



Pengaruh Biodiesel Berbasis Minyak Kelapa Sawit terhadap *Cold-Flow Properties* Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51

Nur Allif Faturrahman, Cahyo S.Wibowo, Riesta Anggarani, Risvita B.Anugrah, Kemal Ginanjar, Gian Akmal, Rizal Zaelani, Majid Abdurrojak, Wahyu N.Hidayat Marsha Katili, Rossy D.Devitasari, Saepul Bahtiar, Hadi Mulyadi, Sylvia A.Bethari, Lies Aisyah, dan Maymuchar

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"
Jl. Ciledug Raya Kav. 109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan 12230

Artikel Info:

Naskah Diterima:
29 April 2020
Diterima setelah perbaikan:
3 Juli 2020
Disetujui terbit:
30 Agustus 2020

Kata Kunci:

Biodiesel
cold-flow properties
cold filter plugging point
minyak solar
titik kabut

ABSTRAK

Cold-flow properties merupakan parameter kunci dalam menganalisis ketahanan bahan bakar pada temperatur rendah. Penelitian ini menyajikan analisis *cold-flow properties*, meliputi titik kabut dan *cold filter plugging point* (CFPP) dari bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel. Analisis varians (ANOVA) dilakukan untuk mendapatkan signifikansi dari pengaruh rasio pencampuran minyak solar-biodiesel terhadap titik kabut dan CFPP bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan rasio pencampuran minyak solar-biodiesel berpengaruh signifikan terhadap titik kabut dan CFPP bahan bakar. Keragaman titik kabut dan CFPP dari basis Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51 dipengaruhi oleh rasio pencampuran biodiesel dengan nilai $> 96,7\%$. Hasil eksperimen menunjukkan *cold-flow properties* bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel dapat diprediksi dengan menghubungkan temperatur awal titik kabut atau CFPP minyak solar murni, dengan rasio pencampuran melalui persamaan model matematika.

© LPMGB - 2020

PENDAHULUAN

Karakteristik bahan bakar pada temperatur rendah (*cold-flow properties*) merupakan isu teknis yang mengiringi implementasi pemanfaatan bahan bakar nabati sebagai campuran bahan bakar minyak, salah satunya adalah biodiesel berbasis kelapa sawit di Indonesia. Permasalahan *cold-flow properties* biodiesel berkaitan dengan mekanisme presipitasi pada temperatur rendah hingga kristalisasi *wax* pada bahan bakar (Paryanto, dkk., 2019). Hal tersebut

dapat menghasilkan penurunan kualitas pada bahan bakar sehingga beresiko terhadap kinerja mesin diesel (Komariah, dkk., 2018). *Cold-flow properties* pada campuran bahan bakar minyak jenis minyak solar dengan biodiesel dianalisis menggunakan parameter titik kabut (*cloud point*, CP), titik tuang (*pour point*, PP), *cold filter plugging point* (CFPP), hingga *low temperature filterability test* (LTFT) (Hoekman, dkk., 2012).

Perilaku bahan bakar pada temperatur rendah, khususnya untuk minyak solar dan biodiesel, dipengaruhi oleh komposisi yang terkandung di dalamnya. Dari sudut pandang mesin, bahan bakar dengan komposisi senyawa jenuh, meningkatkan

Korespondensi:

E-mail: allif.fathur@gmail.com (Nur Allif Fathurrahman)

potensi untuk kristalisasi pada temperatur rendah sehingga menyebabkan penyumbatan filter. Sistem filtrasi tersebut sangat dipengaruhi oleh ukuran dan bentuk kristal *wax* pada bahan bakar. Seiring penurunan temperatur, nukleus *wax* dalam campuran minyak solar-biodiesel mengalami kristalisasi, sehingga membentuk suspensi kabut (Boshui, dkk., 2010; Dunn, 2017). Temperatur pada saat suspensi kabut pada bahan bakar terbentuk dan terdeteksi disebut dengan titik kabut. Penurunan temperatur lebih lanjut pada kondisi tersebut mempengaruhi kemampuan aliran bahan bakar untuk dapat melewati filter sehingga mencapai temperatur CFPP. Kemampuan bahan bakar untuk mengalir dapat terganggu sering penurunan temperatur dibawah CFPP, yang disebut dengan titik tuang (Dunn, 2015).

Titik kabut dan CFPP merupakan dua parameter utama untuk menganalisis sifat aliran bahan bakar pada temperatur rendah sebagai upaya untuk mengembangkan uji laboratorium yang berkorelasi dalam simulasi aliran melalui filter. Verma, dkk. (2016) melaporkan bahwa biodiesel berbasis kelapa sawit memiliki nilai titik kabut dan titik tuang masing-masing sebesar 21°C dan 19°C. Penggunaan campuran B20, menurunkan titik tuang dan titik kabut masing-masing hingga 8,9°C dan 6°C. Penggunaan kerosena sebagai campuran biodiesel, menyebabkan penurunan titik kabut dan titik tuang hingga 2,8°C dan -2°C. Terbentuknya kristal *wax* pada temperatur tersebut menyebabkan pengoperasian mesin menjadi sulit akibat tersumbatnya saluran bahan bakar saat titik kabut tercapai. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biodiesel yang mengandung sifat saturasi lebih tinggi (asam jenuh rantai panjang) menyebabkan peningkatan nilai titik kabut dan CFPP. Oleh karena itu, sangat penting untuk menganalisis pengaruh penambahan biodiesel pada minyak solar terhadap titik kabut dan CFPP, seiring dengan pemanfaatan bahan bakar nabati yang saat ini sedang berlangsung di Indonesia (Dwivedi & Sharma, 2013; Kumar, dkk., 2018).

Penelitian ini menyajikan analisis pengaruh penambahan biodiesel kelapa sawit terhadap *cold-flow properties* dari dua jenis minyak solar yang beredar di Indonesia, yaitu Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51. Dua parameter *cold-flow properties* yang dianalisis meliputi titik kabut dan CFPP. Analisis regresi dan varians (ANOVA) dilakukan untuk mendapatkan nilai prediksi dan signifikansi titik kabut dan CFPP dari campuran minyak solar-biodiesel. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat

menghasilkan pengaruh pencampuran biodiesel dengan minyak solar serta memberikan model prediksi untuk titik kabut dan CFPP dari campuran biodiesel-minyak solar.

BAHAN DAN METODE

Analisis titik kabut dilakukan berdasarkan metode standar ASTM D 5773, dengan prinsip pendinginan terkontrol. Sebanyak 150 uL sampel didinginkan dengan laju 1,5°C per menit. Kristal dalam suspensi awan yang terbentuk dideteksi oleh sinyal optis. Analisis CFPP dilakukan berdasarkan metode standar ASTM D 6371. Sebanyak 45 mL sampel didinginkan setiap 1°C untuk dialirkan pada filter *wire mesh* 45 um dengan tekanan vakum 2 kPa. CFPP menggambarkan temperatur terendah bahan bakar untuk dapat mengalir bebas tanpa hambatan dalam suatu sistem aliran bahan bakar. Pengujian titik kabut dan CFPP untuk setiap sampel, masing-masing dilakukan sebanyak tiga kali ulangan. Data eksperimen yang didapatkan kemudian dilakukan analisis varians (ANOVA) menggunakan perangkat lunak Origin 9.0. Nilai ragam R^2 dan signifikansi statistiknya meliputi nilai P (probabilitas kesalahan) dengan tingkat kepercayaan 95% juga ditentukan dengan uji *F-fischer* menggunakan program serupa.

HASIL DAN DISKUSI

Biodiesel yang digunakan pada penelitian ini merupakan bahan bakar nabati komersial yang beredar di Indonesia sesuai standar dan mutu yang dipersyaratkan. Biodiesel yang digunakan berbasis kelapa sawit yang diolah melalui proses transesterifikasi. Kandungan ester metil dalam biodiesel kelapa sawit ditentukan menggunakan kromatografi gas (Tabel 1). Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51 digunakan sebagai basis untuk mendapatkan beberapa campuran bahan bakar melalui proses *in-tank blending*. Karakteristik bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 2.

Campuran biodiesel-minyak solar pada penelitian ini digambarkan dengan rasio pencampuran (XB) dengan B merujuk pada rasio biodiesel yang ditambahkan pada minyak solar. Pencampuran yang dilakukan meliputi 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, dan 90% biodiesel yang

ditambahkan dalam minyak solar ($XB = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9$). Verifikasi pencampuran dianalisis secara kuantitatif menggunakan *Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) sesuai ASTM D 7806, dengan pengembangan deret standar biodiesel (Tabel 3). Pencampuran minyak solar-biodiesel dilakukan berdasarkan basis volume pada ambien temperatur ($28 \pm 3^\circ\text{C}$). Teknik dengan preparasi ini menguntungkan karena sangat aplikatif diterapkan di kilang pengolahan dan terminal bahan bakar minyak.

Titik Kabut Campuran Minyak Solar-Biodiesel

Titik kabut didefinisikan sebagai temperatur pada saat bahan bakar membentuk sekelompok kristal *wax* pada kondisi dingin sehingga menghasilkan suspensi kabut atau berawan pada bahan bakar. Secara keseluruhan, hasil pengujian titik kabut bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel berbasis Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51 ditampilkan pada Tabel 4. Hasil analisis varians (ANOVA) menunjukkan rasio campuran minyak solar-biodiesel berbasis Minyak Solar 48 berpengaruh signifikan

terhadap titik kabut bahan bakar, dengan nilai F sebesar 95,66 (Tabel 5). Nilai probabilitas kesalahan kurang dari 0,0001 juga menunjukkan pengaruh yang signifikan dari penambahan biodiesel terhadap titik kabut Minyak Solar 48 dengan selang kepercayaan 95%. Nilai R^2 sebesar 0,9797 menggambarkan hasil yang sangat tinggi hingga mendekati 1 serta menunjukkan kesesuaian hasil dengan Adj. R^2 . Hasil tersebut juga menggambarkan 97,97% keragaman hasil titik kabut bahan bakar dipengaruhi oleh rasio pencampuran minyak solar-biodiesel.

Hasil ANOVA untuk titik kabut bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel berbasis Minyak Solar 51 menghasilkan model persamaan kuadrat dengan nilai F sebesar 165,15. Hasil tersebut menunjukkan pengaruh yang signifikan dari rasio pencampuran minyak solar-biodiesel terhadap titik kabut bahan bakar, dengan nilai probabilitas kesalahan kurang dari 0,0001 pada selang kepercayaan 95%. Nilai R^2 sebesar 0,9881 menggambarkan hasil yang sangat tinggi hingga mendekati 1 serta menunjukkan kesesuaian hasil dengan Adj. R^2 . Hasil tersebut menunjukkan 98,81% keragaman hasil titik kabut

Tabel 1
Kandungan ester metil pada biodiesel kelapa sawit menggunakan kromatografi gas

Ester Metil Asam Lemak	%-massa
C12:0	0,11
C14:0	0,13
C16:0	42,41
C18:0	6,12
C18:1	48,98
C18:2	1,66

Tabel 2
Karakteristik bahan bakar minyak solar dan biodiesel

Karakteristik	Satuan	Metode (ASTM)	Minyak Solar 48	Minyak Solar 51	Biodiesel
Angka Setana		D 613	48,7	51,9	57,4
Berat Jenis pada 15°C	kg/m^3	D 4052	835,1	838,3	873,1
Viskositas Kinematik pada 40°C	cSt	D 445	2,49	2,81	4,76
Kandungan Air	mg/kg	D 6304	89,4	71,3	337,5
Angka Asam	mg KOH/g	D 664	0,08	0,05	0,33
Kandungan Sulfur	%m/m	D 4294	0,11	0,03	Nil
Titik Kabut	$^\circ\text{C}$	D 5773	6,2	-3,2	12,8
CFPP	$^\circ\text{C}$	D 6371	6	-3	12

Tabel 3
Kandungan FAME untuk masing-masing campuran bahan bakar

Minyak Solar-Biodiesel Blends (XB)	Kandungan FAME (%-vol)	
	Minyak Solar 48	Minyak Solar 51
0	0	0
0,1	10,1	10,2
0,2	19,8	20,1
0,3	30,0	30,0
0,4	40,1	40,2
0,5	49,8	50,2
0,6	62,7	61,9
0,7	72,7	72,5
0,8	77,9	77,1
0,9	87,4	87,9
1,0	99,41*	

*Menggunakan Kromatografi Gas

Tabel 4
Hasil pengujian titik kabut bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel

Sampel	Rasio Biodiesel dengan Minyak Solar	Titik Kabut Campuran Minyak Solar-Biodiesel	
		Minyak Solar 48	Minyak Solar 51
B0	0	6,2	-3,2
B10	0,1	6,4	0,5
B20	0,2	7,1	1,9
B30	0,3	7,8	2,8
B40	0,4	8,3	3,5
B50	0,5	8,5	4,5
B60	0,6	8,7	6,6
B70	0,7	9,5	7,4
B80	0,8	9,9	8,9
B90	0,9	10,8	10,7
B100	1	12,8	12,8

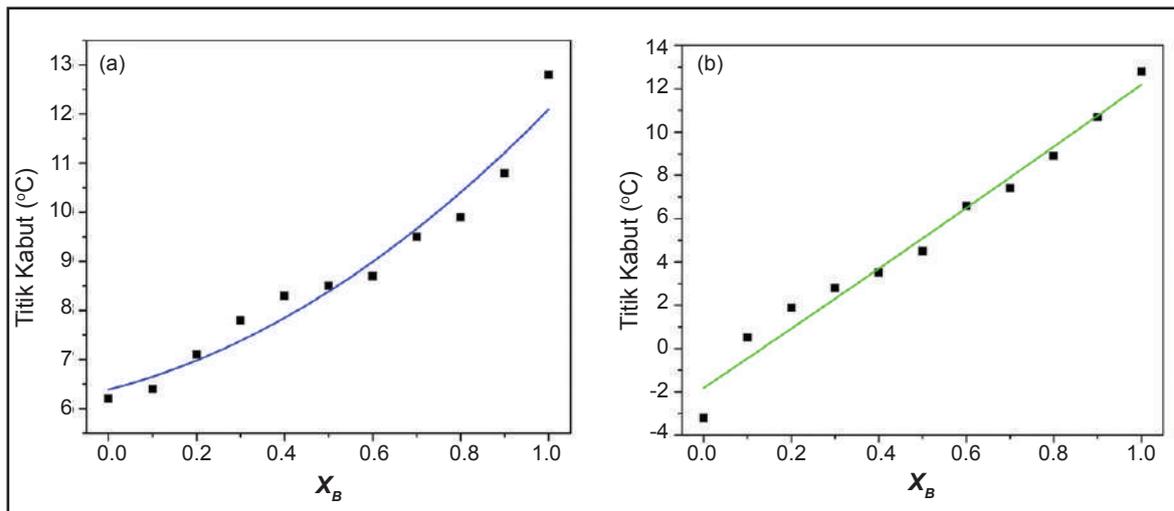
bahan bakar dipengaruhi oleh rasio pencampuran minyak solar-biodiesel.

Hasil pengujian titik kabut dari Minyak Solar 48, Minyak Solar 51, Biodiesel, dan campurannya ditampilkan pada Gambar 1. Biodiesel memiliki titik kabut sebesar 12,8°C, sedangkan Minyak Solar 48 memiliki titik kabut sebesar 6,2°C serta Minyak Solar 51 memiliki titik kabut sebesar -3,2°C.

Penambahan biodiesel pada Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51 menunjukkan peningkatan titik kabut dibandingkan dengan Minyak Solar Murni. Berdasarkan data eksperimental, diperoleh model persamaan polinomial untuk titik kabut bahan bakar campuran biodiesel berbasis Minyak Solar 48 (Persamaan 1) dan Minyak Solar 51 (Persamaan 2).

Tabel 5
Hasil analisis varians (ANOVA) untuk titik kabut

Minyak Solar-Biodiesel <i>Blends</i> ($X_B = 0 - 1$)	F-value	P	R ²	Adj. R ²
Minyak Solar 48	95,66	<0,0001	0,9797	0,9498
Minyak Solar 51	165,15	<0,0001	0,9881	0,9704



Gambar 1
Kurva titik kabut untuk rasio campuran minyak solar-biodiesel berbasis (a) minyak solar 48 dan (b) minyak solar 51. X_B menggambarkan rasio pencampuran dengan minyak solar murni ($X_B = 0$), biodiesel ($X_B = 1$).

$$Y = 6,3867 + 2,2825X + 3,4265X^2 \quad (1)$$

$$Y = -1,8196 + 13,6245X + 0,3846X^2 \quad (2)$$

Penelitian oleh Dunn (2015) menghasilkan pengembangan model korelasi yang akurat antara titik kabut dari biodiesel berbasis kelapa sawit dan kedelai dengan kesetimbangan padat-cair terkait dengan termodinamika campuran senyawa organik penyusunnya. Model tersebut membutuhkan konsentrasi asam lemak dan titik leleh, serta entalpi pelelehan untuk setiap jenis biodiesel yang dianalisis dengan tingkat keragaman, R² sebesar 0,949. Hasil penelitian ini juga memperkuat bahwa bahan baku memainkan peran penting dalam menentukan *cold flow properties* dari biodiesel. Profil konsentrasi asam lemak biodiesel hampir identik dengan profil kandungan asam lemak pada bahan baku asal. Dengan konsentrasi metil ester jenuh >20% maka *cold flow properties* dari biodiesel cenderung buruk. Selain itu, penelitian terbaru menunjukkan penilaian yang akurat dari *cold flow properties*,

khususnya titik kabut yang relevan akan sangat penting untuk keberlangsungan pemanfaatan bahan bakar nabati, yang dipengaruhi oleh perkembangan teknologi dan sumber bahan baku yang digunakan. Di sisi lain, kontaminan monogliserida jenuh dapat mempengaruhi stabilitas bahan bakar pada cuaca dingin. Jika dibiarkan menumpuk dan mengendap di bagian bawah tangki penyimpanan, kontaminan ini dapat mengganggu kemampuan alir dan kemampuan filter terutama akibat pencampuran biodiesel pada minyak solar (Dunn, 2017; Seniorita, dkk., 2019).

Cold Filter Plugging Point Campuran Minyak Solar-Biodiesel

Cold filter plugging point atau CFPP mendeskripsikan temperatur terendah bahan bakar mengalir dengan lancar pada sistem filtrasi. CFPP digunakan untuk memprediksi temperatur ketika filter mulai tersumbat akibat komponen bahan bakar berubah menjadi gel. Hal tersebut menjadi salah satu permasalahan utama dalam operasional. Senyawa metil ester jenuh, seperti metil palmitat

dan metil stearat menentukan nilai capaian CFPP dari biodiesel. Oleh karena itu, menjadi sangat penting dalam menganalisis CFPP dari campuran minyak solar dan biodiesel. Secara keseluruhan, hasil pengujian CFPP bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel berbasis Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51 ditampilkan pada Tabel 6. Hasil analisis varians (ANOVA) menunjukkan rasio campuran minyak solar-biodiesel berbasis Minyak Solar 48 berpengaruh signifikan terhadap CFPP bahan bakar, dengan nilai signifikansi (*F-value*) sebesar 56,89. Nilai probabilitas kesalahan kurang dari 0,0001 juga menunjukkan pengaruh yang signifikan dari penambahan biodiesel terhadap CFPP Minyak Solar 48 pada tingkat selang kepercayaan 95%. Nilai R^2 sebesar 0,9667 menunjukkan kesesuaian dengan nilai Adj. R^2 sebesar 0,9179, dan kedua nilai tersebut menunjukkan nilai yang tinggi (mendekati 1). Hasil tersebut juga menggambarkan 96,67% keragaman hasil CFPP bahan bakar Minyak Solar 48 yang dipengaruhi oleh rasio pencampurannya dengan biodiesel.

Hasil analisis varians (ANOVA) pada data eksperimen CFPP campuran minyak solar-biodiesel berbasis Minyak Solar 51 ditampilkan pada Tabel 7. Hasil analisis menunjukkan penambahan biodiesel pada Minyak Solar 51 berpengaruh signifikan terhadap CFPP bahan bakar, dengan nilai signifikansi (*F-value*) sebesar 601,13. Nilai signifikansi tersebut menghasilkan nilai probabilitas kesalahan sebesar 0,0001 yang menunjukkan penambahan biodiesel berpengaruh signifikan terhadap CFPP Minyak Solar 51 pada tingkat selang kepercayaan 95%. Nilai R^2 sebesar 0,9967 menunjukkan kesesuaian dengan nilai Adj. R^2 sebesar 0,9917, dan kedua nilai tersebut menunjukkan nilai yang tinggi (mendekati 1). Hasil tersebut juga menggambarkan 99,17% keragaman hasil CFPP bahan bakar Minyak Solar 51 yang dipengaruhi oleh penambahan biodiesel.

Kurva hubungan antara nilai CFPP bahan bakar dengan rasio campuran minyak solar-biodiesel ditampilkan pada Gambar 2. Berdasarkan hasil pengujian, biodiesel memiliki CFPP sebesar 12°C, sedangkan Minyak Solar 48 memiliki CFPP sebesar 6°C serta Minyak Solar 51 memiliki titik kabut

Tabel 6
Hasil pengujian CFPP bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel

Sampel	Rasio Biodiesel dengan Minyak Solar	CFPP Campuran Minyak Solar-Biodiesel	
		Minyak Solar 48	Minyak Solar 51
B0	0	6	-3
B10	0,1	6	-1
B20	0,2	7	1
B30	0,3	7	2
B40	0,4	8	3
B50	0,5	8	4
B60	0,6	8	6
B70	0,7	9	7
B80	0,8	9	9
B90	0,9	10	10
B100	1	12	12

Tabel 7
Hasil analisis varians (ANOVA) untuk CFPP

Minyak Solar-Biodiesel Blends (XB = 0 - 1)	F-value	P	R^2	Adj. R^2
Minyak Solar 48	56,89	<0,0001	0,9667	0,9179
Minyak Solar 51	601,13	<0,0001	0,9967	0,9917

sebesar -3°C . Secara umum, penambahan biodiesel sebagai bahan bakar campuran minyak solar, meningkatkan nilai capaian CFPP. Peningkatan tersebut terjadi pada campuran minyak solar-biodiesel berbasis Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51. Model persamaan yang dihasilkan untuk mendapatkan nilai prediksi CFPP bahan bakar dari rasio pencampuran minyak solar-biodiesel, ditampilkan pada Persamaan 3 untuk Minyak Solar 48, dan Persamaan 4 untuk Minyak Solar 51.

$$Y = 6,1608 + 1,5944X + 3,4965X^2 \quad (3)$$

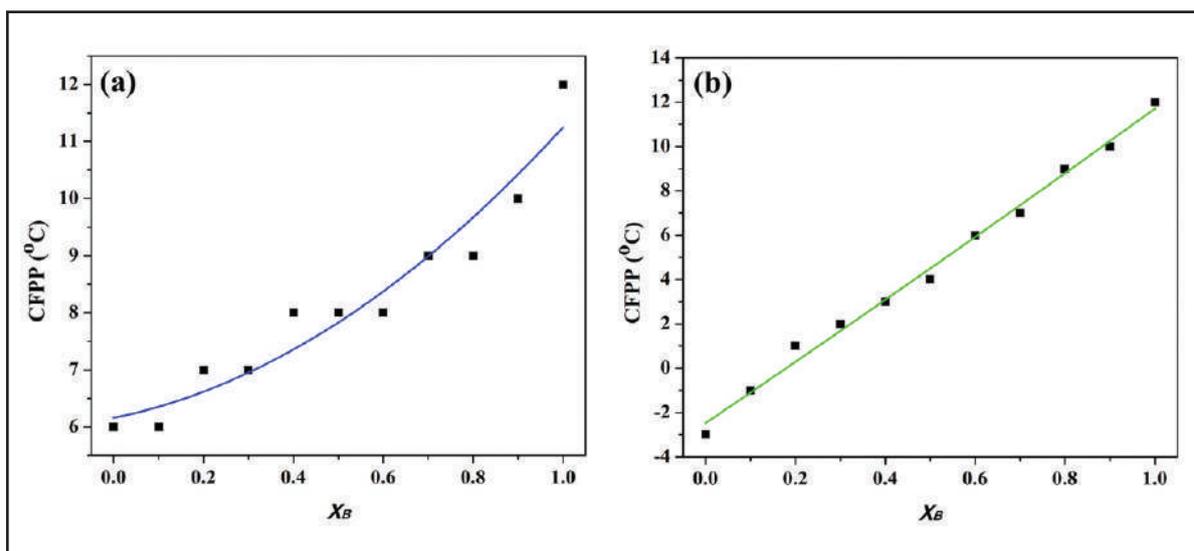
$$Y = -2,4755 + 13,7156X + 0,4662X^2 \quad (4)$$

Beberapa teknik dapat digunakan untuk memperbaiki *cold-flow properties* dari bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel, antara lain winterisasi, hidroisomerisasi pada produk metil ester, serta penambahan aditif berbasis *cold-flow improver*. Aditif berbasis polimer seperti poli metil akrilat, kopolimer etilena vinil asetat, poliolefin, kopolimer olefin-ester, poli gliserol ester dan gliserol eter merupakan beberapa aditif yang umum digunakan sebagai *cold-flow improver* pada bahan bakar minyak solar. Polimetil metakrilat dapat menurunkan CFPP hingga 6°C pada biodiesel berbasis minyak goreng bekas dengan tingkat saturasi asam lemak yang tinggi. Polimer lainnya, secara umum dapat menurunkan CFPP sebesar 5 hingga 8°C pada bahan bakar B20 dan B30 berbasis biodiesel minyak kelapa (Sierra-Cantor

& Guerrero-Fajardo, 2017). Di sisi lain, surfaktan non-ionik sorbitan monooleat juga dilaporkan dapat menurunkan CFPP biodiesel berbasis minyak kelapa sawit hingga 3°C . Perkembangan nanomaterial juga mengarahkan penggunaan nanopartikel sebagai agen untuk meningkatkan efektifitas dari kinerja *cold-flow improver* (Yang, dkk., 2015; Prilla, Ayu & Nasikin, 2020). Aditif pereduksi CFPP, bekerja dengan mencegah agregasi antar molekul *wax* melalui hambatan interaksi Van der Waals, menjaga stabilisasi antarmuka wujud padat-cair, hingga menghasilkan emulsi *Pickering*, suatu emulsi yang distabilisasi partikel padat (Hao, dkk., 2019).

Hubungan antara Titik Kabut dan CFPP

Data eksperimen titik kabut dan CFPP dari bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel menghasilkan model persamaan linier (Persamaan 5). Persamaan tersebut menghasilkan kurva hubungan antara titik kabut dan CFPP dari Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51 seiring peningkatan konsentrasi biodiesel, dengan R^2 sebesar $0,9956$ (Gambar 3). Hasil tersebut menunjukkan $99,56\%$ keragaman titik kabut dapat dijelaskan dengan temperatur terendah bahan bakar dapat terfiltrasi, CFPP. Selisih antara nilai titik kabut dan CFPP dianalisis untuk mempelajari perubahan suspensi awan dan kristalisasi yang terjadi pada setiap penurunan temperatur tersebut. Untuk Minyak Solar 48, penambahan biodiesel hingga 50% menyebabkan selisih nilai antara titik kabut dan CFPP dengan rata-rata sebesar $0,38^{\circ}\text{C}$. Di atas penambahan biodiesel 50% menghasilkan selisih



Gambar 2
Kurva CFPP untuk rasio campuran minyak solar-biodiesel berbasis
(a) Minyak solar 48 dan (b) Minyak solar 51. XB menggambarkan
rasio pencampuran dengan minyak solar murni ($X_B = 0$), biodiesel ($X_B = 1$).

nilai antara titik kabut dan CFPP dengan rata-rata sebesar 0,70°C.

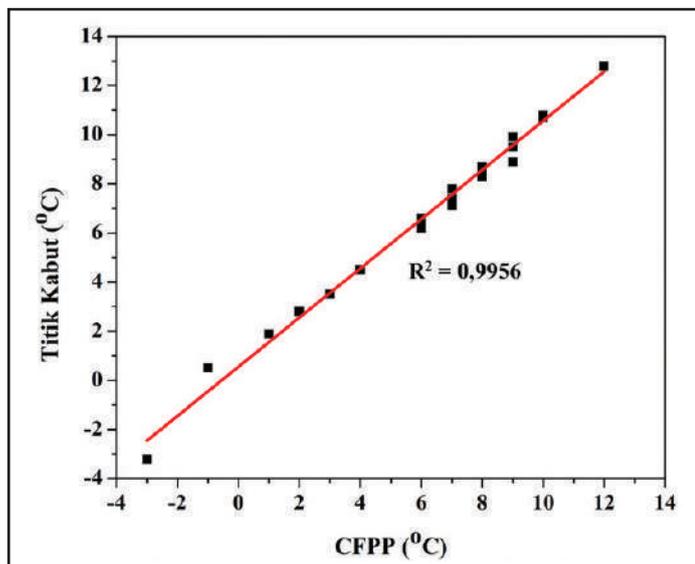
$$Y = 0,55603 + 1,0012X \quad (5)$$

Pada Minyak Solar 51, penambahan biodiesel hingga 50%, menyebabkan selisih nilai antara titik kabut dan CFPP dengan rata-rata sebesar 0,73°C. Penambahan biodiesel lebih dari 50% pada Minyak Solar 51 menghasilkan selisih nilai antara titik kabut dan CFPP dengan rata-rata sebesar 0,52°C (Tabel 8). Hasil tersebut menunjukkan komponen dalam minyak solar dapat mempengaruhi perilaku kristalisasi bahan bakar, bergantung pada jenis minyak solar yang digunakan. Biodiesel mengandung senyawa asam lemak jenuh dalam bentuk ester metil jenuh maupun monogliserida. Dua komponen utama ester metil pada biodiesel, yaitu metil stearat dan metil palmitat masing-masing memiliki titik leleh sebesar 30,5°C dan 39,1°C. Hal tersebut menunjukkan pada temperatur di bawah 30°C, metil palmitat dan metil stearat terdispersi pada biodiesel dan berperan sebagai zat terlarut dalam fasa suspensi minyak solar-biodiesel (Edith, 2012; Chupka, dkk., 2014; Azaria, dkk., 2020).

Umumnya titik leleh komponen dalam minyak solar bergantung pada bobot molekul dan bentuk molekuler. Molekul yang serupa memiliki gaya Van der Waals sehingga lebih mudah membentuk struktur kristal dan memiliki titik leleh yang tinggi dibandingkan molekul lainnya (Dwivedi & Sharma, 2014; Elias, dkk., 2016; Seniorita, dkk., 2020). Hal tersebut menjelaskan titik leleh yang tinggi pada molekul parafinik dan aromatik tak tersubstitusi, bila dibandingkan dengan isoparafin dan naftalena (Bacha, dkk., 2007).

Penelitian ini menunjukkan titik kabut dan CFPP menjadi parameter utama untuk menganalisis sifat aliran

bahan bakar minyak solar-biodiesel, berbasis Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51, sebagai salah satu uji laboratorium yang berkorelasi dalam simulasi aliran melalui filter akibat pengaruh temperatur. Pada campuran homogen bahan bakar yang terdiri atas beberapa komponen dengan titik leleh yang berbeda, kristalisasi ditentukan oleh solubilitas komponen tersebut. Senyawa dengan titik leleh lebih rendah, berperan sebagai pelarut, sedangkan komponen dengan titik leleh tinggi berperan sebagai zat terlarut (Ragunathan, dkk., 2020). Keadaan tersebut tergambar pada campuran minyak solar-biodiesel, pada setiap titik campuran yang diamati pada penelitian ini. Secara umum, kelarutan berkurang dan supersaturasi meningkat seiring penurunan temperatur. Pada temperatur dibawah titik leleh zat terlarut, kristalisasi terjadi akibat keadaan supersaturasi. Keadaan tersebut mengindikasikan keadaan larutan yang mengandung zat terlarut melebihi jumlah yang diperlukan untuk mencapai titik jenuh larutan. Perbedaan transisi fasa suspensi-kristalisasi dapat diamati dari hasil pengukuran titik kabut dan CFPP untuk masing-



Gambar 3
Hubungan antara titik kabut dan CFPP bahan bakar.

Tabel 8
Selisih temperatur antara titik kabut dan CFPP

Minyak Solar-Biodiesel Blends (XB = 0 - 1)	$\Delta T_{\text{Titik Kabut-CFPP}} (\text{°C})$											
	Minyak Solar 48	0,2	0,4	0,1	0,8	0,3	0,5	0,7	0,5	0,9	0,8	0,8
Minyak Solar 51	0,2	1,5	0,9	0,8	0,5	0,5	0,6	0,4	0,1	0,7	0,8	

Titik Kabut (ASTM D 5773), *Repeatability* = 1,3 °C; *Reproducibility* = 2,5 °C.

CFPP (ASTM D 6371), *Repeatability* = 1,8 °C; *Reproducibility* = 2,0 °C.

masing campuran minyak solar-biodiesel. Hal tersebut mengindikasikan suspensi awal yang terlebih dahulu terbentuk, yang secara simultan mempengaruhi ukuran kristal seiring penurunan temperatur dan terdeteksi sebagai titik kabut serta temperatur terendah bahan bakar dapat terfiltrasi (Edith, 2012; Zhong, dkk., 2016; Su, dkk., 2020).

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyajikan hubungan antara rasio pencampuran minyak solar dengan biodiesel dengan titik kabut dan CFPP bahan bakar. Berdasarkan analisis statistika, dapat disimpulkan bahwa rasio pencampuran minyak solar dan biodiesel berpengaruh signifikan terhadap titik kabut dan CFPP bahan bakar. Keragaman titik kabut dan CFPP dari basis Minyak Solar 48 dan Minyak Solar 51 dipengaruhi oleh rasio pencampuran biodiesel dengan nilai $> 96,7\%$. Hasil eksperimen menunjukkan *cold-flow properties* bahan bakar campuran minyak solar-biodiesel dapat diprediksi dengan menghubungkan temperatur awal titik kabut atau CFPP minyak solar murni, dengan rasio pencampuran melalui persamaan polinomial. Komponen dalam minyak solar mengindikasikan perilaku kristalisasi bahan bakar yang terdeteksi melalui pengukuran titik kabut dan CFPP, bergantung pada jenis minyak solar yang digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Pelaksana Penelitian dan Pengembangan Teknologi Aplikasi Produk, LEMIGAS, khususnya untuk Laboratorium Karakteristik Bahan Bakar dan Unjuk Kerja di Kelompok Bahan Bakar dan Aviasi dalam rangka pelaksanaan penelitian.

DAFTAR ISTILAH / SINGKATAN

Simbol	Definisi	Satuan
ANOVA	Analisis Varians	
ASTM	American Standard Testing and Material	
CFPP	Cold Filter Plugging Point	°C

KEPUSTAKAAN

- Azaria, A. P., Bethari, S. A. & Nasikin, M., 2020.** The Effect of Sorbitan Monooleate and Alcohol Addition as Flow Properties Improver in Palm Oil Biodiesel. *Journal of Clean Energy Technologies*, 8(4), pp. 41-46.
- Azaria, A. P., Bethari, S. A., Susanto, B. H. & Nasikin, M., 2020.** The influence of sorbitan monooleate as a surfactant and octanol as a co-surfactant to restore biodiesel's flow properties at the cold temperatures. *International Journal of Renewable Energy Research*, 10(3), pp. 1174-1181.
- Bacha, J., Freil, J., Gibbs, A., Gibbs, L., Hemighaus, G., Hoekman, K., Horn, J., Ingham, M., Jossen, L., Kohler, D., Lesnini, D., McGeehan, J., Nikanjam, M., Olsen, E., Organ, R., Scott, B., Sztenderowicz, M., Tiedemann, A., Walker, C., Lind, J. & Jones, J., 2007.** Diesel Fuels Technical Review. *Chevron Global Marketing*, pp. 1-116.
- Boshui, C., Yuqiu, S., Jianhua, F., Jiu, W., & Jiang, W., 2010.** Effect of cold flow improvers on flow properties of soybean biodiesel. *Biomass and Bioenergy*, 34(9), pp. 1309-1313.
- Chupka, G., Fouts, L., Lennon, J.A., Allemana, L., Daniels, D.A., & McCormicka, R.L., 2014.** Saturated monoglyceride effects on low-temperature performance of biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*, Volume 118, pp. 302-309.
- Dunn, R. O., 2015.** Cold flow properties of biodiesel: A guide to getting an accurate analysis. *Biofuels*, pp. 115-128.
- Dunn, R. O., 2017.** Correlating the Cloud Point of Biodiesel to the Concentration and Melting Properties of the Component Fatty Acid Methyl Esters. *Energy & Fuels*, p. 455-464.
- Dwivedi, G. & Sharma, M., 2013.** Cold flow behaviour of biodiesel-A review. *International Journal of Renewable Energy Research*, 3(4), pp. 827-836.
- Dwivedi, G. & Sharma, M. P., 2015.** Investigation and Improvement in Cold Flow Properties of Pongamia Biodiesel. *Waste and Biomass Valorization*, 6(1), pp. 73-79.
- Edith, O., 2012.** Factors affecting the cold flow behaviour of biodiesel and methods for improvement - A review. 20(1), pp. 1-14.
- Elias, R. C., Senra, M. & Soh, L., 2016.** Cold Flow Properties of Fatty Acid Methyl Ester Blends with and without Triacetin. *Energy & Fuels*, 30(9), p. 7400-7409.

- Hao, L. Z., Al-Salim, H. S. & Ridzuan, N.**, 2019. A review of the mechanism and role of wax inhibitors in the wax deposition and precipitation. *Pertanika Journal Science & Technology*, 27(1), pp. 499 - 526.
- Hoekman, S. K., Brocha, A., Robbins, C., Ceniceros, E., & Nataraja, M.**, 2012. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), pp. 143-169.
- Komariah, L. N., Hadiah, F., Aprianjaya, F. & Nevriadi, F.**, 2018. Biodiesel effects on fuel filter; Assessment of clogging characteristic. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1095.
- Kumar, S., Yadav, K. & Dwivedi, G.**, 2018. Impact analysis of oxidation stability for biodiesel & its blends. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), pp. 19255-19261.
- Paryanto, I., Prakoso, T., Suyono, E. A. & Gozan, M.**, 2019. Determination of the upper limit of monoglyceride content in biodiesel for B30 implementation based on the measurement of the precipitate in a Biodiesel–Petrodiesel fuel blend (BXX). *Fuel*, Volume 258.
- Ragunathan, T., Husin, H. & Wood, C. D.**, 2020. applied sciences Wax Formation Mechanisms , Wax Chemical Inhibitors and Factors Affecting Chemical Inhibition. *Applied Sciences*, pp. 1-18.
- Seniorita, L. & Minami, E.**, 2019. *Effect of Diglycerides on Biodiesel Cold-Flow Properties*. Osaka, Japan, Japan Energy Society.
- Seniorita, L., Minami, E. & Kawamoto, H.**, 2020. Development and Evaluation of Thermodynamic Models for Predicting Cold Flow Properties of Biodiesel. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 76(3), pp. 117-125.
- Sierra-Cantor, J. F. & Guerrero-Fajardo, C. A.**, 2017. Methods for improving the cold flow properties of biodiesel with high saturated fatty acids content: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 72, pp. 774-790.
- Su, B., Wang, L., Xue, Y., Yan, J., Dong, Z., Lin, H., & Han, S.**, 2012. Effect of Pour Point Depressants Combined with Dispersants on the Cold Flow Properties of Biodiesel-Diesel Blends. *Journal of the American Oil Chemist's Society*, 98(2), pp. 163-172.
- Verma, P., Sharma, M. & Dwivedi, G.**, 2016. Evaluation and enhancement of cold flow properties of palm oil and its biodiesel. *Energy Reports*, Volume 2, pp. 8-13.
- Yang, F., Paso, K., Norrman, J., Li, C., Oschmann, H., & Sjöblom, J.**, 2015. Hydrophilic Nanoparticles Facilitate Wax Inhibition. *Energy & Fuels*, 29(3), p. 1368–1374.
- Zhong, H., Watanabe, M., Enomoto, H., Jin, F., Kishita, A., Aida, T.M., & Smith Jr., R.L.**, 2016. Winterization of Vegetable Oil Blends for Biodiesel Fuels and Correlation Based on Initial Saturated Fatty Acid Constituents. *Energy & Fuels*, 30(6), p. 4841–4847.