

ANALISIS TERHADAP KINERJA MODEL-MODEL EMPIRIK DALAM MENENTUKAN KANDUNGAN ENERGI DARI SAMPAH PERKOTAAN

I Made Gunamantha

Analisis Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Pendidikan Ganesha Singaraja
Jl. Udayana Singaraja, Bali, email : md_gunamantha@yahoo.com

Abstrak

Tujuh model empirik untuk mengestimasi *higher heating value* (HHV) yang dilaporkan dalam literatur telah digunakan untuk menunjukkan kebersetujuan HHV hasil estimasi terhadap HHV sampah hasil pengukuran. Model-model tersebut ditekankan pada model yang awalnya dikembangkan untuk mengestimasi HHV dari berbagai jenis bahan bakar meliputi batubara, biomassa, dan *sludge* berdasarkan data analisis proksimatnya. Evaluasi kinerja model ditentukan berdasarkan analisis secara statistik meliputi koefisien korelasi, rata-rata kesalahan absolut dan bias serta standar deviasi kesalahan absolut. Hasil estimasi menunjukkan adanya kebersetujuan terhadap hasil pengukuran. Kecuali model yang dikembangkan oleh Bento, enam model lainnya menunjukkan korelasi yang tinggi. Korelasi terbaik ditunjukkan oleh model Jimenes dan Demirbas-2 dengan $R^2 = 0,97$ diikuti oleh model Sheng-2 ($R^2=0,96$), Sheng-1 ($R^2=0,94$), Demirbas-1 ($R^2=0,90$), dan Cordero ($R^2= 0,89$). Adapun parameter-parameter statistik lainnya : rata-rata kesalahan absolut, kesalahan bias, rentangan dan standar deviasi kesalahan absolut dari semua model menunjukkan nilai yang relatif kecil.

Kata kunci : *higher heating value*, sampah, model empirik, analisis proksimat

1. Pendahuluan

Sampah adalah konsekuensi dari aktivitas kehidupan sehari-hari dari semua kehidupan (Vesilind et al., 2002). Adapun sampah perkotaan terutama dihasilkan dari aktivitas ekonomi yang dilakukan oleh manusia melalui pemanfaatan materi dan energi. Dalam konteks ini, sampah dapat merefleksikan pemborosan sumber daya termasuk energi. Pengelolaan sampah yang dilakukan secara tidak sesuai akan menimbulkan baik persoalan kualitas ekologi, kesehatan manusia, maupun konservasi sumber daya. Terdapat beberapa pilihan yang tersedia untuk mengelola sampah diantaranya adalah melalui pengolahan sampah untuk energi. Pemungutan energi dari sampah ini juga dapat dipertimbangkan sebagai konservasi sumber daya khususnya energi. Upaya pemanfaatan energi dari sampah dapat dilakukan melalui proses konversi biologi maupun *thermal* (Tchonobanoglous et al., 1993); Vesilind et al., 2002).

Pemungutan energi dari sampah melalui proses konversi *thermal* dapat dilakukan melalui berbagai proses seperti insinerasi, pirolisis, dan gasifikasi. Dalam upaya untuk mengevaluasi kelayakan pemungutan energi dari sampah, adalah sangat penting untuk menentukan kandungan energi dari sampah. Kandungan energi atau nilai kalor (*calorific value*) ini didefinisikan sebagai jumlah satuan panas yang dihasilkan ketika suatu satuan massa dibakar secara sempurna (istilah panas reaksi jarang digunakan dalam teknologi pembakaran). Ada dua istilah yang sering digunakan dalam bidang ini adalah : (1) *gross* (atau *higher*) *heating value*, HHV, dan (2) *net* (atau *lower*) *heating value*, LHV

(Vesilind, et al., 2002). HHV merepresentasikan perubahan enthalpi ketika suatu senyawa dibakar secara stokiometri pada suatu temperatur acuan dengan produk akhir juga pada temperatur acuan dan air berada dalam keadaan likuid. Adapun LHV adalah sama seperti HHV kecuali bahwa air dalam keadaan uap sehingga perbedaan kedua nilai merepresentasikan kebutuhan untuk menguapkan air. Kandungan energi ini diukur dalam kJ/kg, kcal/kg, atau dalam satuan British Btu/lb. Kandungan energi dari berbagai bahan termasuk sampah adalah fungsi dari beberapa parameter seperti : komposisi fisik, data analisis proksimat (kandungan air, abu, bahan mudah menguap (*volatile matter*), dan karbon tetap (*fixed carbon*)), data analisis ultimat (karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur) (Vesilind et al., 2002). Oleh karena itu pengukuran, penentuan nilai kalor dari sampah dapat diestimasi dengan menggunakan model-model empirik berdasarkan komposisi fisik, data analisis proksimat (kandungan air, abu, bahan mudah menguap (*volatile matter*), dan karbon tetap (*fixed carbon*)), data analisis ultimat (karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan sulfur) dengan menggunakan model-model empiris yang telah tersedia dalam literatur (Sheng dan Azevedo. 2005; Vesilind et al., 2002) dan komposisi kimia yaitu berdasarkan kandungan lignin, selulosa dan lignoselulosa dalam biomassa (Sheng dan Azevedo, 2005).

Metode yang umum digunakan untuk menentukan kandungan energi dari sampah adalah melalui pengukuran nilai kalor dengan *bomb* kalorimeter (Vesilind et al., 2002). Menurut Vesilind et al. (2002) nilai kalor yang

diperoleh dari pengukuran dengan *bomb* kalorimeter adalah HHV. Walaupun demikian, penggunaan *bomb* kalorimeter jarang dilakukan pada tingkat praktis karena disamping prosedurnya yang cukup rumit dan waktu yang diperlukan relatif lama, biayanya-pun relatif mahal terutama bila dibandingkan dengan penentuan nilai kalor berdasarkan data analisis proksimat.

Tabel 1 menyajikan ringkasan dari model-model yang umumnya digunakan untuk memprediksi kandungan energi dari berbagai jenis bahan bakar padat. Dalam penelitian ini hanya difokuskan pada model-model berbasis komposisi fisik dan analisis proksimat. Adapun model-model berbasis komposisi kimia dan analisis ultimat umumnya relatif mahal dan rumit dalam penentuan parapeter-parameternya sehingga tidak dipertimbangkan dalam penelitian ini.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk membandingkan nilai kalor hasil pengukuran dengan hasil perhitungan melalui model empirik yang didasarkan pada data komposisi sampah secara fisik dan analisis proksimat dengan menggunakan parameter-parameter statistik terhadap sampah yang dikelola di wilayah SARBAGITA. Tujuannya adalah untuk mendapatkan model yang paling sesuai untuk memprediksi nilai kalor dari sampah yang dikelola di wilayah SARBAGITA.

2. Metode penelitian

2.1. Preparasi sampel

Karakteristik sampah ditentukan dengan analisis skala lapangan dan laboratorium. Karakteristik skala lapangan dilakukan dengan pendekatan berbasis TPA yang bertujuan untuk mengetahui komposisi sampah. Sampel sampah yang digunakan dalam penelitian ini dikumpulkan dari tiga lokasi TPA yang ada di wilayah SARBAGITA. Empat belas unit sampel komposit dikumpulkan dalam dua periode pengumpulan dalam 1 (satu) tahun pada tahun 2008 atau 7

(tujuh) sampel komposit sampah campuran pada masing-masing periode. Setiap sampel komposit merupakan gabungan dari 15 (lima belas) sampel yang diambil dari beban kendaraan yang dijadikan *sampling*. Total ukuran setiap sampel komposit sekitar 150-180 kg dipilah berdasarkan kategori komponen-komponen sampah yang telah ditetapkan (plastik keras, plastik lunak, organik *biowaste* (tidak termasuk kayu), kayu, kertas, tekstil, karet dan kulit, serta pembalut dan pempes).

Dalam upaya untuk menentukan data analisis proksimat (kandungan air, bahan mudah menguap, abu, dan karbon tetap) dan nilai kalor dari masing-masing komponen, *grab* sampel dari masing-masing komponen yang telah diidentifikasi dan ditimbang, diambil sekitar 250 gram dan disimpan pada sebuah wadah yang terpisah yang telah diberi tanda klasifikasi komponen komposit (misal; "Kertas" akan diisi dengan *grab* sampel dari setiap fraksi kertas hingga hari terakhir pemilahan atau total 7 *grab* sampel menyusun komposit kertas). Wadah ditutup rapat selama dalam penyimpanan baik ketika menunggu penambahan *grab* sampel maupun untuk analisis laboratorium. Ketujuh sampel fraksi komposit sesuai hasil pemilahan komponen-komponen sampah tersebut adalah sebagai berikut : kertas, plastik keras, plastik kemasan lunak, karet dan kulit, tekstil, kayu, serta pempes dan pembalut. Adapun bahan organik (*biowaste*) dianalisa secara terpisah karena karakteristiknya yang mudah terdekomposisi. Pengambilan sampel organik *biowaste* untuk kepentingan analisis laboratorium dilakukan pada hari terakhir pemilahan. Sampah *biowaste* hasil pemilahan dibagi dengan sistem menara (*coning*) dan kuartir (*quatering*) hingga mendekati 250 gr dari total *biowaste* hasil pemilahan pada hari itu. Selanjutnya sampel komposit dan 1 *grab* sampel organik *biowaste* tersebut dikirim ke laboratorium.

Tabel 1 Model-model Empirik Berbasis Data Analisis Proksimat untuk Mengestimasi Kandungan Energi dari Sampah

No.	Nama Peneliti	Model (HHV, MJ/kg)	Referensi
1	Jimennes dan Gonzales	HHV = -108,81408+0,3133(VM+C)	Sheng dan Azevedo
2	Sheng dan Azevedo	HHV = 19,914-0,2324 Abu	Sheng dan Azevedo
3	Sheng dan Azepedo	HHV=-0,3543FC+0,2218VM+ ,2601FC	Sheng dan Azevedo
4	Demirbas	HHV = 0,196FC+14,119	Sheng dan Azevedo
5	Demirbas	HHV = 0,312FC+0,1534VM	Sheng dan Azevedo
6	Codero et al	HHV = 0,3542FC+0,1708VM	Sheng dan Azevedo
7	Bento	HHV = -3,0368+0,2218VM+0,2601FC	Qudais dan Qdais

3.2. Karakterisasi sampel

Komposisi secara fisik ditentukan dengan melakukan pemilahan secara manual dari setiap sampel komposit sampah campuran dari lima belas kendaraan setiap harinya. Adapun analisis proksimat dan nilai kalor ditentukan untuk masing-masing komponen dengan menggunakan metode ASTM. Analisis *moisture* dilakukan sebelum melakukan analisis yang lainnya, dan ditentukan dengan metode pengeringan *oven* (ASTM D-3173). Dalam metode ini sampel dikeringkan di dalam oven pada temperatur antara 104 °C and 110 °C sampai diperoleh berat yang konstan. Jumlah abu (*ash*) ditentukan dengan memanaskan sampel pada temperatur 750 °C selama 2 (dua) jam, mengacu pada ASTM D-3174. Fraksi yang mudah menguap (*volatile matter*) ditentukan dengan memanaskan sampel dalam wadah tertutup selama 6 (enam) menit pada temperatur 950 °C dengan mengacu pada ASTM D - 3175. Adapun untuk *fixed carbon* ditentukan berdasarkan selisih antara berat sampel dengan total dari *moisture*, *ash*, dan *volatile matter*. Nilai kalor dari masing-masing komponen sampah ditentukan dengan menggunakan *bomb* kalorimeter. Penentuan kandungan nilai kalor dengan *bomb* kalorimeter ini mengacu pada ASTM D 240-92.

3.3. Estimasi nilai kalor

Model-model yang telah terdaftar dalam Tabel 1 digunakan untuk mengestimasi nilai kalor dari aliran sampah. Data nilai kalor yang dilaporkan adalah HHV yang dinyatakan dalam MJ/kg berdasarkan basis kering data analisis proksimat sampah. Selanjutnya nilai hasil estimasi dan pengukuran dibandingkan untuk menentukan kebersetujuan terhadap model. Tiga teknik statistik digunakan untuk mengevaluasi kebersetujuan terhadap model yang ditentukan sebagai berikut (Sheng dan Azevedo, 2005):

Rata-rata kesalahan absolut (RKA)

$$RKA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{HHV_E - HHV_M}{HHV_M} \right| \times 100\%$$

Rata-rata kesalahan bias (RKB)

$$RKB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{HHV_E - HHV_M}{HHV_M} \times 100\%$$

Koefisien korelasi (R^2)

$$(R^2) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(HHV_E - HHV_M)^2}{(\overline{HHV_M} - HHV_M)^2}$$

di mana subskrif E dan M berturut-turut menunjukkan nilai dari hasil estimasi atau perhitungan dan pengukuran, $\overline{HHV_M}$ adalah rata-rata HHV dari hasil pengukuran dari semua sampel dan n adalah jumlah sampel. RKA mengindikasikan kesalahan rata-rata absolut dari korelasi. Nilai RKA yang lebih rendah berarti bahwa kesalahan korelasi yang lebih kecil. RKB menunjukkan rata-rata kesalahan bias dari korelasi yang merepresentasikan ketinggian atau kerendahan estimasi (*overestimasi* atau *underestimasi*), R^2 , telah digunakan secara luas dalam analisis statistik dan regresi sebagai parameter komprehensif untuk mengkuantifikasi keakurasian korelasi. Suatu korelasi dengan nilai R^2 yang lebih tinggi menunjukkan suatu estimasi yang lebih baik (suatu korelasi yang sempurna mempunyai $R^2 = 1$).

Tiga parameter di atas adalah kriteria statistik fundamental yang digunakan secara luas dalam analisis kesalahan dan juga telah digunakan untuk menilai korelasi nilai kalor bahan bakar (Sheng dan Azevedo, 2005). Oleh karena itu parameter-parameter tersebut diadopsi disini sebagai parameter evaluasi. Evaluasi dilakukan untuk menetapkan kebersetujuan atau keakurasian berdasarkan korelasi HHV hasil perhitungan dari model dengan hasil pengukuran sehingga pengguna dapat memilih model yang lebih baik untuk mengestimasi HHV dengan data analisis proksimat. Semua korelasi dibandingkan secara bersama untuk menyajikan secara keseluruhan gambaran dari korelasi.

3. Hasil dan pembahasan

Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari dan Juli 2008 dan pada kedua periode tersebut total 14 (empat belas) sampel komposit dipilah untuk menentukan komposisi sampah secara fisik. Demikian pula 2 (dua) sampel komposit dari masing-masing komponen sampah (plastik keras, plastik lunak, organik *biowaste*, kayu, kertas, tekstil, pembalut anak dan wanita dewasa, karet dan kulit) dianalisis untuk menentukan data analisis proksimat dan nilai kalornya. Data komposisi, analisis proksimat, dan nilai kalor sampah dari masing-masing periode pengambilan sampel ditunjukkan dalam Tabel 2 dan 3.

Komposisi sampah yang ditunjukkan dalam Tabel 2 dan 3 tidak meliputi fraksi komponen sampah lainnya (gelas, logam, *inert*, dan bahan berbahaya) sehingga nilai total keseluruhannya tidak mencapai 100%. Tidak dilibatkannya komponen-komponen sampah tersebut karena dipertimbangkan sebagai bahan yang tidak mudah dibakar.

Tabel 2 dan 3 juga menunjukkan bahwa komponen organik *biowaste* merupakan fraksi tertinggi dalam aliran sampah baik pada musim hujan maupun kemarau. Kandungan air (kecuali pembalut) cenderung lebih tinggi untuk sampel yang diambil pada bulan Januari mengingat bulan ini merupakan bagian dari musim hujan yang terjadi di Indonesia. Kandungan air yang lebih tinggi ini mengakibatkan nilai kalornya lebih rendah dibandingkan dengan sampel yang diambil pada bulan Juli (periode musim kemarau) kecuali untuk tekstil karena kandungan abu yang ditunjukkan lebih tinggi pada musim kemarau.

Selanjutnya data analisis proksimat dan nilai kalor dari sampah campuran yang masuk ke TPA ditentukan berdasarkan jumlah data analisis proksimat dan nilai kalor hasil pengukuran dari masing-masing komponen dikalikan dengan persen berat dari masing-masing kompoen dalam aliran sampah dibagi dengan jumlah total persentase keseluruhan fraksi komponen dalam aliran sampah. Berdasarkan data pada Tabel 2 dan 3, data analisis proksimat dan nilai kalor dari keempat belas sampel komposit ditunjukkan dalam Tabel 4.

Tabel 2. Data Komposisi Sampah Secara Fisik, Analisis Proksimat, dan Nilai Kalor untuk Sampel yang diambil pada Bulan Januari

Sampel	Komponen sampah (% berat)							
	Plastik Lunak	Plastik Keras	Organik <i>biowaste</i>	Kayu	Kertas dan Kardus	Tekstil	Karet dan Kulit	Pembalut
S1	12,37	0,41	69,42	0,86	3,78	7,23	1,78	1,81
S2	12,21	0,41	71,39	0,63	3,89	6,47	0,23	2,32
S3	10,15	0,55	69,67	1,68	6,60	5,96	1,75	1,00
S4	9,18	0,31	71,31	1,30	5,55	3,99	1,70	2,07
S5	11,17	0,39	69,24	1,77	5,44	5,13	1,75	1,34
S6	10,58	0,30	67,09	2,72	6,56	4,79	3,26	0,86
S7	9,65	0,23	70,83	1,12	7,23	4,20	0,42	1,52
Analisis Proksimat								
M (%b)	2,25	4,05	75,93	37,41	9,81	20,51	2,08	12,67
A (%bk)	4,29	13,07	16,62	30,37	16,65	4,30	13,40	8,04
VM(%bk)	87,86	82,00	67,52	28,59	68,36	70,73	80,93	78,14
FC (%bk)	7,84	4,93	15,86	41,04	14,99	24,97	5,67	13,82
kcal/gr	9262,47	8129,82	1732,52	3324,51	3185,99	4364,99	4751,75	6177,14

b = berat, bk = berat kering

Tabel 3. Data Komposisi Sampah secara Fisik, Analisis Proksimat, dan Nilai Kalor untuk Sampel yang diambil pada Bulan Juli

Sampel	Komponen sampah (% berat)							
	Plastik Lunak	Plastik Keras	Organik <i>biowase</i>	Kayu	Kertas dan Kardus	Tekstil	Karet dan Kulit	Pembalut
S8	11,50	0,26	65,23	1,24	6,74	7,31	0,93	1,76
S9	11,46	0,32	63,40	1,08	8,23	8,45	1,24	1,99
S10	14,09	0,11	69,25	0,56	6,69	4,01	1,34	1,78
S11	13,44	0,46	70,05	0,68	6,04	5,24	0,97	2,33
S12	12,66	0,33	69,21	1,26	6,33	5,79	0,44	1,53
S13	12,69	0,33	68,64	0,50	6,48	6,54	0,28	2,22
S14	11,54	0,26	67,91	1,35	5,64	6,06	1,40	2,54
Analisis Proksimat								
M (%b)	1,75	1,52	59,16	13,13	7,36	9,81	0,91	14,11
A (%bk)	4,31	2,37	8,50	7,19	9,86	16,65	42,14	1,40
VM(%bk)	87,77	69,28	31,57	73,50	82,09	68,36	55,63	88,31
FC (%bk)	7,92	28,35	59,93	19,31	8,05	14,99	2,23	10,29
kcal/gr	9296,97	9749,11	3957,14	3637,99	3885,80	3185,99	4945,92	6901,55

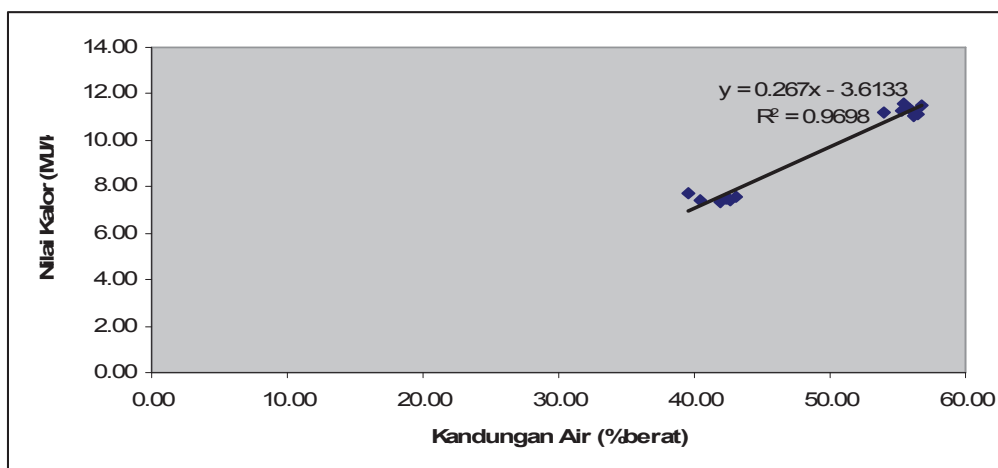
Tabel 4. Data Analisis Proksimat dan Nilai Kalor dari masing-masing Sampel

Sampel	Analisis Proksimat (%berat)				HHV hasil Pengukuran (MJ/kg)
	M	VM ^a	A ^a	FC ^a	
S1	56,77	14,04	70,52	15,08	12,98
S2	58,17	14,13	70,40	15,09	12,74
S3	57,32	14,66	69,65	15,28	12,25
S4	59,22	14,85	69,65	14,79	11,85
S5	57,46	14,60	69,83	14,98	12,50
S6	56,16	14,85	69,47	15,09	12,49
S7	59,03	14,83	69,59	14,83	11,84
S8	42,57	8,88	46,73	44,39	19,23
S9	41,16	9,08	47,91	43,01	19,21
S10	43,38	8,64	46,27	45,09	19,84
S11	43,42	8,57	46,24	45,20	19,75
S12	43,67	8,53	45,99	45,48	19,44
S13	43,35	8,50	46,39	45,12	19,51
S14	43,38	8,85	46,05	45,09	19,35

^a Basis kering

Tabel 5. Nilai Kalor dari Hasil Perhitungan dan Pengukuran (MJ/kg)

No Sampel	Hasil perhitungan HHV (MJ/kg) dengan Model-model Empirik							HHV hasil Pengukuran (MJ/kg)
	Jimenne z (1)	Sheng 1 (2)	Sheng 2 (3)	Demirbas 1 (4)	Demirbas 2 (5)	Corder o (6)	Bent o (7)	
1	15,49	16,73	16,16	17,07	15,27	17,11	11,58	12,68
2	15,43	16,71	16,12	17,08	15,24	17,08	11,51	12,43
3	15,22	16,60	15,98	17,11	15,17	17,00	11,37	11,93
4	14,64	16,62	15,55	17,02	14,81	16,59	11,10	11,31
5	14,93	16,65	15,76	17,06	14,98	16,79	11,27	12,03
6	14,84	16,60	15,70	17,08	14,96	16,76	11,23	12,02
7	14,59	16,63	15,51	17,02	14,79	16,57	11,07	11,27
8	16,30	17,95	17,77	22,38	19,96	22,52	7,38	18,26
9	16,58	17,88	17,94	22,23	19,97	22,53	7,72	18,47
10	17,19	17,95	18,47	22,76	20,71	23,36	7,49	19,41
11	17,60	17,94	18,79	22,91	21,03	23,72	7,59	19,59
12	17,14	17,98	18,45	22,81	20,72	23,38	7,42	18,96
13	17,19	17,99	18,47	22,76	20,70	23,35	7,50	19,05
14	16,80	17,92	18,18	22,66	20,43	23,05	7,37	18,71
Rerata	15,44	16,00	17,30	19,85	17,77	19,98	17,06	9,40
STDV	3,65	1,08	0,67	2,90	2,86	3,28	1,32	1,98



Gambar 1. Plot Antara Kandungan Air dengan HHV

Hasil yang diperoleh dari aplikasi secara numerik dengan menggunakan data dalam Tabel 4 terhadap persamaan (1) –(7) dibandingkan dengan nilai-nilai pengukuran ditunjukkan dalam Tabel 5. Kecuali model Bento, terdapat kebersetujuan yang baik antara data hasil pengukuran dengan perhitungan. Demikian pula, kecuali model Bento, semua persamaan mengikuti perilaku kualitatif yang sama menuruti alur data hasil pengukuran yaitu peningkatan hasil estimasi sejalan dengan peningkatan yang diperoleh dari hasil pengukuran. Namun demikian, kecuali HHV dari hasil perhitungan dengan model empirik Bento (persamaan (7)) yang memperkirakan kerendahan (*underestimate*), tiga persamaan (persamaan (1)-(3)) ada yang memperkirakan ketinggian (*overestimate*) dan kerendahan (*underestimae*) dibandingkan dengan HHV pengukuran. Adapun persamaan (4) –(6) memperkirakan ketinggian (*overestimate*) pada keseluruhan sampel.

Evaluasi terhadap model-model empirik dibahas dalam dua aspek, kesalahan dari model dan aplikasinya. Dalam kaitannya dengan analisis kesalahan, dilakukan dengan pendekatan secara statistik. Informasi yang digunakan untuk menunjukkan kinerja model-model berdasarkan pada kriteria : (1) Rata-rata kesalahan absolut dan bias harus nol atau mendekati nol, (2) Standar deviasi harus paling kecil, (3) Koefisien korelasi yang terbesar, dan (4) Rentangan harus yang terkecil

Hasil evaluasi secara statistik diberikan dalam Tabel 6. Pada sebagian besar model, menunjukkan adanya ketidaksesuaian yang relatif kecil antara nilai perhitungan dengan pengukuran. Persamaan (1), (2), (3) dan (5) menunjukkan nilai R^2 yang baik secara statistik. Adapun persamaan (7) menunjukkan kinerja yang paling jelek sedangkan persamaan (4) dan (6) memiliki kinerja yang sedikit lebih jelek dibandingkan dengan persamaan (1), (2), (3) dan (5). Berdasarkan informasi yang ditunjukkan dalam Tabel 6 rata-rata dan deviasi standar dari kesalahan untuk semua persamaan adalah relatif sangat kecil. Pada semua persamaan kesalahan absolut relatif sama yaitu antara 1,22 – 2,35%. Demikian pula, perbedaan data perhitungan yang relatif sangat kecil terhadap nilai-nilai pengukuran dapat dicermati dari rentangan kesalahan. Untuk menjelaskan penyebab kesalahan dari model Bento, dilakukan dengan mempertimbangkan plot antara estimasi HHV dari model ini dengan kandungan air dari sampah. Sebagaimana yang ditunjukkan dalam Gambar 1 plot menunjukkan peningkatan dalam HHV

dengan kandungan air yang lebih tinggi. Dari sini dapat diduga bahwa komponen air mempunyai pengaruh yang signifikan dalam menentukan nilai kalor dimana dalam model Bento estimasi yang dihasilkan jauh lebih rendah (*underestimasi*) dibandingkan dengan hasil pengukuran sehingga pada akhirnya mempengaruhi nilai R^2 .

Berdasarkan parameter-parameter statistik yang ditunjukkan dalam Tabel 6, kecuali model Bento (persaan (7)), semua model dapat diaplikasikan untuk memperkirakan kandungan energi dalam aliran sampah SARBAGITA khususnya model Jimenez, Sheng-2, dan Demibars-2. Dalam model-model perhitungan pada umumnya, bahan-bahan mudah menguap dan karbon tetap diduga terbakar dengan gas oksigen dan menghasilkan senyawa tertentu seperti CO_2 dan H_2O . Panas yang dilepaskan (atau nilai kalor) kemudian ditentukan dengan perhitungan thermokimia dan stokiometri. Hal ini umumnya dimanfaatkan dalam banyak kasus. Walaupun demikian, perhitungan dengan cara tersebut masih memerlukan pembuktian untuk dapat diterapkan untuk kasus sampah. Walaupun tidak dianalisis dalam tulisan ini, hal ini dimungkinkan karena kandungan sampah relatif kompleks sehingga penentuan nilai kalor dengan cara tersebut dapat menghasilkan nilai kalor yang jauh lebih tinggi maupun lebih rendah.

Oleh karena itu, untuk aplikasi teknologi thermal tertentu terhadap sampah seperti insinerasi, pirolisis dan gasifikasi sebagaimana yang difokuskan dalam penelitian ini, karakteristik bahan perlu untuk dipertimbangkan selain hanya nilai kalornya. Dalam hal ini, analisis proksimat berperan penting dalam memperediksi nilai kalor sampah. Normalnya, bahan yang lebih *volatile* atau kandungan abu yang kurang mempunyai nilai kalor yang lebih tinggi. Tetapi, khusus untuk bahan *volatile* apa yang terjadi adalah cenderung sebaliknya. Bahan *volatile* yang lebih tinggi menunjukkan prediksi HHV yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa estimasi berdasarkan persamaan-persamaan empirik sebagaimana yang digunakan dalam tulisan ini memberikan hasil yang lebih menunjukkan kebersetujuan terhadap hasil pengukuran.

Sebagaimana yang ditunjukkan oleh kinerja dari masing-masing model empirik, data karakterisasi secara fisik yang diperoleh baik melalui pengamatan demikian pula data analisis proksimat dari analisis laboratorium akan mempengaruhi estimasi terhadap HHV sampah. Misalnya, nilai-nilai yang ditunjukkan dalam Tabel 2 dan 3 merepresentasikan

keseluruhan jenis plastik, kertas, organik *biowaste*, demikian pula kayu. Padahal komponen-komponen tersebut mempunyai rentangan yang lebar sebagai fungsi dari sub-sub komponen yang termasuk dalam

komponen-komponen tersebut. Data yang lebih teliti demikian pula estimasi terhadap HHV yang lebih baik tentu dapat diperoleh dengan melibatkan sub-sub komponen tersebut dalam melakukan karakterisasi.

Tabel 6. Koefisien Korelasi dan Kesalahan-Kesalahan Relatif yang Dihasilkan ketika Model-Model Empirik Digunakan untuk Mengestimasi Kandungan Energi dari Sampah

No. Persamaan	R ²	% Kesalahan relatif				
		Rata-rata kesalahan absolut	Rata-rata kesalahan bias	Minimum	Maksimum	SD
(1) Jimenez	0,97	1,29	0,55	-0,77	2,10	0,59
(2) Sheng-1	0,94	1,59	1,23	-0,60	3,85	1,31
(3) Sheng-2	0,96	1,28	1,04	-0,35	2,68	1,10
(4) Demirbas-1	0,90	2,24	2,24	1,21	3,60	0,92
(5) Demirbas-2	0,97	1,22	1,22	0,48	2,21	0,68
(6) Cordero	0,89	2,26	2,26	1,45	3,34	0,73
(7) Bento	0,67	2,35	-2,35	-4,38	-0,13	2,05

4. Kesimpulan

Dalam literatur, terdapat beberapa model empirik untuk mengestimasi *higher heating value* (HHV) bahan bakar padat berdasarkan data analisis ultimat, proksimat dan kimia. Namun demikian dalam tulisan ini evaluasi dilakukan dengan memfokuskan pada model yang dikembangkan dengan berbasis data analisis proksimat. Ketelitian dari model-model ini dievaluasi secara statistik berdasarkan pada data komposisi sampah secara fisik dan analisis proksimat berdasarkan komponen-komponen utama penyusun sampah. Kesimpulan yang diperoleh dari 7 (tujuh) model empirik adalah bahwa kecuali model yang dikembangkan oleh Bento, enam model lainnya menunjukkan korelasi yang sangat tinggi. Korelasi terbaik ditunjukkan oleh model Jimenez dan

Demirbas-2 dengan R² = 0,97 diikuti oleh model Sheng-2 (R²=0,96), Sheng-1 (R²=0,94), Demirbas-1 (R²=0,90), dan Cordero (R²=0,89). Adapun parameter-parameter statistik lainnya : rata-rata kesalahan absolut, kesalahan bias, rentangan dan standar deviasikesalahan abolut semua model menunjukkan nilai yang relatif kecil.

Daftar Pustaka

- Vasilind, R. A; Worrel, W. A; Reinhart, D. R. 2002. New York : Brooks/Cole.
- Sheng, C, dan Azevedo, J.L.T. 2005. Biomass Bioenergy., 28,499-507.
- Quadis, M.A, dan Qdais, H. A. A. 2000. Energy Convers and Manage., 41, 983-991.
- Tchobanoglous, G. 1993. Singapore: McGraw-Hill.