

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. KARAKTERISTIK MUTU DAN REOLOGI CPO AWAL

Minyak sawit kasar (*crude palm oil*/CPO) merupakan komoditas unggulan Indonesia yang juga berperan penting dalam perdagangan dunia. Mengingat pentingnya peranan CPO tersebut, maka mutu harus mendapat perhatian yang utama karena sangat mempengaruhi harga dan nilai ekonomisnya (Muchtadi 1998). Penanganan CPO yang kurang baik dapat mengakibatkan kerusakan mutu CPO.

CPO yang digunakan pada penelitian ini merupakan CPO baru yang belum mengalami proses transportasi dan penyimpanan dalam waktu yang lama. Dengan demikian, diharapkan komposisi kimia dan kondisi kristal lemak di dalamnya belum mengalami perubahan akibat terjadinya kristalisasi dan pelelehan yang berulang. Sebelum dilakukan perlakuan selanjutnya, CPO dianalisis mutu serta reologinya pada suhu 25 °C. Hasil analisis mutu CPO awal yang meliputi pengukuran kadar asam lemak bebas, bilangan iod, kadar karotenoid, dan DOBI (*deterioration of bleachability index*) dapat dilihat pada Tabel 5 dengan data lengkap pada Lampiran 1.

Tabel 5. Parameter mutu CPO awal.

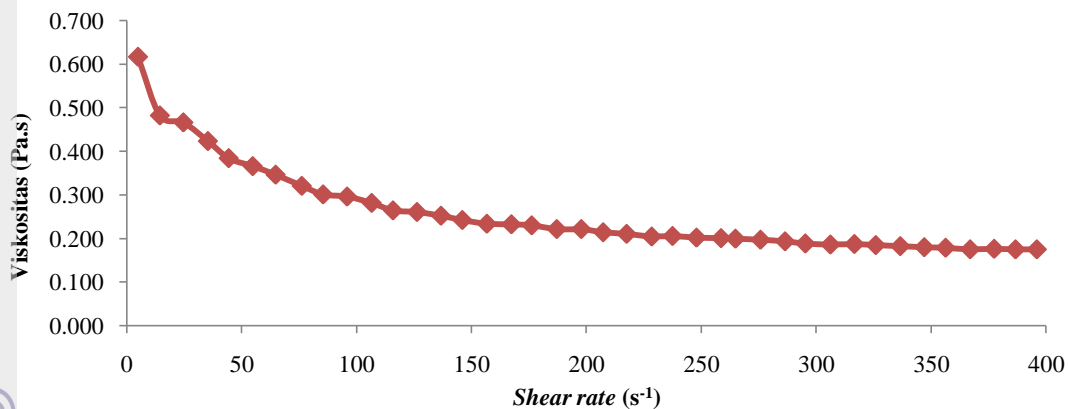
	Parameter mutu			
	Asam lemak bebas (%)	Bilangan iod (g iod/100 g)	Karotenoid (ppm)	DOBI
CPO awal	3.44	52.64	642	2.91
Standar mutu				
SNI 01-2901-2006	0.5 maks	50-55	-	-
Ditjenbun (1997)	5 maks	51 min	500 min	2.5 min

Berdasarkan hasil analisis mutu awal yang dilakukan, sampel CPO yang digunakan pada penelitian ini memiliki kadar asam lemak bebas yang tidak sesuai dengan standar yang diacu, dimana standar asam lemak bebas yang dipersyaratkan dalam SNI 01-2901-2006 maksimal 0.5%. Jika mengacu pada standar mutu CPO di PKS Indonesia yang dikeluarkan oleh Direktorat Jendral Perkebunan (Ditjenbun) (1997), sampel CPO yang digunakan masih memenuhi standar, dimana standar asam lemak bebas pada CPO maksimal 5%. Dilihat dari parameter bilangan iod, kadar karotenoid dan DOBI, sampel CPO yang digunakan masih memenuhi standar mutu yang diacu.

Selain dilakukan analisis mutu awal terhadap sampel CPO yang digunakan, juga dilakukan analisis sifat reologi CPO awal. Sifat reologi yang diamati meliputi indeks tingkah laku aliran (n) dan indeks konsistensi (K). Data lengkap analisis reologi CPO awal dapat dilihat pada Lampiran 2. Hasil analisis reologi CPO awal menunjukkan bahwa indeks tingkah laku aliran (n) CPO awal sebesar 0.635, dan indeks konsistensi (K) sebesar 1.505. Dilihat dari nilai n dan K yang diperoleh berdasarkan persamaan *power law* diketahui bahwa CPO pada suhu 25 °C merupakan fluida pseudoplastik ($0 < n < 1$ dan $K > 0$). Menurut Toledo (1991) pada kondisi *shear rate* yang berbeda, maka nilai viskositas suatu fluida akan berubah. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO awal pada suhu pengukuran 25 °C dapat dilihat pada Gambar 11.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



Gambar 11. Hubungan *shear rate* dan viskositas CPO awal.

Gambar 11 menunjukkan bahwa viskositas CPO pada suhu 25 °C dipengaruhi oleh besarnya *shear rate* yang diberikan. Viskositas CPO awal pada suhu 25 °C semakin menurun seiring dengan kenaikan *shear rate* yang diberikan. Hal ini menunjukkan sifat fluida pseudoplastik. Menurut Moros *et al.* (2002) fluida pseudoplastik akan mengalami penurunan viskositas saat dikenai *shear rate* yang meningkat, atau dikenal dengan sifat *shear thinning*. Sifat reologi CPO yang menunjukkan perilaku fluida pseudoplastik dengan nilai viskositas yang relatif besar pada suhu 25 °C (0.175-0.282 Pa.s) mengakibatkan CPO sulit dialirkan pada suhu pengaliran 25 °C, karena diperlukan gaya dorong yang cukup besar untuk mengalirkan CPO dengan viskositas yang tinggi, selain itu saat dialirkan pada suhu pengaliran tersebut viskositas CPO akan sangat dipengaruhi oleh besarnya *shear rate* yang diberikan.

Jika dibandingkan dengan minyak nabati lainnya, CPO memiliki sifat reologi yang berbeda pada suhu pengukuran 25 °C. Penelitian yang dilakukan oleh Kim *et al.* (2010) terhadap tujuh sampel minyak nabati yaitu minyak *canola*, jagung, *grapeseed*, *hazelnut*, zaitun, kedelai, dan biji bunga matahari menunjukkan bahwa ketujuh minyak nabati tersebut memperlihatkan sifat fluida Newtonian pada suhu pengukuran 25 °C dengan nilai viskositas terukur yang rendah (< 0.08 Pa.s). Minyak nabati dengan sifat aliran fluida Newtonian akan lebih mudah ditangani saat proses pengaliran dalam pipa, karena nilai viskositas fluida Newtonian tidak dipengaruhi oleh besarnya *shear rate* yang diberikan (Matuszek 1997). Akibatnya minyak dengan sifat fluida Newtonian dengan nilai viskositas yang rendah dapat mengalir di dalam pipa tanpa dipengaruhi besarnya *shear rate* yang diberikan. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Maskan (2003), komposisi asam lemak jenuh dan tidak jenuh mempengaruhi sifat reologi minyak. Terdapat korelasi positif antara komposisi asam lemak bebas penyusunnya terhadap viskositas dari minyak nabati. Minyak nabati yang tinggi asam lemak jenuhnya mempunyai viskositas yang lebih tinggi dibandingkan minyak nabati yang tinggi asam lemak tidak jenuhnya (Kim *et al.* 2010). Oleh karena itu CPO yang tersusun atas 50% asam lemak jenuh dan 50% asam lemak tidak jenuh memiliki nilai viskositas yang lebih tinggi dibandingkan minyak nabati lain yang dominan tersusun atas asam lemak tidak jenuh.

B. KARAKTERISTIK MUTU DAN REOLOGI CPO SETELAH PEMANASAN AWAL

CPO tersusun dari berbagai asam lemak, baik asam lemak jenuh maupun asam lemak tidak jenuh. Pada suhu tertentu, terjadi pemisahan fraksi pada CPO akibat perbedaan titik leleh komponen asam-asam lemak penyusunnya. CPO dapat terpisah menjadi fraksi minyak yang tetap cair karena memiliki titik leleh yang rendah (disebut fraksi olein) dan fraksi yang memadat (membeku) karena memiliki titik leleh yang tinggi (disebut fraksi stearin) (Ketaren 2008). Akibatnya, bila suhu penyimpanan dan pengaliran cukup rendah, CPO dapat memadat sebagian atau bahkan seluruhnya. Kondisi fase bahan yang memadat tersebut menyulitkan saat proses bongkar muatan CPO dari tangki angkut ke tangki penyimpanan. Sehingga perlu dilakukan pemanasan CPO untuk menyeragamkan fase CPO sebelum dilakukan bongkar muatan. Menurut Naibaho (1998) suhu CPO pada waktu pemuatan/pembongkaran adalah 50-55 °C.

Pemanasan awal yang dilakukan pada tahap ini bertujuan untuk melihat pengaruh pemanasan CPO sebelum proses bongkar muatan ke dalam tangki penyimpanan CPO. Pada tahap ini CPO dipanaskan hingga mencapai suhu maksimal *loading* (bongkar muatan) yang direkomendasikan CODEX Alimentarius Commission (CAC) (2005), yaitu suhu 55 °C. Analisis mutu dan sifat reologi CPO dilakukan terhadap CPO yang telah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C dengan laju kenaikan suhu 5 °C/24 jam. Hasil analisis mutu CPO terhadap sampel yang telah mengalami pemanasan awal dapat dilihat pada Tabel 6 dengan data lengkap pada Lampiran 3.

Tabel 6. Parameter mutu CPO setelah mengalami pemanasan awal hingga suhu 55 °C.

	Parameter mutu			
	Asam lemak bebas (%)	Bilangan iod (g iod/100 g)	Karotenoid (ppm)	DOBI
CPO setelah pemanasan awal	3.85	52.56	604	2.76
Standar mutu				
SNI 01-2901-2006	0.5 maks	50-55	-	-
Ditjenbun (1997)	5 maks	51 min	500 min	2.5 min

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, setelah mengalami proses pemanasan hingga suhu 55 °C, asam lemak bebas pada CPO meningkat, bilangan iod cenderung tidak mengalami perubahan, sedangkan kadar karotenoid dan DOBI mengalami penurunan. Pada Tabel 6 terlihat bahwa kadar asam lemak bebas, bilangan iod, kadar karotenoid dan DOBI setelah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C masih memenuhi standar mutu CPO di PKS Indonesia yang ditetapkan oleh Ditjenbun (1997). Peningkatan kandungan asam lemak bebas pada CPO yang telah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C terjadi karena perlakuan suhu pemanasan pada CPO dapat mempercepat terjadinya reaksi hidrolisis yang mengakibatkan trigliserida terurai menjadi asam lemak bebas. Selain itu pemanasan hingga suhu 55 °C juga mengakibatkan terjadinya dekomposisi karotenoid yang mengakibatkan turunnya intensitas warna karotenoid (Eskin 1979). Turunnya bilangan DOBI terjadi karena pada suhu tinggi karoten dapat berubah menjadi senyawa yang berwarna kecoklatan dan larut dalam minyak sehingga semakin sukar untuk dipucatkan (Pahan 2008).

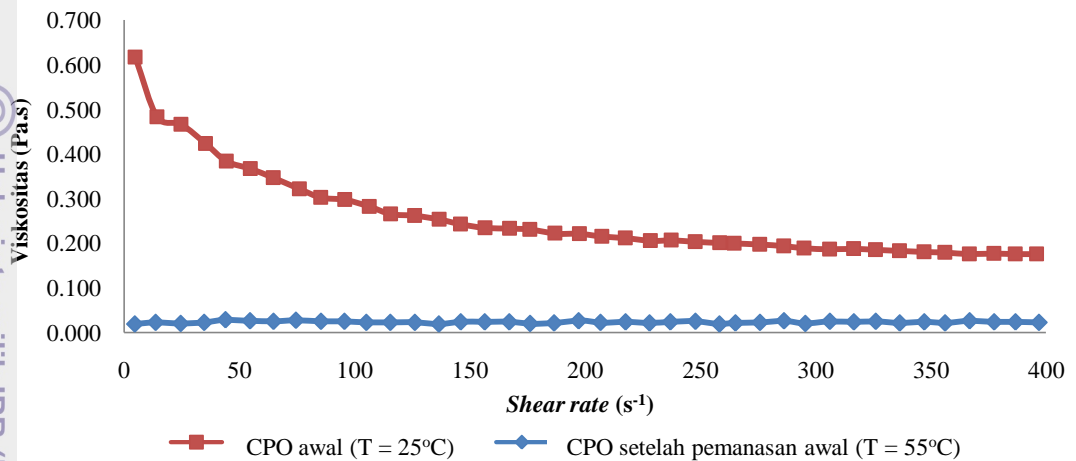
Selain diamati pengaruh pemanasan awal terhadap mutu CPO, juga dilakukan analisis terhadap reologi CPO. Data lengkap hasil analisis reologi CPO setelah mengalami pemanasan awal hingga suhu 55 °C dapat dilihat pada Lampiran 4. Hasil analisis reologi yang dilakukan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

menunjukkan bahwa CPO setelah dipanaskan hingga mencapai suhu 55 °C memiliki indeks tingkah laku aliran (n) sebesar 0.935, dan indeks konsistensi (K) sebesar 0.033. Dilihat dari nilai n dan K yang diperoleh, CPO yang dipanaskan hingga suhu 55 °C memiliki sifat yang mendekati fluida Newtonian ($n=1$ dan $K>0$). Pemanasan hingga suhu 55 °C mengakibatkan indeks konsistensi menurun, sedangkan indeks tingkah laku aliran meningkat mendekati fluida Newtonian. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO setelah mengalami pemanasan awal hingga suhu 55 °C dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO sebelum dan setelah mengalami pemanasan awal hingga suhu 55 °C.

Berdasarkan data hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO pada Gambar 12 terlihat bahwa viskositas CPO setelah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C cenderung tidak dipengaruhi oleh besarnya *shear rate* yang diberikan, yaitu berkisar antara 0.023-0.026 Pa.s. Viskositas CPO setelah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C lebih kecil dibandingkan viskositas CPO awal pada suhu 25 °C. Hal ini terjadi karena pemanasan CPO hingga suhu 55 °C akan mengakibatkan kristal lemak pada CPO meleleh. Menurut Himawan *et al.* (2006), minyak sawit memiliki titik leleh 40 °C. Akibatnya pemanasan hingga suhu di atas titik leleh CPO akan mengakibatkan pelelehan kristal lemak yang mengakibatkan CPO memiliki viskositas yang lebih rendah dengan konsistensi yang lebih cair. Penelitian yang dilakukan oleh Goh (2010) terhadap minyak kelapa, zaitun, kedelai, biji bunga matahari, dan wijen juga menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu maka viskositas minyak nabati akan semakin rendah.

Terlihat pada Gambar 12 bahwa viskositas CPO setelah mengalami pemanasan awal hingga suhu 55 °C cenderung tetap walaupun diberikan *shear rate* yang berbeda-beda. Hal ini menunjukkan bahwa CPO pada suhu 55 °C memiliki sifat fluida Newtonian. Goodrum *et al.* (2002) mengemukakan bahwa viskositas dinamik fluida nilainya berbanding lurus dengan rasio *shear stress* terhadap *shear rate* yang diterapkan. Pada fluida Newtonian, rasio tersebut bernilai konstan, dan nilai viskositas fluida Newtonian tidak dipengaruhi oleh besarnya *shear rate* yang bekerja pada fluida, sehingga fluida Newtonian akan memiliki nilai viskositas yang tetap berapapun *shear rate* yang diberikan. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Kim *et al.* (2010) terhadap tujuh sampel minyak nabati yang menunjukkan perilaku fluida Newtonian, terlihat bahwa semakin tinggi suhu mengakibatkan nilai viskositas minyak semakin kecil. Viskositas minyak *canola*, jagung, *grapeseed*, *hazelnut*, zaitun, kedelai, dan biji bunga matahari pada suhu 55 °C berkisar antara 0.020-0.028 Pa.s (Kim *et al.* 2010). Nilai viskositas CPO yang

telah dipanaskan hingga suhu 55 °C memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dengan minyak nabati lainnya yaitu berkisar antara 0.023-0.026 Pa.s. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu 55 °C, CPO akan lebih mudah ditangani selama pengaliran, karena memiliki viskositas yang rendah dengan sifat fluida Newtonian, sehingga besarnya gaya yang dibutuhkan untuk mengalirkan CPO akan lebih kecil dibandingkan pada suhu pengaliran 25 °C.

C. KARAKTERISTIK MUTU DAN REOLOGI CPO SELAMA PENYIMPANAN

CODEX Alimentarius Commission (CAC) (2005) dalam panduan penyimpanan dan transportasi lemak dan minyak pada skala besar (*bulk*) menyatakan bahwa terdapat tiga penyebab kerusakan yang dapat terjadi selama penyimpanan dan transportasi minyak nabati, yaitu terjadinya reaksi oksidasi dengan oksigen di udara, reaksi hidrolisis, dan terjadinya kontaminasi. Suhu penyimpanan yang tidak terkontrol dengan baik dapat mempercepat terjadinya penurunan mutu CPO (Naibaho 1998).

Pengamatan terhadap perubahan karakteristik mutu dan reologi CPO selama penyimpanan dilakukan selama 4 minggu pada beberapa suhu penyimpanan yang berbeda, yaitu suhu penyimpanan 20, 25, 30, 35, dan 40 °C. Analisis mutu dan reologi dilakukan setiap minggu, selama 4 minggu penyimpanan.

1. Mutu CPO Selama Penyimpanan

Hasil analisis mutu CPO selama penyimpanan pada berbagai suhu penyimpanan yang diujikan dapat dilihat pada Tabel 7 dengan data lengkap tersaji pada Lampiran 5. Berdasarkan data analisis mutu yang diperoleh, terlihat bahwa asam lemak bebas selama penyimpanan meningkat, bilangan iod cenderung tidak mengalami perubahan, sedangkan kadar karotenoid dan DOBI mengalami penurunan selama penyimpanan. Semakin tinggi suhu penyimpanan, mengakibatkan penurunan mutu CPO yang semakin besar. Pada Tabel 7 terlihat bahwa penyimpanan pada suhu 20 °C dapat menghambat penurunan mutu CPO. CPO yang disimpan pada suhu 20 °C memiliki mutu yang paling baik jika dibandingkan dengan CPO yang disimpan pada suhu penyimpanan lainnya. Selama 4 minggu penyimpanan, CPO yang disimpan pada suhu 20 dan 25 °C memiliki kadar asam lemak bebas, bilangan iod, kadar karotenoid, serta DOBI yang masih sesuai dengan standar mutu CPO di PKS Indonesia yang ditetapkan oleh Ditjenbun (1997). CPO yang disimpan pada suhu 30 °C memiliki kadar asam lemak bebas, bilangan iod, kadar karotenoid, serta DOBI yang masih sesuai dengan standar mutu CPO hingga 3 minggu penyimpanan. Setelah 4 minggu penyimpanan, CPO pada suhu penyimpanan 30 °C memiliki nilai DOBI yang sudah tidak memenuhi standar yaitu 2.44 (<2.50). Penyimpanan CPO pada suhu 35 dan 40 °C mengakibatkan penurunan mutu yang lebih cepat, terlihat bahwa pada suhu penyimpanan 40 °C, CPO sudah tidak memenuhi standar mutu setelah 2 minggu penyimpanan dilihat dari nilai DOBI yang sudah tidak sesuai dengan standar yaitu 2.09 (<2.50).

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

Tabel 7. Parameter mutu CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20, 25, 30, dan 40 °C.

Suhu penyimpanan (°C)	Lama penyimpanan (minggu)	Parameter mutu			
		ALB (%)	Bilangan iod (g iod/100 g)	Karotenoid (ppm)	DOBI
20	0	3.85	52.56	604	2.76
	1	3.86	52.54	603	2.75
	2	3.88	52.57	601	2.72
	3	3.89	52.53	600	2.73
	4	3.91	52.53	596	2.69
25	0	3.85	52.56	604	2.76
	1	3.88	52.52	602	2.72
	2	3.91	52.53	599	2.69
	3	3.95	52.53	592	2.64
	4	3.99	52.53	584	2.60
30	0	3.85	52.56	604	2.76
	1	4.09	52.52	589	2.63
	2	4.13	52.50	579	2.57
	3	4.21	52.52	565	2.51
	4	4.38	52.55	549	2.44
35	0	3.85	52.56	604	2.76
	1	4.19	52.51	578	2.57
	2	4.41	52.52	553	2.51
	3	4.58	52.50	524	2.45
	4	4.79	52.52	493	2.33
40	0	3.85	52.56	604	2.76
	1	4.26	52.52	563	2.56
	2	4.52	52.51	538	2.43
	3	4.75	52.52	498	2.26
	4	4.92	52.53	474	1.98
Standar mutu					
SNI 01-2901-2006		0.5 maks	50-55	-	-
Ditjenbun (1997)		5 maks	51 min	500 min	2.5 min

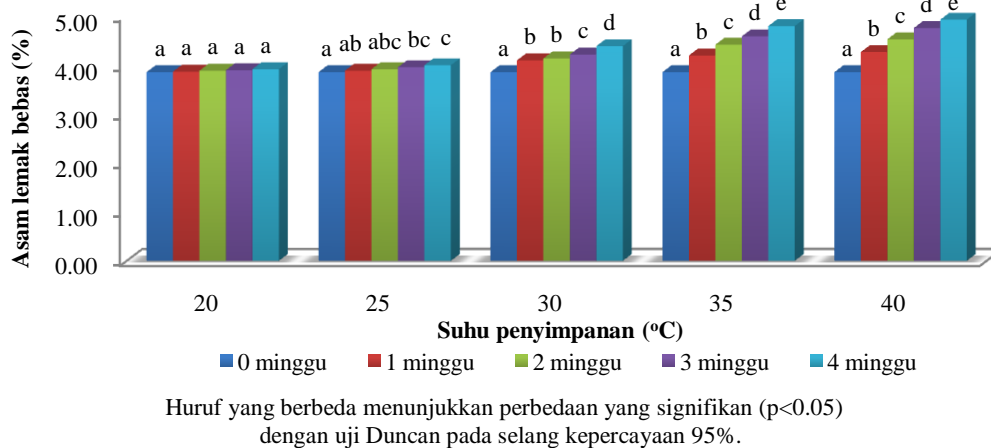
Data analisis mutu CPO selama penyimpanan diuji dengan menggunakan instrumen statistika untuk melihat apakah pengaruh suhu dan lama penyimpanan mengakibatkan perubahan mutu yang signifikan selama penyimpanan. Analisis statistika yang digunakan adalah ANOVA (*analysis of varian*) dengan uji lanjut Duncan. Melalui uji tersebut, juga dapat diketahui apakah perubahan mutu yang terjadi selama penyimpanan berbeda signifikan dengan mutu awal. Dengan uji Duncan, data-data yang tidak berbeda signifikan berada pada subset yang sama, sedangkan data-data yang berbeda signifikan berada pada subset yang berbeda. Hasil analisis statistika dengan ANOVA dan uji lanjut Duncan terhadap asam lemak bebas, bilangan iod, kadar karotenoid, serta DOBI selama 4 minggu penyimpanan pada suhu penyimpanan yang diujikan dapat dilihat pada Lampiran 6-13.

Gambar 13, 14, 15, dan 16 menunjukkan pengaruh suhu dan lama penyimpanan terhadap parameter mutu CPO. Gambar 13 menunjukkan kenaikan asam lemak bebas selama penyimpanan pada suhu penyimpanan yang diujikan. Asam lemak bebas merupakan salah satu faktor penentu mutu CPO yang juga merupakan salah satu indikator dalam kerusakan minyak. Asam lemak bebas dalam minyak tidak dikehendaki karena degradasi asam lemak bebas tersebut menghasilkan rasa dan bau yang tidak disukai. Kenaikan asam lemak bebas disebabkan adanya reaksi hidrolisis pada minyak. Hasil reaksi hidrolisis minyak sawit adalah gliserol dan asam lemak bebas. Reaksi ini akan dipercepat dengan adanya faktor panas, air,

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

keasaman, dan enzim (Siregar 1991). Pada sampel CPO yang disimpan di suhu 20 °C, selama 4 minggu penyimpanan tidak terjadi peningkatan asam lemak bebas yang signifikan. Pada sampel CPO yang disimpan di suhu 25 °C kenaikan asam lemak bebas yang signifikan mulai terjadi sejak minggu ketiga penyimpanan. Sedangkan pada sampel CPO yang disimpan di suhu 30, 35, dan 40 °C kenaikan asam lemak bebas yang signifikan sudah terjadi sejak minggu pertama penyimpanan. Asam lemak bebas sebagai hasil hidrolisis minyak dipacu oleh berbagai faktor seperti suhu. Menurut Saloko (2011) suhu optimum hidrolisis antara 30-40 °C, yang kisarannya tidak begitu jauh dengan suhu kamar. Berdasarkan hasil ANOVA pengaruh suhu terhadap asam lemak bebas selama penyimpanan (Lampiran 7) terlihat bahwa suhu penyimpanan yang berbeda berpengaruh nyata terhadap asam lemak bebas (p value < 0.05) mulai minggu pertama sampai minggu keempat penyimpanan. Penyimpanan CPO pada suhu 20 dan 25 °C tidak berbeda nyata namun saling berbeda nyata dengan penyimpanan pada suhu 30, 35, dan 40 °C.

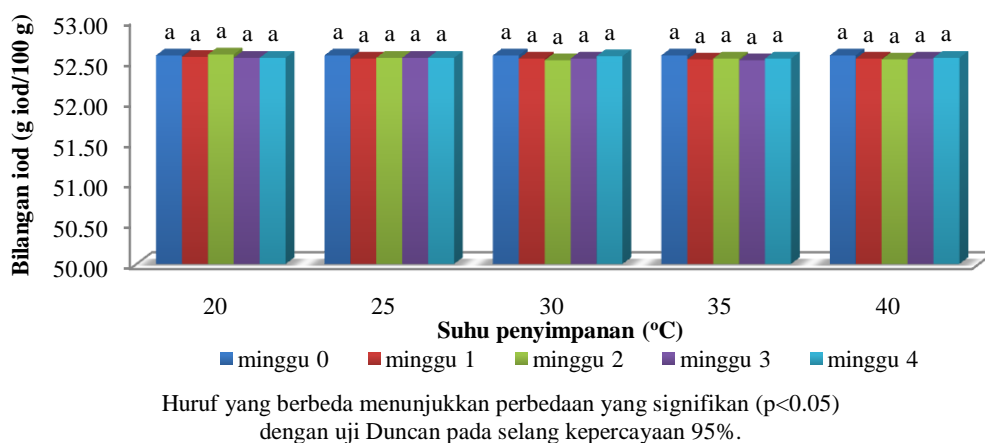


Gambar 13. Kadar asam lemak bebas selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20, 25, 30, 35 dan 40 °C.

Banyaknya ikatan rangkap dalam asam lemak ditunjukkan dengan bilangan iod. Ikatan rangkap akan bereaksi dengan senyawa iod sehingga semakin banyak ikatan rangkap maka jumlah iod yang digunakan semakin banyak dan bilangan iod akan semakin tinggi. Bilangan iod juga menandakan derajat ketidakjenuhan minyak, bilangan iod yang semakin tinggi menunjukkan derajat ketidakjenuhan minyak yang semakin tinggi pula. Menurut Basiron (2005) minyak sawit kasar terdiri dari 50% asam lemak jenuh dan 50% asam lemak tidak jenuh. Sehingga minyak sawit kasar akan memiliki bilangan iod yang berkisar antara 44-58 g iod/100 g sampel (Winarno 1999). Hasil analisis bilangan iod selama penyimpanan dapat dilihat pada Gambar 14.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

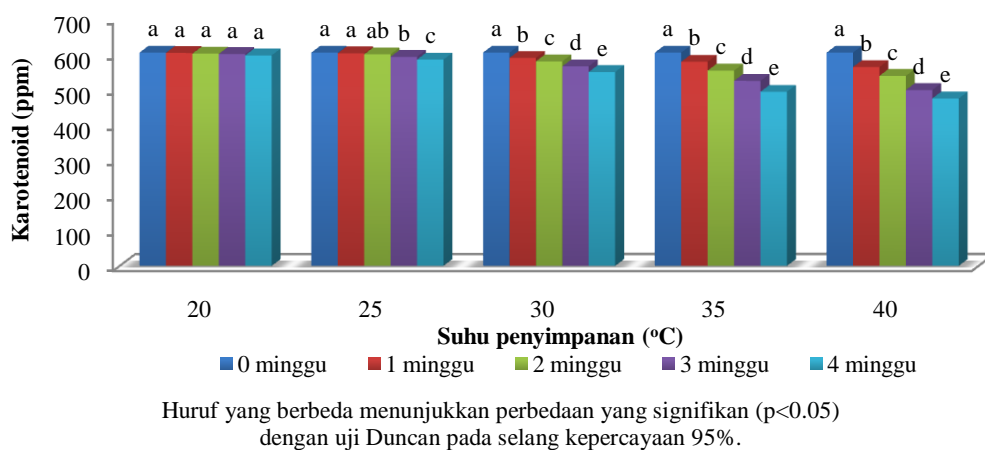
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



Gambar 14. Bilangan iod selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20, 25, 30, 35 dan 40 °C.

Gambar 14 menunjukkan bahwa bilangan iod CPO selama 4 minggu penyimpanan pada setiap suhu penyimpanan yang diujikan tidak mengalami perubahan yang signifikan. Sehingga dapat dikatakan bahwa pada suhu penyimpanan 20-40 °C tidak mempengaruhi bilangan iod CPO. Hal ini terjadi karena perlakuan suhu penyimpanan yang ditetapkan tidak mengakibatkan terjadinya perubahan derajat ketidakjenuhan CPO (komponen asam lemak penyusun tetap). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Tsaknis *et al.* (2002), diketahui bahwa minyak nabati dapat mengalami perubahan bilangan iod jika diberikan perlakuan suhu tinggi ($>180^{\circ}\text{C}$), dimana pada suhu tersebut dapat mengakibatkan pemutusan ikatan rangkap pada asam lemak sehingga terjadi penurunan bilangan iod. Berdasarkan hasil ANOVA pengaruh suhu dan lama penyimpanan terhadap asam lemak bebas selama penyimpanan (Lampiran 8 dan 9) terlihat bahwa suhu penyimpanan yang berbeda serta lama penyimpanan tidak berpengaruh nyata terhadap bilangan iod ($p \text{ value} > 0.05$).

Karotenoid merupakan pigmen yang memberikan warna merah pada kelapa sawit. Karotenoid sangat mudah teroksidasi, hal ini karena adanya ikatan ganda pada karotenoid yang menyebabkan percepatan laju oksidasi. Gross (1991) mengatakan bahwa laju oksidasi karotenoid meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Hasil analisis kadar karotenoid selama penyimpanan dapat dilihat pada Gambar 15.



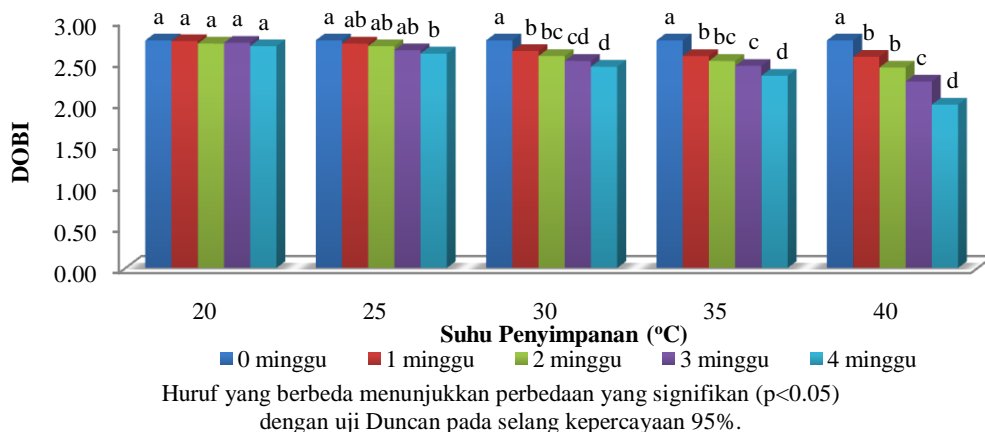
Gambar 15. Kadar karotenoid selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20, 25, 30, 35 dan 40 °C.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

Gambar 15 menunjukkan bahwa terjadi penurunan kadar karotenoid pada CPO selama penyimpanan, namun penurunan kadar karotenoid pada CPO yang disimpan di suhu 20 °C selama 4 minggu penyimpanan tidak signifikan. CPO yang disimpan di suhu 25 °C mulai mengalami penurunan kadar karotenoid yang signifikan setelah 3 minggu penyimpanan. Sedangkan CPO yang disimpan di suhu 30, 35, dan 40 °C sudah mengalami penurunan kadar karotenoid yang signifikan sejak minggu pertama penyimpanan. Berdasarkan hasil ANOVA pengaruh suhu terhadap kadar karotenoid selama penyimpanan (Lampiran 11) terlihat bahwa suhu penyimpanan yang berbeda berpengaruh nyata terhadap kadar karotenoid ($p \text{ value} < 0.05$). Hasil yang diperoleh pada penelitian ini menunjukkan kesesuaian dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Alyas *et al.* (2006) yang menunjukkan bahwa semakin lama dan semakin tinggi perlakuan suhu yang diberikan akan mengakibatkan penurunan kadar karotenoid yang semakin tinggi. Penelitian yang dilakukan oleh Lin dan Chen (2005) mengenai stabilitas karoten pada jus tomat selama penyimpanan juga menunjukkan hal yang serupa, dimana terjadi kecenderungan penurunan kadar karotenoid seiring dengan peningkatan suhu penyimpanan. Penelitian Hastinah (1997) menunjukkan bahwa degradasi karotenoid sangat dipengaruhi oleh suhu dan lamanya pemanasan. Suhu yang semakin tinggi dan pemanasan yang semakin lama mengakibatkan semakin meningkatnya degradasi karoten.

Akibat pengaruh suhu tinggi atau reaksi oksidasi, karoten dapat berubah menjadi senyawa yang berwarna kecoklat-coklatan dan larut dalam minyak sehingga semakin sukar untuk dipucatkan. Penurunan daya pemucatan ini disebut DOBI (*deterioration of bleachability index*) (Pahan 2008). Hasil analisis DOBI selama penyimpanan CPO dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. DOBI selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20, 25, 30, 35 dan 40 °C.

Hasil uji Duncan terhadap DOBI selama penyimpanan yang disajikan pada Gambar 16 menunjukkan bahwa selama 4 minggu penyimpanan pada suhu penyimpanan yang diujikan terjadi penurunan DOBI. Penurunan DOBI yang terjadi pada CPO yang disimpan di suhu 20 °C selama 4 minggu tidak signifikan. CPO yang disimpan pada suhu 25 °C mulai mengalami penurunan DOBI yang signifikan pada minggu keempat penyimpanan. Sedangkan pada CPO yang disimpan di suhu 30, 35, dan 40 °C terjadi penurunan DOBI yang signifikan sejak minggu pertama penyimpanan. Semakin tinggi suhu akan mengakibatkan

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

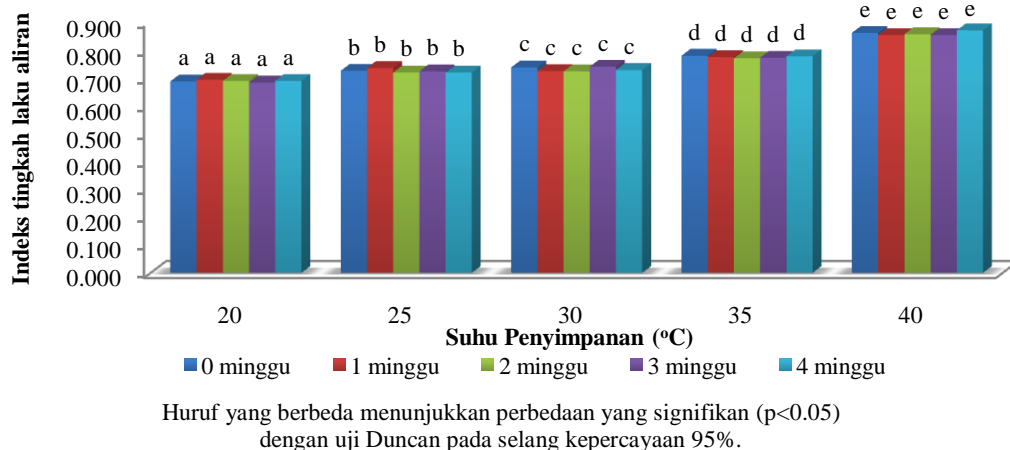
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

kerusakan pigmen karotenoid yang semakin besar. Menurut Naibaho (1998) pada proses kerusakan pigmen karotenoid pada minyak akan terjadi penurunan nilai absorbansi pada panjang gelombang 446 nm dan peningkatan nilai absorbansi pada panjang gelombang 269 nm, sehingga akan terjadi penurunan DOBI yang merupakan petunjuk kerusakan minyak, yang juga menggambarkan penurunan daya pemucatan minyak. Berdasarkan hasil ANOVA pengaruh suhu terhadap DOBI selama penyimpanan (Lampiran 13) terlihat bahwa suhu penyimpanan yang berbeda berpengaruh nyata terhadap DOBI ($p \text{ value} < 0.05$).

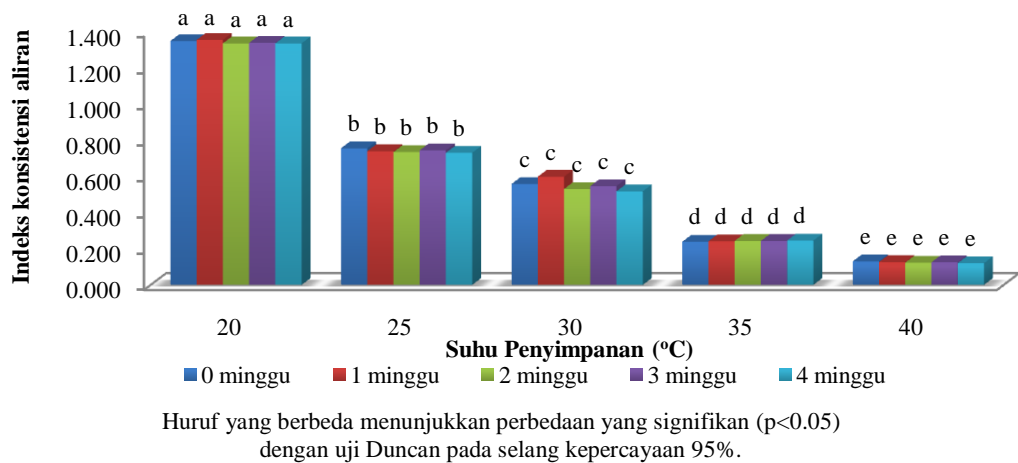
Pengawasan mutu CPO selama penyimpanan perlu dilakukan dengan ketat untuk mencegah terjadinya penurunan mutu. Lubis dan Naibaho (1995) mengatakan bahwa suhu penyimpanan pada tangki timbun CPO perlu diperhatikan dengan baik, karena suhu merupakan salah satu faktor yang dapat mengakibatkan kerusakan mutu CPO. Berdasarkan hasil analisis mutu CPO yang dilakukan, suhu penyimpanan yang paling baik adalah penyimpanan pada suhu 20 °C. CPO yang disimpan selama 4 minggu pada suhu 20 °C memiliki mutu yang paling baik jika dibandingkan dengan CPO yang disimpan pada suhu penyimpanan lainnya yang lebih tinggi. Penyimpanan CPO pada suhu 20 dan 25 °C dapat dilakukan dalam jangka waktu yang lebih lama, karena pada suhu penyimpanan tersebut mutu CPO tidak banyak mengalami perubahan. Apabila penyimpanan dilakukan pada suhu yang lebih tinggi seperti pada suhu 35 dan 40 °C, sebaiknya penyimpanan CPO tidak dilakukan dalam waktu yang terlalu lama, karena semakin tinggi suhu penyimpanan akan mengakibatkan penurunan mutu CPO yang semakin besar. Oleh karena itu lama penyimpanan CPO pada suhu penyimpanan yang diterapkan harus diperhatikan. Pengawasan terhadap mutu CPO selama penyimpanan harus dilakukan secara teratur.

Reologi CPO Selama Penyimpanan

Selama penyimpanan sifat reologi CPO dianalisis dengan menggunakan Haake *Rotoviscometer* RV20 setiap minggunya. Sifat reologi CPO selama penyimpanan dilihat dari indeks tingkah laku aliran (n) dan indeks konsistensi (K). Hasil analisis reologi CPO selama penyimpanan dapat dilihat pada Gambar 17 dan 18 dengan data lengkap pada Lampiran 14.



Gambar 17. Indeks tingkah laku aliran CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20, 25, 30, 35 dan 40 °C.



Gambar 18. Indeks konsistensi aliran CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20, 25, 30, 35 dan 40 °C.

Berdasarkan data reologi CPO selama penyimpanan yang disajikan pada Gambar 17 dan 18, CPO yang disimpan di suhu 20 °C memiliki nilai n berkisar antara 0.682-0.692 dan nilai K berkisar antara 1.335-1.354. CPO yang disimpan di suhu 25 °C memiliki nilai n berkisar antara 0.718-0.734 dan nilai K berkisar antara 0.730-0.755. CPO yang disimpan di suhu 30 °C memiliki nilai n berkisar antara 0.722-0.739 dan nilai K berkisar antara 0.517-0.598. CPO yang disimpan di suhu 35 °C memiliki nilai n berkisar antara 0.769-0.778 dan nilai K berkisar antara 0.238-0.245. CPO yang disimpan di suhu 40 °C memiliki nilai n berkisar antara 0.852-0.869 dan nilai K berkisar antara 0.120-130. Terlihat bahwa semakin tinggi suhu penyimpanan maka indeks tingkah laku aliran (n) semakin tinggi, sedangkan indeks konsistensi (K) aliran semakin menurun. Menurut Goodrum *et al.* (2001), karena viskositas merupakan fungsi dari suhu, maka nilai parameter n dan K juga dapat berubah dengan perubahan suhu. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Ahmed (2004) juga menunjukkan bahwa indeks tingkah laku aliran akan semakin tinggi seiring dengan semakin tinggi suhu fluida, sedangkan indeks konsistensi aliran menurun secara signifikan.

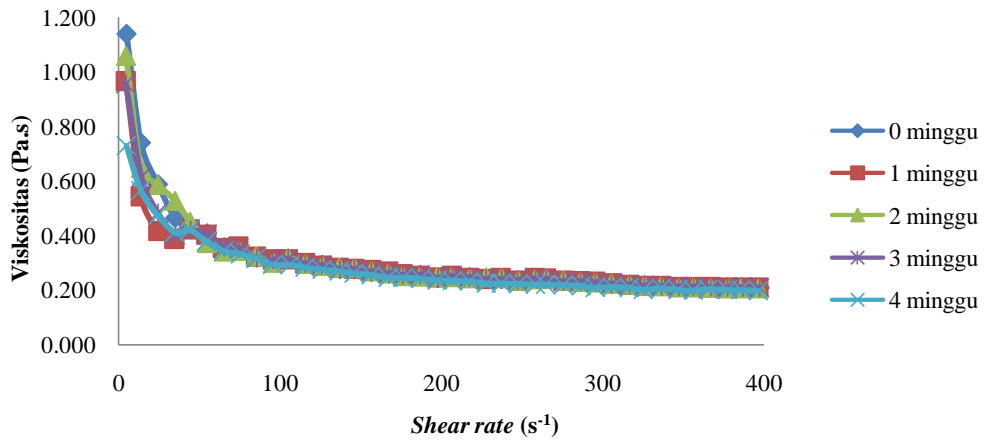
Dilihat dari nilai n dan K , sampel CPO yang disimpan pada setiap suhu penyimpanan memiliki sifat pseudoplastik. Namun semakin tinggi suhu penyimpanan, sifat CPO semakin mendekati fluida Newtonian yang ditandai dengan nilai n yang semakin tinggi (mendekati 1) dan nilai K yang semakin rendah. Secara kasat mata terlihat bahwa CPO yang disimpan pada suhu 40 °C memiliki konsistensi yang lebih cair dibandingkan CPO yang disimpan pada suhu penyimpanan lainnya. Menurut Rosidah (1990) semakin tinggi suhu akan mengakibatkan penurunan kekentalan tampak serta konsistensi suatu fluida

Pada Gambar 17 dan 18 terlihat bahwa suhu penyimpanan yang berbeda mengakibatkan perbedaan nyata terhadap indeks tingkah laku aliran dan indeks konsistensi aliran (p value < 0.05). Data lengkap ANOVA pengaruh suhu penyimpanan terhadap indeks tingkah laku aliran dan indeks konsistensi aliran selama penyimpanan dapat dilihat pada Lampiran 15 dan 16. Jika dilihat dari pengaruh lama penyimpanan terhadap tingkah laku aliran dan indeks konsistensi aliran, pada Gambar 17 dan 18 terlihat bahwa indeks tingkah laku aliran dan indeks konsistensi aliran CPO pada setiap suhu penyimpanan yang diujikan tidak berbeda signifikan selama 4 minggu penyimpanan. Hal ini menunjukkan bahwa lama penyimpanan tidak berpengaruh nyata terhadap sifat reologi CPO. Data lengkap ANOVA pengaruh lama penyimpanan terhadap indeks tingkah laku aliran dan indeks konsistensi

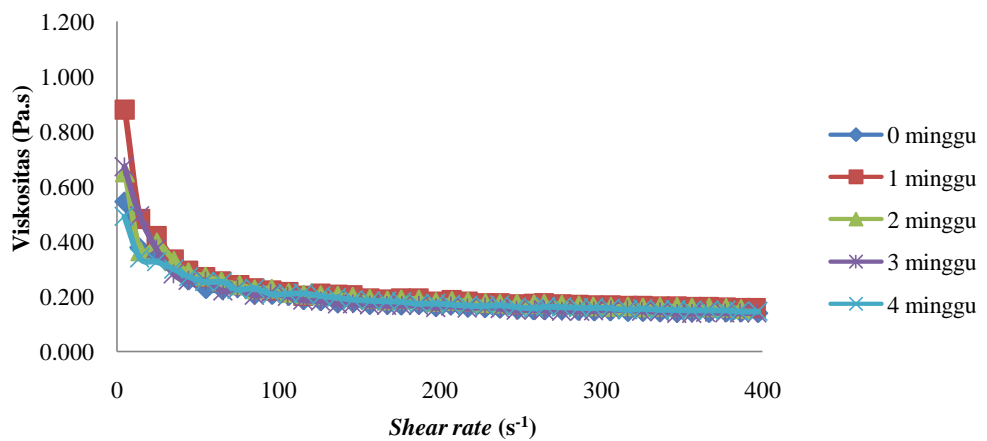
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

aliran selama penyimpanan dapat dilihat pada Lampiran 17 dan 18. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO selama 4 minggu penyimpanan pada setiap suhu penyimpanan yang diujikan disajikan pada Gambar 19-23, dengan data ANOVA pada Lampiran 19.



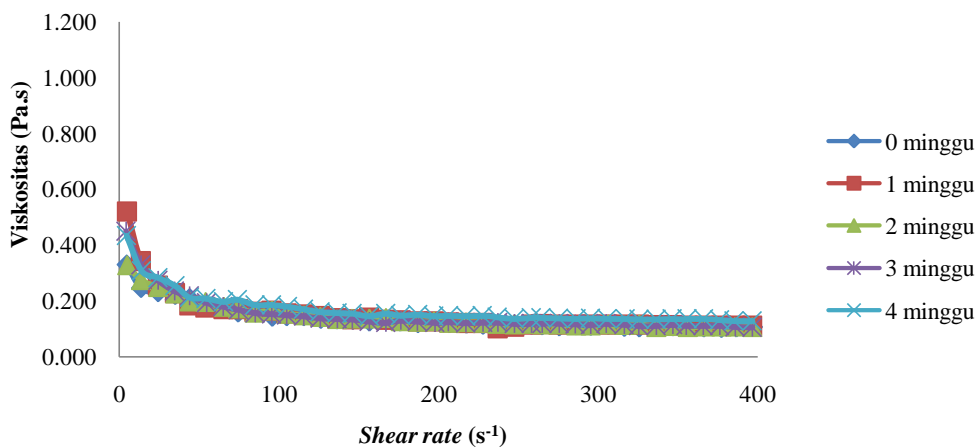
Gambar 19. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 20 °C.



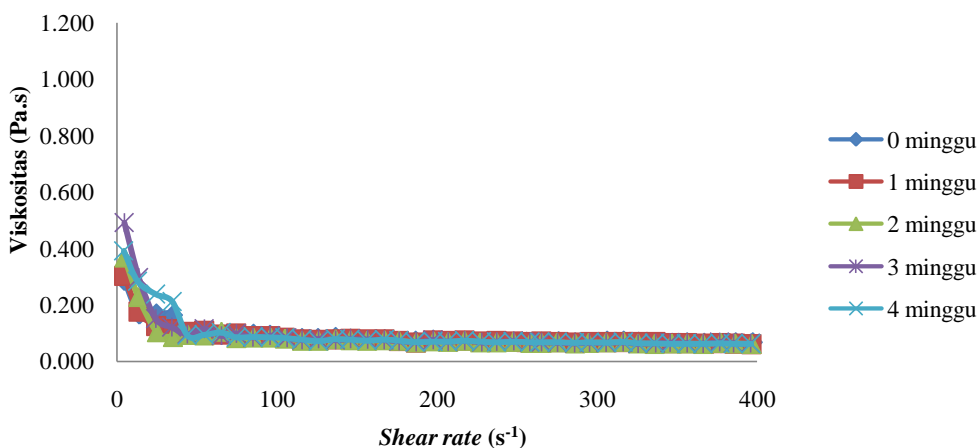
Gambar 20. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 25 °C.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

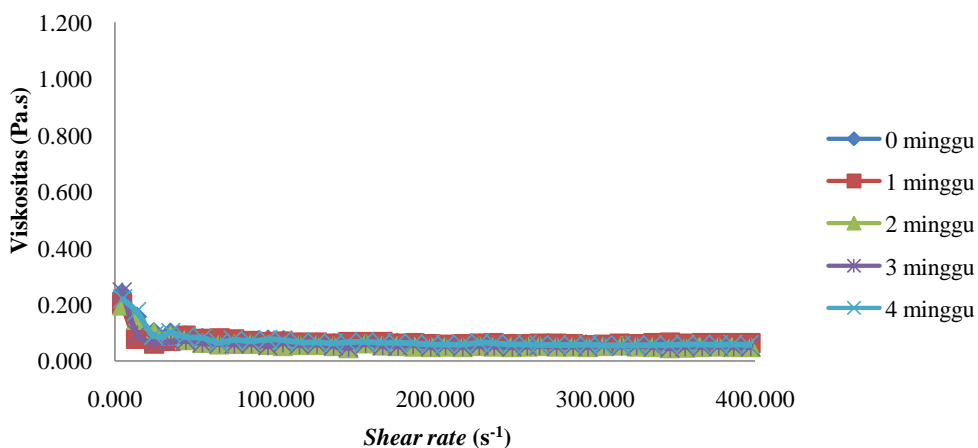
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



Gambar 21. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 30 °C.



Gambar 22. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 35 °C.



Gambar 23. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO selama 4 minggu penyimpanan pada suhu 40 °C.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

Gambar 19-23 menunjukkan bahwa semakin besar *shear rate* yang diberikan maka nilai viskositas akan semakin kecil. Menurut Singh dan Heldman (2001), saat fluida pseudoplastik mengalami gaya geser, partikel-partikel yang terdistribusi secara acak akan mengatur dirinya sejajar dengan arah aliran, sehingga viskositas menurun. Selama 4 minggu penyimpanan nilai viskositas CPO pada berbagai *shear rate* yang diberikan di setiap suhu penyimpanan tidak mengalami perubahan yang signifikan berdasarkan uji Duncan. Sehingga dapat dikatakan bahwa lama penyimpanan tidak berpengaruh terhadap viskositas CPO. Pada Gambar 19-23 terlihat bahwa suhu penyimpanan mempengaruhi viskositas CPO pada setiap *shear rate* yang diberikan. Berdasarkan data hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO pada Gambar 19-23 terlihat bahwa semakin tinggi suhu penyimpanan maka nilai viskositas CPO akan semakin kecil. Menurut Rao (1999) suhu sangat berpengaruh terhadap viskositas fluida, dimana secara umum viskositas akan menurun dengan meningkatnya suhu. Munson *et al.* (2001) juga mengungkapkan bahwa secara umum viskositas suatu fluida akan menurun dengan meningkatnya suhu. Hal tersebut disebabkan oleh terjadinya penurunan gaya kohesif pada molekul-molekul fluida saat suhu mengalami peningkatan. Pengaruh suhu terhadap viskositas CPO selama penyimpanan dapat dijelaskan dari nilai energi aktivasi (E_a) yang didapatkan melalui persamaan Arrhenius (Persamaan 10) yang melibatkan suhu absolut (T), konstanta gas universal (R), dan energi aktivasi (E_a):

$$\ln \mu = E_a/RT + \ln A \quad (10)$$

Nilai E_a dan konstanta Arrhenius ditentukan menggunakan regresi linier dari data percobaan yang diperoleh pada *shear rate* tertentu. Hasil perhitungan nilai energi aktivasi dan konstanta Arrhenius pada *shear rate* 100, 200, 300, dan 400 s^{-1} dapat dilihat pada Tabel 8, dengan data lengkap pada Lampiran 20.

Tabel 8. Energi aktivasi dan konstanta Arrhenius pada *shear rate* 100, 200, 300, dan 400 s^{-1} .

<i>Shear rate</i> (s^{-1})	Persamaan Arrhenius	R^2	Energi aktivasi ($kJ\ mol^{-1}$)	Konstanta Arrhenius (Pa.s)
100	$y = 7325.x - 26.13$	0.98	60.90	4.48×10^{-12}
200	$y = 6991.x - 25.23$	0.98	58.12	1.10×10^{-11}
300	$y = 6860.x - 24.88$	0.98	57.03	1.56×10^{-11}
400	$y = 6495.x - 23.72$	0.97	53.99	4.99×10^{-11}

Berdasarkan Tabel 8, terlihat bahwa semakin kecil *shear rate* yang diberikan maka energi aktivasi semakin besar. Pada *shear rate* 100 $^{-1}$, energi aktivasi sebesar 60.90 $kJ\ mol^{-1}$ dan konstanta Arrhenius sebesar 4.48×10^{-12} . Menurut Cuah *et al.* (2008) energi aktivasi yang besar mengindikasikan sensitivitas viskositas terhadap suhu. Artinya pada *shear rate* 100 s^{-1} , perbedaan suhu akan sangat berpengaruh terhadap viskositas CPO. Konstanta Arrhenius dan energi aktivasi yang diperoleh berdasarkan persamaan Arrhenius pada *shear rate* tertentu dapat digunakan untuk memperkirakan besarnya viskositas pada berbagai suhu.

Sifat reologi CPO selama penyimpanan sangat bergantung pada suhu penyimpanan yang diterapkan. Menurut CAC (2005) untuk mencegah terjadinya kristalisasi dan pematangan yang berlebihan selama penyimpanan singkat, CPO di dalam tangki harus dipertahankan suhunya tetap tinggi pada kisaran suhu 32-40 °C. Suhu-suhu tersebut dipilih untuk meminimalisir kerusakan pada minyak atau lemak. Kristalisasi tetap akan terjadi, tetapi tidak

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

berlebihan sehingga tidak memerlukan pemanasan yang panjang sebelum sampai di tujuan. Dengan demikian, minyak sawit yang disimpan pada suhu 32-40 °C membutuhkan sekitar 3 hari pemanasan pada laju kenaikan suhu 5 °C/24 jam untuk mencapai suhu pengaliran. Sedangkan pada penyimpanan dengan waktu yang panjang, seluruh minyak harus disimpan pada suhu kamar atau suhu yang lebih rendah, dan pemanasan harus dihentikan. Hal ini dilakukan untuk mencegah kerusakan mutu CPO akibat pemanasan yang terlalu lama.

D. KARAKTERISTIK MUTU DAN REOLOGI CPO SETELAH PEMANASAN SEBELUM PENGALIRAN

Pengaliran CPO di dalam sistem pipa berlangsung pada saat pengisian CPO dari tangki penyimpanan ke tangki angkut, atau sebaliknya, serta pada saat pengapungan di pelabuhan. Sebelum dialirkan, CPO dipanaskan untuk mencapai suhu maksimal pengaliran yang direkomendasikan CAC (2005), yaitu suhu 55 °C. Hasil analisis mutu CPO terhadap sampel yang telah mengalami pemanasan sebelum pengaliran dapat dilihat pada Tabel 9, dengan data lengkap tersaji pada Lampiran 21.

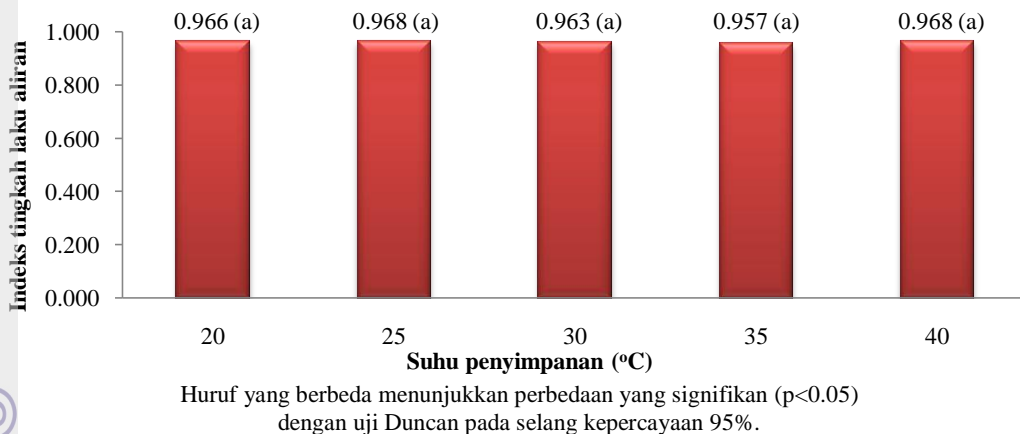
Tabel 9. Parameter mutu CPO setelah mengalami penyimpanan 4 minggu dan mengalami pemanasan kembali hingga suhu 55 °C sebelum pengaliran.

Suhu penyimpanan (°C)	Parameter mutu			
	Asam lemak bebas (%)	Bilangan iod (g iod/100 g)	Karotenoid (ppm)	DOBI
20	4.25	52.52	553	2.57
25	4.33	52.53	538	2.51
30	4.54	52.54	509	2.37
35	5.05	52.53	444	2.10
40	5.24	52.52	425	1.65
Standar mutu				
SNI 01-2901-2006	0.5 maks	50-55	-	-
Ditjenbun (1997)	5 maks	51 min	500 min	2.5 min

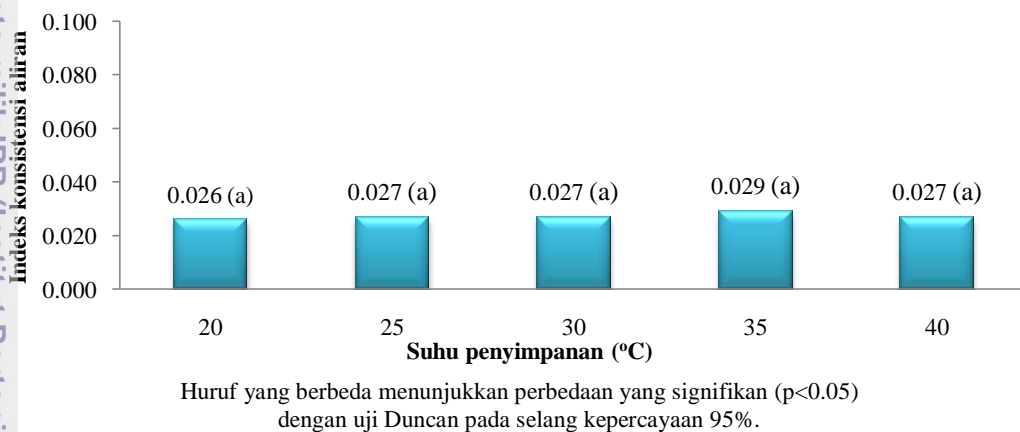
Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, setelah mengalami proses pemanasan hingga suhu 55 °C dengan kenaikan suhu 5 °C/24 jam kadar asam lemak bebas pada sampel CPO meningkat, bilangan iod cenderung tetap, sedangkan kadar karotenoid dan DOBI menurun. Pada Tabel 9 terlihat bahwa semakin tinggi suhu penyimpanan mengakibatkan penurunan mutu yang semakin besar setelah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C. Setelah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C, CPO yang disimpan pada suhu 20 dan 25 °C masih memenuhi standar mutu CPO di PKS Indonesia dilihat dari nilai asam lemak bebas, bilangan iod, kadar karotenoid, dan DOBI. Sedangkan CPO yang disimpan pada suhu 30, 35 dan 40 °C sudah tidak memenuhi standar mutu setelah dipanaskan hingga suhu 55 °C.

Analisis reologi terhadap CPO yang telah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C dilakukan untuk mengetahui sifat reologi CPO sebelum pengaliran. Data lengkap analisis reologi CPO setelah mengalami pemanasan sebelum pengaliran hingga suhu 55 °C disajikan pada Lampiran 22. Gambar 24 menunjukkan indeks tingkah laku aliran CPO setelah pemanasan sebelum pengaliran, sedangkan Gambar 25 menunjukkan indeks konsistensi aliran CPO setelah pemanasan sebelum pengaliran.

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



Gambar 24. Indeks tingkah laku aliran CPO setelah pemanasan sebelum pengaliran.

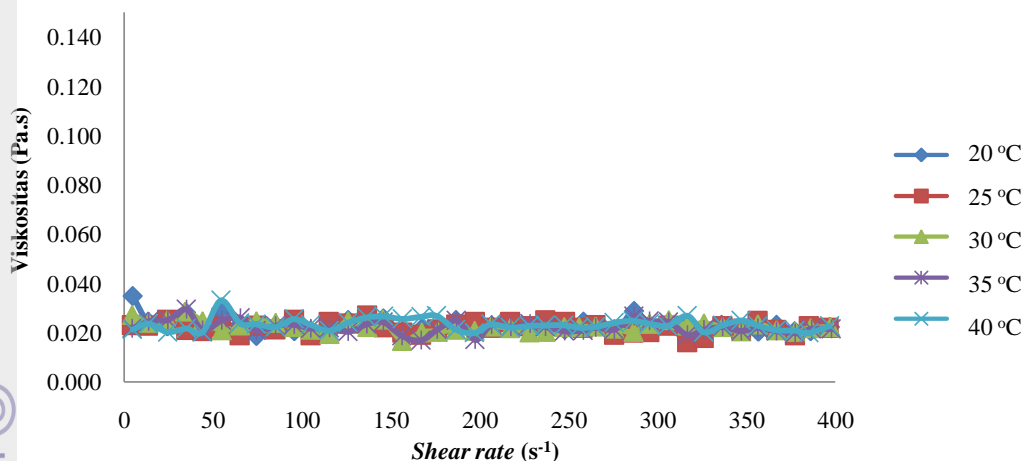


Gambar 25. Indeks konsistensi aliran CPO setelah pemanasan sebelum pengaliran.

Terlihat pada Gambar 24 dan 25 bahwa pemanasan hingga mencapai suhu pengaliran, yaitu suhu 55 °C mengakibatkan indeks konsistensi menurun, sedangkan indeks tingkah laku aliran meningkat mendekati fluida Newtonian. Pemanasan CPO hingga suhu 55 °C mengakibatkan CPO homogen dengan konsistensi yang lebih cair. Berdasarkan data reologi CPO yang disajikan pada Gambar 24 dan 25, terlihat bahwa suhu penyimpanan yang berbeda tidak berpengaruh terhadap reologi CPO setelah pemanasan hingga suhu 55 °C. Semua sampel CPO yang disimpan pada suhu penyimpanan yang berbeda, setelah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C memiliki indeks tingkah laku aliran dan indeks konsistensi yang tidak berbeda signifikan ($p \text{ value} > 0.05$), dengan indeks tingkah laku aliran berkisar antara 0.957-0.968 dan indeks konsistensi aliran berkisar antara 0.026-0.029. Semua sampel CPO yang dipanaskan hingga suhu 55 °C memiliki sifat yang mendekati fluida Newtonian ($n=1$ dan $K > 0$).

Hasil analisis statistika terhadap nilai indeks tingkah laku aliran (n) dan indeks konsistensi aliran (K) pada Gambar 24 dan 25 terlihat bahwa setelah mengalami pemanasan, semua sampel CPO yang disimpan pada setiap suhu penyimpanan (20, 25, 30, 35, dan 40 °C) memiliki nilai n dan K yang tidak berbeda nyata setelah dipanaskan hingga suhu 55 °C. Hubungan antara *shear rate* dan viskositas CPO setelah mengalami pemanasan sebelum pengaliran pada suhu 55 °C dapat dilihat pada Gambar 26.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.



Gambar 26. Hubungan *shear rate* dan viskositas CPO setelah mengalami pemanasan sebelum pengaliran.

Berdasarkan data hubungan *shear rate* dan nilai viskositas CPO setelah pemanasan sebelum pengaliran pada Gambar 26 terlihat bahwa viskositas CPO setelah mengalami pemanasan tidak lagi dipengaruhi oleh besarnya *shear rate* yang diberikan. Setelah mengalami pemanasan hingga suhu 55 °C, pada *shear rate* yang berbeda-beda nilai viskositas tidak banyak mengalami perubahan, berkisar antara 0.022-0.024 Pa.s. Hal ini menunjukkan sifat fluida Newtonian. Menurut Goodrum *et al.* (2002) nilai viskositas fluida Newtonian tidak dipengaruhi oleh besarnya gaya geser yang bekerja pada fluida, sehingga fluida Newtonian akan memiliki nilai viskositas yang tetap berapapun *shear rate* yang diberikan. Berdasarkan data reologi CPO setelah pemanasan sebelum pengaliran, suhu CPO setelah pemanasan sebelum pengaliran sangat mempengaruhi sifat reologi CPO yang selanjutnya akan dialirkan dalam pipa. Ditinjau dari sifat reologinya, CPO yang telah dipanaskan hingga mencapai suhu pengaliran tidak dipengaruhi oleh suhu penyimpanan yang dilakukan sebelumnya.

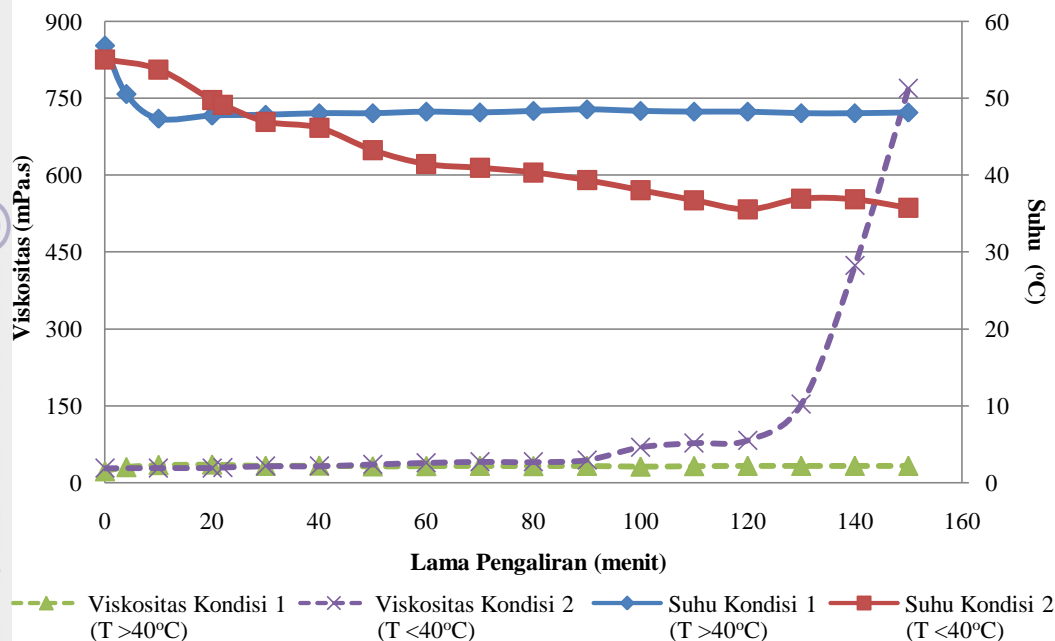
E. KARAKTERISTIK MUTU DAN REOLOGI CPO SELAMA PENGALIRAN DALAM PIPA

Menurut Yuliati (2001), transportasi minyak kelapa sawit moda pipa dapat meningkatkan keterandalan (*reliability*) waktu antar, menyederhanakan proses penanganan bahan (*material handling*), dan menurunkan biaya pengangkutan minyak kelapa sawit. Dalam mengembangkan transportasi minyak kelapa sawit moda pipa, diperlukan kajian mengenai perubahan sifat fisik dan kimia minyak kelapa sawit yang dialirkan secara terus-menerus pada waktu yang lama.

Untuk pengujian pengaruh proses pengaliran CPO terhadap mutu dan reologi CPO, dilakukan pengaliran sampel CPO pada sistem pipa sirkulasi skala laboratorium yang dilengkapi dengan pompa pendorong aliran. Sampel CPO yang digunakan untuk simulasi pengaliran, sebelumnya dipanaskan terlebih dahulu hingga mencapai suhu maksimal pengaliran yang direkomendasikan CAC (2005) yaitu suhu 55 °C. Selama pengaliran terjadi pelepasan panas yang mengakibatkan suhu CPO menurun dan mencapai kondisi isothermal, yang ditandai dengan tidak terjadinya penurunan suhu lagi (suhu konstan). Sistem pipa sirkulasi yang digunakan dilengkapi dengan termokopel yang terdapat di lima titik sepanjang pipa pengaliran yang terhubung dengan termorekorder, sehingga suhu selama pengaliran dapat diamati. Pengaliran

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.

CPO dilakukan pada dua kondisi, yaitu pada kondisi isothermal di atas titik leleh CPO (kondisi 1, $T > 40^{\circ}\text{C}$) dan pengaliran CPO pada kondisi isothermal di bawah titik leleh CPO (kondisi 2, $T < 40^{\circ}\text{C}$). Selama pengaliran dilakukan pengukuran terhadap viskositas terukur yang dapat dilihat pada Gambar 27 dengan data lengkap pada Lampiran 23.



Gambar 27. Profil perubahan viskositas dan suhu selama simulasi pengaliran CPO pada dua kondisi pengaliran.

Berdasarkan Gambar 27 dapat diketahui bahwa pengaliran CPO pada kondisi 1, suhu pengaliran isothermal pada suhu 48°C , dimana pada suhu tersebut viskositas CPO cenderung tetap berada pada kisaran 0.034 Pa.s hingga akhir pengaliran. Hal ini menunjukkan bahwa belum terjadi kristalisasi lemak ketika CPO dialirkan pada kondisi tersebut. Titik leleh minyak sawit adalah kisaran dari nilai-nilai yang menunjukkan gliserida penyusunnya yang terdiri dari asam-asam lemak dengan titik cair yang berbeda-beda (Satiawihardja *et al.* 2001). Menurut Himawan *et al.* (2006), minyak sawit memiliki titik leleh 40°C . Oleh karena itu, CPO tetap berada dalam fase cair ketika dialirkan pada kondisi pengaliran isothermal di atas titik leleh CPO.

Pada Gambar 27 juga dapat diamati pengaliran CPO dengan kondisi yang sangat berbeda yaitu pengaliran CPO pada kondisi 2, ketika CPO dialirkan pada kondisi isothermal di bawah titik leleh CPO. Pada kondisi 2, ketika terjadi penurunan suhu dari 55°C hingga mendekati titik leleh CPO yaitu sekitar suhu 40°C , viskositas CPO cenderung tidak banyak mengalami perubahan, berkisar antara $0.030 - 0.040 \text{ Pa.s}$. Namun ketika suhu CPO berada di bawah titik lelehnya, viskositas CPO mengalami peningkatan yang drastis. Pada saat suhu CPO isothermal di sekitar suhu 35°C , viskositas CPO terus mengalami peningkatan yang signifikan. Hal ini menunjukkan mulai terbentuknya kristal lemak yang mengakibatkan pembentukan fase padat pada CPO. Menurut Metin dan Hartel (2005), penyebab terjadinya kristalisasi adalah adanya perbedaan suhu aktual di bawah suhu titik leleh trigliserida. Sehingga suhu yang semakin jauh di bawah titik leleh CPO akan mengakibatkan peningkatan kandungan lemak padat pada CPO yang dapat diamati dari peningkatan viskositas terukur. Berdasarkan Gambar 27, pada pengaliran CPO kondisi 2 terlihat bahwa pada suhu 40°C viskositas terukur sebesar 0.041 Pa.s , pada suhu 38°C

viskositas terukur mengalami peningkatan, yaitu sebesar 0.070 Pa.s, dan pada suhu 36 °C viskositas terukur meningkat drastis, mencapai 0.770 Pa.s. Dengan demikian, untuk menjamin CPO tetap dapat mengalir di sepanjang pipa, maka pembentukan kristal lemak pada CPO selama pengaliran perlu dicegah. Kristalisasi lemak pada CPO dapat dicegah dengan cara mempertahankan suhu pengaliran yang lebih tinggi dari titik leleh CPO, yaitu suhu di atas 40 °C.

Selama pengaliran juga dilakukan analisis terhadap sifat reologi CPO yang dilihat dari indeks konsistensi aliran (n) dan indeks konsistensi aliran (K). Hasil analisis reologi CPO selama pengaliran dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Sifat reologi CPO selama pengaliran dalam pipa.

Suhu pengaliran (°C)	Persamaan <i>power law</i>	Indeks tingkah laku aliran (n)	Indeks konsistensi (K)	Sifat fluida
55	$y = 0.961x - 1.572$	0.961	0.027	Newtonian
50	$y = 0.904x - 1.348$	0.904	0.045	Newtonian
45	$y = 0.915x - 1.305$	0.915	0.049	Newtonian
40	$y = 1.021x - 1.445$	1.021	0.035	Newtonian
35	$y = 0.667x - 0.060$	0.667	0.870	Pseudoplastik

Berdasarkan indeks tingkah laku dan indeks konsistensi aliran pada Tabel 10, ketika CPO dialirkan dari suhu 55 °C hingga suhu 40 °C, CPO memiliki sifat fluida Newtonian. Namun ketika suhu CPO berada di bawah titik leleh CPO, yaitu pada suhu 35 °C, CPO memiliki sifat fluida pseudoplastik. Berdasarkan data tersebut maka dapat dikatakan bahwa selama pengaliran, CPO dapat mempertahankan sifat fluida Newtonian hingga suhu pengaliran mendekati titik leleh CPO, namun ketika suhu pengaliran berada di bawah titik leleh CPO, maka CPO akan memiliki sifat pseudoplastik.

Selain sifat reologi, selama pengaliran juga dilakukan pengamatan terhadap perubahan mutu CPO yang terjadi. Pengamatan terhadap mutu CPO dilakukan pada kondisi 1, yaitu kondisi pengaliran CPO pada suhu isothermal di atas titik leleh CPO. Analisis terhadap mutu CPO selama pengaliran dapat dilihat pada Tabel 11 dengan data lengkap pada Lampiran 24.

Tabel 11. Parameter mutu CPO selama pengaliran dalam pipa pada kondisi isothermal di atas titik leleh CPO ($T > 40^\circ\text{C}$).

Lama pengaliran (jam)	Parameter mutu			
	Asam lemak bebas (%)	Bilangan iod (g iod/100 g)	Karotenoid (ppm)	DOBI
0	4.13 ^a	52.43 ^a	623 ^a	2.76 ^a
2	4.43 ^b	52.41 ^a	595 ^b	2.57 ^b
3	4.64 ^c	52.40 ^a	582 ^c	2.52 ^{bc}
4	4.85 ^d	52.42 ^a	574 ^d	2.45 ^{cd}
5	5.07 ^e	52.40 ^a	563 ^e	2.38 ^{de}
6	5.21 ^f	52.42 ^a	547 ^f	2.32 ^e
Standar mutu				
SNI 01-2901-2006	0.5 maks	50-55	-	-
Ditjenbun (1997)	5 maks	51 min	500 min	2.5 min

Keterangan: Huruf yang berbeda dalam kolom yang sama menunjukkan perbedaan yang signifikan ($p < 0.05$) dengan uji Duncan pada selang kepercayaan 95%.

Pada Tabel 11 terlihat bahwa selama pengaliran terjadi penurunan mutu CPO. Selama 3 jam pengaliran, mutu CPO masih memenuhi standar mutu CPO di PKS Indonesia yang



ditetapkan oleh Ditjenbun (1997), dimana standar asam lemak bebas maksimal 5%, bilangan iod minimal 51 g iod/100 g, karotenoid minimal 500 ppm, dan DOBI minimal 2.5. Setelah 4 jam pengaliran, DOBI sudah tidak memenuhi standar (<2.50), dan setelah 5 jam pengaliran asam lemak bebas sudah tidak memenuhi standar ($>5\%$). Selama 6 jam pengaliran kadar karotenoid masih memenuhi standar (>500 ppm), sedangkan bilangan iod cenderung tidak mengalami perubahan selama pengaliran berlangsung.

Penanganan CPO sebelum pengaliran sangat mempengaruhi mutu CPO ketika dialirkan. Semakin baik mutu CPO awal, maka pengaliran dapat dilakukan pada waktu pengaliran yang lebih lama sebelum akhirnya melewati standar mutu yang ditetapkan. Selama proses pengaliran, suhu CPO dipertahankan tetap di atas titik leleh CPO ($>40^{\circ}\text{C}$) agar memudahkan proses pengaliran. Namun pengaliran di atas titik leleh CPO ini mengakibatkan penurunan mutu CPO selama pengaliran. Berdasarkan hasil uji Duncan terhadap perubahan parameter mutu CPO selama pengaliran yang disajikan pada Lampiran 24, terlihat bahwa selama pengaliran terjadi penurunan mutu yang signifikan dilihat dari asam lemak bebas, karotenoid, dan DOBI. Sedangkan bilangan iod tidak mengalami perubahan yang signifikan selama pengaliran. Pada sistem pipa yang digunakan untuk pengaliran pada penelitian ini terdapat bagian yang terbuka, yaitu pada tangki pemanas. Kondisi pengaliran yang tidak tertutup sempurna dapat mengakibatkan terjadinya kontak antara CPO dengan lingkungan, terutama oksigen dan air yang merupakan faktor penyebab kerusakan minyak.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB.
2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB.