

SIFAT TERMODINAMIKA CAMPURAN PROPANA/N-BUTANA DAN KEMUNGKINANNYA SEBAGAI SUBSTITUSI REFRIGERAN R12

Aryadi Suwono dan Willy Adriansyah
Laboratorium Teknik Pendingin, Jurusan Teknik Mesin, FTI, ITB
Laboratorium Termodinamika, PAU-Ilmu Rekayasa, ITB

ABSTRAK

Di bidang teknik pendingin terbitnya kesepakatan Protokol Montreal, mencetuskan masalah yang cukup besar, karena R12 (CCl_2F_2) dan refrigeran sejenis lainnya yang selama ini menjadi refrigeran andalan, tidak akan lagi dapat dipakai dan perlu segera dicarikan penggantinya. Dalam tulisan ini dibahas mengenai peluang pemakaian campuran propana/n-butana sebagai alternatif substitusi sementara R12 hingga refrigeran pengganti yang lebih baik dan ekonomis dapat diperoleh di pasaran. Untuk prediksi sifat termodinamika campuran tersebut, dalam tulisan ini diusulkan sebuah persamaan tingkat keadaan termodinamika yang dapat dievaluasi dari sifat masing-masing unsurnya. Pembahasan dititik-beratkan pada penjabaran dan pengembangan persamaan tersebut serta hasil yang diperoleh dikaitkan dengan usaha untuk mendekati sifat termodinamika R12.

1. PENDAHULUAN

Sejak tahun 1930, fluida kerja gugus chlorofluorocarbon (CFC) telah mulai digunakan secara meluas dalam bidang teknik pendingin, pengkondisian udara dan pompa kalor. Pesatnya perkembangan pemakaian CFC tersebut didasarkan pada keunggulan-keunggulan yang dimilikinya baik ditinjau dari sifat termodinamikanya maupun keamanan dalam pemakaiannya (tak beracun, tak mudah terbakar dan tak merusak material peralatan sistem). Sinyalemen bahwa zat ini bertanggung jawab terhadap terjadinya lubang ozon dan penambahan efek 'rumah hijau' di bagian yang lebih tinggi pada atmosfer kita, sebenarnya telah dilontarkan sejak 20 tahun yang lalu, akan tetapi baru pada tahun 1987 dapat dibahas secara lebih tuntas dalam forum internasional yang dituangkan dalam buletin yang dikenal dengan Protokol Montreal^[1] sepakat bahwa penyebab lubang ozon yang terbentuk terutama di atmosfer bagian atas daerah kutub utara tersebut adalah diakibatkan oleh pelepasan unsur halogen CFC (chlorofluorocarbon) yang telah sangat berlebihan ke atmosfer. Dalam kesepakatan internasional ini, pihak industri didesak untuk secara bertahap menghapus pemakaian semua jenis CFC.

Fraksi utama pelepasan CFC ke atmosfer berasal dari pemakaian zat tersebut sebagai fluida kerja (refrigeran) sistem pendingin. Untuk mengantisipasi desakan Protokol Montreal tersebut, pihak industri mengajukan periode transisi hingga berkembangnya refrigeran baru, untuk tetap menggunakan refrigeran komersial lain dari keluarga CFC yang mempunyai tingkat sifat halogenya lebih lemah^[2-4]. Seperti telah diketahui sifat halogen dari kelompok HCFC dan HFC relatif lebih lemah. Akan tetapi hal tersebut ternyata tidak mudah untuk dilaksanakan, banyak peralatan yang standard tidak dirancang untuk penggunaan refrigeran tersebut. Cara lain yang dapat dilakukan adalah pencampuran secara azeotropik^[5,6] atau non-azeotropik^[7-10] dari refrigeran komersial yang tersedia, bila substitusi

langsung belum dimungkinkan (seperti untuk kulkas dan AC mobil).

Dalam tulisan ini akan diketengahkan, bagian pertama dari hasil penelitian yang telah diperoleh terhadap kemungkinan pemakaian campuran propana dan n-butana sebagai substitusi R12. Meskipun tidak sedikit kelemahan yang dimiliki oleh refrigeran yang diusulkan ini, namun sebagaimana akan ditunjukkan dalam pembahasan, paling tidak untuk kondisi darurat atau selama periode transisi hingga ditemukannya fluida kerja yang lebih baik penerapan fluida kerja tersebut dapat dijadikan alternatif dalam mengatasi masalah, terutama untuk lemari-lemari pendingin rumah tangga.

2. SIFAT UTAMA REFRIGERAN

Sifat utama yang dijadikan kriteria untuk pemilihan refrigeran pada mulanya adalah sifat termofisik tidak merusak (korosif, erosi) dan tidak berbahaya (beracun, mudah terbakar) dan stabil secara kimiawi (tidak berubah struktur selama pemakaian). Pertimbangan inilah dan terutama kriteria yang terakhir yang mendasari dikembangkannya refrigeran dari gugus CFC. Akan tetapi pemakaian chlorine (Cl) yang membuat refrigeran bersifat stabil secara kimiawi terhadap pengaruh atmosfer (halogen), justru CFC dapat mencapai lapisan ozon dan merusaknya. Oleh karena itu, kriteria untuk pemilihan refrigeran mengalami perubahan. Kriteria lingkungan hidup secara global yang semula tidak diperhitungkan perlu ditinjau kembali dalam mengembangkan refrigeran alternatif.

Dalam Gb. 1 dan 2 ditunjukkan senyawa yang dapat dibentuk dari unsur carbon, hidrogen, fluorine dan chlorine yang tergabung dalam keluarga CFC. Gb. 1 menunjukkan keluarga CFC dari turunan methana atau lebih dikenal dengan merek dagang berdigit dua (bilangan dalam digit pertama dan kedua masing-masing menunjukkan kandungan H dan F), sedangkan Gb. 2 menunjukkan keluarga CFC

berdigit 3 (kandungan H dan F ditunjukkan dalam digit kedua dan ketiga). Refrigeran dengan kotak garis penuh pada kedua gambar tersebut menunjukkan bahwa refrigeran tersebut telah mencapai tahap komersial dan kotak dengan garis putus menunjukkan masih pada tahap pengembangan. Sifat utama (diluar termofisik) dari kedua keluarga CFC tersebut telah diteliti⁵¹ dan secara ringkas hasil yang diperoleh adalah seperti ditunjukkan dalam Gb.3. Dengan demikian, bila sebagai refrigeran substitusi dari R12 masih akan dikembangkan dari keluarga CFC, selain dari segi sifat termodinamika harus mendekati, harus pula memperhitungkan kriteria sebagaimana ditunjukkan dalam Gb. 3. Pencanangan R134a sebagai refrigeran substitusi R12 diantaranya adalah atas pertimbangan tersebut.

3. TERMODINAMIKA CAMPURAN BINER

Untuk tujuan tertentu, campuran biner tak-bereaksi terlarut (miscible) dapat didekati sebagai campuran ideal di mana sifat campuran dapat ditentukan dari sifat masing-masing unsurnya dengan mengabaikan kemungkinan terjadinya saling pengaruh pada sifat pribadi unsur tersebut akibat interaksi pada skala molekuler. Dengan pendekatan ini, parameter yang berperan selain sifat masing-masing unsur adalah fraksi mol yang ditunjukkan oleh Raoult (untuk fasa cair) dan Dalton (untuk fasa gas) sama dengan perbandingan tekanan parsial unsur-unsurnya terhadap tekanan total campuran atau,

$$x_i = \frac{P_i}{P} \quad (1)$$

$$y_i = \frac{P_i}{P} \quad (2)$$

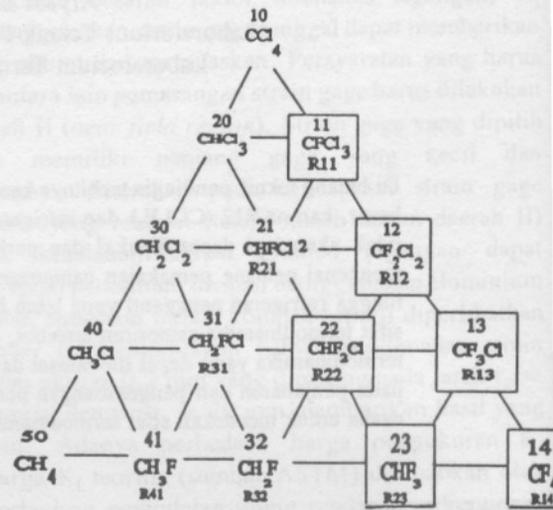
Karena dalam pendekatan campuran ideal interaksi antar-molekuler diabaikan, maka volume campuran persis sama dengan penjumlahan volume parsial tiap komponen (Hk. Amagat). Disamping itu juga, dari pengabaian interaksi molekuler tersebut maka kemungkinan terjadinya evolusi ataupun absorpsi panas akibat pencampuran tidak diperhitungkan, sehingga enthalpi campuran dapat ditentukan hanya dari enthalpi tiap komponen yang membentuk campuran tersebut. Jadi,

$$V_{mix} = \sum x_i V_i = x_1 V_1 + x_2 V_2 \quad (3)$$

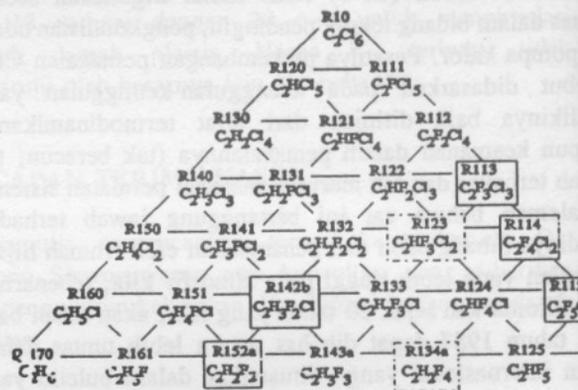
$$H_{mix} = \sum x_i H_i = x_1 H_1 + x_2 H_2 \quad (4)$$

Dalam kondisi riil, pada campuran biner, perilaku suatu molekul yang dikelilingi oleh molekul lain yang tidak identik atau berbeda dibanding dengan kondisi bila molekul tersebut dikelilingi oleh molekul dari unsur yang sama. Kondisi ini berlaku baik untuk fasa cair maupun uap.

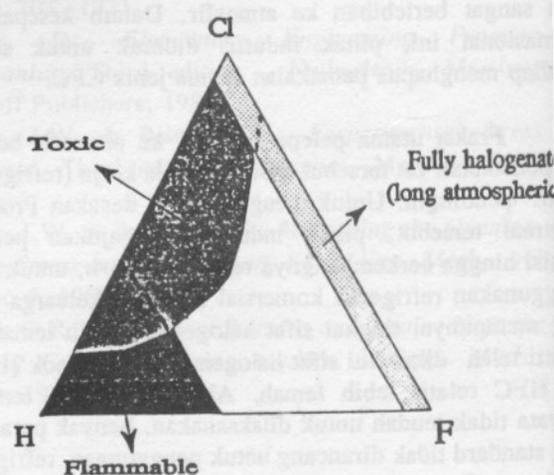
Tambahan gaya tarik atau gaya tolak akan berlangsung tingkat molekuler dengan kehadiran molekul unsur lain dalam banyak kasus kondisi ini tidak dapat diabaikan.



Gb. 1. CFC turunan methana



Gb. 2. CFC turunan ethana



Gb. 3. Karakteristik utama refrigeran CFC.

Tambahan gaya tolak-menolak, akan mengakibatkan tekanan parsial campuran akan menjadi lebih besar daripada tekanan parsial yang diperoleh dengan pendekatan Hukum Raoult. Dengan kata lain, adanya gaya tolak ini memberi kecenderungan tiap molekul untuk melepaskan diri dari campuran cair dibandingkan bila molekul ini berada dalam keadaan terpisah. Deviasi jenis ini disebut dengan deviasi positif dari keadaan ideal. Batas deviasi positif dari keadaan ideal adalah ketika gaya tolak antar molekul sangat besar dimana kedua komponen menjadi tak-tercampur (*miscible*). Sebaliknya bila gaya yang timbul akibat pencampuran adalah gaya tarik-menarik, maka kecenderungan tiap molekul untuk melepaskan diri menjadi berkurang. Tekanan parsial tiap komponen menjadi lebih kecil daripada tekanan menurut Hukum Raoult. Penyimpangan ini disebut dengan deviasi negatif dari keadaan ideal. Sebagai konsekuensinya maka untuk campuran riil, persamaan (3) dan (4) perlu dikoreksi.

Persamaan untuk entalpi campuran non-ideal dapat diperoleh dengan cara menjumlahkan enthalpi parsial tiap komponennya dan dikoreksi dengan kemungkinan tercetusnya evolusi atau absorpsi panas saat berlangsung proses pencampuran. Untuk campuran dengan deviasi negatif yang menghasilkan evolusi panas dan campuran dengan deviasi positif yang menghasilkan absorpsi panas, persamaan entalpi dapat ditulis masing-masing sebagai,

$$H_{mix} = \sum x_i H_i - \Delta H_{mix} \quad (5)$$

$$H_{mix} = \sum x_i H_i + \Delta H_{mix} \quad (6)$$

Untuk mendapatkan ketelitian yang memadai, prediksi campuran antara propana dan n-butana, dalam tulisan ini akan diperlakukan sebagai campuran non-ideal.

4. SIFAT TERMODINAMIKA UNSUR PROPANA DAN N-BUTANA

4.1. Persamaan Tingkat Keadaan

Persamaan tingkat keadaan untuk unsur propana dan n-butana secara individu telah tersedia dalam berbagai bentuk^[12,14](persamaan aljabar, tabel, grafik). Sebagai persamaan tingkat keadaan aljabar yang lazim dipakai untuk kedua unsur tersebut adalah persamaan gas riil dengan menggunakan faktor kompresibilitas yang masih merupakan fungsi suhu dan tekanan yang diberikan dalam bentuk grafik atau tabel.

Untuk memudahkan dalam penerapan selanjutnya terutama sebagai basis data komputer, dalam tulisan ini akan dilakukan pendekatan yang berbeda. Untuk tujuan tersebut, sebagai persamaan tingkat keadaan akan dipakai persamaan

yang diusulkan oleh Riazi-Mansoori^[11] untuk hidrokarbon ringan yaitu,

$$P = \frac{RT}{(v-b)} - \frac{a}{T^{1/2}v(v+b)} \quad (7)$$

di mana,

$$a = 0.42748 \cdot R^2 \cdot T_c^2 \cdot P_c \quad (8)$$

$$b = (0.08664 \cdot R \cdot T_c / P_c) / \beta(R^* T_c) \quad (9)$$

$$\beta = 1 + (\exp[1 - 0.92 \cdot \exp(-1000 \cdot |T_c - 1|)] - 0.035 \cdot (T_c - 1)) \cdot (R^* - 1) \quad (10)$$

Persamaan tersebut pada hakekatnya merupakan hasil modifikasi persamaan tingkat keadaan Redlich-Kwong agar dapat diterapkan di daerah jenuh (baik uap maupun cairan) dengan menyempurnakan konstanta b untuk memperhitungkan aspek mikroskopik ruang bebas antarmolekul yang semakin sempit pada daerah jenuh tersebut. Oleh karena itu, pada persamaan tingkat keadaan hasil modifikasi, parameter a dibuat konstan, sedangkan parameter b dimodifikasi dengan melibatkan parameter lain yaitu β yang merupakan fungsi dari besaran refraksi molar (R^*) dan suhu yang direduksi Tr (T/T_c). Dalam Tabel 1 ditunjukkan harga besaran-besaran tersebut untuk masing-masing unsurnya. Dapat ditunjukkan, bahwa kesalahan maksimum hasil penerapan persamaan tingkat keadaan (1) untuk masing-masing unsur ternyata tidak lebih dari 1.4 %.

Tabel 1. Harga besaran T_c , P_c , dan R^* untuk propana dan n-butana

Unsur	T_c (K)	P_c (bar)	R^*	kisaran suhu (K)	kisaran tekanan (bar)
Propana	369.8	42.5	2.259	85-700	0.1-700
n-Butana	425.2	38.0	2.929	130-700	0.1-700

4.2. Tekanan dan Suhu Jenuh

Karena persamaan persamaan (7) merupakan fungsi kubik dari volume jenis, dapat ditunjukkan untuk setiap pasangan P dan T pada umumnya akan memberikan 3 harga volume jenis kecuali pada tingkat keadaan kritis dan di atasnya. Oleh karena itu, untuk tingkat keadaan di bawah titik kritis perlu ada persamaan lain yang memisahkan fasa cair dan fasa gas.

Dalam keadaan keseimbangan termodinamika, pada keadaan cair jenuh dan uap jenuh, tekanan merupakan fungsi dari suhu saja. Di antara kedua tingkat keadaan tersebut

harga volume jenis tidak hanya mempunyai harga tiga melainkan tak hingga, oleh karena itu persamaan (7) tidak berlaku untuk daerah fasa campuran. Hubungan antara tekanan uap dan suhu yang diusulkan^[11] adalah,

$$\ln P_r^s = f(\omega)(1 - T_r^s)^{-1} \quad (11)$$

di mana,

$$f(\omega) = a(\omega)T_r^s + b(\omega)(T_r^s)^{1.5} + c(\omega)(T_r^s)^3 + d(\omega)(T_r^s)^6 \quad (12)$$

$$\omega = (-\log P_r^s)_{T_r=0.7} - 1 \quad (13)$$

$$a(\omega) = -6,156 - 4,087\omega \quad (14)$$

$$b(\omega) = 1,574 - 1,054\omega - 4,437 \cdot 10^{-3}d(\omega) \quad (15)$$

$$c(\omega) = -0,875 - 7,887\omega \quad (16)$$

$$d(\omega) = (-0,489 - 0,991\omega + 3,155\omega^2)^{-1} \quad (17)$$

Apabila tekanan dan suhu jenuh telah diketahui, volume jenis cair jenuh dan uap jenuh dapat diprediksi melalui persamaan (7) dengan mengambil masing-masing sebagai harga minimum dan maksimumnya.

4.3. Entalpi Cair Jenuh dan Uap Jenuh

Data entalpi jenuh secara individu dari unsur propana dan n-butana telah tersedia dalam dalam berbagai bentuk^[12,13] terutama dalam bentuk tabel dan grafik. Agar data ini dapat digunakan dalam perhitungan dengan komputer memakai persamaan yang sedang dikembangkan, maka di sini telah disusun dalam bentuk persamaan aljabar. Persamaan polinomial entalpi jenuh sebagai fungsi suhu ini disusun dengan metode 'curve fitting' hingga derajat sembilan pada kisaran suhu -20°F sampai 180°F. Hasil yang diperoleh dapat ditulis sebagai,

$$H_f = \sum_{i=1}^9 H_f(i)T^{(i-1)} \quad (18)$$

$$H_g = \sum_{i=1}^9 H_g(i)T^{(i-1)} \quad (19)$$

Hasil perhitungan konstanta $H_f(i)$ dan $H_g(i)$ untuk

tingkat keadaan cair jenuh dan uap jenuh dari ditunjukkan masing-masing dalam Tabel 2 dan

Tabel 2 Konstanta enthalpi cair jenuh

$H_f(i)$	propana	n-butana
$H_f(1)$	106.1832551755732	103.715063339784
$H_f(2)$	0.5186415224774886	0.5373143461222436
$H_f(3)$	-1.86298675840261E-5	-3.531461986025607E-3
$H_f(4)$	1.823908282722029E-5	1.869016425764856E-4
$H_f(5)$	1.483179367811103E-7	-4.574151663710788E-6
$H_f(6)$	-3.421121839740839E-9	5.863969115976325E-8
$H_f(7)$	-1.049843335478974E-11	-4.043981502661867E-10
$H_f(8)$	3.08735497333738E-13	1.428866425843597E-12
$H_f(9)$	-1.042965299921062E-15	-2.03535047070762E-15

Tabel 3 Konstanta enthalpi uap jenuh

$H_g(i)$	propana	n-butana
$H_g(1)$	277.6643712300693	275.312148086314
$H_g(2)$	0.2788860371948372	0.3193580418709583
$H_g(3)$	-5.089358268471317E-4	-9.389121331466994E-4
$H_g(4)$	3.135978016643369E-6	5.915982382547301E-5
$H_g(5)$	5.325096279750295E-8	-1.548176937140994E-6
$H_g(6)$	-7.368765053307931E-10	2.04050917924971E-8
$H_g(7)$	-8.965213127846663E-13	-1.44173286144689E-10
$H_g(8)$	1.99059280350012E-14	5.205223742679249E-13
$H_g(9)$	-2.636197134611561E-17	-7.555493543693409E-15

4.4. Kapasitas Panas Fasa Cair

Kapasitas panas cair propana maupun n-butana dapat diperkirakan dari kapasitas panas apabila propana dan n-butana pada fasa gas serta berperilaku sebagai gas kemudian dikoreksi dengan faktor aksentrik, ω , dan T_r yang bergantung pada suhu yang diturunkan, T_r . Bentuk tak berdimensi persamaan untuk kapasitas panas dapat ditulis dalam bentuk,

$$\frac{C_p - C_p^o}{R} = (0,5 + 2,2\omega)f(T_r) \quad (20)$$

di mana,

$$f(T_r) = 3,67 + 11,64(1 - T_r)^4 + 0,634(1 - T_r)^{-1} \quad (21)$$

Kapasitas panas sebagai fungsi suhu pada tingkatan gas untuk kedua unsur dapat dinyatakan sebagai

fungsi polinomial derajat empat yaitu,

$$C_p^o = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (22)$$

di mana konstanta a, b, dan c, adalah sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Konstanta a, b dan c.

Konstanta	Propana	n-Butana
a	-0.42244812E+4	0.94872888E+4
b	0.30626442E+3	0.33130148E+3
c	-0.15863785	-0.11082460
d	0.32146250E-4	-0.28219032E-5

5. PREDIKSI TINGKAT KEADAAN CAMPURAN PROPANA/N-BUTANA

Untuk campuran propana dan n-butana, persamaan tingkat keadaan yang dipakai masih Pers.(7), perbedaannya terletak pada konstanta a, b, dan R yang akan dievaluasi sesuai dengan fraksi unsur di dalam campuran. Di dalam bagian ini akan ditunjukkan persamaan yang diterapkan untuk menentukan besaran-besaran suhu kritis campuran, T_{cm} , tekanan kritis campuran P_{cm} , dan fraksi molar campuran R_m^* untuk pemakaian Pers. (7).

Untuk penentuan besaran tersebut akan diterapkan persamaan pencampuran Van der Walls, yaitu

$$T_{cm} = \frac{(\sum \sum x_i x_j T_{c_{ij}}^2 / P_{c_{ij}})}{(\sum \sum x_i x_j T_{c_{ij}} / P_{c_{ij}})} \quad (23)$$

$$P_{cm} = \frac{(\sum \sum x_i x_j T_{c_{ij}} / P_{c_{ij}})}{(\sum \sum x_i x_j T_{c_{ij}}^2 / P_{c_{ij}}^2)} \quad (24)$$

$$R_m^* = \sum \sum x_i x_j R_{ij}^* \quad (25)$$

$$T_{c_{ij}} = (T_{c_i} T_{c_j})^{1/2} (1 - k_{ij}) \quad (26)$$

$$P_{c_{ij}} = \frac{8 T_{c_{ij}}}{[(T_{c_i} / P_{c_i})^{1/3} + (T_{c_j} / P_{c_j})^{1/3}]^3} \quad (27)$$

Indeks i dan j yang untuk sistem biner berharga dari 1

$$R_{ij}^* = \frac{[(R_{ii}^*)^{1/3} + (R_{jj}^*)^{1/3}]^3}{8} \quad (28)$$

sampai 2 mewakili unsur dalam campuran. Harga faktor interaksi k_{ij} adalah nol untuk sistem campuran propana dan n-butana. Bila indeks p dan b masing-masing mewakili propana dan n-butana, maka persamaan (23), (24), dan (25) dapat ditulis dalam bentuk,

$$T_{cm} = \frac{\frac{x_p^2 T_{cp}^2}{P_{cp}} + 2x_p x_b A_{pb} + x_b^2 \frac{T_{cb}^2}{P_{cb}}}{\frac{x_p^2 T_{cp}}{P_{cp}} + 2x_p x_b B_{pb} + \frac{x_b^2 T_{cb}}{P_{cb}}} \quad (29)$$

$$P_{cm} = \frac{\frac{x_p^2 T_{cp}}{P_{cp}} + 2x_p x_b B_{pb} + x_b^2 \frac{T_{cb}}{P_{cb}}}{\frac{x_p^2 T_{cp}}{P_{cp}^2} + 2x_p x_b C_{pb} + \frac{x_b^2 T_{cb}}{P_{cb}^2}} \quad (30)$$

$$R_{cm}^* = x_p^2 R_p^* + \frac{1}{4} x_p x_b (R_p^3 + R_b^3)^{1/3} + x_b^2 R_b^* \quad (31)$$

dengan

$$A_{pb} = \frac{1}{8} (T_{cp} T_{cb})^{1/2} [(T_{cp} / P_{cp})^{1/3} + (T_{cb} / P_{cb})^{1/3}]^3 \quad (32)$$

$$B_{pb} = \frac{1}{8} [(T_{cp} / P_{cp})^{1/3} + (T_{cb} / P_{cb})^{1/3}]^3 \quad (33)$$

$$C_{pb} = \frac{1}{64} (T_{cp} T_{cb})^{-1/2} [(T_{cp} / P_{cp})^{1/3} + (T_{cb} / P_{cb})^{1/3}]^6 \quad (34)$$

5.1. Keseimbangan Cair-Uap dan Penentuan Suhu Jenuh

Besaran kunci dalam menganalisis keseimbangan cair-uap adalah konstanta keseimbangan (equilibrium ratio) K_i yang menunjukkan perbandingan antara komposisi fasa uap terhadap komposisi fasa cair dari unsur i, atau

Dalam bentuk yang lebih khusus, konstanta keseimbangan tersebut dapat dinyatakan sebagai

$$D = \sum_i \sum_j x_i x_j m_j (1 - k_{ij}) \sqrt{a_i \alpha_i} \sqrt{a_j T_{ij}} \quad (47)$$

6. HASIL PENERAPAN PERSAMAAN

Beberapa korelasi harga antar sifat termodinamika yang penting untuk analisis siklus refrigerasi telah dihitung dengan menggunakan program komputer yang telah dikembangkan di laboratorium. Untuk meneliti kesahihan hasil prediksi, hasil yang diperoleh telah pula dibandingkan dengan data yang tersedia dalam literatur. Hubungan antara tekanan dan suhu uap jenuh dengan konsentrasi campuran, misalnya, tersedia dalam pustaka^[6]. Meskipun dalam data tersebut kandungan ethana cukup tinggi (2%) namun, hasil perbandingan dapat dipakai sebagai acuan bahwa hasil prediksi yang diperoleh dapat diandalkan.

Dalam Tabel 6, 7 dan 8 ditunjukkan contoh hasil hasil komputasi yang menunjukkan korelasi, suhu cairjenuh, t_f dan suhu uap jenuh, t_g dan harga sifat termodinamik penting lainnya yaitu volume jenis dan entalpi untuk berbagai harga tekanan. Dapat dilihat bahwa sifat termodinamika campuran propana/n-butana pada konsentrasi n-butana sekitar harga 0.7 dan 0.8 sangat mendekati R12.

Tabel 6. Sifat termodinamika propana/n-butana pada $x_2 = 0,6$.

tf	tg	vf	vg	hf	hg
0,0	17,240	0,0581	9,560	74,212	275,855
10,0	27,068	0,0589	7,948	79,174	278,593
20,0	41,144	0,0597	6,298	84,192	281,177
30,0	58,496	0,0606	4,689	89,408	283,602
40,0	78,926	0,0614	3,328	94,855	285,788
50,0	102,25	0,0624	1,552	100,52	287,620

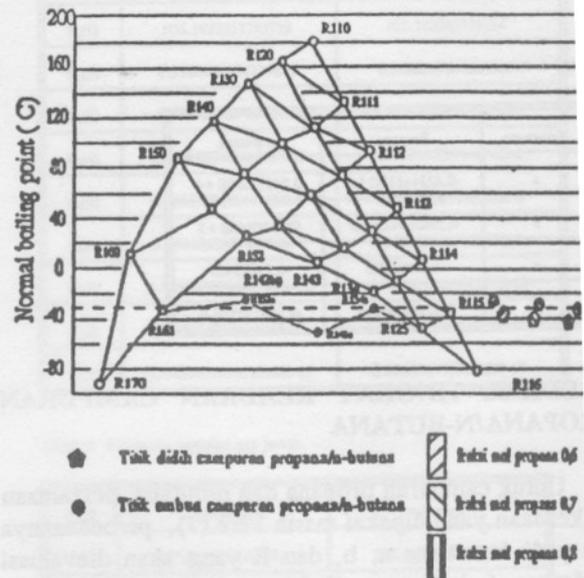
Tabel 7. Sifat termodinamika propana/n-butana pada $x_2 = 0,7$.

tf	tg	vf	vg	hf	hg
0,0	12,360	0,0604	9,226	74,331	276,046
10,0	22,370	0,0613	7,773	79,289	278,752
20,0	30,992	0,0622	6,587	84,316	281,370
30,0	40,424	0,0631	5,610	89,537	283,955
40,0	49,910	0,0641	4,799	94,988	286,511
50,0	69,890	0,0652	4,123	100,65	289,024

Tabel 8. Sifat termodinamika propana/n-butana pada $x_2 = 0,8$.

tf	tg	vf	vg	hf	hg
0,0	9,032	0,0651	8,195	74,416	276,109
10,0	18,014	0,0661	6,952	79,372	278,754
20,0	28,274	0,0671	5,864	84,418	281,292
30,0	39,146	0,0682	4,926	89,677	283,762
40,0	49,496	0,0694	4,155	95,195	286,184
50,0	59,450	0,0706	3,551	100,96	288,569

Dalam Gb. 4 ditunjukkan perbandingan d R12, refrigeran turunan ethana dan campuran pro butana untuk konsentrasi 0.7 dan 0.8 ditinjau da didihnya pada tekanan atmosfer.



Gb. 4. Suhu didih beberapa refrigeran.

7. KESIMPULAN

Persamaan Redlich-Kwong yang telah dimodifikasi diterapkan untuk prediksi tingkat keadaan campuran propana/n-butana untuk berbagai konsentrasi komposisi dengan menggunakan data tingkat-keadaan unsur-unsur yang masing-masing dapat diperoleh dari literatur. Demikian pula untuk prediksi sifat-sifat termodinamika lainnya penting dalam evaluasi unjuk-kerja termodinamik sistem refrigerasi siklus kompresi uap. Sebagaimana ditunjukkan dalam pembahasan, sifat refrigeran CFC R12 yang di waktu dekat akan dihentikan produksinya dapat didekati oleh campuran tersebut. Dengan demikian diharapkan, campuran propana/n-butana mempunyai peluang untuk dijadikan sebagai satu alternatif penggantinya apabila aspek lain seperti keselamatan dan kompatibilitas dengan perangkat keras lazim dipakai (kompresor, evaporator, kondensator, pelumas) dapat dijamin.

Studi teoritik unjuk kerja sistem refrigerasi dengan campuran biner propana/n-butana dengan menerapkan persamaan tingkat keadaan yang diusulkan telah dilakukan. Sebuah program komputer telah dikembangkan untuk tujuan tersebut. Hasil studi tersebut akan dibahas dalam tulisan selanjutnya sebagai kelanjutan dari tulisan ini.

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (35)$$

perbandingan antara koefisien fugasitas parsial fasa cair terhadap koefisien fugasitas fasa uap, atau

$$K_i = \frac{\phi_i^L}{\phi_i^V} \quad (36)$$

Untuk menentukan koefisien fugasitas parsial baik fasa cair maupun fasa uap akan dipakai persamaan yang diusulkan oleh Soave^[15] yang dapat ditulis dalam bentuk,

$$f_1 = \frac{a\alpha}{bRT} \left[b/b - \frac{z\sqrt{(a\alpha)_1}}{\sqrt{a\alpha}} \right] \ln(1+b/v) \quad (37)$$

dimana z adalah faktor kompresibilitas yang untuk bentuk persamaan tingkat keadaan (7) dapat ditulis sebagai,

$$z = \frac{1}{1-b/v} - \frac{a}{RT^2 v(1+b/v)} \quad (38)$$

$$\ln \phi_i = -\ln[z(1-b/v)] + \frac{b_i}{b}(z-1) + f_i \quad (39)$$

Hasil komputasi persamaan-persamaan diatas untuk berbagai kombinasi x dan y ditunjukkan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Keseimbangan Cair-Uap

x_1	T(K)	y_1	z_1	z_2	ϕ_1^*	ϕ_1^L
0.0	387.28	0.000	0.675	0.097	0.9072	1.7088
0.1	378.98	0.179	0.696	0.095	0.8849	1.5846
0.2	371.03	0.336	0.691	0.093	0.8712	1.4630
0.3	363.50	0.472	0.687	0.092	0.8571	1.3472
0.4	356.45	0.588	0.686	0.091	0.8430	1.2394
0.5	349.84	0.687	0.688	0.090	0.8291	1.1399
0.6	343.67	0.772	0.692	0.089	0.8156	1.0492
0.7	337.94	0.844	0.698	0.087	0.8029	0.9676
0.8	332.60	0.904	0.706	0.088	0.7911	0.8942
0.9	327.63	0.956	0.715	0.088	0.7804	0.8288
1.0	322.93	1.000	0.695	0.088	0.7701	0.7701

5.2. Volume-jenis Cair dan Uap Jenuh

Pada umumnya pengaruh perubahan tekanan terhadap penyimpangan sifat-sifat campuran pada fasa cair sangat kecil dibanding dengan pada fasa uapnya, kecuali pada suhu yang mendekati suhu kritis atau pada tekanan yang cukup tinggi. Karena untuk pemakaiannya sebagai refrigeran sistem kompresi uap, tekanan yang terjadi cukup kecil dibanding dengan tekanan kritisnya, maka untuk fasa cair persamaan (3) dapat dipakai untuk menentukan volume jenis campuran.

Volume jenis uap jenuh campuran ditentukan dengan memasukkan tekanan dan suhu jenuh ke dalam persamaan (7).

5.3. Entalpi Cair Jenuh dan Uap Jenuh

Karena campuran propana dan n-butana mempunyai penyimpangan positif dari hukum Raoult, pencampuran dua substansi ini akan menimbulkan absorpsi panas. Dengan demikian, entalpi campuran harus ditambah dengan entalpi pencampuran ini. Secara matematik, pernyataan ini dituliskan sebagai berikut,

$$H_{mix,s} = x_1 H_1 + x_2 H_2 + \Delta H_{mix,s} \quad (40)$$

Soave telah membuat program komputer untuk memprediksi besarnya panas pencampuran larutan biner baik pada fasa cair maupun pada fasa uap.

Harga $\Delta H_{mix,s}$ fasa cair dan fasa uap dievaluasi dengan menyelesaikan persamaan berikut,

$$\Delta H_{mix,s} = RT \left[1 - z + \frac{A}{B} \left(1 + \frac{D}{a\alpha} \right) \ln(1+B/z) \right] \quad (41)$$

di mana,

R = konstanta gas universal,

$$a = 0,42747 \alpha R^2 T_c^2 / P_c \quad (42)$$

$$\alpha = \left[1 + m \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right]^2 \quad (43)$$

$$m = 0,48508 + 1,55171 \omega - 0,15613 \omega^2 \quad (44)$$

$$A = 0,42747 \alpha \frac{P}{P_c} \left(\frac{T_c}{T} \right)^2 \quad (45)$$

$$B = 0,08664 \left(\frac{P}{P_c} \right) \left(\frac{T_c}{T} \right) \quad (46)$$

CATATAN

Studi ini dibiayai dengan dana penelitian OPF dan sebagai kelanjutannya telah disetujui pendanaannya melalui proyek penelitian sektoral dari Bank Dunia untuk dilaksanakan studi eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

1. United Nations Environment Program (UNEP), *Montreal protokol on substances that deplete the ozone layer*, Final Act September, 1987.
2. Kuijpers, L.J.M., de Wit, J.A., and Janssen M.J.P., *Possibilities for the replacement of CFC 12 in domestic equipment*, Int. J. Refrig., 11, 1988.
3. Spauschus, H. O., *HFC 134a as substitute refrigerant for CFC R12*. Int. J. Refrig., 11, 1988.
4. Kruse, H. and Hesse, U., *Possible substitutes for fully halogenated CFC using fluids already marketed*, Int. J. Refrig., 11, 1988.
5. Braswell, A., *Impact of CFC regulations on the air conditioning and refrigeration industry*, Rev. Int. Froid, 11, 1988.
6. A. Suwono dan A. Sambodo, *Penggunaan campuran biner non-azeotropik freon untuk sistem pendingin siklus kompresi uap*, Lap. Penelitian No. 8787286, No. Kontrak 07/PSSR/DPPM/621/1985, Dikti-PDK, 1986.
7. Didion, D.A., *Experimental evaluation of efficiency benefits using non-azeotropic refrigerant mixtures*, Second DOE/ORNL Heat Pumps Conference, Washington DC USA, April 17-20, 1988.
8. Anonymous, *New refrigerant blend offered as CFC 12 replacement*, ACHR News July, 1988.
9. Quast, U., *Betriebsverhalten von Hubkolbenverdichtern beim Einsatz von nichtazeotropen Kältemitteln*, PhD Thesis Universität Hannover FRG, 1987.
10. Samudro, H. M. and Suwono, A., *Performance of a vapor compression refrigerator using non-azeotropic mixture of R12-R22*, Proc. of Fifth Australian Mass Transfer Conference, Brisbane, Australia, December 6-9, 1993.
11. Riazi, M. R. and Mansoori, G. A., *Simple equation of state accurately predicts hydrocarbon densities*, Gas Journal, July, 1993.
12. Denny, L. C., *Handbook of Butane-Propane Refrigeration*, Chilton, 4th ed., L.A., 1962.
13. Perry, R. H., *Chemical Engineering Handbook*, McGraw-Hill, Int. ed., 1984.
14. Campbell, J., *Gas conditioning and processing*, Campbell Petroleum Series, Cat-76.157183, 1987.
15. Walas, S. M., *Phase equilibria in chemical engineering*, University of Kansas, 1987.