

Model Perhitungan Energi Gas alam berbasis Pada Kecepatan Suara, Bulk Modulus, dan Komposisi Gas Diluent

Elohansen Padang^{a*}, Lilik Hendrajaya^a, Linus Ampang Pasasa^a, Hendro^b

^aKK Fisika Bumi dan Sistem Kompleks, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

^bKK Fisika Teoritik Energi Tinggi dan Instrumentasi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

*Email : elohansen_padang@yahoo.co.id

(Diterima 7 Mei 2019; Disetujui 20 Agustus 2019; Dipublikasikan 30 November 2019)

Abstrak

Gas alam merupakan campuran hidrokarbon kompleks yang karakteristik utama kualitasnya sering dinyatakan dalam bentuk nilai kalor, yaitu energi yang dilepaskan tiap satuan massa atau satuan volume bahan bakar ketika habis dibakar. Pengukuran energi gas alam saat ini umumnya dilakukan secara tidak langsung dengan mengkombinasikan *flow meter* dan kromatografi gas atau *gas analyzer*. Metode tidak langsung memiliki beberapa keterbatasan sehingga mendorong para peneliti mengembangkan metode alternatif menghitung energi gas alam. Pada penelitian ini, dikembangkan metode korelasi yang berbasis pada *bulk modulus* campuran gas alam, kecepatan suara, dan komposisi gas *diluent* sebagai alternatif metode perhitungan energi campuran gas alam. Pengembangan model dilakukan menggunakan 95 data komposisi gas alam yang dilaporkan oleh Morrow, *et al.* [11]. Data komposisi tersebut digunakan untuk menghitung kecepatan suara (v_s), massa jenis (ρ), dan rasio kapasitas panas (γ) campuran gas alam pada keadaan standar (15°C, 0,325 kPa). Kemudian nilai v_s , ρ , γ dan komposisi gas *diluent* (CO_2 dan N_2) dipakai untuk menghitung *bulk modulus* campuran gas alam dan *bulk modulus* hidrokarbon. Sementara itu, nilai kalor campuran gas alam pada keadaan standar dihitung dalam basis massa menggunakan data nilai kalor tiap-tiap komponen campuran gas alam yang terdapat dalam Standar GPA 2145. Setelah semua data fisis diperoleh, dilakukan pencocokan kurva untuk memperoleh model menghitung energi campuran gas alam. Hasil pengujian kinerja model menunjukkan bahwa persentase kesalahan adalah sebesar 0,0697% dengan rentang dari 0 sampai 0,119%, RMSE sebesar 0,0833, dan R sebesar satu. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa model yang dikembangkan memiliki akurasi tinggi sehingga dapat direkomendasikan sebagai metode alternatif untuk menghitung energi gas alam.

Kata kunci: gas alam, gas diluent, kecepatan suara, bulk modulus, metode korelasi, nilai kalor

1. Latar Belakang

Gas alam merupakan campuran hidrokarbon kompleks dengan sedikit kandungan anorganik yang terjadi secara alami. Gas alam lebih bersih dan ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil lainnya, seperti batubara dan minyak bumi, karena emisi gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO_2) lebih rendah [1].

Liberalisasi perdagangan gas alam telah memungkinkan gas alam yang diperdagangkan berasal dari sumber lapangan gas yang berbeda-beda. Sumber yang berbeda-beda tersebut akan menyebabkan sifat-sifat gas alam seperti komposisi, nilai kalor (*heating value*), Wobbe indeks, massa jenis, dan bilangan metana akan semakin bervariasi sehingga akan menyebabkan kualitas gas alam menjadi semakin bervariasi pula. Karakteristik utama kualitas gas alam dan paling sering digunakan adalah nilai kalornya [2,3]. Nilai kalor merupakan energi yang dilepaskan tiap satuan massa atau satuan volume bahan bakar

ketika habis dibakar. Nilai kalor suatu bahan bakar tergantung pada asumsi keadaan molekul-molekul air pada produk pembakaran. Nilai kalor gas ideal berbasis massa tiap-tiap komponen (*superior* dan *inferior*) umumnya diukur pada suhu $t = 288,15$ K dan tekanan absolut 101,325 KPa yang dapat dilihat dalam dokumen GPA Standard 2145 [4].

Saat ini, pengukuran energi gas alam secara langsung di pasar belum tersedia. Pengukuran energi umumnya dilakukan secara tidak langsung menggunakan *flow meter*, perangkat konversi volume, dan kromatografi gas atau *gas analyzer*. Pengukuran energi secara tidak langsung tersebut seringkali menganggap kualitas gas konstan dan mengabaikan variasi yang disebabkan oleh pencampuran gas dari sumber dan jenis yang berbeda seperti gas yang berasal dari LNG, biogas, gas alam impor, dan gas alam produksi dalam negeri [5]. Selain itu, meskipun analisis menggunakan kromatografi gas atau *gas analyzer* memberikan hasil pengukuran yang akurat, biaya

pengadaan dan pemeliharaan masih menjadi pertimbangan. Pasar membutuhkan metode alternatif berbiaya murah dalam penentuan kualitas gas alam untuk proses perdagangan energi gas alam dan untuk teknologi kendali proses [2].

Keterbatasan pengukuran energi gas alam secara tidak langsung telah mendorong para peneliti melakukan usaha intensif pengembangan metode alternatif pengukuran energi gas alam yang akurat, dapat diaplikasikan secara *real time*, dan berbiaya murah. Salah satu metode yang banyak dikembangkan adalah metode korelasi [6]. Metode korelasi didasarkan pada ide bahwa pengukuran sifat fisis seperti kecepatan suara, konduktivitas panas, absorpsi inframerah, dan permitivitas dielektrik cukup untuk mengkarakterisasi sifat-sifat gas alam dan memberikan informasi yang dibutuhkan untuk konversi energi [7].

Metode korelasi untuk pengukuran energi gas alam umumnya dilakukan dengan mengasumsikan gas alam sebagai empat komponen, yaitu nitrogen, karbon dioksida, metana, dan hidrokarbon dengan jumlah atom karbon lebih tinggi. Gas metana dan gas hidrokarbon lebih berat berkontribusi terbesar terhadap nilai kalor bahan bakar gas [8], kemudian gas nitrogen dan karbon dioksida merupakan gas diluent yang dapat menghambat proses pembakaran sehingga nilai kalor campuran gas lebih rendah jika dibandingkan dengan gas alam murni [9].

Beberapa penelitian tentang alternatif metode penentuan nilai kalor campuran gas alam menggunakan metode korelasi yang telah dilakukan antara lain penentuan nilai kalor berbasis jaringan syaraf tiruan menggunakan informasi kecepatan suara, konsentrasi CO₂, dan N₂ [2,9], pengukuran konduktivitas panas, kombinasi sensor absorpsi inframerah untuk mengukur komposisi hidrokarbon dan CO₂ untuk menentukan nilai kalor gas alam [7] monitor *wobbe index* menggunakan menggunakan *Fiber-Enhanced Raman Spectroscopy* [3], dan metode lain dengan menggunakan spektroskopi *Near Infrared* (NIR) untuk memperoleh informasi komposisi dan nilai kalor gas alam [10].

Pada penelitian ini, dikembangkan metode korelasi berbasis *bulk modulus* campuran gas alam, kecepatan suara, serta komposisi gas *diluent* yang terdapat pada campuran gas alam. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat dijadikan sebagai pendekatan baru metode alternatif untuk menghitung nilai kalor campuran gas alam.

Tabel 1. Rentang komposisi dan beberapa parameter fisis gas alam

Komponen	Rentang karakteristik
CH ₄ (mol%)	83,4187 - 98,2722
C ₂ H ₆ (mol%)	1,0118 - 9,5284
C ₃ H ₈ (mol%)	0,2128 - 3,5694
<i>i</i> - C ₄ H ₁₀ (mol%)	0,0355 - 0,6474
<i>n</i> - C ₄ H ₁₀ (mol%)	0,0239 - 0,0432
<i>i</i> - C ₅ H ₁₂ (mol%)	0,0139 - 0,0167
<i>n</i> - C ₅ H ₁₂ (mol%)	0,0063 - 0,0836
<i>n</i> - C ₆ H ₁₄ (mol%)	0,0030 - 0,0654
<i>n</i> - C ₇ H ₁₆ (mol%)	0 - 0,0260
<i>n</i> - C ₈ H ₁₈ (mol%)	0 - 0,0235
CO ₂ (mol%)	0,33 - 5,999
N ₂ (mol%)	0,33 - 5,999
ρ (kg/m ³)	0,74143 - 0,8289
v _s (m/s)	394,392 - 437,368
Hv (MJ/kg)	51,13 - 55,00

2. Metodologi

Seperti sudah disampaikan sebelumnya, tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan metode alternatif untuk menghitung nilai kalor gas alam dengan menggunakan beberapa parameter fisis dan kimia yang mudah diukur seperti suhu, tekanan, kecepatan suara, komposisi gas non-hidrokarbon (N₂ dan CO₂). Oleh karena itu, pengembangan metode Korelasi yang dikembangkan untuk menghitung kalor campuran gas alam diawali dengan membangun basis data, kemudian dilanjutkan dengan pengembangan dan pengujian model korelasi untuk mengestimasi kandungan energi gas alam.

2.A. Basis Data

Pengembangan model korelasi dilakukan menggunakan basis data yang terdiri dari 95 sampel campuran gas alam [11]. Basis data ini merupakan *array* campuran gas alam yang dimodifikasi dan parameter-parameternya telah diidentifikasi menggunakan kromatografi. Rentang karakteristik masing-masing komponen ditampilkan pada Tabel 1. Sementara itu, data komposisi gas alam yang telah dilaporkan sebelumnya [12,13], ditampilkan pada Tabel 2 dan digunakan sebagai data untuk menguji tingkat akurasi korelasi yang dikembangkan.

Selanjutnya, untuk menghasilkan basis data yang diperlukan, data komposisi campuran gas alam digunakan untuk menghitung kecepatan suara massa jenis, dan rasio kapasitas panas campuran gas alam pada keadaan suhu dan tekanan standar (15°C; 101,325 kPa). Perhitungan kecepatan suara,

Tabel 2. Komposisi campuran gas alam untuk pengujian

Komponen	Gas alam									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CH_4	82,54	91,44	89,66	88,12	98,66	90,04	88,05	94,38	86,93	90,04
C_2H_6	7,32	3,41	3,72	3,48	0,59	3,69	1,4	2,25	5,40	3,69
C_3H_8	5,46	0,89	1,10	1,10	0,09	0,93	0,34	0,53	1,70	0,93
C_4H_{10}	0,80	0,29	0,33	0,32	0,02	0,20	0,09	0,36	0,30	0,20
C_4H_{10}	1,08	0,27	0,32	0,35	0,04	0,29	0,13	0,00	0,45	0,29
$i - C_5H_{12}$	0,39	0,10	0,18	0,18	0,02	0,13	0,07	0,26	0,13	0,13
$n - C_5H_{12}$	0,27	0,06	0,11	0,12	0,02	0,08	0,06	0,00	0,11	0,08
$n - C_6H_{14}$	0,47	0,06	0,14	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$n - C_7H_{16}$	0,00	0,02	0,05	0,10	0,00	0,01	0,03	0,18	0,03	0,01
CO_2	1,65	3,34	4,28	5,92	0,00	0,00	0,35	0,14	1,85	0,00
N_2	0,03	0,13	0,11	0,11	0,56	4,48	7,85	1,90	3,10	4,48

massa jenis, dan rasio kapasitas panas campuran gas alam tersebut dilakukan menggunakan persamaan keadaan AGA10 yang tersedia pada perangkat lunak Kelton *FloCalc.Net* [14]. Data kecepatan suara dan massa jenis gas alam tersebut kemudian digunakan pada proses perhitungan *bulk modulus* campuran gas alam dan *bulk modulus* hidrokarbon.

Bulk modulus campuran gas alam (B) pada suhu dan tekanan standar dihitung dengan menyusun ulang persamaan (A-6) (uraian detil pada bagian Apendiks) menjadi,

$$B = v_s^2 \rho / \gamma \tag{1}$$

dengan ρ adalah massa jenis campuran gas alam dan v_s adalah kecepatan suara pada campuran gas alam dan γ adalah rasio kapasitas panas.

Bulk modulus gas hidrokarbon dihitung dengan mengurangi *bulk modulus* campuran gas alam dengan *bulk modulus* gas pengencer (*diluent*) yaitu gas CO_2 dan N_2 dengan menggunakan persamaan (A-13), sehingga diperoleh

$$B_{CH} = \frac{B(1 - x_{N_2} - x_{CO_2})}{1 - B \left(\frac{x_{N_2}}{B_{N_2}} + \frac{x_{CO_2}}{B_{CO_2}} \right)} \tag{2}$$

dengan B_{CH} adalah *bulk modulus* hidrokarbon, x_{N_2} adalah fraksi mol gas N_2 , dan x_{CO_2} fraksi mol gas CO_2 .

Dengan demikian, pada akhirnya, terbangun basis data yang terdiri atas komposisi gas, massa jenis, dan *bulk modulus* campuran gas alam serta *bulk modulus* hidrokarbon pada keadaan standar. Basis data ini akan digunakan pada tahap pengembangan model untuk perhitungan *bulk modulus* campuran gas alam dan *bulk modulus* gas hidrokarbon, serta perhitungan energi gas alam berbasis pada kecepatan suara, *modulus bulk*, dan

komposisi gas *diluent* yang akan dijelaskan pada bagian 2.2 Pengembangan Model.

2.1 Pengembangan Model

Setelah basis data terbangun, tahap selanjutnya adalah mengembangkan model korelasi nilai kalor berbasis *bulk modulus* campuran gas alam. Pengembangan model untuk mengestimasi *heating value* campuran gas alam diawali dengan menyusun ulang persamaan (A-7) (uraian detil pada bagian Apendiks) sehingga diperoleh volume molar campuran gas alam (v) sebagai

$$v = B \frac{\partial v}{\partial P} \approx B \frac{\Delta v}{\Delta P} \tag{3}$$

dengan P adalah tekanan gas alam. Selanjutnya, dengan mengingat bahwa gas alam pada suhu dan tekanan rendah berperilaku mendekati perilaku gas ideal dengan faktor kompresibilitas ($Z=1$) [11], persamaan (3) disubstitusi ke dalam persamaan keadaan gas ideal

$$pv = \frac{RT}{M} \tag{4}$$

sehingga diperoleh,

$$p \left(B \frac{\partial v}{\partial P} \right) = \frac{RT}{M} \text{ atau } p \left(B \frac{\Delta v}{\Delta P} \right) = \frac{RT}{M} \tag{5}$$

Dengan menyusun kembali persamaan (5), akan diperoleh massa molekul campuran gas alam (M) sebagai

$$M = \frac{RT \partial P}{PB \partial v} \approx \frac{RT \Delta P}{PB \Delta v} \tag{6}$$

atau

$$M = \sum_{i=1}^n x_i M_i = \frac{RT}{P \left(\sum_{i=1}^n \frac{B_i}{x_i} \right)} \frac{\partial P}{\partial v} \approx \frac{RT}{P \left(\sum_{i=1}^n \frac{B_i}{x_i} \right)} \frac{\Delta P}{\Delta v} \tag{7}$$

dengan x_i adalah fraksi mol gas ke- i , M_i adalah massa molekul gas ke- i , R adalah tetapan gas umum, dan T adalah suhu gas.

Nilai kalor gas alam dalam basis massa pada suhu keadaan standar dari campuran gas alam dapat dihitung dari persamaan,

$$H_m = \sum_{i=1}^n \left(x_i \frac{M_i}{M} \right) H_{m,i} \quad (8)$$

dengan H_m adalah nilai kalor ideal campuran gas alam berbasis massa, $H_{m,i}$ adalah nilai kalor ideal masing-masing komponen campuran pada basis massa, dan M adalah massa molar campuran. Persamaan (8) merupakan persamaan standar yang digunakan untuk menghitung nilai kalor gas alam berbasis massa dan nilai kalor masing-masing komponen ($H_{m,i}$) penyusun gas alam. Nilai-nilai yang dibutuhkan dalam perhitungan dapat diperoleh dari data konstanta fisika yang terdapat dalam GPA Standard 2145 [13]. Pada penelitian ini, nilai kalor hasil perhitungan persamaan (8) akan digunakan sebagai nilai kalor aktual campuran gas alam.

Massa molar campuran gas alam (M) pada persamaan (8) dapat dihitung menggunakan persamaan

$$M = \sum_{i=1}^n x_i M_i \quad (9)$$

Massa molekul pada persamaan (6) dan (7) disubstitusikan ke persamaan (8) dan dengan mengingat tekanan berubah serba sama untuk seluruh komponen gas serta gas menempati ruang yang sama, sehingga diperoleh nilai kalor sebagai

$$H_m = \sum_{i=1}^n x_i \left(\frac{B}{B_i} \right) H_{m,i} \quad (10)$$

Dari persamaan (10), terungkap bahwa hanya komposisi hidrokarbon dari gas alam yang berpengaruh dalam penentuan *heating value* gas alam, karena gas pengencer (*diluent*) tidak memiliki nilai kalor ($H_{m,CO_2} = H_{m,N_2} = 0$). Karena secara umum H_m adalah fungsi lemah dari komposisi hidrokarbon, maka H_m diasumsikan sebagai fungsi linear dari rasio *bulk modulus* campuran gas alam terhadap *bulk modulus* hidrokarbon (B/B_{CH}), sehingga model korelasi inferensial yang dipilih adalah

$$H_m = aB + \frac{bB}{B_{CH}} \quad (11)$$

dengan

$$b = (b_0 + b_1 x_{CO_2} + b_2 x_{N_2}) v_s \quad (12)$$

Koefisien-koefisien persamaan (11) dan (12) di-tampilkan pada Tabel 3. Koefisien-koefisien tersebut merupakan hasil pencocokan kurva dengan menggunakan metode kuadrat terkecil yang dila-kukan terhadap data komposisi gas alam yang telah dilaporkan [11].

Tabel 3. Nilai koefisien persamaan (11) dan (12)

Koefisien	Nilai
a	0,52049
b_0	-0,03013
a_0	-0,14893
a_0	-0,15948

2.2 Evaluasi Kinerja Model

Untuk memvalidasi model yang dikembangkan, Persentase kesalahan relatif terhadap nilai referensi (E_r), *root mean square error* ($RMSE$), dan koefisien korelasi (R) digunakan untuk membandingkan nilai kalor aktual dan nilai kalor hitung untuk menguji kinerja model yang dikembangkan. Parameter-parameter statistik tersebut diberikan oleh persamaan berikut

$$E_r = \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \times 100 \% \quad (13)$$

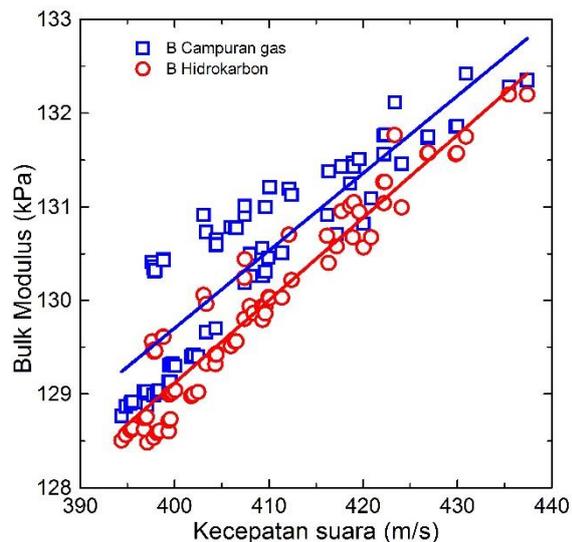
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (14)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (15)$$

Dengan x adalah nilai kalor aktual, y adalah nilai kalor prediksi menggunakan model, \bar{x} dan \bar{y} secara berurutan adalah nilai rata-rata aktual dan prediksi, serta i adalah data ke- i .

3. Hasil dan Pembahasan

Gambar 1 menampilkan hubungan antara *bulk modulus* dengan kecepatan suara gas alam. Berdasarkan grafik yang ditampilkan, dapat dilihat bahwa nilai *bulk modulus* berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan suara pada gas alam ($B \propto v_s^2$). Nilai *bulk modulus*, baik untuk campuran gas hidrokarbon (kotak berwarna biru) maupun hidrokarbon (lingkaran berwarna merah), meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan suara. Penyimpangan titik-titik data nilai *bulk modulus* campuran dan *bulk modulus* gas hidrokarbon dari garis linear kemungkinan disebabkan oleh variasi komposisi komponen penyusun campuran gas alam. Koefisien korelasi (R) antara *bulk modulus*

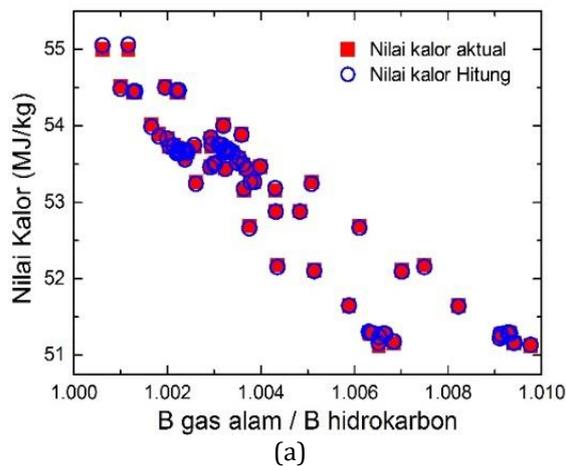


Gambar 2 Grafik bulk modulus campuran gas alam dan bulk modulus hidrokarbon terhadap kecepatan suara pada gas alam

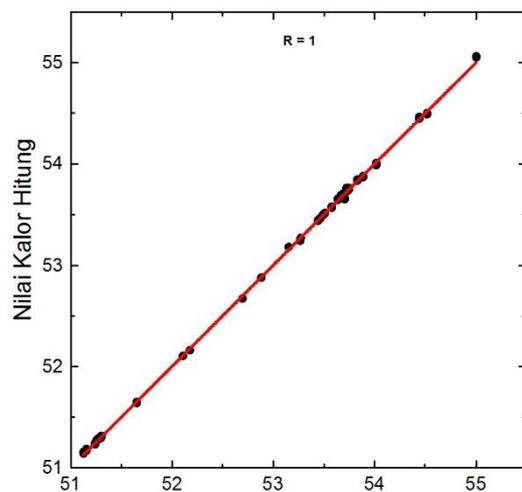
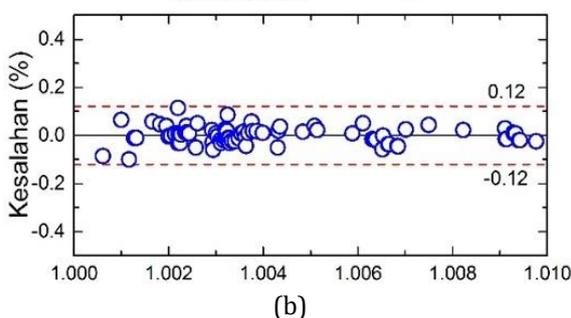
dengan kecepatan suara sebesar 0,957 menunjukkan adanya keterkaitan yang kuat antara *bulk modulus* dengan kecepatan suara. sesuai dengan persamaan (1) dan (2).

Selanjutnya, Gambar 2 menampilkan grafik perbandingan nilai kalor aktual dan nilai kalor hasil perhitungan menggunakan metode korelasi [persamaan (11) dan (12)]. Data komposisi gas alam yang digunakan pada tahap ini sama dengan data komposisi yang digunakan pada proses pencocokan kurva untuk memperoleh koefisien persamaan (11) dan (12). Tujuan tahap ini adalah untuk memvalidasi apakah hasil perhitungan nilai kalor gas alam menggunakan model korelasi yang yang dikembangkan memberikan hasil perhitungan yang akurat jika dibandingkan dengan nilai kalor aktual. Jika hasil validasi memberikan hasil yang akurat, proses dilanjutkan dengan pengujian model korelasi. Pada proses ini, data yang melibatkan adalah data komposisi campuran gas alam yang tidak melibatkan dalam proses pencocokan kurva saat proses pengembangan model.

Berdasarkan pengamatan visual pada Gambar 2.a, dapat dilihat bahwa trend sebaran titik data nilai kalor gas alam menurun secara linear seiring dengan kenaikan rasio *bulk modulus* campuran gas alam terhadap *bulk modulus* hidrokarbon (B_C/B_{HC}). Hal ini sesuai dengan persamaan korelasi [persamaan (11) dan (12)] yang menunjukkan adanya hubungan linear antara B_C/B_{HC} dengan H_m . Dari grafik tersebut, dapat pula dilihat bahwa nilai kalor aktual (titik berwarna merah) dengan



RMSE = 0.0335



Gambar 1. Hasil validasi pada data a. sebaran nilai kalor aktual dan nilai kalor model, b. persentase kesalahan absolut antara nilai kalor aktual dengan model, dan c. korelasi antara nilai kalor aktual dengan model.

nilai kalor hasil perhitungan (titik berwarna hijau) secara umum sangat berimpit. Hal ini didukung dengan hasil perhitungan parameter statistik, yaitu nilai persentase kesalahan absolut rata-rata sebesar 0,0259% dan berada pada rentang 0,0013% sampai 0,1147% (seperti ditunjukkan

pada Gambar 2.b), nilai RMSE sebesar 0,0335, dan $R = 1$. Nilai kesalahan dan RMSE yang kecil mengindikasikan bahwa nilai kalor hasil perhitungan secara umum sangat dekat dengan nilai kalor aktual gas alam. Nilai R sama dengan satu menunjukkan adanya korelasi yang sangat kuat antara nilai kalor aktual gas alam dengan nilai kalor hasil perhitungan. Dengan kata lain, nilai kalor hasil perhitungan dapat mengikuti *trend* nilai kalor aktual gas alam.

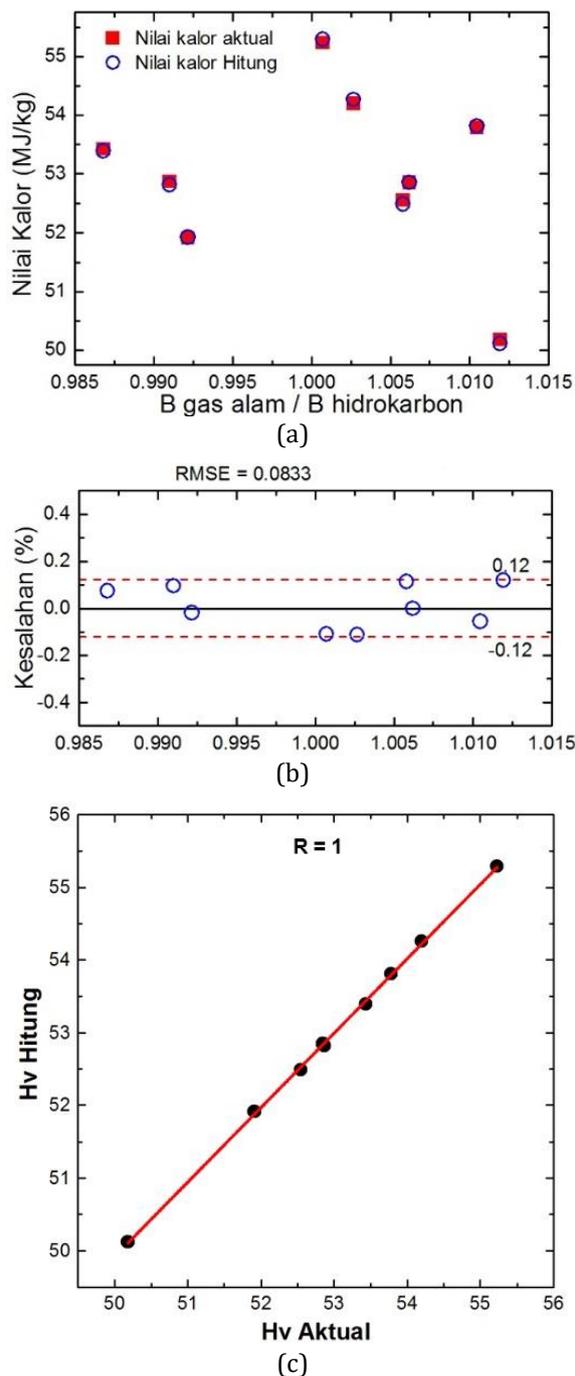
Pada tahap selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap model korelasi yang dikembangkan menggunakan data komposisi gas alam. Pada tahap ini, data yang digunakan adalah data komposisi gas alam yang terdapat pada Tabel 2. Data ini merupakan data komposisi gas alam yang tidak dilibatkan pada proses pencocokan kurva untuk memperoleh koefisien-koefisien persamaan (11) dan (12). Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3, dapat dilihat bahwa secara umum hasil pengujian tidak jauh berbeda dengan hasil validasi yang sudah dijelaskan sebelumnya. Nilai kalor hasil perhitungan menggunakan model korelasi yang dikembangkan secara umum berimpit dengan nilai kalor aktual gas alam (Gambar 3.a). Hal ini dikonfirmasi oleh rata-rata persentase kesalahan yang sangat kecil, yaitu 0,0697% dalam rentang dari 0 sampai 0,119% (Gambar 3.b), demikian halnya dengan nilai RMSE sebesar 0,0833, dan nilai R sebesar satu (Gambar 3.c). Hal ini mengindikasikan bahwa hasil perhitungan nilai kalor gas alam menggunakan model yang dikembangkan sangat dekat dengan nilai kalor aktual gas alam.

Dari hasil validasi dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa model perhitungan nilai kalor gas alam berbasis *bulk modulus* gas alam yang dikembangkan dapat digunakan sebagai metode alternatif untuk menghitung nilai kalor gas alam disamping metode konvensional yang telah dikenal dan digunakan secara luas di dalam industri migas seperti metode kromatografi dan kalorimeter.

4. Kesimpulan

Telah dilakukan pengembangan metode alternatif perhitungan nilai kalor gas alam berbasis pada kecepatan suara, *bulk modulus*, dan komposisi gas *diluent*. Kinerja model menunjukkan bahwa pada proses pengujian untuk menghitung nilai



Gambar 3. Hasil pengujian model korelasi a. sebaran nilai kalor aktual dan nilai kalor model, b. persentase kesalahan absolut antara nilai kalor aktual dengan model, dan c. hubungan antara nilai kalor aktual dengan model.

kalor gas alam diperoleh persentase kesalahan sebesar 0,0697% dengan rentang dari 0 sampai 0,119%, nilai RMSE sebesar 0,0833, dan nilai $R = 1$. Hal ini mengindikasikan bahwa model yang dikembangkan memiliki akurasi yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai alternatif untuk menghitung energi gas alam.

Apendiks A: Penurunan Persamaan *Bulk Modulus Gas Alam dan Persamaan Keadaan Gas Ideal Gas*

A-1 *Bulk Modulus Campuran Gas Alam*

Kecepatan suara v_s dapat didefinisikan sebagai kecepatan gelombang yang bergerak melalui media dengan tekanan yang sangat kecil dan frekuensi nol. Persamaan dasar yang menghubungkan kecepatan fase gelombang akustik longitudinal v_s dengan sifat-sifat termodinamika dari fluida homogen adalah [15]

$$v_s^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s \quad (A-1)$$

dengan p adalah tekanan, ρ adalah massa jenis, s adalah entropi jenis. Akan tetapi, karena entropi bukan merupakan sifat yang dapat diukur secara langsung, turunan isentropis pada persamaan (A-1) biasanya diganti dengan turunan yang sesuai pada suhu konstan melalui hubungan termodinamika berikut

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \frac{c_p}{c_v} \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T \quad (A-2)$$

dengan T adalah suhu, c_p dan c_v secara berturut-turut adalah panas jenis pada tekanan konstan dan panas jenis volume konstan. Dengan melakukan substitusi persamaan (A-2) ke dalam (A-1) dan mengganti rasio panas jenis pada tekanan konstan dan volume konstan dengan γ diperoleh

$$v_s^2 = \gamma \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_T \quad (A-3)$$

Ketika gelombang suara melewati gas, energi potensial berkaitan dengan kompresi dan ekspansi periodik elemen-elemen kecil volume gas. Sifat yang menentukan sejauh mana suatu elemen volume dari medium berubah ketika diberi tekanan (gaya per satuan luas) adalah *bulk modulus* B , yang didefinisikan sebagai [16]

$$B = -\frac{dP}{(dV/V)} \quad (A-4)$$

dengan dV/V merupakan perubahan fraksional volume yang dihasilkan oleh perubahan tekanan dP . Tanda negatif menunjukkan bahwa dV/V dan dP selalu berlawanan, yaitu ketika tekanan pada elemen ditambah (dP positif), volumenya akan berkurang (dV negatif). Selanjutnya dengan mengingat bahwa $-\frac{dV}{V} = \frac{d\rho}{\rho}$ maka persamaan (A-4) dapat dituliskan menjadi

$$B = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (A-5)$$

Kemudian jika persamaan (A-4) disubstitusikan ke dalam (A-3) diperoleh persamaan kecepatan suara pada suatu medium sebagai

$$v_s^2 = \frac{B}{\rho} \quad (A-6)$$

Pada gas alam, rasio panas jenis pada tekanan tetap terhadap panas jenis pada volume tetap juga dipengaruhi oleh komposisi gas diluent [11]

Definisi *bulk modulus* pada persamaan yang diberikan pada persamaan (A-4) dapat dituliskan sebagai [16]

$$\partial V = \frac{V \partial P}{B} \cong \frac{V \Delta P}{B} \quad (A-7)$$

Perubahan total volume berkaitan dengan perubahan masing-masing gas atau fasa jika dua terdapat dua material atau lebih sehingga dapat dituliskan,

$$\begin{aligned} \partial V &= \partial V_1 + \partial V_2 + \dots + \partial V_i \\ &\cong \Delta V_1 + \Delta V_2 + \dots + \Delta V_i \end{aligned} \quad (A-8)$$

dengan melakukan substitusi persamaan (A-8) ke dalam (A-7) diperoleh

$$\begin{aligned} \partial V &= \frac{V_1 \partial P}{B_{T_1}} + \frac{V_2 \partial P}{B_{T_2}} + \dots + \frac{V_i \partial P}{B_{T_i}} \\ &\cong \frac{V_1 \Delta P}{B_{T_1}} + \frac{V_2 \Delta P}{B_{T_2}} + \dots + \frac{V_i \Delta P}{B_{T_i}} \end{aligned} \quad (A-9)$$

diasumsikan bahwa model ini memiliki volume total merupakan penjumlahan dari masing-masing volume

$$V = x_1 V + x_2 V + \dots + x_i V \quad (A-10)$$

dengan menggunakan identitas dan kenyataan bahwa tekanan berubah serba sama untuk seluruh fasa persamaan (A-9) dapat ditulis sebagai

$$\begin{aligned} \partial V &= V \partial P \left(\frac{x_1}{B_{T_1}} + \frac{x_2}{B_{T_2}} + \dots + \frac{x_i}{B_{T_i}} \right) \\ &\cong V \Delta P \left(\frac{x_1}{B_1} + \frac{x_2}{B_2} + \dots + \frac{x_i}{B_i} \right) \end{aligned} \quad (A-11)$$

dengan menyusun ulang persamaan (A-7) diperoleh

$$\begin{aligned} v \frac{\partial P}{\partial v} &\cong v \frac{\Delta P}{\Delta v} \\ &= \frac{1}{\left(\frac{x_1}{B_1} + \frac{x_2}{B_2} + \dots + \frac{x_i}{B_i}\right)} \end{aligned} \quad (A-12)$$

Persamaan (A-12) merupakan nilai rata-rata

bulk modulus campuran gas alam yang dapat dituliskan sebagai

$$B = \frac{1}{\left(\frac{x_1}{B_1} + \frac{x_2}{B_2} + \dots + \frac{x_i}{B_i}\right)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{B_i}} \quad (\text{A- 13})$$

A-2 Persamaan Gas Ideal

Ketika massa jenis cukup rendah, seluruh gas nyata akan memenuhi hukum gas ideal,

$$pV = nRT \quad (\text{A- 14})$$

dengan p adalah tekanan absolut, V adalah volume gas, n adalah jumlah mol gas, T adalah suhu dalam kelvin, R adalah konstanta gas yang nilainya sama untuk seluruh gas $R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. Jika volume molar $v = \frac{V}{n} = \frac{M}{\rho}$ maka persamaan gas ideal dapat dituliskan sebagai

$$pv = \frac{RT}{M} \quad (\text{A- 15})$$

dengan M adalah massa molekul.

Daftar Pustaka

- [1] Farzaneh-Gord, M. and Rahbari, H. R., Developing novel correlations for calculating natural gas thermodynamic properties, *Chemical and Process Engineering*, **32**(4), pp.435-452, 2011.
- [2] Koturbash, T., Karpash, M., Darvai, I., Rybitskiy, I., and Kutcherov, V., Development of new instant technology of natural gas quality determination, *Proceedings of the ASME 2013 Power Conference*, (July 29-August 1, 2013), pp.1-6, 2013.
- [3] Dorr, Holger;Koturbash, Taras; Kutcherov, V., Review of Impacts of Gas Qualities with Regard to Quality determination and Energy Metering of Natural Gas, *Measurement Science and Technology*, pp.1-38, 2018.
- [4] Processor Gas Association, GPA 2145-09: Table of Physical Properties for Hydrocarbons and Other Compounds of Interest to the Natural Gas Industry, 2009.
- [5] Ficco, G., Dell'Isola, M., Vigo, P., and Celenza, L., Uncertainty analysis of energy measurements in natural gas transmission networks, *Flow Measurement and Instrumentation*, **42**, pp.58-68, 2015.
- [6] Schley, P., Jaeschke, M., Altfeld, K., and Ruhrgas, A. G., New technologies for gas quality determination, *Proceedings of the 22nd World Gas Conference*, (January 2003), pp.1-12, 2003.
- [7] Jaeschke, M., Schley, P., and Rosmalen, R. J. Van, Thermodynamic Research Improves Energy Measurement in Natural Gas, *International Journal*, **23**(4), pp.1013-1031, 2002.
- [8] Lueptow, R. M. and Phillips, S., Acoustic sensor for determining combustion properties of natural gas, *Measurement Science and Technology*, **5**(11), pp.1375-1381, 1994.
- [9] Karpash, O., Darvai, I., and Karpash, M., New approach to natural gas quality determination, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **71**(3-4), pp.133-137, 2010.
- [10] Jangale, V., Zalepouga, S., Saveliev, A., Gnatenko, V., and Pratapas, J., A Real-Time Method for Determining the Composition and Heating Value of Opportunity Fuel Blends, *Proceedings of the ASME 2012 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference ICES2012*, pp.1-8, 2012.
- [11] Morrow, T.B., Kelner, E., and Minachi, A., Development of a Low Cost Inferential Natural Gas Energy Flow Rate Prototype Retrofit Module. (October) . (2000).
- [12] Gunawan, Tjokronegoro, H. A., Leksono, E., and Nugraha, N. , Nonadiabatic Condition on the Natural Gas Energy Custody Transfer Using Orifice Flow Meter, *Mapan - Journal of Metrology Society of India*, **30**(2), pp.77-84, 2015.
- [13] Farzaneh-Gord, M., Arabkoohsar, A., and Koury, R. N. N., Novel natural gas molecular weight calculator equation as a functional of only temperature, pressure and sound speed, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **30**pp.195-204, 2016.
- [14] Smith, J. P. and Clancy, J., Understanding aga report no. 10.
- [15] Bijedić, M. and Begić, S., Thermodynamic properties of vapors from speed of sound, *Journal of Thermodynamics*, **2014**, pp.10-15, 2014.
- [16] Meir, G. B. ,Basics of Fluid Mechanics, 2013.