



METODE ESTIMASI PROPERTI KRITIS UAP-CAIR KOMPONEN MURNI ESTER

Dhoni Hartanto^{a,*}, Ibnu Eka Rahayu^b, Bayu Tri Wibowo^a

^aProdi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Jl Raya Sekaran, Gunungpati, Semarang 50229, Indonesia

^bJurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Samarinda, Samarinda, Kalimantan Timur, Indonesia

Received 1 September 2013; revised 30 Nopember 2013; accepted 15 Desember 2013

Abstract

Biodiesel become eco-friendly renewable energy resources which is consisted of monoalkyl ester or long chain fatty acid from plants or animal. Biodiesel has more advantage than petrodiesel. Property of pure compound such as critical properties are the important thing to determine chemical mixtures behavior and also as base of equation of state. Joback method can show good results in estimating critical properties of monoalkyl ester.

Keywords: biodiesel, critical properties, Joback Method

1. PENDAHULUAN

Biodiesel merupakan bahan bakar terbarukan yang tersusun dari rantai panjang asam lemak (*fatty acid*) yang terdiri dari monoalkilester atau biasa disebut *Fatty Acid Methyl Ester* (FAME) yang berasal dari biomassa seperti tumbuh-tumbuhan dan lemak pada hewan sebagai pengganti bahan bakar minyak bumi yaitu petrodiesel. Komposisi biodiesel dapat disebut dengan alkil alkanoat misal metil linoleate atau asam alkanik alkil ester misal asam linoleikmetil ester. Biodiesel mempunyai sifat-sifat yang menguntungkan antara lain, tidak beracun, dapat terdegradasi secara alami, aman (*safety*), emisi yang lebih bersih dibanding dengan petrodiesel, dan berfungsi sebagai pelumas dalam mesin. Selain itu, biodiesel dapat dicampur dengan petrodiesel dengan komposisi tertentu dengan sedikit modifikasi atau tanpa modifikasi pada mesin yang sebelumnya telah menggunakan petrodiesel (Siddiquee, dkk., 2011).

Biodiesel sebagian besar tersusun dari monoalkil ester seperti metil oleat, metil palmiat, metil stearat, metil miristat, dan metil heptadecanoat (Rengga dan Ernawati, 2012) serta metil linoleat dan metil arakhidat disertai beberapa komponen lain yang sama dengan hasil penelitian Rengga dan Ernawati (Damayanti dan Bariroh, 2012). Beberapa ester penyusun biodiesel lain antara lain *lauric acidmethyl ester* (metil laurat), *myristoleic acidmethyl ester* (metil miristoleat), *palmitoleic acidmethyl ester* (metil palmitoleat), *linolenic acidmethyl ester* (metil linolenat), *gondoic acidmethyl ester* (metil gondoat), *behenic acid* (asam behenat), dan *erucic*

*Corresponding author. Tel.: +6282 1415 48851; e-mail: dhoni.hartanto@gmail.com.

acid methyl ester (metil erutat) (Hoekman dkk., 2012). Kemungkinan beragamnya komposisi biodiesel dari berbagai jenis monoalkil ester yang berasal dari biomassa atau lemak hewan yang berbeda-beda masih terbuka lebar. Salah satu hal penting yang diperlukan komponen-komponen tersebut adalah properti kritis.

Properti komponen murni diperlukan dalam menentukan sifat campuran kimia. Selain itu, properti komponen murni juga digunakan sebagai basis untuk persamaan keadaan. Salah satu cara untuk menentukan properti tersebut adalah menggunakan metode estimasi properti dengan model sehingga tidak membutuhkan eksperimen. Metode estimasi dalam menentukan properti diantaranya berbasis interaksi grup, kontribusi ikatan, dan kontribusi atom. Properti kritis seperti temperatur kritis (T_c), tekanan kritis (P_c), dan volume kritis (V_c) merupakan properti yang penting dan sering digunakan dalam korelasi volumetrik, termodinamika, dan *transport*. Penentuan properti secara eksperimental menjadi hal yang sulit dilakukan karena komponen khususnya beberapa komponen-komponen yang besar dapat terdegradasi secara kimia pada temperatur kritis yang cukup tinggi (Ambrose dan Young, 1995). Beberapa metode estimasi berdasarkan kontribusi grup yaitu Joback (1984; 1987), Constantinou and Gani (1994), Wilson and Jasperson (1996), and Marrero and Pardillo (1999).

2. METODE

Metode Joback (Jb)

Metode ini dikembangkan oleh Joback pada tahun 1984 dan 1987 yang merupakan evaluasi ulang dari Metode Lydersen pada tahun 1955 yang mengestimasi properti kritis yang berdasarkan kontribusi grup. Joback menambahkan beberapa grup fungsi baru dan menentukan nilai kontribusi grupnya. Berikut persamaan-persamaan untuk properti kritis :

$$T_c(K) = T_b \left[0.584 + 0.965 \left\{ \sum_k N_k (tck) \right\} - \left\{ \sum_k N_k (tck) \right\}^2 \right]^{-1} \quad (1)$$

$$P_c(\text{bar}) = \left[0.113 + 0.0032 N_{atom} - \sum_k N_k (pck) \right]^{-2} \quad (2)$$

$$V_c(\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}) = 17.5 + \sum_k N_k (vck) \quad (3)$$

Dimana tck , pck , dan vck merupakan nilai kontribusi grup untuk masing-masing variabel temperatur, tekanan, dan volume. Nilai kontribusi grup Joback untuk beberapa properti dapat di lihat di Appendix C Tabel 1 Poling (2001).

Metode Constantinou-Gani (CG)

Metode ini diusulkan oleh Constantinou dan Gani pada tahun 1994 untuk mengestimasi properti kritis suatu senyawa berdasarkan kontribusi grup berbasis grup UNIFAC. Dalam metode ini terdapat grup "First order" yang dilambangkan dengan huruf $1k$ dan grup "Second order" yang dilambangkan dengan huruf $2j$. Nilai W diset 0 saat perhitungan pada "First order". Berikut merupakan persamaan untuk estimasi properti kritis :

$$T_c(K) = 181.128 \ln \left[\sum_k N_k (tc1k) + \sum_j N_j (tc2j) \right] \quad (4)$$

$$P_c(\text{bar}) = \left[\sum_k N_k (pc1k) + W \sum_j M_j (pc2j) + 0.10022 \right]^{-2} + 1.3705 \quad (5)$$

$$V_c(\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}) = -0.00435 + \left[\sum_k N_k (vc1k) + W \sum_j M_j (vc2j) \right] \quad (6)$$

Dalam persamaan CG ini tidak diperlukan T_b dalam mengestimasi nilai T_c , beberapa nilai kontribusi grup untuk mengestimasi propertikritis pada persamaan 4, 5, dan 6 dapat dilihat di Appendixs Tabel C-2, C-3, dan C-4 Poling (2001).

Metode Wilson-Japerson (WJ)

Metode ini dilaporkan oleh Wilson dan Japerson pada tahun 1996 yaitu penerapan tiga metode untuk estimasi T_c dan P_c pada senyawa organik dan anorganik. Metode pertama adalah *Zero order* yang menggunakan analisis faktor dengan titik didih, densitas liquid, dan berat molekul sebagai penjelas. Metode yang kedua adalah *First order* yang menggunakan kontribusi atom dengan titik didih dan jumlah kelompok. Metode ketiga adalah *Second order* yang juga menggunakan kontribusi grup. Untuk *Zero order* hasil yang diperoleh kurang akurat sehingga *First order* dan *Second order* menjadi metode yang dipilih. Persamaan mengestimasi nilai T_c dan P_c sebagai berikut :

$$T_c(K) = \frac{T_b}{\left[(0.048271 - 0.019846N_r + \sum_k N_k (tck) + \sum_j N_j (tcj)) \right]^{0.2}} \quad (7)$$

$$P_c(\text{bar}) = 0.0186233 T_c / [-0.96601 + \exp(Y)] \quad (8)$$

$$Y = -0.00922295 - 0.0290403 N_r + 0.041 \left(\sum_k N_k (\Delta pck) + \sum_j M_j (\Delta pcj) \right) \quad (9)$$

N_r merupakan nomor kelompok, N_k merupakan nomor atom tipe k yaitu kontribusi atom *First order*, dan M_j adalah nomor grup tipe j dengan kontribusi grup *Second order*. Nilai kontribusi atom dapat dilihat di tabel 2-3 di buku Poling(2001).

Metode Marrero-Pardillo (MP)

Metode ini diusulkan oleh Marrero-Marejo'n and Pardillo-Fontdevila pada tahun 1999 yang mendeskripsikan T_c , P_c , dan V_c berdasarkan kontribusi interaksi grup atau disebut juga kontribusi ikatan. Berikut persamaan metode MP :

$$T_c(K) = \frac{T_b}{\left[(0.5851 - 0.9286 \left(\sum_k N_k (tcbk) \right)) - \left(\sum_k N_k (tcbk) \right)^2 \right]} \quad (10)$$

$$P_c(\text{bar}) = \left[(0.1285 - 0.0059 N_{atom} - \sum_k N_k (pcb_k)) \right]^{-2} \quad (11)$$

$$V_c(\text{cm}^3 \text{mol}^{-1}) = 25.1 + \sum_k N_k (vbck) \quad (12)$$

Pada metode ini dibutuhkan T_b yang dapat berasal dari eksperimen atau melalui perhitungan sehingga Marero dan Pardillo juga menyediakan perhitungan untuk nilai T_b secara estimasi dengan persamaan sebagai berikut :

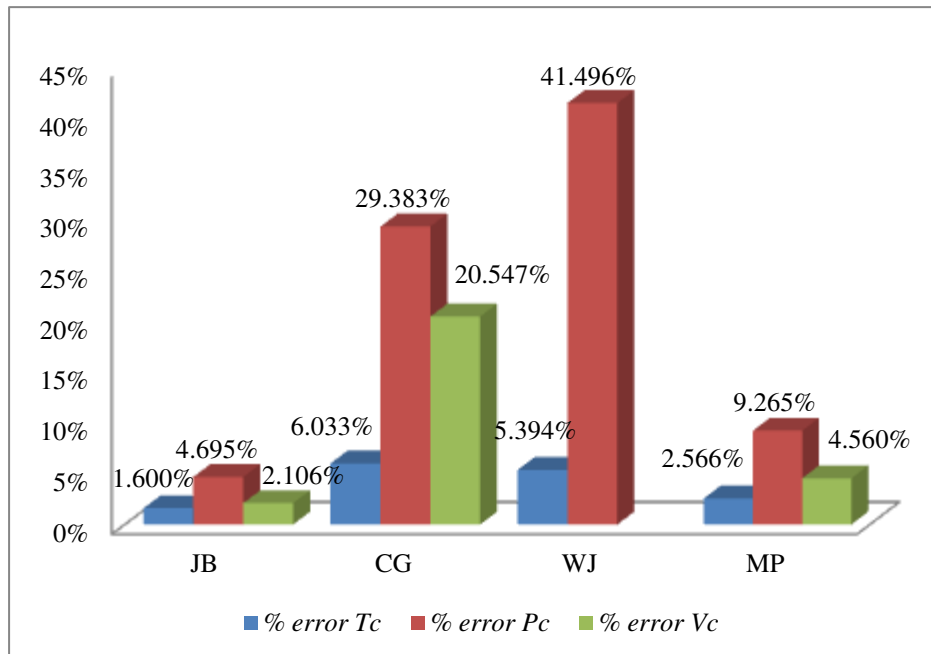
$$T_b(K) = Mr^{-0.404} \sum_k N_k(tbbk) + 156.00 \quad (13)$$

Nilai kontribusi untuk 167 ikatan grup diberikan pada tabel 2-5 pada buku Poling (2001).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Persen error (%) perhitungan dalam bentuk rata-rata untuk mengestimasi properti kritis pada senyawa ester dengan menggunakan keempat metode dapat dilihat pada tabel 1. Persen error merupakan selisih properti kritis hasil eksperimen dengan properti kritis hasil estimasi dikalikan 100%. Gambar 1 menunjukkan persen error untuk mengestimasi properti kritis pada masing-masing metode. Secara rata-rata, grafik tersebut menunjukkan bahwa Metode Joback (Jb) merupakan metode yang paling akurat dibanding keempat metode yang lain dalam mengestimasi temperatur kritis (T_c) ester dengan persen error 1.60%. Metode Marrero-Pardillo merupakan metode kedua yang dapat mengestimasi temperatur kritis ester dengan persen error (2.57%). Metode Wilson-Japerson (WJ) dan metode Constantinou-Gani (CG) mengestimasi dengan persen error yang lebih besar yaitu masing-masing (6.03%) dan (5.39%). Metode Joback (Jb) juga menunjukkan persen error yang paling kecil dalam mengestimasi tekanan kritis (P_c) dan volume kritis (V_c) dibanding dengan metode yang lain. Sementara itu, metode Marrero-Pardillo juga dapat mengestimasi tekanan kritis (P_c) dan volume kritis (V_c) dengan baik setelah Metode Joback.

Metode Joback lalu diikuti Metode Marrero-Pardillo secara berurutan merupakan metode yang dapat mengestimasi masing-masing properti kritis senyawa ester dengan persen error yang kecil. Kedua metode tersebut kemudian digunakan untuk mengestimasi properti kritis pada senyawa ester berdasarkan efek pertambahan jumlah atom C pada gugus alkanoat dengan gugus alkil tetap yaitu metil. Pada estimasi tekanan kritis, kedua metode estimasi menunjukkan bahwa pertambahan atom pada gugus alkanoat menyebabkan persen error semakin kecil yang ditunjukkan pada gambar 2. Sedangkan pada estimasi temperatur kritis, tidak dapat diprediksi kecenderungan persen error yang ditunjukkan pada gambar 3. Akan tetapi dapat dilihat bahwa persen error Metode Marrero-Pardillo lebih kecil yaitu di bawah 15% dibanding dengan Metode Joback yaitu di bawah 25%. Pada gambar 4 berdasarkan Metode Marrero-Pardillo, persen error untuk estimasi volume kritis relatif kecil (kurang dari 1%) untuk penambahan atom C pada gugus alkanoat yaitu dari mulai metil metanoat sampai dengan metil butanoat dan setelah itu mengalami peningkatan persen error. Sedangkan berdasarkan Metode Joback, persen error untuk estimasi volume kritis relatif kecil (kurang dari 1%) untuk penambahan atom C pada gugus alkanoat yaitu dari mulai metil metanoat dan hanya sampai dengan metil propanoat, setelah itu persen error menjadi lebih dari 1%.



Gambar 1. Grafik persen (%) error masing-masing metode untuk senyawa ester.

Gambar 5 menunjukkan pada penambahan alkil menyebabkan kecenderungan penurunan persen error pada estimasi temperatur kritis dengan menggunakan Metode Joback, sedangkan pada Metode Marrero-Pardillo terjadi penurunan persen error sampai dengan etil metanoat, setelah itu pertambahan alkil menyebabkan kecenderungan kenaikan persen error. Pada estimasi tekanan kritis berdasarkan gambar 6, Metode Joback menunjukkan persen error naik dari metil metanoat sampai etil metanoat, setelah itu persen error cenderung mengalami penurunan, sedangkan pada Metode Marrero-Pardillo persen error cenderung menurun pada penambahan alkil dari metil metanoat sampai dengan propil metanoat, setelah itu persen error meningkat. Pada estimasi volume kritis berdasarkan gambar 7, kedua metode memiliki kecenderungan yang sama yaitu memberikan persen error yang relatif stabil maksimum sekitar 1 % dari metil metanoat sampai dengan propil metanoat, setelah itu persen error naik.

Tabel 1 Rekapitulasi persen (%) error untuk masing-masing metode pada senyawa ester.

Nama	Metode Joback				Constantinou & Gani		
	T_c (exp)	T_c (est)	P_c	V_c	T_c (exp)	P_c	V_c
metil metanoat	5.93%	20.54%	4.49%	0.29%	3.84%	24.64%	5.00%
metil etanoat	4.16%	20.07%	6.19%	0.22%	0.78%	15.45%	3.68%
etil metanoat	1.20%	1.59%	6.36%	0.22%	5.30%	1.08%	2.14%
metil propanoat	4.14%	18.65%	13.98%	0.53%	2.72%	12.28%	3.62%
propil metanoat	1.13%	2.70%	3.43%	0.18%	3.13%	1.02%	1.65%
etil etanoat	0.38%	0.05%	2.37%	0.17%	0.39%	7.09%	1.29%
metil butanoat	3.99%	17.32%	11.00%	0.15%	3.50%	10.09%	2.35%
etil propanoat	0.08%	0.01%	3.84%	1.01%	1.40%	7.77%	0.14%
metil 2-metilpropanoat	3.64%	20.99%	19.04%	1.62%	18.71%	66.06%	68.23%
propil etanoat	0.12%	0.61%	4.77%	1.01%	0.17%	7.27%	0.78%
2 metilpropil metanoat	0.29%	0.22%	12.58%	4.69%	17.81%	50.75%	53.98%
metil pentanoat	1.70%	0.24%	2.05%	4.52%	8.07%	2.53%	4.42%
etil butanoat	0.39%	0.41%	2.11%	5.58%	1.38%	2.25%	17.34%
propil propanoat	1.46%	1.67%	1.12%	0.89%	0.21%	2.98%	1.04%
etil 2-metil propanoat	0.45%	3.43%	4.56%	7.01%	10.02%	62.64%	48.13%
butil etanoat	0.77%	1.84%	1.12%	3.71%	0.38%	2.98%	3.56%
2metilpropyl etanoat	0.75%	1.95%	1.58%	5.21%	12.75%	54.16%	47.75%
pentil metanoat	0.86%	1.33%	1.12%	3.52%	0.90%	4.30%	2.60%

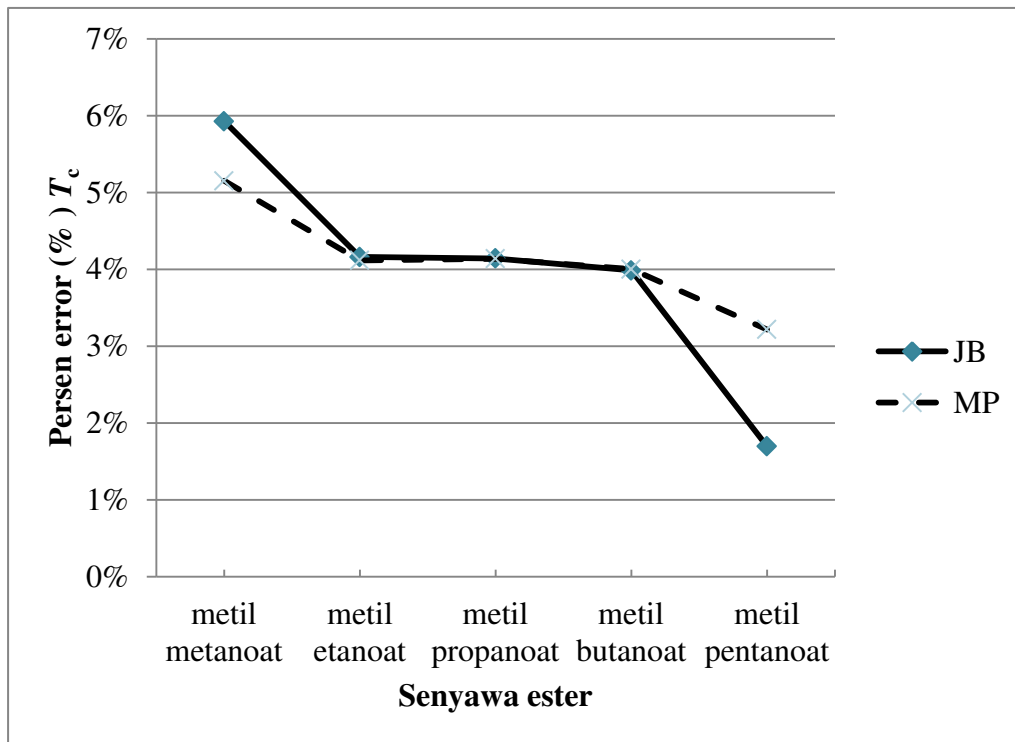
(lanjutan tabel 1)

Nama	Wilson& Japerson			Marrero& Pardillo		
	T_c 1st (exp)	T_c 2nd (exp)	P_c	T_c (est)	P_c	V_c
metil metanoat	8.05%	8.02%	76.83%	5.15%	3.18%	0.58%
metil etanoat	8.13%	12.42%	60.08%	4.12%	22.56%	0.39%
etil metanoat	6.17%	27.19%	77.97%	0.27%	1.57%	1.05%
metil propanoat	6.77%	14.70%	45.51%	4.14%	25.04%	0.60%
propil metanoat	5.30%	30.21%	58.62%	0.79%	0.96%	0.18%
etil etanoat	6.91%	32.20%	66.02%	1.04%	0.27%	1.82%
metil butanoat	5.91%	17.03%	37.55%	4.00%	1.09%	0.09%
etil propanoat	5.93%	34.63%	52.44%	0.64%	1.43%	0.81%
metil 2- metilpropanoat	5.56%	16.64%	35.68%	5.23%	25.20%	6.78%
propil etanoat	5.97%	34.69%	54.84%	0.26%	0.22%	1.48%
2 metilpropil metanoat	4.70%	33.07%	31.67%	0.09%	9.76%	6.99%
metil pentanoat	9.24%	21.94%	50.10%	3.22%	10.93%	8.94%
etil butanoat	5.79%	37.73%	40.88%	0.86%	0.03%	3.94%
propil propanoat	3.84%	35.19%	39.85%	1.37%	2.94%	3.22%
etil 2-metil propanoat	5.07%	36.79%	36.26%	0.87%	2.20%	9.71%
butil etanoat	11.15%	15.68%	19.87%	15.61%	2.94%	1.48%
2metilpropyl etanoat	5.39%	37.21%	34.70%	0.82%	1.23%	7.41%
pentil metanoat	6.29%	38.38%	42.64%	1.07%	3.65%	3.23%

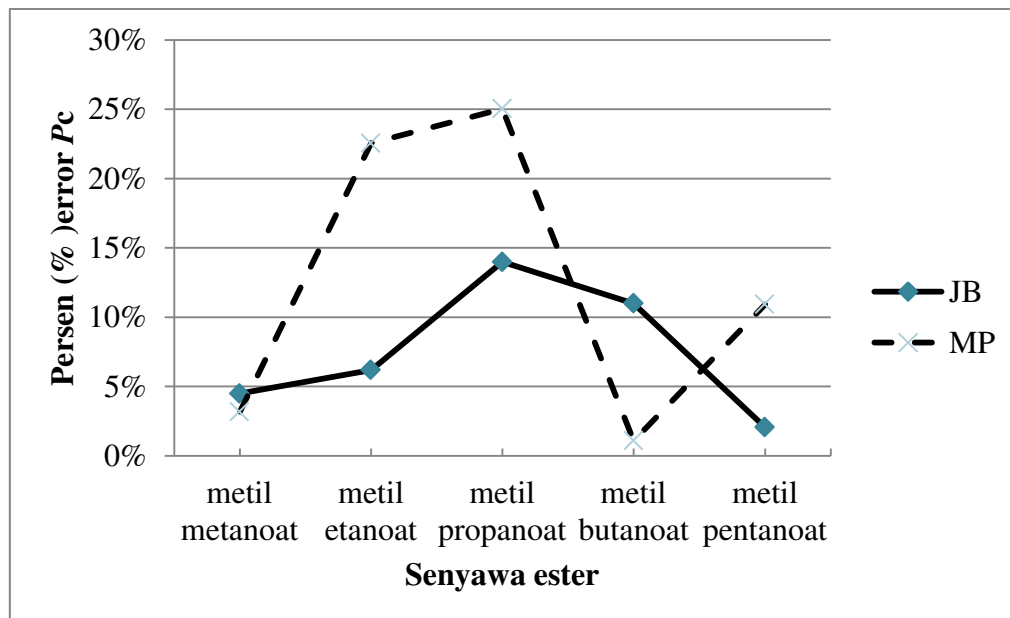
(lanjutan tabel 1)

Nama	Metode Joback				Constantinou & Gani		
	T_c (<i>exp</i>)	T_c (<i>est</i>)	P_c	V_c	T_c (<i>exp</i>)	P_c	V_c
3 metil butil metanoat	0.57%	1.02%	4.91%	1.19%	13.91%	59.53%	46.92%
etil pentanoat	3.96%	3.57%	1.24%	1.00%	6.16%	3.93%	1.80%
etil 3-metil butanoat	1.38%	0.99%	5.77%	0.11%	9.28%	58.10%	38.53%
propil butanoat	1.89%	1.61%	1.24%	1.00%	0.21%	2.69%	1.09%
2-metil propil propanoat	1.49%	0.31%	5.77%	0.11%	9.94%	64.36%	40.20%
propil 2 -metil propanoat	1.28%	0.82%	5.77%	0.11%	9.48%	64.36%	40.20%
3-metil butil etanoat	1.35%	0.86%	2.75%	1.24%	10.99%	59.68%	39.53%
propil pentanoat	0.11%	0.13%	1.12%	1.09%	1.92%	13.29%	9.94%
2-metil propil butanoat	1.57%	0.74%	4.86%	0.30%	7.74%	58.12%	35.64%
propil 3-metilbutanoat	1.69%	1.11%	1.52%	3.29%	7.43%	58.12%	35.64%
3-metil butil propanoat	0.81%	0.74%	2.39%	1.31%	7.74%	54.40%	34.99%
3metil butil butanoat	0.48%	2.92%	1.83%	11.90%	4.70%	49.58%	24.22%
Rata-rata	1.60%	4.28%	4.69%	2.11%	6.03%	29.38%	20.55%

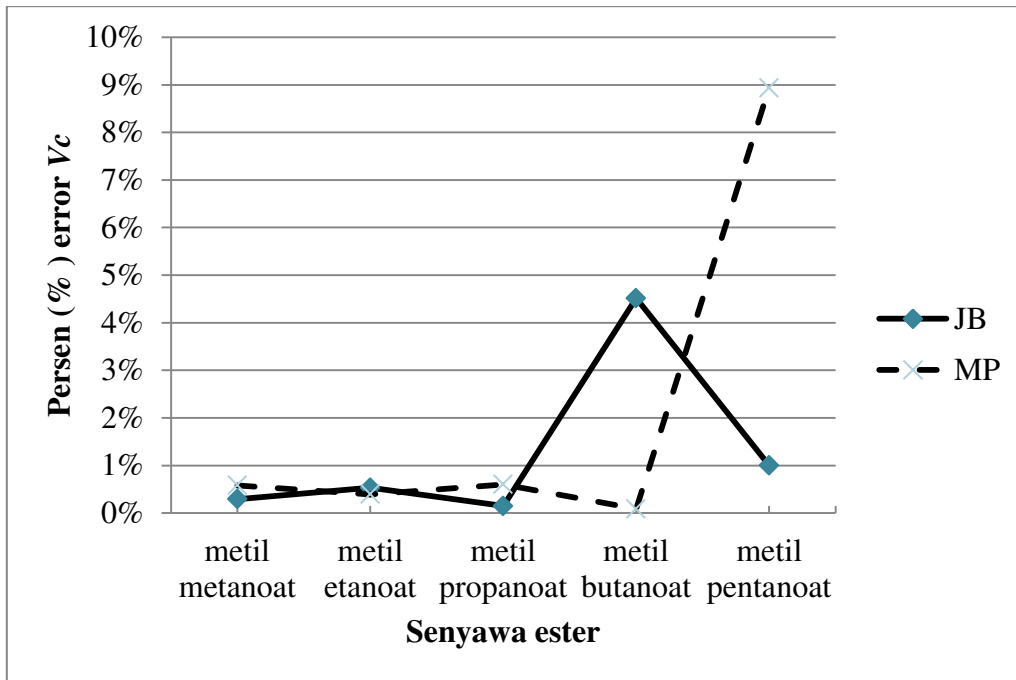
Nama	Wilson& Japerson			Marrero& Pardillo		
	T_c 1st (exp)	T_c 2nd (exp)	P_c	T_c (est)	P_c	V_c
3 metil butil metanoat	4.27%	35.75%	38.63%	1.87%	0.38%	8.99%
etil pentanoat	9.21%	45.27%	34.94%	4.39%	0.67%	2.67%
etil 3-metil butanoat	2.89%	36.86%	33.54%	0.75%	57.71%	15.35%
propil butanoat	3.07%	37.10%	34.06%	1.82%	2.52%	3.18%
2-metil propil propanoat	2.77%	36.70%	34.30%	1.49%	2.57%	0.36%
propil 2 -metil propanoat	2.99%	37.00%	33.91%	2.82%	2.47%	1.79%
3-metil butil etanoat	2.92%	36.90%	32.21%	3.86%	56.49%	20.59%
propil pentanoat	4.68%	41.98%	31.19%	0.05%	2.36%	3.15%
2-metil propil butanoat	2.50%	39.02%	29.58%	4.42%	24.41%	10.00%
propil 3-metilbutanoat	2.60%	39.15%	29.28%	2.89%	2.83%	1.27%
3-metil butil propanoat	3.29%	40.08%	27.50%	2.24%	5.12%	0.28%
3metil butil butanoat	4.47%	44.22%	24.23%	0.84%	5.22%	10.44%
Rata-rata	5.39%	31.79%	41.50%	2.57%	9.27%	4.56%



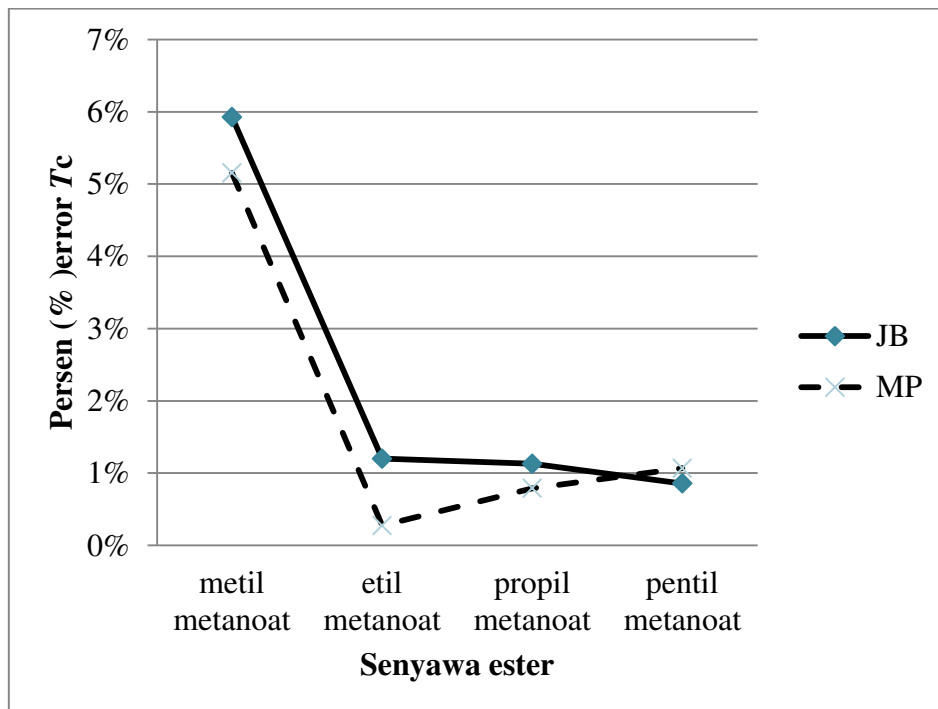
Gambar 2. Grafik efek penambahan atom C terhadap estimasi persen error (%) temperatur kritis (T_c) pada metode Joback (JB) dan Marrero-Pardillo (MP).



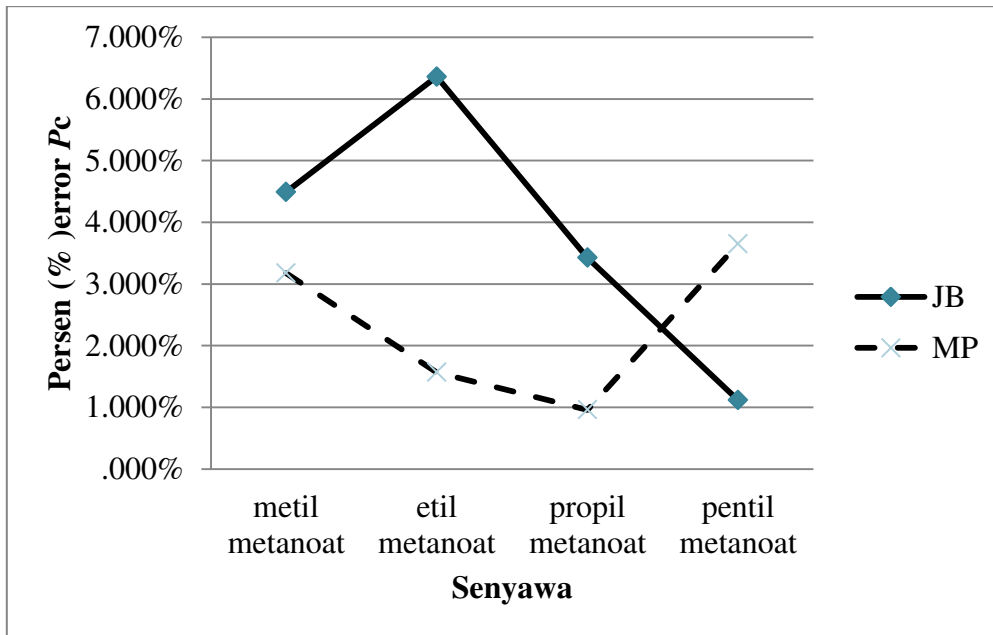
Gambar 3. Grafik efek penambahan atom C terhadap estimasi persen error (%) tekanan kritis (P_c) pada metode Joback (JB) dan Marrero-Pardillo (MP).



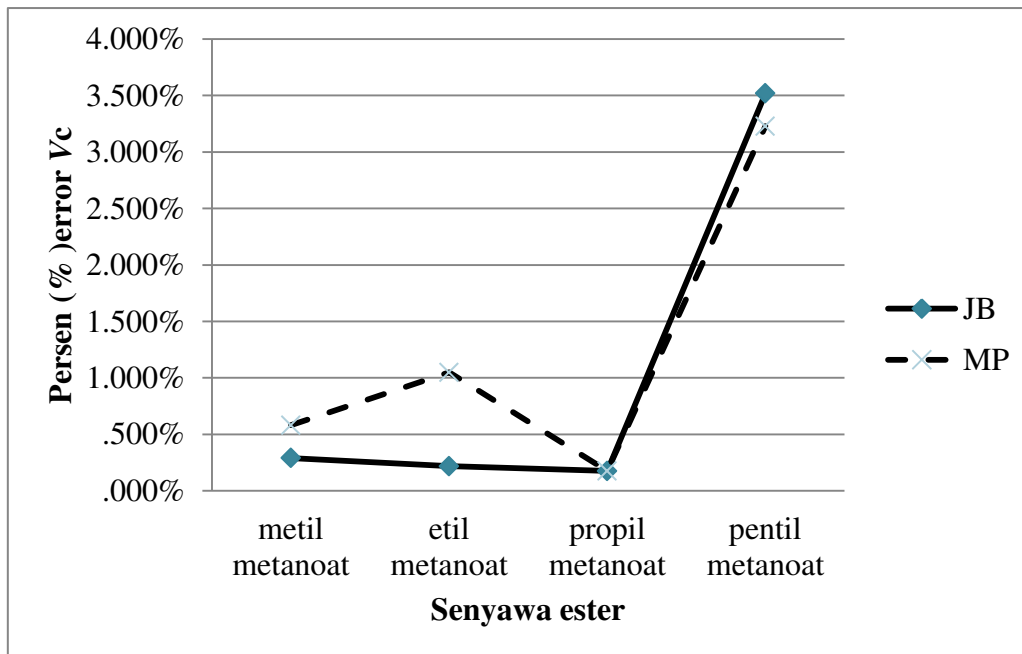
Gambar 4. Grafik efek penambahan atom C terhadap estimasi persen error (%) volume kritis (V_c) pada metode Joback (JB) dan Marrero-Pardillo (MP).



Gambar 5. Grafik efek penambahan alkil terhadap estimasi persen error (%) temperatur kritis (T_c) pada metode Joback (JB) dan Marrero-Pardillo (MP).



Gambar 6. Grafik efek penambahan alkil terhadap estimasi persen error (%) tekanan kritis (P_c) pada metode Joback (JB) dan Marrero-Pardillo (MP).



Gambar 7. Grafik efek penambahan alkil terhadap estimasi persen error (%) volume kritis (V_c) pada metode Joback (JB) dan Marrero-Pardillo (MP).

4. KESIMPULAN

Secara rata-rata, dalam mengestimasi properti kritis Metode Joback mempunyai persen error yang paling kecil jika dibandingkan metode yang lain yaitu 1.60% untuk temperatur kritis, 4,69% untuk tekanan kritis, dan 2,11% untuk volume kritis. Metode kedua yang dapat mengestimasi dengan baik adalah Metode Marrero-Pardillo 2.57% untuk temperatur kritis, 9,27% untuk tekanan kritis, dan 4,56% untuk volume kritis.

Pertambahan atom pada gusur alkanoat menyebabkan persen error semakin menurun untuk Metode Joback dan Metode Marrero-Pardillo, sedangkan untuk temperatur kritis tidak dapat dilihat kecenderungan persen error tetapi dapat dilihat bahwa persen error yang diberikan Metode Marrero-Pardillo lebih kecil dibanding Metode Joback. Pada estimasi volume kritis, masing-masing metode memberikan grafik yang relatif stabil di bawah 1%, kemudian persen error meningkat.

Pertambahan gugus alkil dengan menggunakan menunjukkan persen error menurun Metode Joback untuk estimasi temperatur kritis, kenaikan sampai senyawa etil metanoat kemudian menurun pada estimasi tekanan kritis, dan pada estimasi volume kritis persen error stabil di bawah 1% kemudian naik. Pada Metode Marrero-Pardillo terjadi penurunan persen error sampai etil metanoat kemudian terjadi peningkatan untuk estimasi temperatur kritis, kecenderungan yang sama terjadi saat estimasi tekanan kritis tetapi persen error mulai meningkat setelah propil metanoat. Kecenderungan persen error untuk estimasi volume kritis sama dengan Metode Joback.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambrose, D., and Young, C. L. (1995). *J. Chem. Eng. Data*, (40), 345.
- Siddiquee, M. N.; Rohani, S., (2011), *Lipid extraction and biodiesel production from municipal sewage sludges: A review*. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 15(2), 1067–1072.
- Rengga, W., D., P., dan Ernawati, R., D. (2012), Biodiesel dari campuran minyak sapi (*Beef Tallow*) dan minyak sawti, *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 1 (1), 16-24.
- Damayanti, A., dan Bariroh, S. (2012), Pengolahan biji mahoni (*Swietenia Macrophylla King*) sebagai bahan baku alternative biodiesel, *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 1 (1), 8-15.
- Hoekmana S., K., Broch, A., Robbins, C., Ceniceros, E., Natarajan, M. (2012), *Review of biodiesel composition, properties, and specifications*. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16 (1), 143–169.
- Constantinou, L., dan Gani, R., (1994), *New group contribution method for estimating properties of pure compounds*. *AIChE J.*, 40 (10), 1697-1710.
- Joback, K. G. (1984), *A Unified Approach to Physical Property Estimation Using Multivariate Statistical Techniques*, S.M. Thesis, Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA,
- Joback K.G., Reid R.C., (1987), *Estimation of Pure-Component Properties from Group-Contributions*, *Chem. Eng. Commun.* 57, 233-243.
- Wilson, G. M., and L. V. Jasperson (1996), *Critical Constants Tc, Pc, Estimation Based on Zero, First and Second Order Methods*, AIChE Spring Meeting, New Orleans, LA, USA.

Marrero-Morejon, J., dan Pardillo-Fontdevila, E., (1999), *Estimation of Pure Compound Properties Using Group-Interaction Contributions*. *AIChE J.*, 45, 615-621.

Poling, B., E., Prausnitz, J., M., dan O'Connell, J., P., (2001), *The Properties of Gases and Liquids, Fifth Edition*, McGraw-Hill, USA.