

Konversi Bahan Bakar Padat dari Sampah Kota melalui Torefaksi: Optimasi Temperatur Torefaksi Simultan Berdasarkan Hasil Uji Temperatur Torefaksi Masing-Masing Komponennya

Amrul¹, Toto Hardianto², Aryadi Suwono², Ari Darmawan Pasek², dan Adrian Rizqi Irhamna

¹Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung

²Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, Bandung

Lab. Termodinamika, Pusat Rekayasa Industri, ITB, Jl. Ganesha no. 10 Bandung 40132

Email: amrul@students.itb.ac.id

Abstrak

Salah satu sumber energi alternatif yang sedang dikembangkan saat ini adalah bahan bakar padat dari sampah kota melalui proses torefaksi. Karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi ditentukan oleh temperatur proses. Karakteristik produk yang penting untuk menentukan kualitas bahan bakar di antaranya adalah nilai kalor. Sampah kota merupakan material heterogen yang terdiri dari berbagai jenis komponen. Temperatur optimal, yakni temperatur yang memberikan nilai kalor tertinggi pada produk torefaksi, berbeda untuk masing-masing komponen. Untuk itu, temperatur optimal torefaksi sampah simultan perlu dirumuskan berdasarkan temperatur torefaksi masing-masing komponennya.

Optimasi temperatur torefaksi simultan dilakukan dengan metode analitik dan metode pendekatan hasil eksperimen. Metode analitik dirumuskan berdasarkan variabel temperatur, fraksi massa, dan nilai kalor (HHV) masing-masing komponen. Sedangkan pada metode pendekatan hasil eksperimen, temperatur torefaksi simultan didekati dengan temperatur yang memberikan nilai kalor tertinggi dari komposisi komponen sampah yang dominan.

Rancangan temperatur torefaksi simultan yang diperoleh dari metode analitik adalah 296°C, sedangkan dari metode pendekatan hasil eksperimen adalah 285°C. Nilai kalor produk torefaksi simultan pada temperatur optimal yang diperoleh dari kedua metode ini tidak berbeda signifikan untuk berbagai model komposisi. Temperatur yang dipilih untuk torefaksi simultan adalah 285°C dan nilai kalor produk yang diperoleh dari eksperimen adalah sekitar 5400 kkal/kg, setara batubara subbituminus B.

Keywords: sampah kota, bahan bakar padat, torefaksi, temperatur torefaksi simultan, optimasi

Pendahuluan

Sumber energi primer nasional saat ini masih banyak bertumpu pada bahan bakar fosil, yakni minyak bumi, batubara, dan gas alam. 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 [1]. Saat ini biomassa mulai dilirik menjadi sumber energi primer yang diperkirakan dapat memberikan kontribusi sekitar 10-14% dari pasokan energi dunia [2]. Biomassa merupakan sumber energi baru dan terbarukan yang ramah lingkungan [3].

Salah satu sumber biomassa yang belum banyak mendapat perhatian adalah biomassa yang berasal dari sampah kota. Timbulan sampah kota terus meningkat dari waktu ke waktu seiring bertambahnya populasi penduduk dan berubahnya perilaku manusia menuju gaya hidup modern yang cenderung konsumneris, yang pada akhirnya juga meningkatnya timbulan sampah per kapita [4].

Sampah kota, yang selama ini lebih banyak dipandang sebagai sumber masalah, merupakan potensi energi yang belum banyak digarap. Menurut data Statistik Persampahan Indonesia 2008, jumlah timbulan sampah kota di Indonesia mencapai 38,5 juta ton per tahun [5]. Timbulan sampah kota Bandung, sebagai studi kasus dalam penelitian ini, mencapai 7.500 m³/hari dengan densitas sekitar 223 kg/m³ [6]. Dengan menggunakan hitungan sederhana, di mana fraksi sampah yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar adalah sebesar 75% (%-brt) dan nilai kalor nyata (LHV) 2300 kJ/kg pada kandungan air (*ar*) 60%, maka potensi energi yang

dapat dimanfaatkan dari timbunan sampah tersebut mencapai 2800 GJ/hari atau setara 34 MW daya panas. 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. Salah satu teknologi pengolahan termal yang saat ini banyak dikembangkan untuk mengkonversi biomassa menjadi bahan bakar padat adalah proses pirolisis pada temperatur rendah, yang dikenal dengan torefaksi. Torefaksi merupakan proses perlakuan panas pada temperatur sekitar 200-320°C pada tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen. Torefaksi pada biomassa berhasil memperbaiki karakteristiknya sebagai bahan bakar, yang ditandai dengan meningkatnya nilai kalor, densitas energi yang tinggi, kandungan air yang rendah, dan hidrofobia (tidak menyerap air) [7]. Karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi, di antaranya yang cukup penting adalah nilai kalor, ditentukan oleh temperatur proses. Sampah kota merupakan material heterogen yang terdiri dari berbagai jenis komponen. Temperatur optimal, yakni temperatur proses yang memberikan nilai kalor tertinggi pada produk torefaksi, berbeda untuk masing-masing komponen. Tulisan ini akan membahas bagaimana mendapatkan temperatur optimal untuk torefaksi sampah simultan, yang dirumuskan berdasarkan temperatur torefaksi masing-masing komponennya.

Bahan dan Metode

Persiapan Sampel

Pada eksperimen torefaksi sampah ini, sampel pengujian adalah komponen sampah kota yang berasal dari biomassa, yakni daun, ranting/kayu, nasi, kulit jeruk, dan kulit pisang. Daun mewakili komponen sampah yang berasal dari kelompok daun-daunan, termasuk sisa makanan jenis sayur-sayuran. Ranting pohon mewakili komponen sampah yang mengandung sifat kayu-kayuan. Nasi dipilih untuk mewakili sampah sisa makanan yang berasal dari makanan pokok. Kulit

pisang dan kulit jeruk mewakili komponen sampah yang berasal dari kulit buah-buahan. Kulit pisang dan kulit jeruk dipilih karena kedua jenis buah ini merupakan buah yang paling umum dikonsumsi di Indonesia dan tidak dipengaruhi musim.

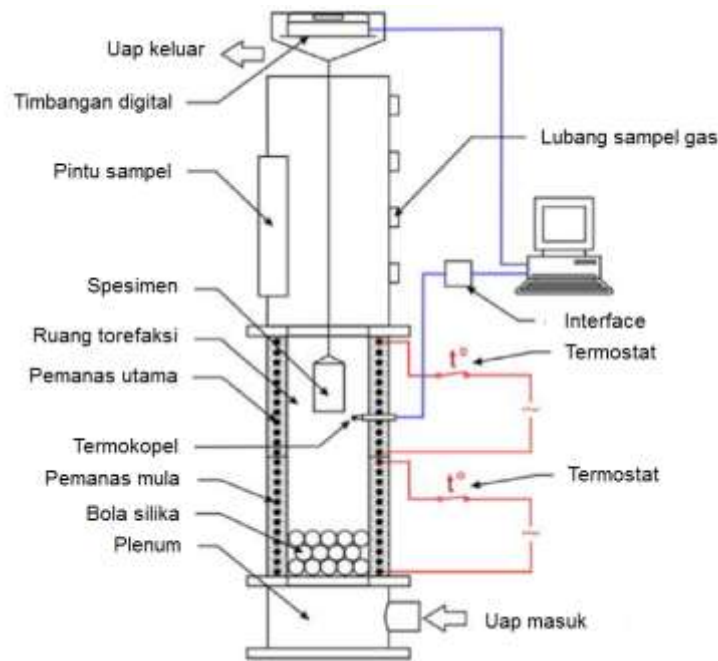
Sampel pengujian diambil dari sampah segar pada kondisi apa adanya (*as received*), sehingga kandungan air masing-masing komponen sampah berbeda. Sebelum diproses sampah dicacah sesuai dengan kondisi masing-masing komponen. Ranting kayu yang dipilih adalah yang berukuran diameter kurang dari 1 cm dan dipotong sepanjang lebih kurang 1 cm. Daun, kulit jeruk, dan kulit pisang dipotong kecil-kecil dengan ukuran sekitar 1 cm². Nasi tidak diperlakukan secara khusus, dibiarkan sesuai dengan ukuran butirnya.

Peralatan Torefaksi

Eksperimen torefaksi sampah dilakukan menggunakan reaktor torefaksi jenis *batch* skala lab yang sudah ada. Reaktor ini menggunakan uap panas lanjut sebagai media torefaksi. Uap dimasukkan ke dalam reaktor setelah melalui pengatur tekanan dan pengatur laju. Dinding reaktor bagian dalam dilengkapi pemanas listrik yang bisa diatur untuk mendapatkan temperatur yang dikehendaki. Sampel sampah ditempatkan dalam sebuah wadah di ruang torefaksi. Gas yang keluar dari reaktor adalah uap bersama dengan zat volatil dari proses torefaksi. Temperatur dan berat padatan sampel yang tersisa setiap saat diukur dengan timbangan digital yang dihubungkan dengan perangkat data akuisisi. Gambar skematik reaktor torefaksi ini ditunjukkan oleh Gambar 1.

Eksperimen Torefaksi Sampah Masing-Masing Komponen

Temperatur optimal torefaksi sampah simultan dirumuskan berdasarkan temperatur optimal masing-masing komponen. Temperatur optimal masing-masing komponen diperoleh melalui eksperimen torefaksi. Pada eksperimen torefaksi sampah masing-masing komponen ini, temperatur proses divariasikan pada rentang 180 – 320°C untuk waktu tinggal yang sama, yakni 45 menit. Nilai kalor produk torefaksi diukur untuk mendapatkan temperatur optimal masing-masing komponen, yakni temperatur torefaksi yang memberikan nilai kalor tertinggi. Rancangan eksperimen torefaksi sampah masing-masing komponen ditunjukkan oleh Tabel 1.



Gambar 1. Skema peralatan torefaksi skala lab.

Tabel 1. Rancangan eksperimen torefaksi sampah masing-masing komponen.

Komponen Sampah Kota	Kandungan Air (%)	Berat awal (gram)	Temperatur (°C)	Waktu Tinggal (menit)
Daun	12	12-18	180, 215, 250, 285, 320	45
Ranting	18	22-27	180, 215, 250, 285, 320	45
Nasi	62	54-58	150, 200, 250	45
Kulit Jeruk	65	42-43	180, 215, 250, 285, 320	45
Kulit Pisang	42	37-42	180, 215, 250, 285, 320	45

Perumusan Temperatur Optimal Torefaksi Simultan

Parameter yang digunakan untuk merumuskan temperatur optimal torefaksi simultan adalah temperatur, nilai kalor, dan komposisi komponen (%-berat). Parameter temperatur diambil dari variasi temperatur yang digunakan dalam eksperimen torefaksi. Parameter nilai kalor diambil dari nilai kalor tertinggi produk torefaksi pada masing-masing komponen. Sementara itu, parameter komposisi komponen ditentukan dari model komposisi komponen sampah yang disimulasikan.

Model komposisi yang digunakan dalam penelitian ini ada tiga, yaitu model komposisi sampah untuk kawasan umum, pasar, dan pemukiman, seperti ditunjukkan oleh Tabel 2. Model 1 mewakili kawasan umum yang mengandung sedikit sisa makanan (nasi, kulit jeruk, dan kulit pisang) dan didominasi oleh daun-daun yang berserakan akibat ruang hijau dari tata kota. Model 2 mewakili pasar yang didominasi oleh bahan makanan dan sayuran. Sedangkan model 3 mewakili pemukiman yang didominasi sisa makanan sebagai komponen sampah terbesar.

Tabel 2. Model komposisi komponen sampah kota.

Komponen Sampah Kota	Komposisi (%-berat)		
	Model 1	Model 2	Model 3
Nasi	19	25	30
Kulit Jeruk	10,5	12,5	15
Kulit Pisang	10,5	12,5	15
Ranting	14	20	20
Daun	46	30	20

Perumusan temperatur optimal torefaksi sampah simultan menggunakan dua metode, yaitu:

- metode analitik, dan
- metode pendekatan hasil eksperimen.

Perumusan temperatur dengan metode analitik mengacu pada nilai temperatur torefaksi yang memberikan nilai kalor tertinggi, dan nilai kalor temperatur tersebut. Sedangkan perumusan berdasarkan pendekatan hasil eksperimen dilakukan dengan mengoptimalkan temperatur yang digunakan pada proses torefaksi per komponen saja, yaitu temperatur yang memberikan nilai kalor tertinggi pada komponen sampah yang dominan.

Metode analitik yang digunakan dibagi menjadi dua, yaitu metode analitik 2-variabel bebas dan metode analitik 3-variabel bebas. Persamaan untuk metode analitik 2-variabel bebas adalah:

$$T_{ts} = \sum_{i=1}^n T_i x_i \quad (1)$$

Keterangan:

- T_{ts} = Temperatur optimal torefaksi simultan (°C)
- T_i = Temperatur torefaksi komponen sampah ke- i yang memberikan nilai kalor tertinggi (°C)
- x_i = Komposisi komponen sampah ke- i dalam model komposisi sampah kota (%-berat)

Sedangkan persamaan untuk metode analitik 3-variabel bebas adalah:

$$T_{ts} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i y_i} \quad (2)$$

Keterangan:

- T_{ts} = Temperatur optimal torefaksi simultan (°C)
- T_i = Temperatur torefaksi komponen sampah ke- i yang memberikan nilai kalor tertinggi (°C)
- x_i = Komposisi komponen sampah ke- i dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- y_i = Nilai kalor tertinggi komponen sampah ke- i (kkal/kg)

Validasi temperatur optimal yang diperoleh dari kedua metode ini dilakukan dengan cara membandingkan nilai kalor yg diperoleh pada temperatur optimal tersebut dengan nilai kalor hasil pengujian pada temperatur yang sama. Perumusan nilai kalor pada temperatur optimal menggunakan persamaan:

$$HHV_{ts} = \sum_{i=1}^n HHV_i x_i \quad (3)$$

Keterangan:

- HHV_{ts} = Nilai kalor pada temperatur optimal

torefaksi simultan (kkal/kg)

HHV_i = Nilai kalor komponen sampah ke- i pada temperatur optimal torefaksi simultan (kkal/kg)

x_i = Komposisi komponen sampah ke- i dalam model komposisi sampah kota (%-berat)

Eksperimen Torefaksi Sampah Simultan

Agar hasil perumusan dapat digunakan sebagai acuan, maka dilakukan eksperimen torefaksi sampah simultan pada temperatur optimal yang diperoleh dari hasil perumusan tersebut. Eksperimen torefaksi simultan dilakukan terhadap ketiga model komposisi komponen sampah. Selanjutnya, nilai kalor yang diperoleh dari perumusan dibandingkan dengan nilai kalor yang diperoleh dari hasil eksperimen untuk melihat sejauh mana keakuratan hasil perumusan.

Hasil dan Pembahasan

Nilai kalor hasil eksperimen torefaksi masing-masing komponen sampah diberikan pada Tabel 3. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai kalor produk tidak selamanya berbanding lurus dengan temperatur proses. Temperatur yang memberikan nilai kalor tertinggi bervariasi untuk setiap jenis komponen. Nilai kalor tertinggi untuk komponen nasi diperoleh pada temperatur 300°C (5423 kkal/kg), kulit jeruk 320°C (6802 kkal/kg), kulit pisang 215°C (5334 kkal/kg), ranting 285°C (5423 kkal/kg), dan daun 320°C. Nilai kalor dan temperatur yang memberikan nilai kalor tertinggi yang diperoleh dari eksperimen torefaksi sampah per komponen ini selanjutnya digunakan untuk merumuskan temperatur optimal torefaksi sampah simultan menggunakan metode analitik.

Tabel 3. Nilai kalor (HHV) tertinggi hasil pengujian torefaksi masing-masing komponen sampah kota.

Temperatur Torefaksi (°C)	HHV (kkal/kg)				
	Nasi	K. Jeruk	K. Pisang	Ranting	Daun
180	-	5747	5032	4799	5503
200	3937	-	-	-	-
215	-	5752	5334*	5297	5983
250	5132	6270	4962	5587	6106
285	-	6634	4439	5781*	6150
300	5423*	-	-	-	-
320	-	6802*	4095	5270	6225*

*) Nilai kalor tertinggi

Metode Analitik

Dengan menggunakan Pers. 1, perumusan temperatur optimal torefaksi simultan dengan metode analitik 2-variabel bebas adalah:

$$T_{ts} = (300x_1 + 320x_2 + 215x_3 + 285x_4 + 320x_5)$$

Keterangan:

- T_{ts} = Temperatur optimal torefaksi simultan (°C)
- x_1 = Komposisi komponen **nasi** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_2 = Komposisi komponen **kulit jeruk** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_3 = Komposisi komponen **kulit pisang** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_4 = Komposisi komponen **ranting** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_5 = Komposisi komponen **daun** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)

Dengan menggunakan Pers. 2, perumusan temperatur optimal torefaksi simultan dengan metode analitik 3-variabel bebas adalah:

$$T_{ts} = \frac{[(300)(5423)x_1 + (320)(6802)x_2 + (215)(5334)x_3 + (285)(5781)x_4 + (320)(6525)x_5]}{[(5423)x_1 + (6802)x_2 + (5334)x_3 + (5781)x_4 + (6525)x_5]}$$

Keterangan:

- T_{ts} = Temperatur optimal torefaksi simultan (°C)
- x_1 = Komposisi komponen **nasi** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_2 = Komposisi komponen **kulit jeruk** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_3 = Komposisi komponen **kulit pisang** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_4 = Komposisi komponen **ranting** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_5 = Komposisi komponen **daun** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)

Pers.1 diselesaikan dengan memasukkan parameter komposisi komponen sampah kota (Tabel 2), sedangkan Pers. 2 diselesaikan dengan memasukkan parameter komposisi sampah kota (Tabel 2) dan nilai kalor tertinggi masing-masing komponen (Tabel 3). Hasil penyelesaian Pers.1 dan Pers.2 ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil perhitungan perumusan temperatur torefaksi simultan.

Model	Pers.1	Pers.2
Model 1	300	302
Model 2	295	297
Model 3	291	293
Rata-rata	295	297

Karena nilai temperatur desain yang diperoleh dari kedua metode analitik tidak berbeda jauh, maka dapat disimpulkan bahwa kedua pendekatan analitik memberikan hasil yang mirip karena perbedaan temperatur yang terjadi hanya 2°C. Dengan mengambil rata-rata dari kedua persamaan tersebut, maka temperatur optimal torefaksi sampah simultan berdasarkan pendekatan analitik adalah **296°C**.

Setelah mendapatkan temperatur desain, langkah selanjutnya adalah memperkirakan HHV sampah kota yang terjadi pada temperatur optimal torefaksi simultan 296°C. Karena pengujian masing-masing komponen sampah kota tidak dilakukan pada temperatur tersebut, maka perlu dilakukan pendekatan HHV untuk masing-masing komponen. Nilai antara dua titik yang diketahui diasumsikan linier, maka dari interpolasi titik 285 dan 320°C diperoleh HHV masing-masing komponen sampah kota pada temperatur 296°C, yang ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Perkiraan HHV masing-masing komponen sampah kota pada temperatur torefaksi 296°C

Komponen Sampah Kota	HHV (kkal/kg)
Nasi	5506
Kulit Jeruk	6682
Kulit Pisang	4341
Ranting	5635
Daun	6171

Dengan nilai HHV yang sudah diperoleh, maka dapat dirumuskan perkiraan HHV torefaksi komponen sampah kota pada temperatur 296°C menggunakan Pers. 3. HHV produk torefaksi sampah simultan diperoleh dari hasil kali antara HHV setiap komponen sampah kota dengan komposisi komponennya, yaitu:

$$HHV_{ts} = (5506x_1 + 6682x_2 + 4341x_3 + 5635x_4 + 6171x_5)$$

Keterangan:

- HHV_{ts} = Nilai kalor pada temperatur optimal torefaksi simultan (kkal/kg)
- x_1 = Komposisi komponen **nasi** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_2 = Komposisi komponen **kulit jeruk** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_3 = Komposisi komponen **kulit pisang** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_4 = Komposisi komponen **ranting** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_5 = Komposisi komponen **daun** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)

Metode Pendekatan Hasil Eksperimen

Perumusan temperatur optimal torefaksi simultan menggunakan metode pendekatan hasil eksperimen mengacu pada nilai kalor tertinggi dari komponen sampah kota yang dominan. Pendekatan ini dilakukan dengan mengoptimalkan temperatur yang digunakan pada proses torefaksi per komponen saja. Hal ini dimaksudkan agar nilai HHV yang dirumuskan adalah HHV yang diperoleh berdasarkan hasil pengujian, bukan berdasarkan pendekatan secara matematis.

Temperatur yang digunakan dalam eksperimen torefaksi per komponen adalah 180°, 215°, 250°, 285°, dan 320°C. Nilai kalor (HHV) produk torefaksi cenderung meningkat seiring dengan naiknya temperatur torefaksi. Peningkatan HHV terjadi pada seluruh komponen sampah kota sampai temperatur 285°C, kecuali kulit pisang. Pada temperatur 320°C, peningkatan HHV hanya terjadi pada nasi, kulit jeruk dan daun, sedangkan pada kulit pisang dan ranting justru terjadi penurunan. Karena kulit pisang bukan komponen yang dominan dalam komponen sampah kota, maka melalui metode pendekatan hasil eksperimen ini, temperatur 285°C dapat digunakan sebagai temperatur optimal torefaksi simultan.

Dengan temperatur optimal 285°C, HHV dari produk torefaksi simultan tersebut dapat diperkirakan dengan mengetahui HHV masing-masing komponen sampah kota pada temperatur tersebut. HHV diambil dari nilai kalor hasil pengujian produk torefaksi tiap komponen sampah pada temperatur torefaksi 285°C, hasilnya dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. HHV komponen sampah kota pada temperatur 285°C

Komponen Sampah Kota	HHV (kkal/kg)
Nasi	5423
Kulit Jeruk	6634
Kulit Pisang	4439
Ranting	5781
Daun	6120

Dengan nilai HHV yang sudah diperoleh dari masing-masing komponen tersebut, maka dapat dirumuskan prediksi HHV untuk torefaksi sampah simultan pada temperatur 285°C. Persamaan untuk memprediksi nilai HHV tersebut adalah:

$$HHV_{ts} = (5423x_1 + 6634x_2 + 4439x_3 + 5781x_4 + 6120x_5)$$

Keterangan:

HHV_{ts} = Nilai kalor pada temperatur optimal torefaksi simultan (kkal/kg)

x_1 = Komposisi komponen **nasi** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)

x_2 = Komposisi komponen **kulit jeruk** dalam

- x_3 = Komposisi komponen **kulit pisang** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_4 = Komposisi komponen **ranting** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)
- x_5 = Komposisi komponen **daun** dalam model komposisi sampah kota (%-berat)

Dari dua metode perumusan yang digunakan diatas, diperoleh dua temperatur optimal untuk torefaksi sampah simultan, yaitu 296°C dan 285°C. Untuk mengetahui hasil perumusan mana yang akan digunakan, diperlukan perbandingan HHV dari kedua temperatur tersebut pada model komposisi sampah kota yang digunakan. Hasil prediksi HHV untuk ketiga model komposisi sampah tersebut diberikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil perhitungan HHV torefaksi simultan.

Model	HHV pada 296°C (kkal/kg)	HHV pada 285°C (kkal/kg)
Model 1	5831	5831
Model 2	5733	5741
Model 3	5667	5674

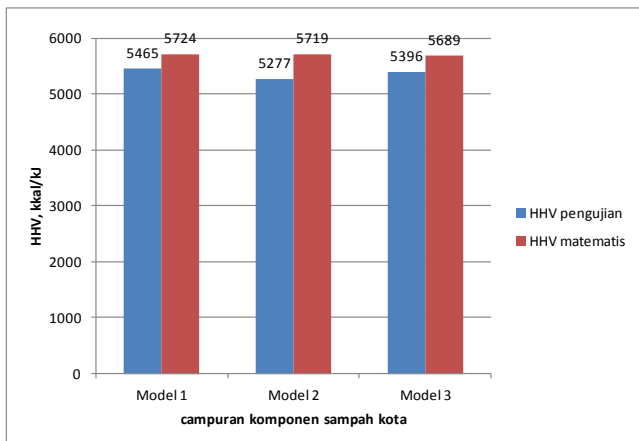
Temperatur optimal yang dipilih adalah temperatur yang memberikan HHV lebih tinggi. Dari perbandingan ini dapat dilihat bahwa temperatur optimal yang diperoleh dari pendekatan hasil eksperimen, yakni 285°C, memberikan nilai HHV yang lebih tinggi dibandingkan hasil pendekatan analitik. Untuk itu, temperatur 285°C digunakan sebagai temperatur optimal untuk desain torefaksi simultan sampah kota.

Eksperimen Torefaksi Sampah Simultan

Agar perumusan dapat digunakan sebagai acuan yang baik, perlu dilakukan validasi terhadap rumusan yang diperoleh. Validasi dilakukan dengan melakukan pengujian torefaksi sampah simultan terhadap model sampah kota dengan parameter-parameter yang telah ditentukan. Eksperimen untuk torefaksi simultan dilakukan pada temperatur 285°C dengan waktu tinggal 45 menit. Prosedur dan peralatan eksperimen sama dengan yang dilakukan pada pengujian torefaksi sampah per komponen.

Nilai kalor yang diperoleh melalui eksperimen ini dibandingkan dengan nilai kalor yang diperoleh dari perumusan. Nilai kalor hasil perumusan matematis adalah sekitar 5600-5700 kkal/kg, sementara nilai kalor yang diperoleh dari hasil eksperimen adalah sekitar 5200-5400 kkal/kg untuk berbagai model komposisi.

Perbandingan nilai kalor (HHV) torefaksi simultan sampah kota tersebut disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan nilai kalor torefaksi sampah simultan yang diperoleh dari pengujian dan pendekatan matematis

Hasil perbandingan nilai kalor ini menunjukkan bahwa nilai kalor torefaksi sampah simultan tidak berbeda signifikan antara ketiga model sampah kota. Hal tersebut dapat dilihat dari persebaran nilai kalor pembakaran yang saling berdekatan di antara ketiga model tersebut. Semakin banyak komposisi komponen sampah yang bernilai kalor tinggi maka semakin meningkatkan nilai kalor produk torefaksi sampah simultan.

Nilai kalor torefaksi sampah simultan melalui perumusan sedikit berbeda dengan nilai kalor yang diperoleh dari eksperimen. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh kondisi dimana sebagian sampel produk torefaksi terbakar saat dikeluarkan dari reaktor akibat kondisi yang tidak inert. Terbakarnya sebagian produk ini menyisakan abu, sehingga ketika diuji menggunakan kalometer, nilai kalornya berkurang. Namun secara umum, nilai kalor yang diperoleh dari perumusan dan eksperimen ini dapat dianggap sama karena setara dengan nilai kalor batubara Subbituminus B (5200-5800 kkal/kg). Rumusan yang digunakan melalui metode analitik dan metode pendekatan hasil eksperimen dapat memprediksi kisaran nilai kalor yang akan dihasilkan dari proses torefaksi sampah simultan.

Kesimpulan

Temperatur optimal torefaksi simultan yang diperoleh dari metode analitik adalah 296°C, sedangkan dari metode pendekatan hasil eksperimen adalah 285°C. Nilai kalor produk torefaksi simultan pada temperatur optimal yang diperoleh dari metode pendekatan hasil eksperimen sedikit lebih tinggi daripada model analitik, untuk itu temperatur optimal yang dipilih untuk torefaksi simultan adalah 285°C.

Nilai kalor hasil perumusan pada temperatur 285°C tidak berbeda signifikan dengan nilai kalor hasil

eksperimen pada temperatur yang sama, yakni berada pada rentang 5200-5800 kkal/kg, setara batubara subbituminus B.

Daftar Pustaka

- [1] International Energy Agency, World Energy outlook (2007).
- [2] S. Yokoyama, dkk., *Panduan untuk Produksi dan Pemanfaatan Biomassa*, Buku Panduan Biomassa Asia, Proyek Bantuan untuk Pembangunan Kerjasama Asia untuk Pertanian Sadar Lingkungan, Kementerian Pertanian, Kehutan, dan Perikanan Republik Indonesia (2008)
- [3] Basu, Prabir, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*, Elsevier, Oxford, UK (2010).
- [4] Becidan, Michaël, *Experimental Studies on Municipal Solid Waste and Biomass Pyrolysis*, Thesis for the degree of doctor philosophiae, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim (2007).
- [5] Statistik Persampahan Indonesia 2008 (2008)
- [6] 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).
- [7] ChenW-H, Kuo P-C, *Torrefaction and Co-Torrefaction Characterization of Hemicellulose, Cellulose and Lignin As Well As Torrefaction of Some Basic Constituents in Biomass*, Energy (2011).