

Konversi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat: Modifikasi Sistem Torefaksi Kontinu Unggun Terfluidisasi untuk Mengakomodasi Karakteristik Sampah

Toto Hardianto¹, Aryadi Suwono¹, Ari Darmawan Pasek¹, Amrul²

¹Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, Bandung

²Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung

Jl. Ganesha no. 10 Bandung 40132 Telp/fax: (022) 250 23 42

Email: toto@termo.pauir.itb.ac.id

Abstrak

Teknologi konversi sampah kota yang sedang dikembangkan saat ini adalah memanfaatkan sampah menjadi bahan bakar padat melalui proses torefaksi. Proses torefaksi sampah yang sudah dilakukan menggunakan jenis reaktor batch, sementara untuk kebutuhan produksi skala industri mengharuskan proses berlangsung secara kontinu. Salah satu jenis reaktor kontinu yang diunggulkan untuk torefaksi sampah adalah jenis unggun terfluidisasi.

Penggunaan peralatan torefaksi kontinu skala lab untuk proses torefaksi sampah, yang sebelumnya dirancang untuk bahan baku gambut, memerlukan beberapa modifikasi. Peralatan torefaksi kontinu ini terdiri dari komponen utama berupa sistem pengering unggun terfluidisasi dan sistem torefaksi unggun terfluidisasi. Modifikasi sistem diperlukan karena sifat sampah dan gambut berbeda cukup signifikan, khususnya dalam hal kehomogenan dan sifat-sifat hidrodinamika unggun terfluidisasi. Modifikasi dilakukan terhadap kedua komponen utama sistem, yakni sistem pengering dan sistem torefaksi. Modifikasi utama pada sistem pengering dilakukan terhadap saluran penukar panas untuk meningkatkan kecepatan superfisial udara pengering sehingga mampu memfluidisasi sampah basah, sedangkan modifikasi utama pada sistem torefaksi meliputi perubahan posisi pelat distributor dan pemanas-dalam (internal heater) serta by-pass saluran sirkulasi gas torefaksi untuk menaikkan kecepatan superfisialnya sehingga mampu memfluidisasi sampah kering.

Kecepatan superfisial udara pengering dan gas torefaksi dihitung berdasarkan sifat-sifat hidrodinamika masing-masing unggun. Hasil modifikasi menunjukkan bahwa proses torefaksi sampah menggunakan sistem kontinu unggun terfluidisasi memungkinkan untuk dilakukan.

Kata kunci: sampah kota, torefaksi kontinu, unggun terfluidisasi, modifikasi, bahan bakar padat

Pendahuluan

Energi primer dunia saat ini masih didominasi oleh minyak bumi, batubara, gas alam, nuklir, dan hidroelektrik [1]. Tiga urutan terbesar dari energi primer tersebut berupa bahan bakar fosil yang suatu saat akan habis akan habis. Di Indonesia, keadaannya lebih parah lagi karena penggunaan energi nuklir belum ada, sedangkan hidroelektrik porsinya kecil, sehingga praktis hanya bertumpu pada minyak bumi, gas alam, dan batubara. Meningkatnya populasi penduduk dan semakin besarnya konsumsi energi per kapita menyebabkan sumber energi tersebut semakin cepat menipis dan harganya juga semakin tinggi. Untuk menjamin keamanan pasokan energi nasional di masa depan, perlu kiranya segera mencari sumber energi baru sebagai energi alternatif yang bersifat

terbarukan, sebagaimana juga tertuang dalam sasaran bauran energi (*energy mix*) nasional 2025.

Sumber energi alternatif yang cukup menjanjikan dan potensinya paling besar di dunia adalah biomassa [2]. Salah satu sumber biomassa yang belum banyak mendapat perhatian adalah biomassa yang berasal dari sampah kota.

Sampah yang selama ini lebih dikenal sebagai sumber permasalahan di kota-kota besar di Indonesia berpotensi untuk diolah menjadi sumber energi alternatif yang ramah lingkungan. Timbulan sampah kota di beberapa kota besar di Indonesia cukup besar, misalnya kota Bandung, timbulan sampahnya mencapai 1700 ton per hari, dimana sekitar 60 persen dari sampah tersebut merupakan komponen yang berasal dari biomassa [3]. Namun dalam aplikasinya,

pemanfaatan sampah secara langsung sebagai bahan bakar mempunyai banyak kendala, baik secara teknis maupun non-teknis. Kendala teknis di antaranya adalah kandungan air yang tinggi, densitas energi yang rendah serta komponen yang heterogen dan bentuk yang beragam. Sedangkan kendala non-teknis adalah berupa

bau busuk dan potensi sumber bibit penyakit. Berbagai kendala tersebut menyebabkan sampah kurang layak digunakan sebagai bahan bakar. Sebaliknya, jika dalam pengelolaan sampah diterapkan teknologi yang tepat maka akan didapatkan dua keuntungan sekaligus, yakni berkurangnya jumlah sampah secara signifikan dan dihasilkannya bahan bakar alternatif dari sampah.

Penelitian yang dilakukan oleh tim ini di lab Termodinamika secara terus menerus telah menghasilkan bahan bakar padat yang berasal dari sampah melalui proses torefaksi reaktor *batch* skala lab. Hasilnya adalah bahan bakar padat dengan kualitas setara dengan batubara subbituminous bernilai kalor (HHV) 4.900-6.800 kkal/kg [4].

Tim peneliti juga telah mengembangkan model pabrik torefaksi sampah kontinu skala industri kecil untuk mengamati neraca energi sistem dengan bantuan perangkat lunak AspenTM. Kajian pada sistem kontinu ini penting sebagai tahap untuk pengembangan sistem torefaksi menuju skala industri. Industri proses umumnya menggunakan sistem kontinu untuk produksi skala besar karena memiliki beberapa keunggulan dibandingkan reaktor *batch*. Keunggulan ini di antaranya adalah kemampuan sistem kontinu untuk mendukung laju produksi yang tinggi dan pengontrolan proses yang lebih mudah untuk mendapatkan keseragaman produk karena proses berlangsung pada kondisi *steady-state*.

Pada pemodelan tersebut, jumlah produksi bahan bakar bergantung pada jumlah kandungan air yang terdapat dalam sampah umpam ketika masuk reaktor pengering. Parameter yang divariasikan dalam simulasi ini adalah kandungan air sampah umpam, yakni dari 50-80 % dengan selang 5 %. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa kesetimbangan energi sistem, yakni kemampuan sistem untuk memproduksi bahan bakar padat yang mana energinya mampu memenuhi kebutuhan energi proses, diperoleh pada kandungan air sampah 75% [5].

Dari model pabrik torefaksi sampah kontinu yang dikembangkan tersebut, tim peneliti juga melakukan analisis dasar kelayakan ekonomi pabrik berupa simulasi finansial. Hasil simulasi finansial

menunjukkan bahwa pembangunan pabrik torefaksi sampah skala industri kecil layak dilakukan [6].

Untuk menindaklanjuti hasil pengujian torefaksi reaktor *batch*, sebelum melangkah ke pengujian skala pilot, perlu dilakukan pengujian torefaksi sampah kota pada sistem kontinu. Peralatan yang akan digunakan untuk pengujian torefaksi sampah pada sistem kontinu adalah peralatan yang sudah ada, yang sebelumnya digunakan

untuk gambut. Namun sebelum peralatan ini dapat digunakan untuk bahan baku sampah kota, perlu dilakukan modifikasi terhadap sistem supaya bisa mengakomodasi karakteristik sampah. Modifikasi yang dilakukan cukup mendasar, mengingat perbedaan karakteristik sampah kota dan gambut cukup signifikan.

Deskripsi Global Sistem Torefaksi Sampah Kontinu Skala Lab

Skema peralatan torefaksi sampah kontinu yang akan digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 1. Sistem torefaksi ini terdiri dari dua komponen utama yakni unggun pengering dan unggun torefaksi. Sampah yang telah dicacah dengan ukuran tertentu dimasukkan ke dalam reaktor pengering. Sampah yang telah kering (kadar air sekitar 30-40%) selanjutnya masuk ke reaktor torefaksi, yang menggunakan media *inert* berupa uap air hasil penguapan proses torefaksi itu sendiri. Sumber panas utama sistem torefaksi kontinu ini adalah uap panas lanjut yang disuplai dari sebuah boiler.

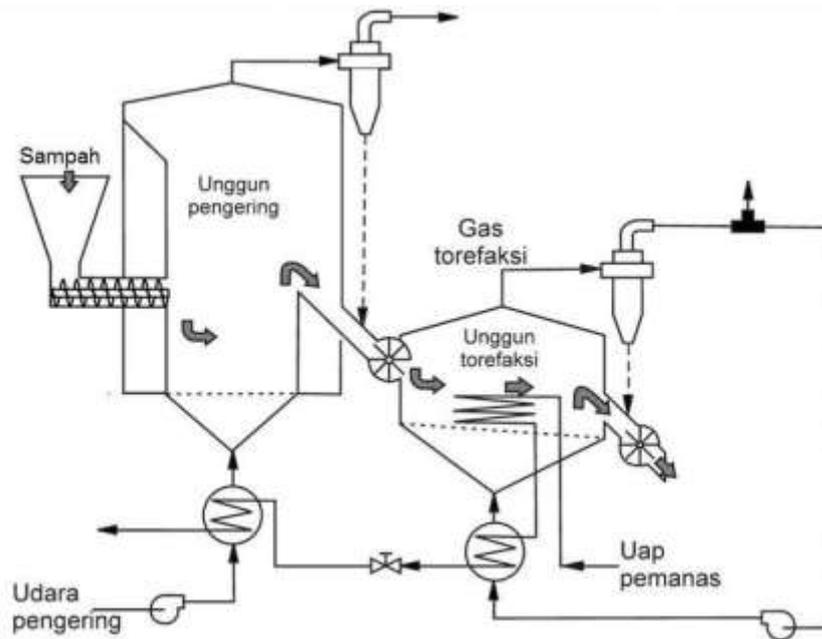
Proses pengeringan pada peralatan torefaksi kontinu ini menggunakan sistem unggun terfluidisasi (*fluidized-bed*) dengan metode beda kecepatan terminal. Fluida pengering menggunakan udara yang sebelumnya telah dipanaskan. Pada kecepatan terminalnya, sampah basah yang telah kering dengan kandungan air tertentu akan terbawa aliran udara dan diteruskan ke reaktor torefaksi.

Proses torefaksi menggunakan unggun terfluidisasi metode aliran silang. Sampah dari ruang pengering masuk ke reaktor torefaksi melalui sebuah katup putar berupa poros bersirip (*rotary-valve*) dengan rumah berbentuk silinder. Katup ini memungkinkan sampah masuk ke dalam reaktor, sementara udara pengering tetap tertahan. Katup putar juga dipasang pada bagian sisi keluar sampah di reaktor torefaksi. Pada proses torefaksi, sampah akan mengeluarkan uap dan gas-gas torefaksi. Uap dan gas panas ini disirkulasikan kembali ke ruang torefaksi karena berfungsi sebagai media torefaksi.

Sampah yang masuk melalui katup putar akan jatuh pada pelat distributor yang mempunyai kemiringan tertentu terhadap bidang horizontal. Unggun torefaksi bekerja dengan kecepatan superfisial gas sedikit di atas kecepatan fluidisasi minimum. Dengan demikian, bila gas medium sudah dialirkan, partikel sampah

akan terangkat sedikit di atas pelat distributor dalam arah miring, sesuai dengan arah aliran gas. Bila partikel jatuh kembali pada pelat distributor, partikel tersebut

akan tergeser ke arah sisi keluar. Demikian seterusnya sampai partikel tersebut mencapai sisi keluar.



Gambar 1. Skema sistem torefaksi kontinu skala lab [7].

Identifikasi Parameter Hidrodinamika Unggun Terfluidisasi Sampah

Langkah awal sebelum memodifikasi sistem adalah melakukan identifikasi parameter hidrodinamika unggun terfluidisasi untuk pengeringan dan torefaksi. Parameter hidrodinamika ini menjadi acuan dalam modifikasi untuk mendapatkan parameter utama sistem yang sesuai untuk sampah. Parameter utama sistem yang ingin diperoleh melalui modifikasi ini adalah kecepatan superfisial gas pada unggun pengering dan unggun torefaksi.

Pada proses pengeringan dengan metode beda kecepatan terminal, kecepatan superfisial udara pengering pada pelat distributor harus lebih rendah dari kecepatan terminal (U_t) sampah basah, supaya sampah basah tersebut tidak terbang sebelum mengalami pengeringan, dan harus lebih tinggi dari kecepatan terminal sampah kering, supaya sampah yang sudah kering bisa terbawa aliran udara dan masuk ke reaktor torefaksi. Parameter hidrodinamika masing-masing komponen sampah diberikan pada Tabel 1.

Kecepatan fluidisasi minimum (U_{mf}) komponen sampah adalah antara 0,42 – 0,97 m/s. Kecepatan

terminal sampah basah berada pada rentang 5,20 – 6,52 m/s, sedangkan kecepatan terminal sampah kering adalah antara 3,13 – 3,91 m/s, kecuali untuk komponen daun. Pada kondisi sebelum modifikasi, kecepatan superfisial udara unggun pengering pada pelat distributor adalah 2,87 m/s. Kecepatan operasional ini cukup untuk memfluidisasi semua komponen sampah, tetapi tidak cukup kuat untuk menerbangkan sampah yang sudah kering karena berada di bawah kecepatan terminalnya, kecuali daun. Untuk itu, supaya proses pengeringan dengan metode beda kecepatan terminal ini bisa berjalan, sistem torefaksi kontinu ini harus dimodifikasi untuk mendapatkan kecepatan operasional pengeringan (kecepatan superfisial udara pada pelat distributor) antara 3,91 dan 5,20 m/s.

Temperatur udara pengering yang dibutuhkan adalah 80°C, sama dengan temperatur yang digunakan pada pengeringan gambut. Modifikasi saluran alat penukar panas untuk meningkatkan kecepatan udara akan mempengaruhi temperatur udara pengering.

Pada unggun torefaksi, kecepatan superfisial gas bekerja sedikit di atas kecepatan fluidisasi minimum unggun, yakni di atas 1,54 m/s, yang merupakan kecepatan fluidisasi minimum tertinggi dari komponen

sampah (ranting kayu), seperti terlihat pada Tabel 2. Pada kondisi sebelum modifikasi, kecepatan superficial gas unggun torefaksi pada pelat distributor adalah 0,18 m/s. Kecepatan superficial gas ini tidak cukup untuk memfluidisasi sampah, sehingga diperlukan modifikasi.

Temperatur desain torefaksi sampah adalah 285°C, lebih rendah dari temperatur spesifikasi alat sebelum modifikasi yang digunakan untuk gambut, yakni

300°C. Waktu tinggal yang diperlukan untuk proses pengeringan dan torefaksi sampah ini adalah sekitar 25 menit.

Di samping untuk mendapatkan parameter utama di atas, modifikasi juga diperlukan untuk mendukung sistem supaya dapat berjalan dengan baik. Untuk itu, modifikasi juga dilakukan pada sistem pengumpanan, pelat distributor dan pemanas-dalam, serta sistem penggerak katup putar.

Tabel 1. Parameter hidrodinamika unggun terfluidisasi pengering.

Komponen	ψ	ε	d_p (cm)	ρ (kg/m ³)	ρ_p (kg/m ³)		ε_{mf}	U_{mf} (m/s)	U_t (m/s)	
					Basah	Kering			Basah	Kering
Ranting kayu	0,83	0,40	0,60	267	445	240	0,44	0,97	5,20	3,91
Daun	0,30	0,80	0,14	35	175	123	0,80	0,42	0,59	0,49
Kulit jeruk	0,73	0,51	0,67	300	612	165	0,51	1,40	5,34	3,45
Kulit pisang	0,73	0,43	0,67	500	877	211	0,46	1,44	6,52	3,43
Nasi	0,93	0,35	0,23	500	769	292	0,43	0,80	5,28	3,13

Tabel 2. Parameter hidrodinamika unggun terfluidisasi torefaksi.

Komponen	ψ	ε	d_p (cm)	ρ (kg/m ³)	ρ_p (kg/m ³)		ε_{mf}	U_{mf} (m/s)
					Kering	Torefaksi		
Ranting kayu	0.83	0.47	0.60	206.00	388.68	155.47	0.44	1.54
Daun	0.30	0.80	0.14	35.00	175.00	122.50	0.80	0.72
Kulit jeruk	0.43	0.69	0.25	150.00	483.87	130.65	0.51	1.00
Kulit pisang	0.43	0.69	0.25	107.00	345.16	82.84	0.55	0.94
Nasi	0.93	0.35	0.23	300.00	461.54	253.85	0.43	1.05

Modifikasi Sistem

Modifikasi yang akan dilakukan pada sistem torefaksi kontinu ini meliputi sistem pengumpanan, saluran penukar panas udara pengering, pemanas-dalam dan pelat distributor pada reaktor torefaksi, penambahan pemanas listrik, saluran gas torefaksi, dan sistem penggerak katup putar.

- *Sistem pengumpanan*



Gambar 2. Posisi *hopper* pada sistem pengumpanan setelah dimodifikasi.

Sampah umpan dimasukkan ke reaktor pengering menggunakan mekanisme *screw-conveyor*. Sebelum dimasukkan ke pengering sampah dicacah untuk mendapatkan ukuran tertentu dan bentuk yang relatif seragam. Meskipun demikian, ukuran dan sifat partikel sampah tidak sama dengan gambut. Partikel sampah ukurannya lebih kasar dari gambut dan juga tidak seragam, karena sampah terdiri dari berbagai komponen. Di samping itu, densitas sampah juga lebih rendah dari gambut. Oleh karena itu, untuk memudahkan pengumpanan, panjang *screw-conveyor* dikurangi hingga setengah dari panjang awal dengan cara memindahkan posisi *hopper* lebih dekat ke dinding reaktor pengering, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.

Saluran penukar panas udara pengering

Proses pengeringan menggunakan sistem unggun terfluidisasi dengan prinsip beda kecepatan terminal. Fluida pengering yang digunakan adalah udara, yang sebelumnya telah dipanaskan melalui sebuah alat penukar panas.

Pada kecepatan supersial tertentu, sampah basah mengalami pengeringan dalam bentuk unggun terfluidisasi. Sampah kering akan berkurang beratnya, sehingga pada kecepatan superfisial tertentu (kecepatan terminal sampah kering) sampah tersebut akan terbawa aliran udara untuk diteruskan ke reaktor torefaksi.

Perbedaan karakteristik gambut dan sampah kota menyebabkan parameter-parameter pengeringan pada alat tersebut, yang sebelumnya dirancang berdasarkan sifat-sifat hidrodinamika unggun terfluidisasi gambut, tidak bisa diterapkan secara langsung untuk sampah. Perbedaan sifat hidrodinamika ini mensyaratkan kecepatan superfisial udara untuk menfluidisasi sampah harus lebih besar daripada gambut. Untuk mendapatkan kecepatan superfisial udara yang lebih besar, maka dilakukan modifikasi terhadap sistem penukar panas udara pengering.

Udara pengering dipanaskan oleh uap yang keluar dari reaktor torefaksi melalui sebuah alat penukar panas aliran silang jenis pipa bersirip (radiator). Alat penukar panas ini sebelumnya terdiri dari tiga laluan, kemudian dimodifikasi menjadi satu laluan, sehingga hambatan udaranya menjadi lebih kecil. Dengan berkurangnya hambatan ini, kecepatan superfisial udara menjadi lebih tinggi sehingga mampu memfluidisasi sampah pada reaktor pengering. Hasil modifikasi saluran sistem penukar panas udara pengering ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar 3. Saluran sistem penukar panas udara pengering setelah dimodifikasi.

Pemanas-dalam (internal heater) dan pelat distributor pada reaktor torefaksi

Pemanas-dalam yang digunakan adalah berupa pipa-pipa besi dengan konstruksi sedemikian rupa berisikan uap yang berasal dari boiler, sebagai sumber

pemanas utama sistem. Posisi pemanas-dalam sebelumnya terletak dalam ruang reaktor torefaksi, di atas pelat distributor. Tujuan pemanas-dalam adalah untuk meningkatkan laju perpindahan panas pada partikel bahan baku, yang sebelumnya digunakan gambut. Posisi dan konstruksi pemanas-dalam ini dapat digunakan dengan baik untuk gambut. Akan tetapi ketika bahan baku diganti dengan sampah, posisi dan konstruksi pemanas-dalam ini menjadi kendala. Geometri partikel sampah yang lebih kasar daripada gambut dan jenisnya yang heterogen membuat aliran sampah tertahan oleh pemanas-dalam.

Untuk mengatasi persoalan ini dilakukan modifikasi terhadap posisi pemanas-dalam. Di bagian atas pemanas dalam ditambahkan pelat distributor yang baru sehingga partikel sampah dapat mengalir tanpa penghalang, seperti ditunjukkan oleh Gambar 4. Kemiringan pelat distributor yang sebelumnya tetap, sekarang dibuat fleksibel sehingga bisa diatur. Dengan posisi yang baru ini, alat penukar panas yang sebelumnya berfungsi sebagai pemanas-dalam sekarang berfungsi sebagai pemanas-mula (*pre-heater*), sehingga laju perpindahan panas ke bahan baku menjadi berkurang.



Gambar 4. Posisi pelat distributor dan pemanas listrik pada unggun torefaksi setelah dimodifikasi.

Penambahan pemanas listrik pada reaktor torefaksi

Berubahnya posisi pemanas-dalam menjadi pemanas-mula membuat suplai panas ke ruang torefaksi berkurang. Supaya suplai panas tetap mencukupi untuk mencapai temperatur torefaksi yang diinginkan, maka sebagai ganti pemanas-dalam dipasang dua buah pemanas listrik tipe “U” berukuran 2 x 1 kW. Pemanas listrik ini dikontrol secara otomatis, jika temperatur yang diinginkan tercapai, pemanas ini mati dengan sendirinya. Gambar instalasi pemanas listrik dapat dilihat pada Gambar 4.

Saluran gas torefaksi

Seperti halnya pada sistem pengering, sifat hidrodinamika unggun terfluidisasi sampah yang berbeda dari gambut membuat kebutuhan laju aliran gas untuk fluidisasi sampah pada unggun torefaksi menjadi lebih besar. Untuk mengatasi hal ini dilakukan modifikasi terhadap saluran gas torefaksi. Pada saluran gas torefaksi sebelumnya dipasang sebuah siklon untuk memisahkan partikel sampah yang terbawa aliran gas. Untuk keperluan torefaksi sampah ini, siklon tersebut dibuang untuk mengurangi hambatan gas, dan sebagai gantinya dipasang sebuah penyaring (*filter*). Berkurangnya hambatan ini menyebabkan kecepatan superfisial gas meningkat sehingga diharapkan cukup untuk terjadinya fluidisasi minimum, sesuai dengan rancangan proses. Instalasi saluran gas torefaksi hasil modifikasi ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Instalasi saluran gas torefaksi hasil modifikasi.

Sistem penggerak katup putar

Ukuran partikel sampah lebih besar dari gambut. Perbedaan sifat sampah dan gambut ini membuat ia sulit keluar dari katup putar, baik pada sisi masuk maupun sisi keluar ruang torefaksi. Beberapa komponen sampah juga bersifat lengket dan saling kait sehingga sebagian komponen sampah tersebut tersangkut di celah udara (*clerance*), yang pada akhirnya membuat katup putar macet (*blocked*).



Gambar 6. Transmisi penggerak katup putar yang diganti dengan rantai dan sproket.

Sistem transmisi penggerak katup putar yang sebelumnya menggunakan sabuk dan *pulley* tidak cukup kuat untuk penggunaan bahan baku sampah. Untuk itu dibutuhkan sistem penggerak yang bisa mentransmisi daya lebih kuat. Dalam modifikasi ini, sistem penggerak katup putar diganti dengan rantai dan *sproket*, seperti ditunjukkan oleh Gambar 6.

Hasil dan Pembahasan

Modifikasi pada sistem pengumpanan dengan cara memperpendek *screw-conveyor* hingga setengah dari panjang awal dapat memperlancar aliran sampah bahan baku dari *hopper* ke reaktor pengering. Hal ini dilakukan karena densitas curah sampah yang lebih kecil dari gambut membuatnya lebih sulit mengalir pada sistem transpor jenis *screw-conveyor*.

Modifikasi pada saluran udara alat penukar panas dan saluran gas torefaksi dimaksudkan untuk mendapatkan parameter utama sistem, yakni kecepatan superfisial udara unggun pengering dan kecepatan superfisial gas unggun torefaksi. Perbandingan parameter utama sistem sebelum dan sesudah modifikasi diberikan pada Tabel 3.

Setelah modifikasi, kecepatan superfisial udara unggun pengering di pelat distributor meningkat dari 2,87 menjadi 4,12 m/s. Kecepatan superfisial udara setelah modifikasi ini lebih tinggi dari kecepatan fluidisasi minimum (U_{mf}) semua komponen sampah (Tabel 1), sehingga secara teoritik unggun terfluidisasi sampah bisa terbentuk. Kecepatan superfisial udara ini juga berada di bawah kecepatan terminal sampah basah sehingga tidak ada komponen sampah yang terbang sebelum mengalami pengeringan, kecuali komponen daun. Demikian juga sebaliknya, kecepatan superfisial udara ini berada di atas kecepatan terminal sampah kering (dengan kadar air tertentu), sehingga sampah yang telah mengalami pengeringan tersebut terbawa bersama aliran udara, dan selanjutnya jatuh kembali di atas pelat miring ketika melewati *free board*, karena kecepatannya turun di bawah kecepatan terminalnya.

Parameter	Satuan	Sebelum	Sesudah
Kecepatan superfisial udara pengering di pelat distributor	m/s	2,87	4,12
Kecepatan superfisial udara pengering di <i>free board</i> .	m/s	0,72	1,03
Temperatur udara pengering	°C	80	75
Kecepatan superfisial gas torefaksi di pelat distributor	m/s	0,18	0,78
Temperatur ruang torefaksi`	°C	285	300

Tabel 3. Perbandingan parameter sistem sebelum dan sesudah modifikasi.

Peningkatan laju aliaran massa udara pengering menyebabkan temperaturnya turun karena kapasitas perpindahan panas pada alat penukar panas relatif tetap. Temperatur udara pengering turun dari 80 menjadi 75°C. Penurunan temperatur udara tidak terlalu signifikan, karena pada sistem yang dimodifikasi ini temperatur uap air masuk pada alat

Modifikasi pada saluran gas buang torefaksi juga berhasil meningkatkan kecepatan superfisial gas unggun torefaksi di pelat distributor, yakni dari 0,18 menjadi 0,78 m/s. Meskipun demikian, kecepatan superfisial gas hasil modifikasi ini hanya mampu memfluidisasi sebagian komponen sampah kering, yakni daun. Kemiringan pelat distributor yang dapat diatur sedemikian rupa setelah modifikasi menyebabkan komponen sampah yang tidak mengalami fluidisasi tetap bisa mengalir karena efek gravitasi. Untuk itu, proses kontinu pada reaktor torefaksi menggunakan prinsip unggun bergerak dan unggun terfluidisasi sebagian (*moving and partial fluidized bed*).

Perubahan posisi dan fungsi pemanas-dalam (*internal heater*) menjadi pemanas-mula (*preheater*) setelah modifikasi menyebabkan perpindahan panas dari pipa uap ke ruang torefaksi menjadi berkurang, sehingga temperatur ruang torefaksi yang diinginkan sulit dicapai. Penambahan pemanas listrik sebesar 2 x 1 kW cukup memadai untuk mendapatkan temperatur ruang torefaksi sebesar 285°C.

Posisi pemanas dalam yang sebelumnya terletak di atas pelat distributor sangat menghalangi aliran sampah, karena ukuran partikelnya jauh lebih besar dari gambut. Modifikasi posisi pelat distributor dan pemanas dalam secara bersamaan, yakni dengan cara menghilangkan pemanas dalam sehingga tidak ada penghalang di atas pelat distributor, menyebabkan sampah dapat mengalir dengan lancar dalam ruang torefaksi.

Modifikasi pada sistem penggerak katup putar dengan cara mengganti sistem katrol-sabuk (*pulley-belt*) dengan roda gigi-rantai (*sprocket-chain*) dapat menjamin rotasi katup putar tidak terhalangi oleh

penukar panas lebih tinggi dari sebelum dimodifikasi. Temperatur uap air masuk alat penukar panas dapat lebih tinggi karena penyerapan panas di ruang torefaksi berkurang akibat tidak difungsikannya pemanas dalam yang sebelumnya digunakan pada gambut.

aliran sampah, karena kemampuan transmisi dayanya meningkat.

Kesimpulan

Modifikasi terhadap sistem torefaksi kontinu unggun terfluidisasi yang sebelumnya digunakan untuk gambut, secara umum berhasil dilakukan untuk mengakomodasi karakteristik sampah kota. Modifikasi pada sistem torefaksi kontinu ini meliputi sistem pengumpanan, saluran udara alat penukar panas, pelat distributor dan pemanas-dalam, penambahan pemanas listrik, saluran gas torefaksi, dan sistem penggerak katup putar.

Hasil yang diperoleh dari modifikasi ini adalah sebagai berikut:

1. Modifikasi pada sistem pengumpanan dapat memperlancar aliran sampah bahan baku dari *hopper* ke reaktor pengering.
2. Modifikasi pada saluran udara alat penukar panas berhasil menaikkan kecepatan superfisial udara unggun pengering di pelat distributor hingga 4,12 m/s, sesuai dengan kebutuhan parameter hidrodinamika unggun terfluidisasi sampah, yakni antara 3,91 dan 5,20 m/s.
3. Kecepatan superfisial gas unggun torefaksi di pelat distributor setelah modifikasi diperoleh sebesar 0,78 m/s, dimana kecepatan ini hanya mampu memfluidisasi sebagian komponen sampah, sehingga proses kontinu pada reaktor torefaksi menggunakan prinsip unggun bergerak dan unggun terfluidisasi sebagian (*moving and partial fluidized bed*).
4. Modifikasi posisi pelat distributor dan pemanas dalam secara bersamaan, dapat menjamin sampah mengalir dengan lancar dalam ruang torefaksi.
5. Penambahan pemanas listrik pada ruang torefaksi dapat menggantikan fungsi pemanas-

- dalam, sehingga temperatur ruang torefaksi yang diinginkan dapat tercapai, yakni 285°C.
6. Modifikasi pada sistem penggerak katup putar berhasil meningkatkan kemampuan transmisi
 7. dayanya, sehingga katup putar dapat beroperasi dengan baik untuk bahan baku sampah.

Daftar Pustaka

- [1] Dudley, B. (2012): BP Statistical Review of World Energy June 2012, London, UK.
- [2] International Energy Agency, World Energy outlook (2007).
- [3] A. D. Pasek, T. Hardianto, W. Adriansyah, dan A. Suwono, *Laporan Akhir Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Dengan Bahan Bakar Sampah Di Kota Bandung*, LPPM ITB, Bandung (2007).
- [4] T. Hardianto, Amrul, A. Suwono, dan A.D. Pasek, *Upgrading of Municipal Solid Waste as Solid Fuel to Subbituminous Coal Grade by Torrefaction Process*, Proceeding of Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology, Bali (2010).
- [5] T. Hardianto, A. Suwono, A.D. Pasek, dan Amrul, *Balance Energi pada Proses Torefaksi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat Ramah Lingkungan Setara Batubara untuk Memperhitungkan Tingkat Kelayakannya*, Digital Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X, Kampus Universitas Brawijaya, Malang (2011)
- [6] Amrul, T. Hardianto, A. Suwono, dan A.D. Pasek, *Studi Awal Kelayakan Ekonomi Pabrik Torefaksi Sampah Perkotaan Menjadi Bahan Bakar Padat Setara Batubara Skala Pilot Berkapasitas 25 Ton per Jam*, Proceedings Seminar Nasional Energi Terbarukan dan Produksi Bersih 2012, Bandar Lampung (2012).
- [7] Haryadi, *Pengembangan Sistem Torefaksi untuk Meningkatkan Nilai Kalor Gambut sebagai Bahan Bakar Padat Setara Batubara*, Disertasi Doktor, Institut Teknologi Bandung, Bandung (2011).