uji pembakaran dengan campuran gas dilakukan di Laboratorium di ITB.

2. Fundamental

Dalam gasifikasi batubara dengan udara dan kukus menghasilkan CO, H₂, CO₂, H₂O sisa, N₂, dan sedikit CH₄. Proses gasifikasi dapat diwakili dengan persamaan-persamaan reaksi oksidasi berurutan dari karbon menjadi CO₂.

Reaksi (2) merupakan reaksi utama dalam proses gasifikasi batubara (Groeneveld, 1980). Oleh karena itu, dalam proses gasifikasi batubara, sangat diharapkan untuk beroperasi pada suhu yang tinggi untuk mengoptimalkan hasil gasifikasi batubara.

Sebelum reaksi-reaksi gasifikasi melalui persamaan reaksi diatas, batubara akan mengalami proses berturut-turut: pengeringan dan pirolisis. Disamping itu, bila proses gasifikasi dilakukan secara autotermal, sebagian batubara harus dibakar untuk menghasilkan panas yang diperlukan oleh tahapan reaksi lainnya (lihat Gambar 1). Sehubungan dengan hal terakhir, gasifikasi sering dinamai *partial oxidation*, dengan nisbah udara stoisiometrik 30 -70% (G. Kolios et al.,2000).

Gambar 1. Tahap proses Gasifikasi

Jenis *gasifying agent* sangat menentukan komposisi gas produser. Bila udara digunakan sebagai *gasifying agent*, gas produser akan banyak mengandung N₂. Gas produser dari proses ini dikategorikan sebagai gas dengan kandungan energi rendah (*low Btu gas*). Gasifikasi dengan oksigen murni menghasilkan gas produser dengan panas pembakaran menengah (*medium Btu gas*). Kukus sering ditambahkan ke dalam proses gasifikasi batubara untuk menambah kandungan H₂ dalam gas produser.

Perbedaan komposisi dan komponen penyusun bahan bakar akan mengakibatkan perbedaan karakteristik pembakaran didalam ruang bakar (*burner*). Stoikiometri pembakaran yaitu campuran udara dengan bahan bakar yang menyediakan cukup oksigen untuk pembakaran bahan bakar. Bahan bakar yang berbeda akan menghasilkan karakteristik pembakaran yang berbeda pula, hal ini diakibatkan oleh kualitas panas yang berbeda dari setiap komponen dan perbedaan interaksinya. Karakteristik pembakaran *flammability limits*, dan *flame speed*.

Burner merupakan bagian yang sangat penting dalam mewujudkan pembakaran dengan kinerja yang baik yaitu efisien dalam energi termal dan emisi polutan yang minimum. Geometri burner juga bergantung pada jenis bahan bakar, metoda pembakaran dan teknik pemanasan yang diinginkan. Pemasangan burner yang efisien akan memberikan penghematan pemakaian bahan bakar. Ruang pembakaran adalah ruangan tempat *flame* disemburkan dan pelepasan panas secara radiasi. Ruang bakar harus cukup sehingga *flame* yang terbentuk tidak menabrak dinding.

Secara umum di industri *flame* tidak dibolehkan menabrak dinding. Perpindahan panas yang terjadi dari *flame* dan gas hasil pembakaran ke dinding ruang pembakaran atau material yang dipanaskan pertama berlangsung secara radial. Tertutupnya permukaan perpindahan panas oleh kerak dari hasil pembakaran akan menurunkan koefisien perpindahan panas, sehingga menurunkan efisiensi yang mengakibatkan naiknya temperatur gas buang.

Batas kestabilan dinyatakan dengan *turndown ratio* dari *flame*, batas atas daerah stabil ditandai dengan dimulainya daerah *blowoff* dan batas bawah daerah stabil dimulai dengan berakhirnya daerah *flashback* (Sommerer et al., 2000). *Blowoff* yaitu kondisi pencetus *flame* yang terjadi jauh diluar ujung pipa burner sehingga *flame* tidak stabil bahkan mati. *Flashback* terjadi ketika *flame* terjadi tidak pada ujung burner atau *flame* tidak diujung pipa burner sehingga *flame* mengejar sumber gas. Udara berlebih (*excess air*) menjadi salah satu faktor yang harus diperhatikan pada kinerja burner.

3. Metodologi

Penelitian ini meliputi kegiatan perancangan unit gasifikasi, uji coba unit gasifikasi di pabrik teh, pengamatan visual terhadap *flame*, perhitungan-perhitungan neraca massa dan energi, serta karakterisasi burner gas produser. Alur penelitian yang dilakukan disajikan pada Gambar 2.

Unit gasifikasi yang terinstalasi dengan unit pengering pabrik teh di Patuhawatee terdiri dari gasifier, dua buah siklon, *blower* dan burner. Gasifier adalah unggun tetap jenis *downdraft*. Sifat khas dari *downdraft* gasifier ini adalah perbedaan temperatur pada berbagai tempat di dalam gasifier. Gasifier jenis *fixed bed* ini sangat mudah dibuat dan dioperasikan. Gasifier jenis ini cocok untuk pengolahan batubara dengan teknologi tepat guna seperti di pabrik teh Patuhawatee Ciwidey. Sifat penting lain yang dimiliki oleh gasifier adalah kemampuan untuk mengolah batubara dengan kandungan abu dan *moisture* yang tinggi (sekitar 35 % berat abu dan 35 % berat *moisture*). Batubara

ditumpuk di dalam reaktor dan disangga dengan grate.

Gambar 2. Diagram alir penelitian

Sebagai medium penggasifikasi digunakan campuran udara-air. Udara dimasukkan melalui *box* air (distributor) yang terletak pada bagian tengah gasifier, sedangkan air disemprotkan melalui *pocker* bagian atas gasifier dan abu yang dihasilkan dikeluarkan dengan *rotary grade* melalui bagian bawah gasifier. Grate plate dibuat tegak dengan *space* yang lebih lebar dari 1 cm, kaki-kaki unit pendingin dan filter dicelupkan dalam air (kolam).

Konfigurasi gasifier yang digunakan tetap, dengan kapasitas rancangan 120 kg/jam (Kjellstrom, 1985). Variabel proses yang dimanipulasi adalah jenis umpan dalam hal ini batubara, dan limbah kayu (kayu rambutan dan kayu mangga). Umpan masuk secara *batch* 500 - 1000 kg sekali pengisian. Laju proses gasifikasi diatur dengan cara memvariasikan laju alir udara gasifikasi atau laju isapan gas produser. Waktu pengocokan dengan siklus putaran 40-50 menit/1 kali.

Gas produser disuplai ke unit pengering teh melalui pipa. Panjang pipa untuk menyalurkan gas hasil ± 60 meter. Pembakaran gas produser digunakan untuk memanaskan udara pengering teh. Temperatur udara pengering teh diharapkan sudah mencukupi untuk pelayuan teh.

Gambar 3. Unit Gasifikasi untuk pengeringan daun teh

Target uji gasifikasi yang dilakukan berupa waktu pengoperasian 10 jam, kapasitas batubara 120 kg/jam, dan gas produser yang dihasilkan tidak mengandung tar (bersih). Selain itu ditargetkan mampu memanaskan udara pengering teh ($\pm 18000 \text{ ft}^3/\text{menit}$) dengan kisaran suhu 100°C - 120°C .

Uji karakteristik gas produser diwakili dengan pembakaran gas produser burner, dan dilanjutkan dengan perancangan burner yang cocok untuk pembakaran gas produser. Diharapkan dari percobaan pembakaran dapat dilakukan analisis mengenai sifat api. Percobaan pengamatan karakteristik api juga dilakukan di laboratorium.

Sebagai dasar yang digunakan untuk mendesain burner adalah *mixed gas* dengan komposisi gas berturut-turut sebagai berikut (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , dan N_2 adalah 23,53%, 18,35%, 2,17%, 10,77%, 45,18%), sehingga *flame speed* yang dihasilkan adalah 122 cm/s (Weber et al., 1965). Nosel yang digunakan tetap, yaitu pipa $\frac{1}{4}$ in.

Uji burner gas produser dilakukan untuk mengamati karakteristik api yang dihasilkan, percobaan dilakukan dengan membakar *mixed gas*

Gambar 4. Rangkaian uji burner gas produser di Laboratorium

dan LPG. Karakteristik api yang ditinjau, diwakili oleh peta kestabilan api, yang dibuat dengan mengalurkan laju alir volumetrik campuran bahan bakar dan udara terhadap A/F_{rasio} . Bahan yang digunakan adalah LPG dan *mixed gas*. Rangkaian percobaan burner gas produser disajikan pada Gambar 4.

Variabel yang diamati dan diukur pada percobaan ini adalah temperatur pembakaran dan karakteristik *flame* yang meliputi bentuk, warna, dan panjang nyala api atau lebih dikenal dengan kestabilan *flame*, agar tidak terjadi *blowoff* dan *flashback*. Variabel yang divariasikan adalah laju udara/bahan bakar untuk mendapatkan kondisi laju alir udara minimum dan maksimum.

Beberapa aspek diatas tidak dapat dilakukan dengan uji gasifikasi, keterbatasan fasilitas untuk menganalisa komposisi gas produser, untuk mengatasi permasalahan ini dilakukan simulasi atas dasar neraca massa dan energi.

Temperatur udara dan batubara masuk adalah temperatur lingkungan. Kemudian simulasi dilakukan dengan menetapkan temperatur keluaran gasifikasi 850 °C dan variasi gasifier *wall heat loss* 0 dan 10% dan konversi karbon 30 dan 70% (angka ini diambil berdasarkan kondisi di Patuha).

Sebelum melakukan simulasi terlebih dahulu sampel batubara dan kayu dianalisis *ultimate* dan *proximate*, yang dilakukan di tekMIRA/ Pusat Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara. Analisis *ultimate* dan *proximate* ini digunakan untuk input umpan.

Simulasi dilanjutkan dengan perhitungan pembakaran gas produser hasil simulasi gasifikasi. Simulasi proses pembakaran dilakukan dengan variasi *excess air* 0-50% dan *heat loss* burner 0-10% (Susanto, 1983). Temperatur pembakaran hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan kondisi temperatur aktual di lapangan.

4. Hasil dan Diskusi

Bahan baku yang digunakan adalah batubara dan sebagai pembanding digunakan limbah kayu. Komposisi bahan baku yang digunakan dianalisis terlebih dahulu di Pusat Teknologi Mineral dan Batubara, hasil analisa biomassa disajikan pada Tabel 1

Berdasarkan catatan teknis dan penyelesaiannya diperoleh *blower* hembus terlalu besar dan hambatan di sistem pendingin gas cukup besar, sehingga gas produser keluar melalui *water seal pipe* di bawah gasifier. Percobaan kemudian dilakukan dengan memodifikasi *blower* hembus dipindah menjadi *blower hisap* (tanpa *blower* hembus). Pasokan udara hanya melalui *blower hisap*, dengan laju alir rendah 339 m³/jam.

Tabel 1. Hasil analisa umpan

Jenis Umpan	Batubara	Rambutan	Mangga
Analisa Proksimat (dalam fraksi massa, % basis kering)			
Moisture	5,11	11,30	14,71
Fixed carbon	44,83	15,16	14,40
Volatile matter	42,61	71,13	68,50
Abu	7,45	2,41	2,39
Analisa Ultimat (dalam fraksi massa, % basis kering)			
Karbon	67,47	48,76	43,20
Hidrogen	5,57	7,15	6,41
Nitrogen	1,49	0,49	0,22
Sulfur	0,66	0,32	0,22
Oksigen	17,36	40,87	47,56
Abu	7,45	2,41	2,39
Kalor bakar (kcal/kg)	6300	4153	4282
Kalor bakar (MJ/kg)	26,36	17,38	17,92

Grate yang terletak di bagian bawah gasifier tidak berfungsi meloloskan abu, sehingga *pressure drop* meningkat. Penyangga arang bergerak (*grate drive*) diturunkan 2 cm, dengan harapan debu tidak menumpuk dan lebih cepat turun. Laju putaran 1 kali/jam.

Proses gasifikasi juga belum sempurna. Drum filter yang diisi sekam padi 50 cm tersumbat tar, karena tar merupakan bahan bakar, maka tar sebaiknya tetap dijaga dalam bentuk uap dan dibakar di burner. *Grate* yang digunakan hancur/meleleh. Hal ini menunjukkan adanya bara yang turun akibat reaksi reduksi kurang sempurna sehingga gas melewati *grate* pada temperatur tinggi.

Hasil uji coba pengoperasian unit gasifikasi di bengkel Kopo, gas produser terbakar dengan nyala api stabil di *burner* dengan warna api biru sampai kemerahan, tergantung pada jenis batubara yang digunakan. Setelah gas hasil gasifikasi banyak terbakar dengan nyala api stabil pada burner, maka diputuskan untuk menginstalasi unit gasifikasi yang dihubungkan dengan unit pengering teh.

Uji pengoperasian yang dilakukan di *Patuhawattee* terinstalasi dengan unit pengering

Tabel 2. Hasil uji gasifikasi di Patuha

No	Jenis dan jumlah umpan	Waktu pengoperasian	Suhu udara pengering the
1.	batubara 900 kg	8,0 jam	-
2.	batubara 900 kg	4,0 jam	52 °C
3.	batubara 1000 kg	4,0 jam	52 °C
4.	batubara 900 kg	3,5 jam	92 °C
5.	batubara 500 kg	3,5 jam	92 °C
6.	batubara 800 kg	6,0 jam	98 °C
7.	kayu 800 kg	4,0 jam	96 °C
8.	batubara 980 kg	4,0 jam	86 °C
9.	kayu 545 kg	2,5 jam	78 °C
10.	kayu 800 kg	5,0 jam	70 °C

teh. Gas produser dibakar untuk memanaskan udara pengering teh. Hasil uji unit gasifikasi yang telah tersambung dengan unit pengering teh disajikan pada Tabel 2.

Uji pengoperasian dilakukan dengan kondisi operasi dan teknis sebagai berikut. Umpan batubara dimasukkan secara *batch* 500–1000 kg, laju alir udara berkisar 339–396 m³/jam. *Grate plate* dibuat tegak dengan jarak yang lebih lebar dari 1 cm. Waktu pengocokan dengan siklus putaran 40–50 menit/1 kali. Gas produser disuplai pada unit pengering teh dengan panjang pipa gas hasil ± 60 meter dari keluaran *filter*. Setelah dilakukan beberapa kali uji diputuskan untuk tidak memakai filter. Pipa dilapisi dengan isolasi untuk mencegah kondensasi uap tar.

Batubara kalori tinggi memerlukan waktu *start up* sekitar 5–20 menit, sedangkan batubara kalori rendah berkisar 30–40 menit. Batubara yang terletak diatas tenggorokan tidak dapat turun sehingga laju udara gasifikasi menjadi tidak terkendali, laju alir udara gasifikasi bisa mencapai 396–419 m³/jam. Laju alir udara gasifikasi dengan umpan batubara berkisar antara 200–400 m³/jam.

Upaya yang dilakukan untuk meningkatkan kualitas gas hasil dengan menambahkan *blower* (dorong dan hisap), dan memperpanjang tenggorokan (zona reduksi menjadi 74 cm). Perubahan yang dilakukan pada zona reduksi mengakibatkan semakin banyak tar yang menempel disekitar tenggorokan. Untuk menghindari tar, *pocker* diputar selama lima menit

Tabel 3. Progress proses gasifikasi terhadap temperatur ke unit pengering teh dengan umpan batubara

Batubara kalori tinggi (6300 kcal/kg)		
Waktu (menit)	Laju alir udara gasifikasi (m ³ /jam)	Temperatur Udara pengering (°C)
5	343	30
10	241	30
20	229	64
30	213	64
40	304	64
50	349	74
70	353	74
80 ^{a)}	303	74
90	341	86
100	357	86
110	357	88
120	334	88
140	419	89
160	313	89
180	363	89
200	329	90
210	351	89
220	320	88
230	342	88
240	311	86

Keterangan: a) mulai ditambahkan minyak bakar

sekali. Terjadinya kerak atau tar ini diakibatkan temperatur leleh abu melewati temperatur gasifikasi.

Sebagai pembanding digunakan limbah kayu rambutan dan kayu mangga, faktor ketersediaan kayu menjadi alasan dipilihnya kayu sebagai bahan baku. Gasifikasi dengan menggunakan kayu diharapkan akan mengurangi kadar tar yang terbentuk.

Pemanfaatan limbah kayu dilakukan untuk melihat pengaruhnya ke target temperatur udara pengering. Kayu lebih mudah terbakar, sehingga kenaikan temperatur di unit pengering teh diharapkan menjadi lebih cepat. Namun pada kenyataan setelah dilakukan gasifikasi limbah kayu, target temperatur udara di unit pengering teh tetap tidak tercapai. Kayu yang basah dan ukuran kayu yang tidak seragam mengakibatkan kayu hanya terbakar sebagian, akibatnya kayu yang terletak diatas tenggorokan tidak dapat turun ke arah ruang reduksi, sehingga laju udara gasifikasi menjadi tidak terkendali mencapai 400 m³/jam (lihat Tabel 3). Kenaikan temperatur pada unit pengering teh menjadi lambat dan pada akhirnya target temperatur untuk unit pengering daun teh tidak pernah tercapai.

Tabel 4. Progress proses gasifikasi terhadap temperatur ke unit pengering the dengan umpan kayu mangga

Kayu Mangga (4153 kcal/kg)		
Waktu (menit)	Laju alir udara gasifikasi (m ³ /jam)	Temperatur Udara pengering (°C)
5	188	30
15	186	30
25	199	55
35	175	55
45	127	62
55	193	68
65	164	68
75	153	68
85	170	68
95 ^{a)}	304	68
105	163	74
115	150	74
125	142	74
135	173	76
150	150	78
165	242	78
180	183	78

Keterangan: a) mulai ditambahkan minyak bakar

Dari percobaan yang telah dilakukan, ternyata pembakaran gas produser tidak dapat memanaskan udara pengering sampai dengan 102 °C (lihat Gambar 5). Penggunaan batubara dengan kalor bakar tinggi atau kalor bakar rendah, temperatur ke unit pengering teh tetap tidak dapat memenuhi target yang diinginkan (temperatur yang dicapai relatif sama). Begitu pula dengan menggunakan kayu mangga dan kayu rambutan, temperatur yang dicapai juga tidak jauh berbeda.

Tabel 5. Progress proses gasifikasi terhadap temperatur ke unit pengering the dengan umpan kayu rambutan

Kayu Rambutan (4282 kcal/kg)		
Waktu (menit)	Laju alir udara gasifikasi (m ³ /jam)	Temperatur Udara pengering (°C)
5	343	30
10	241	30
20	229	64
30	213	64
50 ^{a)}	304	64
60	349	74
75	319	74
85	353	74
100	303	74
110	341	76
120	357	76
150	357	77
180	334	80
210	419	81
240	313	81
250	363	81
270	329	82

Keterangan: a) mulai ditambahkan minyak bakar

Gambar 5. Progress gasifikasi batubara dan pembakaran gas produser untuk udara pengering the.

a) laju udara gasifikasi

b) temperatur udara pengering teh

Hal ini diakibatkan reaktivitas, kadar air (air yang menempel pada kayu dan batubara), dan ukuran partikel/hidrodinamika partikel (Ghazali, 1985). Pada kayu rambutan, kayu kering dan ukuran partikel dari kayu relatif kecil dan seragam, sementara pada kayu mangga, kayu dalam keadaan basah, dan ukuran partikel cukup besar dan tidak seragam.

Secara umum unit gasifikasi yang telah terinstalasi dengan unit pengering teh telah mampu terbakar dengan nyala api yang stabil selama 6 jam tanpa kesulitan dan menghasilkan gas hasil yang cukup banyak. Namun diduga akibat kapasitas perancangan yang kurang tepat, mengakibatkan target temperatur ke unit pengering teh tidak dapat dicapai. Kapasitas yang diujicoba telah mencapai 120 kg/jam (sudah setara dengan penggunaan minyak bakar 40 L/jam).

Dalam rangka mengetahui pengaruh berbagai faktor terhadap proses gasifikasi, maka dilakukan proses simulasi. Simulasi dilakukan mulai dari tahap pengeringan batubara sampai pada proses gasifikasi. Temperatur batubara dan udara masuk gasifier pada temperatur lingkungan yaitu 25 °C dan 30 °C. Simulasi dilakukan dengan basis perhitungan laju alir umpan 100 kg/jam. Umpan yang digunakan adalah batubara dan limbah kayu (komposisi disajikan di Tabel 1). Variabel-variabel yang divariasikan adalah Q_{loss} , konversi karbon 30% dan 70%. Temperatur gasifikasi ditetapkan 850 °C, dan $heat loss$ melalui dinding gasifier diasumsikan 0 dan 10%. Laju alir udara gasifikasi merupakan variabel tak bebas sebagai hasil perhitungan. Pada simulasi pembakaran gas produser dilakukan pada berbagai kondisi laju alir udara dan $heat loss$.

Sesuai dengan perkiraan, penurunan konversi karbon akan mengakibatkan penurunan kadar CO dan kenaikan kadar H₂. Pengaruh

Tabel 6. Hasil simulasi gasifikasi batubara

Jenis bahan	Batubara kalori tinggi (6300 kcal/kg)		Batubara kalori tinggi (6300 kcal/kg)	
	70		30	
Karbon terkonversi	70		30	
Gasifier heat loss (%)	0	10	0	10
Udara/b. baku (m ³ /kg)	1,77	2,09	1,52	1,99
Gas prod./b. baku (m ³ /kg)	2,65	2,90	2,45	2,73
Komposisi gas (%-mol)				
H ₂ O	3,32	3,83	5,94	6,32
H ₂	22,94	22,02	24,02	21,88
CO	24,13	23,08	20,22	19,05
CH ₄	0,02	0,01	0,05	0,04
N ₂	45,25	46,40	47,34	48,4
H ₂ S	0,02	0,02	0,04	0,03
CO ₂	3,06	3,53	4,01	4,66
LHV (kJ/Nm ³)	5667	5426	5365	4897
Flammability limits (%)	15-72	15-72	15-73	15-72

penurunan konversi karbon terhadap komposisi gas produser lebih terlihat pada kayu jika dibandingkan dengan batubara, mengingat kandungan *volatile matter*-nya lebih tinggi (lihat Tabel 6 dan Tabel 7). Pada kenyataannya, jenis bahan bakar yang berbeda akan menghasilkan karakteristik pembakaran gas produser yang berbeda pula.

Tabel 7. Hasil simulasi gasifikasi kayu

Jenis bahan	kayu rambutan (4282 kcal/kg)		Kayu rambutan (4282 kcal/kg)	
Karbon terkonversi	70		30	
Gasifier heat loss (%)	0	10	0	10
Udara/b. baku (m ³ /kg)	1,23	1,43	1,23	1,99
Gas prod./b. baku (m ³ /kg)	2,41	2,64	2,41	2,73
Komposisi gas (%-mol)				
H ₂ O	7,25	7,90	7,25	6,32
H ₂	15,12	13,69	15,12	21,88
CO	16,89	15,36	16,89	19,05
CH ₄	-	-	-	0,04
N ₂	53,25	54,87	53,25	48,4
H ₂ S	0,06	0,06	0,06	0,03
CO ₂	7,43	8,12	7,43	4,66
LHV (kJ/Nm ³)	3858	3502	3858	4897
Flammability limits (%)	16-72	17-72	16-72	15-72

Nilai LHV menurun seiring dengan naiknya perbandingan udara/bahan baku, karena semakin besar perbandingan udara/bahan baku semakin banyak batubara dan gas produser yang terbakar. Nilai LHV juga menjadi lebih rendah seiring dengan naiknya Q_{loss} , hal ini mungkin akibat panas yang lolos lewat dinding gasifier terkonsumsi menjadi H₂O.

Adanya peningkatan kadar H₂O akan menurunkan nilai LHV, karena H₂O selain menurunkan temperatur operasi juga mengkonsumsi CO untuk menghasilkan CO₂ dan H₂ yang memiliki kalor bakar yang lebih rendah daripada CO. Mengacu pada kondisi nyata dilapangan, dengan menggunakan umpan batubara, api yang diperoleh hasil pembakaran batubara cukup stabil, sedangkan limbah kayu, yang terbakar dengan nyala api yang cukup stabil hanya limbah kayu rambutan saja, sedangkan limbah kayu mangga tidak dapat terbakar dengan api stabil. Hal ini bila dikaitkan dengan nilai LHV, batubara mempunyai nilai LHV berkisar 4800-5600 kJ/Nm³, sedangkan limbah kayu berkisar antara 2900-3700 kJ/Nm³, pengalaman dari eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya oleh Tim ITB menunjukkan bahwa gas produser dengan panas pembakaran di bawah 3500 kJ/Nm³ cukup sulit terbakar dengan nyala api stabil (Susanto, 1985).

Nilai *flammability limits* juga dipengaruhi komposisi gas produser, terutama senyawa-senyawa yang *flammable* seperti CO, H₂, dan CH₄. Secara umum nilai *flammability limits* dari gasifikasi batubara maupun gasifikasi limbah kayu tidak jauh berbeda, karena komposisi yang dihasilkan tidak jauh berbeda (lihat Tabel 6 dan Tabel 7). Batubara, baik yang berkalori tinggi maupun yang berkalori rendah berkisar antara 15-73%. Sedangkan limbah kayu, baik kayu mangga maupun kayu rambutan mempunyai rentang *flammability limits* berkisar antara 16-72%, adanya unsur H₂ akan meningkatkan nilai *flame speed* (Sommerer et al., 2004), akan tetapi hal ini dikompensasi dengan *flammability limits* yang makin sempit, artinya kenaikan komposisi H₂ akan menurunkan rentang terbakar dari gas produser, namun karena komposisi H₂ relatif tidak berubah maka *flammability limits* juga tidak jauh berbeda.

Gambar 6. Temperatur pembakaran pada berbagai kondisi gasifier heat loss (a) dan burner heat loss (b)

Simulasi lain yang dilakukan adalah simulasi gas bakar (dengan mengasumsikan komposisi gas adalah keluaran gas produser di gasifier) dengan udara untuk mengetahui temperatur keluaran burner, dengan cara memvariasikan *excess air* (0, 20, 50%) dan *heat loss* (0 dan 10%). Pada proses-proses dengan temperatur tinggi seperti proses gasifikasi, panas yang hilang melalui dinding gasifier dan panas yang hilang akibat pembakaran burner, merupakan sebuah parameter yang harus diperhatikan, dan secara teknis hal ini berkaitan dengan masalah isolasi. Nilai-nilai *heat loss* yang ditetapkan adalah nilai yang lazim digunakan di industri. Hasil simulasi temperatur keluaran burner dapat dilihat pada Gambar 6.

Sesuai perkiraan peningkatan Q_{loss} akan menurunkan temperatur gasifier sehingga konversi reaksi endoterm akan menurun, reaksi pembentukan CO merupakan reaksi endoterm. CO yang terkonversi menjadi H_2 dan CO_2 , merupakan pemasok panas dalam proses gasifikasi. Pensuplaian udara berlebih dimaksudkan untuk menjaga kesempurnaan reaksi, namun pensuplaian udara berlebih juga akan mengakibatkan penurunan temperatur api.

Gambar 7 mewakili peta kestabilan api dari pembakaran *mixed gas*. Rentang *flammability limits* (A/F *upper* dan *lower limit*). Adanya senyawa CO dan H_2 akan menyebabkan rentang pembakaran menjadi jauh lebih sempit akan tetapi *flame speed* yang dihasilkan menjadi jauh lebih besar. *Flame speed* dari semua hidrokarbon seperti propana dan butana relatif sama, namun *flame speed* dari hidrokarbon jauh lebih rendah daripada *flame speed* gas produser, hal ini diakibatkan hidrokarbon lebih cepat terpirolisis menjadi partikel yang lebih kecil sebelum reaksi pembakaran terjadi.

Secara umum hasil percobaan yang diperoleh masih berada pada daerah rentang terbakar, rentang pembakaran *mixed gas* berada pada 0,71-6,90 (lihat Gambar 7a). Ada beberapa nilai yang berada di atas A/F *upper limit*, namun api tetap terbakar, hal ini dimungkinkan dengan adanya fenomena api difusi, dimana api tetap terbakar pada kondisi kaya bahan bakar. Sedangkan diluar rentang A/F *lower limit* tidak ada nilai yang menyimpang karena bahan bakar tidak mungkin terbakar dengan udara yang terlalu banyak, karena api tidak akan pernah menyala.

Kecepatan rambat api dari *mixed gas* adalah 2,25 m/s. Adanya unsur H_2 mengakibatkan meningkatnya nilai *flame speed*. H_2 mempunyai diffusivitas termal dan diffusivitas massa yang jauh lebih besar jika dibandingkan dengan hidrokarbon (LPG tersusun atas komponen propan

Gambar 7. Karakteristik pembakaran *mixed gas*. Fenomena *lifted* dan *blowoff* (a) dan Burner load (b)

dan butan). Indikator kinerja proses gasifikasi adalah komposisi gas H_2 . Gas H_2 merupakan bahan bakar yang memberi stabilitas *flame* pada pembakaran burner. Burner load untuk pembakaran *mixed gas* berkisar agar tercapainya kestabilan api berkisar antara 1800-7800 kJ/s m².

Hasil perhitungan *heat load* burner adalah 1200000 kJ/jam. Atas dasar nilai *heat load* hasil percobaan ini, burner gas produser untuk pembakaran menggantikan minyak bakar seharusnya dibuat dengan diameter 19 cm, sedangkan burner yang terlebih dahulu diinstalasi di unit pengering memiliki diameter 12 cm. Jadi tidak tercapainya temperatur udara pengering 102 °C mungkin disebabkan oleh rendahnya kapasitas burner. Pada pembakaran gas produser di burner ternyata menghasilkan api biru pucat yang mungkin disebabkan oleh rendahnya kalor bakar dan tingginya udara berlebih.

Proses gasifikasi batubara memberi temperatur di dalam gasifier terlalu tinggi yang dapat mengakibatkan rusaknya *grate*. Proses

gasifikasi sebaiknya disertai pemasukan air yang berfungsi sebagai pendingin dan sekaligus sebagai sumber hidrogen.

Api pembakaran *mixed gas* (gas yang komposisinya mirip dengan gas produser) dapat dijaga stabil pada kecepatan linier campuran udara-gas 1,5-2,4 m/s dan dengan rentang *air to fuel ratio* 0,71– 6,90 mol/mol. Berdasarkan beban spesifik burner hasil perhitungan (12000000 kJ/jam), bahwasanya diameter burner yang harus dipasang di unit pengering teh adalah 19 cm (burner sebelumnya memiliki diameter 12 cm).

5. Kesimpulan

Unit gasifikasi telah terpasang di pabrik teh di Patuha dan ujicobanya telah memberi hasil-hasil yang mendorong pada implementasi lebih lanjut. Walaupun demikian, masih ada hal yang perlu diperbaiki, antara lain adalah target temperatur untuk pengering teh minimal 102 °C belum dapat dicapai dengan pembakaran gas produser saja, akibat dari kapasitas reaktor kurang besar atau jarak pipa dari unit gasifikasi ke unit pengering teh terlalu jauh (60 m).

Untuk memperbesar kapasitas gasifier modifikasi yang dilakukan adalah memanjangkan daerah reduksi dari 50 cm menjadi 70 cm dan melebarkan daerah reduksi 40 cm menjadi 55 cm. Kedua upaya ini ternyata belum memberi hasil yang memuaskan. Kemungkinan besar, diameter daerah oksidasi perlu ditambah. Selama pengoperasian unit gasifikasi ini, kualitas batubara tidak pernah terjamin. Kendala-kendala yang pernah dihadapi antara lain adalah batubara mengandung tanah dan titik lelehnya relatif rendah, batubara mudah pecah ketika mengalami proses di dalam gasifier sehingga menimbulkan *pressure drop* tinggi. Akibat ketidakseragaman kualitas batubara tersebut kinerja proses gasifikasi belum dapat disimpulkan dengan baik.

Simulasi proses gasifikasi batubara menunjukkan bahwa konversi karbon mempengaruhi jumlah gas produser, tetapi tidak terlalu banyak mempengaruhi komposisi dan panas pembentukan gas produser. Jika konversi karbon 100%, panas pembakaran sekitar 5650 kJ/Nm³. Sedangkan pada konversi karbon 30%, panas pembakaran gas produser kira-kira 5420 kJ/Nm³. Simulasi proses gasifikasi kayu menunjukkan bahwa konversi karbon sangat mempengaruhi jumlah dan panas pembakaran gas produser.

Jumlah dan panas pembakaran gas produser juga dipengaruhi oleh gasifier *heat loss*, tetapi dari sisi lain, pengisolasian gasifier untuk mengurangi *heat loss* dapat mengakibatkan temperatur gasifikasi terlalu tinggi yang dapat merusak gasifier. *Flammability limits* 15–72%

(untuk semua bahan bakar gasifikasi). *Gasifier heat loss* 10% mempengaruhi LHV gas, tetapi sedikit saja (<10%). Konversi karbon tidak mempengaruhi komposisi gas produser, tetapi mempengaruhi jumlah gas produser.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Ir. Suwito Gunadarma, Suhartono ST, MSc., Sunu Pranolo ST, MSc., atas kerjasamanya selama penelitian.

Daftar Pustaka

- [1.] G. Kolios, J. Frauhammer, G. Eigebenger, (2000), "Autothermal Fixed-Bed Reactor Concept", *Chemical Engineering Science*, 55, hal. 5935-5967
- [2.] Susanto, H., (2005), "Pengujian PLTD-Gasifikasi Sekam 100 KW di Haur Geulis, Indramayu", ITB
- [3.] Groeneveld, M.J., (1980), "The Co-current Moving Bed Gasifier", *Doctor Dissertation*, TH Twente
- [4.] Kjellstrom, B., (1985), "Practical Design of Producer Gas Systems", *lecture note at the Producer Gas Course*, Bandung
- [5.] Susanto, H., (1984), "Moving Bed Gasifier with Internal Recycle and Separate Combustion of Pyrolysis Gas", *Doctor Dissertation*, ITB
- [6.] Susanto, H., (2005), "Field Experiences on The Operation of Biomass Gasification System for Rural Electricity", ITB
- [7.] Ghazali, 3, D. Sasongko, dan Sudarno H., (1985), "Experiences in Using Rubber tree Wood as Feed stocks for Producer Gas Generator", *the Second Int. Producer Gas Conference*, Bandung
- [8.] M.J. Groeneveld, (1980), "The Moving Bed Gasifier", *PhD Thesis*, TH Twente
- [9.] Suhartono, Suwito, dan Susanto, H., (2005/2006), "Field Experiences on The Operation of Fixed Bed Gasifier for Tea drying Systems", Bandung
- [10.] Sommerer, G., W. Galley, dan J. Poinso, (2004), "Experimental Study of Flashback and Blowoff in a Lean Partially Premixed Swirled Burner", Elsevier Science, Paris
- [11.] Weber, E.J., Vandaveer, (1965), *Gas Burner Design-Gas Engineers Handbook*, Industrial Press, hal. 12/193-12/210, New York