

## KARAKTERISASI SIFAT-SIFAT PEMBAKARAN BAHAN BAKAR PADAT RAMAH LINGKUNGAN YANG BERASAL DARI SAMPAH KOTA

Toto Hardianto<sup>1</sup>, Aryadi Suwono<sup>1</sup>, Ari Darmawan Pasek<sup>1</sup>, dan Amrul<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB, Bandung

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung

### Kontak Person:

Toto Hardianto

Lab. Termodinamika, Pusat Rekayasa Industri, ITB

Jl. Ganesha no. 10 Bandung 40132

Telp/fax: (022) 250 23 42, Email: [toto@termo.pauir.itb.ac.id](mailto:toto@termo.pauir.itb.ac.id)

### Abstrak

*Pembakaran sampah padat perkotaan secara langsung menghasilkan kalor pembakaran yang rendah dan gas emisi yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan. Melalui proses torefaksi, kualitas sifat-sifat sampah sebagai bahan bakar dapat ditingkatkan, terutama nilai kalornya, sehingga setara dengan batubara jenis sub-bituminous. Bahan bakar padat hasil torefaksi tersebut juga ditargetkan untuk bersifat ramah lingkungan yang ditandai dengan kandungan emisi gas buang yang tidak membahayakan bagi kesehatan dan lingkungan.*

*Tujuan penelitian ini adalah melakukan kaji eksperimental untuk mendapatkan karakteristik nilai kalor dan gas emisi hasil pembakaran bahan bakar padat hasil torefaksi yang berasal dari sampah kota, dibandingkan dengan pembakaran sampah langsung.*

*Melalui simulasi dengan menggunakan software Cyclo-Tempo, sampah kota dan bahan bakar padat produk torefaksinya dibakar pada tungku yang temperaturnya dapat dikontrol secara kontinu, dan emisi gas hasil pembakarannya dapat dihitung untuk kemudian diidentifikasi dan dianalisis. Bahan bakar padat hasil torefaksi sampah mempunyai nilai kalor setara dengan batubara sub-bituminous dan menghasilkan emisi gas buang yang lebih ramah lingkungan dibandingkan gas emisi hasil pembakaran sampah kota secara langsung.*

*Kata Kunci: bahan bakar padat, torefaksi sampah, nilai kalor, gas emisi, ramah lingkungan*

### 1. Pendahuluan

Energi Primer dunia saat ini masih didominasi oleh minyak bumi, gas alam, batubara, nuklir, dan hidroelektrik. Tiga urutan terbesar dari energy primer tersebut berupa bahan bakar fosil, yang akan habis dalam waktu singkat. 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. Data tahun 2007 menunjukkan bahwa konsumsi energi primer Indonesia pertahunnya mencapai 114,6 juta toe (*tonnes oil equivalent* atau ton setara minyak).

Untuk menjamin kelangsungan pemenuhan energi dalam negeri, perlu kiranya segera mencari sumber energi baru sebagai energi alternatif yang bersifat

terbarukan, sehingga berdampak positif ganda yaitu mendapatkan energy baru pengganti bahan bakar fosil dan mencegah laju pemanasan global akibat produksi CO<sub>2</sub> hasil pembakaran bahan bakar fosil. Alternatif yang cukup menjanjikan di antaranya adalah biomassa, dari limbah pertanian dan sampah kota.

Sampah kota selama ini lebih menjadi masalah komunitas perkotaan karena menjadi sumber penyakit dan jumlahnya yang terus meningkat. Padahal bila dianalisis, komponen sampah kota terdiri dari bahan organik yang dapat dibuat kompos untuk pupuk organik, juga berpotensi mempunyai nilai kalor cukup tinggi bila digunakan sebagai bahan bakar. Tabel 1 menunjukkan produksi sampah dari beberapa kota utama di Indonesia [1].

Penggunaan sampah kota sebagai bahan bakar



padat dapat menjadi solusi yang cepat bagi masyarakat perkotaan dibandingkan bila dibuat kompos yang membutuhkan proses yang lama. Tetapi penggunaan secara langsung sebagai bahan bakar mempunyai banyak kendala karena sampah terdiri dari multi komponen yang sulit untuk dikontrol kualitas pembakarannya, juga sifat kandungan air yang tinggi, sehingga sampah merupakan bahan bakar yang jelek, yang ditandai dengan nilai kalor yang rendah. Untuk memperbaiki sifat sampah sebagai bahan bakar padat, diperlukan proses yang khusus, di antaranya adalah proses termal yang dapat mendekomposisi komponen sampah sehingga dapat menaikkan densitas energinya.

Tabel 1: Produksi Sampah dari Beberapa Kota Utama di Indonesia [1].

Kota	Produksi Sampah		Daya Panas Ekuivalen (MW)*
	(m <sup>3</sup> /hari)	(ton/hari)	
Jakarta	27966	6236	755
Surabaya	8700	1940	235
Bandung	7500	1673	202
Medan	3973	886	107
Total	48139	10735	1300

\* anggapan nilai kalor terendah (sekitar 2.500 kCal/kg)

Penelitian yang dilakukan oleh team ini di lab. Termo secara terus menerus telah menghasilkan bahan bakar padat yang berasal dari sampah melalui proses Torefaksi [2]. Hasilnya adalah bahan bakar padat dengan kualitas setara dengan batubara Subbituminous bernilai kalor (HHV) 4.900-6.800 kcal/kg. Paper ini akan membahas aspek emisi dari bahan bakar padat hasil Torefaksi sampah kota Bandung (sebagai studi kasus sampah kota di Indonesia) dan membandingkannya dengan standart baku mutu emisi yang berlaku di Indonesia.

## 2. Karakteristik Sampah Kota

Penelitian tentang karakteristik sampah kota Bandung telah dilakukan oleh team ini pada tahun 2007 [1]. Penelitian ini telah berhasil mengkarakterisasi tentang jumlah, komposisi, densitas, dan sifat-sifat pembakaran dari komponen-komponen sampah kota.

Jumlah sampah kota Bandung yang ditangani oleh Perusahaan Daerah Kebersihan mencapai 7.500 m<sup>3</sup>/hari. Sampah tersebut didominasi oleh komponen organik berupa daun, ranting, sisa makanan, dan kertas, yang mencapai 85% berat dengan densitas rata-rata 223 kg/m<sup>3</sup>. Nilai kalor dari komponen sampah bervariasi dari 2.500 hingga 11.000 kcal/kg.

Analisis Proximate sampah kota menunjukkan bahwa sebagian besar berupa volatile matter. Kandungan fix carbon dan inherent moisture hanya 20%, sedangkan

kandungan abu hanya 15% berat. Hasil analisis Ultimate menunjukkan unsur karbon (C) mencapai 80% pada komponen Styrofoam dan plastic, sedangkan komponen kertas didominasi oleh unsur Oksigen (O). Kandungan Chlorin ditemukan pada komponen karet sandal, kantong plastik, pipa PVC, dan sedikit pada sisa makanan.

## 3. Klasifikasi Batubara

Batubara adalah mineral padat yang utamanya terdiri dari Karbon, Hidrogen, dan Oksigen, serta kandungan Sulfur, Nitrogen, dan abu dalam jumlah yang kecil. Komposisi ikatan kimianya tidak dapat dirumuskan secara global seperti pada kayu.

Batubara diklasifikasikan menurut peringkatnya berdasarkan standard ASTM D388, dari peringkat paling rendah (Lignite) sampai dengan yang paling tinggi (Antrasit). Peringkat tersebut didasarkan atas nilai kalor untuk jenis Lignite sampai dengan Bituminous, sedangkan untuk jenis Antrasit didasarkan atas kandungan fix carbon. Untuk klasifikasi kualitas batubara, tingkatannya didasarkan atas kandungan abu, Sulfur, dan *ash fusion temperature* [3].

## 4. Torefaksi Sampah

Torefaksi, yaitu proses perlakuan panas pada 200-300°C dan tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen, telah diterapkan pada material homogen berupa biomassa, kayu, dan gambut, dan berhasil menaikkan nilai kalornya. Dalam penelitian ini, dikembangkan metode torefaksi multi komponen hiterogen yang digunakan sebagai teknologi pengolah sampah kota untuk meningkatkan densitas energi dan memperbaiki karakteristiknya, sehingga menjadi bahan bakar setara dengan batubara subbituminous C menurut kualifikasi standard ASTM D 388. Inovasi pada penelitian ini adalah peningkatan densitas energi dari sampah padat perkotaan yang bersifat hiterogen, dengan cara mendekomposisi fraksi *lignocellulose* secara simultan melalui proses torefaksi pada temperatur 200-300°C, menjadi bahan bakar ramah lingkungan setara dengan batubara subbituminous C. Dalam eksperimen proses torefaksi, parameter utama penentu adalah temperature dan waktu tinggal, kedua parameter ini akan dikombinasikan pada seluruh spesimen untuk mendapatkan hasil terbaik.

Pengujian torefaksi dilakukan dalam dua tahap, yaitu tahap pengujian torefaksi perkomponen dan tahap pengujian torefaksi campuran secara keseluruhan. Kriteria pengujian torefaksi yang diambil oleh team untuk tiap komponen sampah maupun untuk campuran meliputi parameter temperature dan waktu tinggal ditunjukkan melalui Tabel 2. Temperatur torefaksi ditentukan antara 250 dan 300°C, sedangkan waktu tinggalnya ditentukan antara 20 sampai 60 menit.

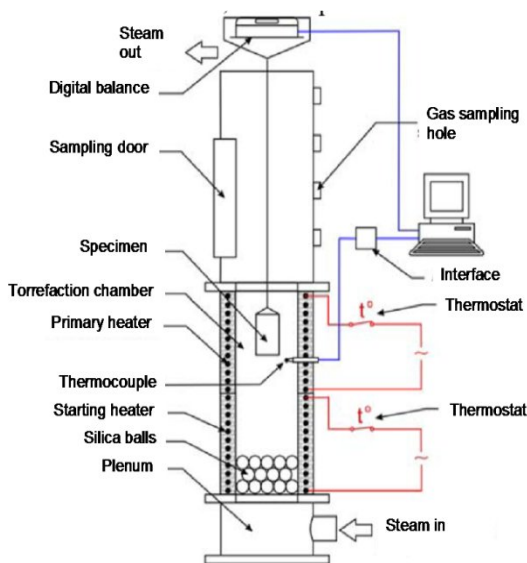
Peralatan yang digunakan untuk proses torefaksi merupakan peralatan buatan sendiri yang berupa reactor



panas dengan fluida kerja uap super panas yang dialirkan pada benda kerja, sementara benda kerjanya diposisikan pada pusat reactor dan terhubung dengan timbangan yang dapat memonitor laju pengurangan massa benda kerja secara kontinu. Secara skematik, peralatan tersebut ditunjukkan melalui Gambar 1.

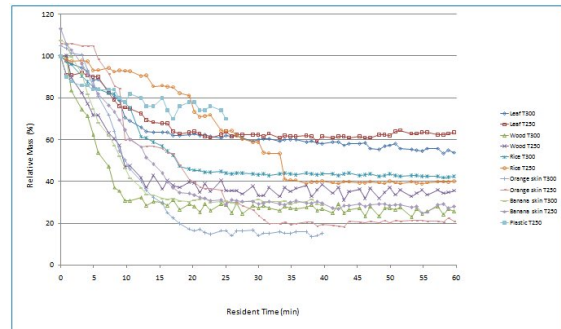
Tabel 2: Sampel beserta parameter percobaan Torefaksi

Sampel	Temperatur Torefaksi (°C)	Waktu Tinggal (menit)
Daun	250	60
		25
	300	60
		20
Kayu	250	60
		15
	300	60
		10
Nasi	250	60
		35
	300	60
		25
Kulit jeruk	250	60
		35
	300	40
		20
Kulit pisang	250	60
		20
	300	40
		50
Plastik	250	60
Campuran	250	60
		25

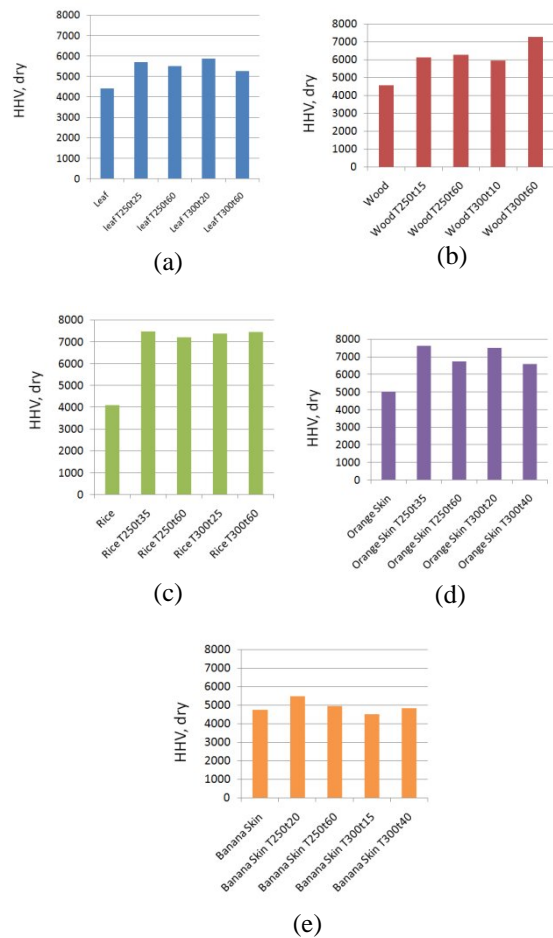


Gambar 1: Skema peralatan untuk Torefaksi

Pengurangan massa pada proses Torefaksi komponen sampah ditunjukkan melalui Gambar 2, sedangkan nilai kalor (HHV, *dry*) hasil torefaksi pada proses Torefaksi tiap komponen sampah ditunjukkan melalui Gambar 3.

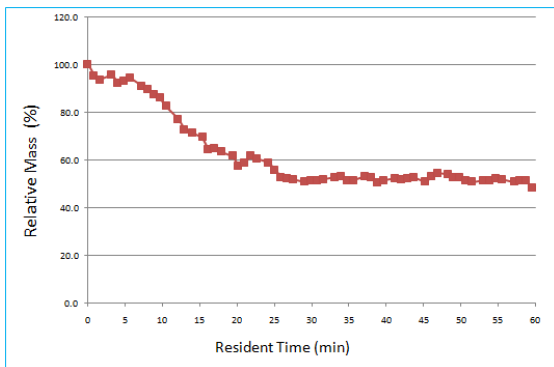


Gambar 2: Pengurangan massa komponen sampah selama proses Torefaksi



Gambar 3: Nilai Kalor (HHV, *dry*) hasil Torefaksi dari (a) daun, (b) kayu, (c) nasi, (d) kulit jeruk, dan (e) kulit pisang

Pada proses Torefaksi campuran secara keseluruhan, kurva pengurangan massa sampah pada temperature 250°C menunjukkan bahwa proses pengurangan massa berlangsung selama 25 menit, setelah itu massanya konstan yang berarti proses dekomposisi berlangsung 25 menit, sebagaimana ditunjukkan melalui Gambar 4.

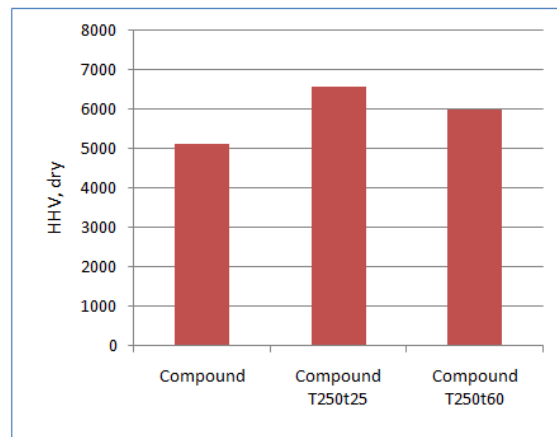


Gambar 4: Pengurangan massa campuran selama proses Torefaksi

Pengujian nilai kalor sampah hasil torefaksi per komponen menunjukkan bahwa nilai kalor produk torefaksi lebih tinggi dari nilai kalor awal untuk semua komponen, seperti ditunjukkan oleh Gambar.3. Kenaikan nilai kalor sampah hasil torefaksi dibandingkan nilai kalor awal adalah sekitar 33.1 % untuk daun (T300t20), 59.3 % untuk kayu (T300t60), 75.6 % untuk nasi (T250t35), 52.2 % untuk kulit jeruk, (T250t35) dan 15.3 % untuk kulit pisang (T250t20). Secara umum nilai kalor tertinggi dari sampah hasil torefaksi per komponen diperoleh pada temperatur proses 250°C dan waktu tinggal yang relatif pendek.

Berdasarkan analisis nilai kalor terhadap hasil torefaksi sampah per komponen di atas maka proses torefaksi untuk sampah campuran secara keseluruhan dipilih pada temperatur 250°C dan waktu tinggal 25 dan 60 menit. Pengujian nilai kalor hasil torefaksi sampah campuran menunjukkan bahwa nilai kalor tertinggi diperoleh pada waktu tinggal yang lebih pendek, seperti ditunjukkan oleh Gambar 5.

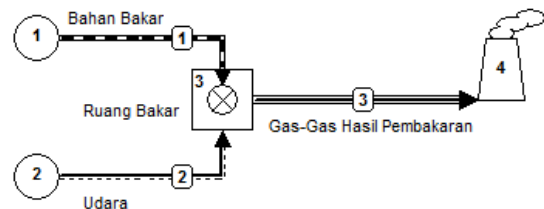
Dari hasil pengujian torefaksi sampah ini, nilai kalor bahan bakar padat hasil torefaksi campuran menyeluruh diperoleh sebesar 6.600 kkal.kg pada temperatur proses 250°C dan waktu tinggal 25 menit.



Gambar 5: Nilai Kalor (HHV, dry) hasil Torefaksi dari campuran secara keseluruhan

## 5. Karakterisasi Emisi Gas Buang Bahan Bakar Hasil Torefaksi

Pada penelitian ini gas-gas emisi hasil pembakaran tidak ditentukan secara langsung tetapi diperoleh melalui pemodelan pembakaran menggunakan program Cycle – Tempo. Skema sistem pembakaran ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 6: Skema sistem pembakaran pada program simulasi.

Data input bahan bakar pada program adalah kandungan unsur-unsur bahan bakar dan abu dalam bentuk fraksi massa serta nilai kalor rendah (LHV). Untuk sampah mentah dan sampah torefaksi dalam penelitian ini, data nilai kalor yang ada adalah nilai kalor tinggi (HHV), sehingga harga LHV ditentukan melalui iterasi dari beberapa simulasi pembakaran. Parameter input yang divariasikan pada ruang bakar adalah temperatur operasional pada tekanan reaksi yang sama, yakni 1 bar.

Pada ruang bakar diasumsikan tidak ada perpindahan panas ke luar; panas yang dihasilkan digunakan untuk menaikkan temperatur gas produk dan abu. Dalam simulasi ini komposisi gas buang diasumsikan sama dengan komposisi yang terbentuk

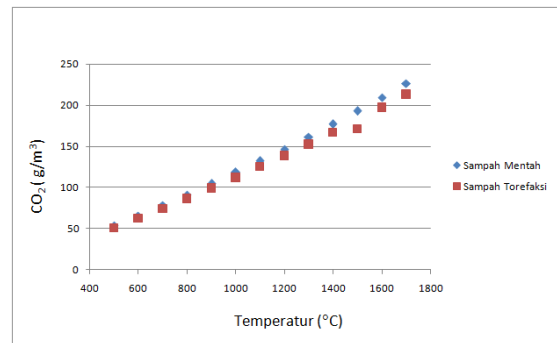
pada kondisi ideal, yakni komposisi pada tingkat keadaan kesetimbangan kimia tercapai.

Hasil perhitungan simulasi memberikan parameter output berupa komposisi komponen dan massa molar rata-rata bahan bakar, udara dan produk pembakaran (gas buang dan abu) serta HHV bahan bakar. Komposisi komponen ditampilkan dalam satuan dalam fraksi mol, massa molar rata-rata dalam kg/kmol dan HHV bahan bakar dalam kJ/mol.

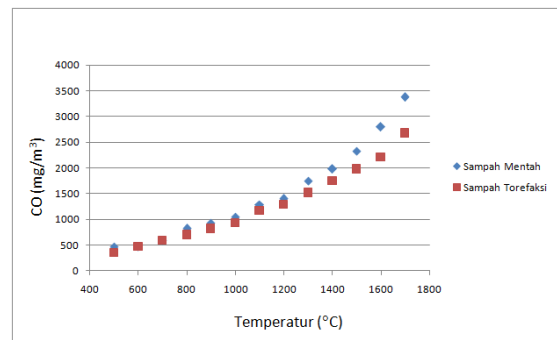
Hasil perhitungan gas-gas emisi melalui pemodelan ini dibandingkan antara hasil emisi sampah mentah dan sampah torefaksi serta dengan baku emisi yang sudah ada, yakni Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 7 tahun 2007 untuk pembakaran biomassa [4] Karena dalam Peraturan Menteri tersebut belum diatur baku mutu emisi CO<sub>2</sub> dan CO, maka emisi untuk kedua gas ini hanya dibandingkan antara sampah mentah dan sampah torefaksi saja.

Hasil perhitungan gas-gas emisi melalui pemodelan ini menunjukkan bahwa emisi gas CO<sub>2</sub> meningkat seiring dengan peningkatan temperatur operasional pembakaran. Emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh sampah torefaksi sedikit lebih rendah dari yang dihasilkan oleh sampah mentah. Perbedaan ini semakin jelas terlihat pada temperatur yang relatif tinggi (Gambar 7). Demikian juga dengan emisi gas CO, emisi yang dihasilkan oleh sampah torefaksi juga lebih rendah dari sampah mentah (Gambar 8).

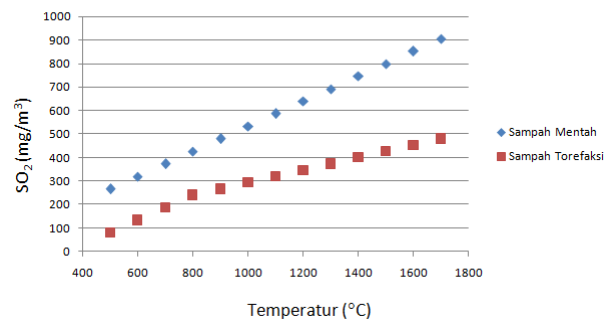
Perbedaan yang signifikan terlihat pada emisi SO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh sampah torefaksi dan sampah mentah (Gambar 9). Bila mengacu pada baku mutu emisi yang ditetapkan Menteri KLH, maka emisi SO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh sampah torefaksi berada dibawah nilai baku tersebut, yaitu sebesar 800 mg/m<sup>3</sup>. Hasil pemodelan juga menunjukkan bahwa perbedaan emisi SO<sub>2</sub> sampah torefaksi dan sampah mentah semakin besar pada temperatur yang lebih tinggi. Untuk emisi partikulat, yang mana dalam pemodelan ini ditentukan dari kandungan abu yang dilepaskan, emisi yang dihasilkan oleh sampah torefaksi lebih tinggi dari sampah mentah (Gambar 10). Emisi partikulat ini juga masih berada di atas baku mutu yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri KLH, yakni sebesar 230 mg/m<sup>3</sup>.



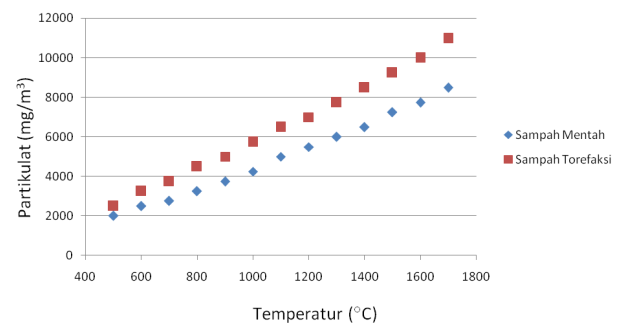
Gambar 7: Emisi CO<sub>2</sub> terhadap variasi temperatur.



Gambar 7: Emisi CO terhadap variasi temperatur.



Gambar 9: Emisi SO<sub>2</sub> terhadap variasi temperatur.



Gambar 10: Emisi Partikulat terhadap variasi temperatur.



## 6. Kesimpulan

1. Bahan bakar padat hasil torefaksi mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi dari bahan baku, bahkan mencapai peringkat subbituminous C
2. Pengujian emisi melalui modelisasi pembakaran menunjukkan bahwa semua emisi yang dihasilkan oleh sampah torefaksi lebih rendah dari emisi sampah mentah, kecuali untuk partikulat. Emisi SO<sub>2</sub> sampah torefaksi mempunyai perbedaan yang cukup besar dengan emisi SO<sub>2</sub> sampah mentah dan harga yang dihasilkan berada dibawah baku mutu emisi regulasi.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih berikan kepada Dirjen DIKTI dan LPPM ITB atas support dana untuk pelaksanaan penelitian ini melalui program Riset Strategis Nasional tahun 2009.

## References

- [1] Ari Darmawan Pasek, Toto Hardianto, Willy Adriansyah, dll., 2007, *Laporan Akhir Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Dengan Bahan Bakar Sampah Di Kota Bandung*, LPPM ITB, Bandung.
- [2] Toto Hardianto, Amrul, Aryadi Suwono, and Ari Darmawan Pasek, *Upgrading of Municipal Solid Waste as Solid Fuel to Subbituminous Coal Grade by Torrefaction Process*, Proceedings of Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology 2010, Bali, Indonesia, February 9-10, 2010.
- [3] Borman, Gary L., Ragland, Kenneth W., 1998. *Combustion Engineering*, McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- [4] Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup RI Nomor 7 tahun 2007.

