

**PENELITIAN DURABILITAS MINYAK LUMAS
MESIN SEPEDA MOTOR SAE 10W-40, API SL/JASO MB
MELALUI UJI JALAN**

(Penelitian Durabilitas Minyak Lumas)

Rona Malam K, M. Hanifuddin, Tri Purnami,

Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Minyak dan Gas Bumi "LEMIGAS"
Jl. Ciledug Raya Kav.109, Cipulir, Kebayoran Lama, Jakarta Selatan
Telepon: +62-21-7394422, Fax.: +62-21-7246150

email: ronamk@lemigas.esdm.go.id
mhanif@lemigas.esdm.go.id - tpurnami@lemigas.esdm.go.id;

Teregistrasi I tanggal 23 April 2015; Diterima setelah perbaikan tanggal 6 Mei 2015;
Disetujui terbit tanggal: 3 Pebruari 2016.

ABSTRAK

*Penggunaan minyak lumas yang tepat akan berpengaruh pada kinerja mesin yang baik, sehingga masa pakai mesin kendaraan lebih lama dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Penelitian ini dilakukan dengan cara membuat minyak lumas untuk kendaraan sepeda motor SAE 10W 40, API SL/JASO MB yang memerlukan spesifikasi khusus dengan kinerja yang optimum, kemudian melakukan uji jalan sampai mencapai jarak tempuh 5000 km. Analisis minyak lumas bekas (used oil) dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja minyak lumas dan pengaruh pemakaiannya terhadap komponen mesin. Hasil analisis menunjukkan bahwa minyak lumas bekas mesin sepeda motor hasil formulasi, hasilnya masih di bawah nilai batas toleransinya, sehingga dapat disimpulkan bahwa durabilitas minyak lumas hasil formulasi **ML-F** mampu digunakan sampai jarak tempuh 5000 km.*

Kata Kunci:

ABSTRACT

*The using of the right lubricant will affect the good performance of engine, therefore the duration the engine using for long time and improve the efficiency. This research was conducted in a way to make lubricants for vehicles motorcycles SAE 10W/40 API SL, JASO MB, which require special specifications with optimum performance, through the road test to the distance of 5000 km mileage. The used oil analysis was conducted to determine the performance of lubricants and influence its use against the machine components. The results of the analysis showed that the formulation used oil motorcycle engines shows the result was still below the value of the limit of toleration, so it can be the conclusion that durability the results of oil formulation **ML-F** is able to use up to 5000 km mileage.*

Keywords:

I. PENDAHULUAN

Minyak lumas secara umum dapat dikelompokkan menjadi dua kelompok besar yaitu minyak lumas otomotif dan minyak lumas industri. Minyak lumas otomotif terbagi menjadi minyak lumas mesin (*engine lubricant*) dan minyak lumas bukan mesin (*non-engine lubricant*). Minyak lumas mesin diperuntukkan melumasi *silinder liner, cam lobe,*

crankshaft, valve, dan bagian mesin lainnya.

Fungsi utama minyak lumas adalah untuk mencegah terjadinya gesekan, keausan dan kerusakan permukaan suatu sistem yang terdiri atas berbagai elemen mesin, seperti gigi dan bantalan (Fein, 1992). Fungsi lainnya untuk mencegah terjadinya korosi, serta untuk mengumpulkan panas, kotoran dan partikel yang aus. minyak lumas juga berfungsi untuk menghantarkan gaya ataupun energi seperti

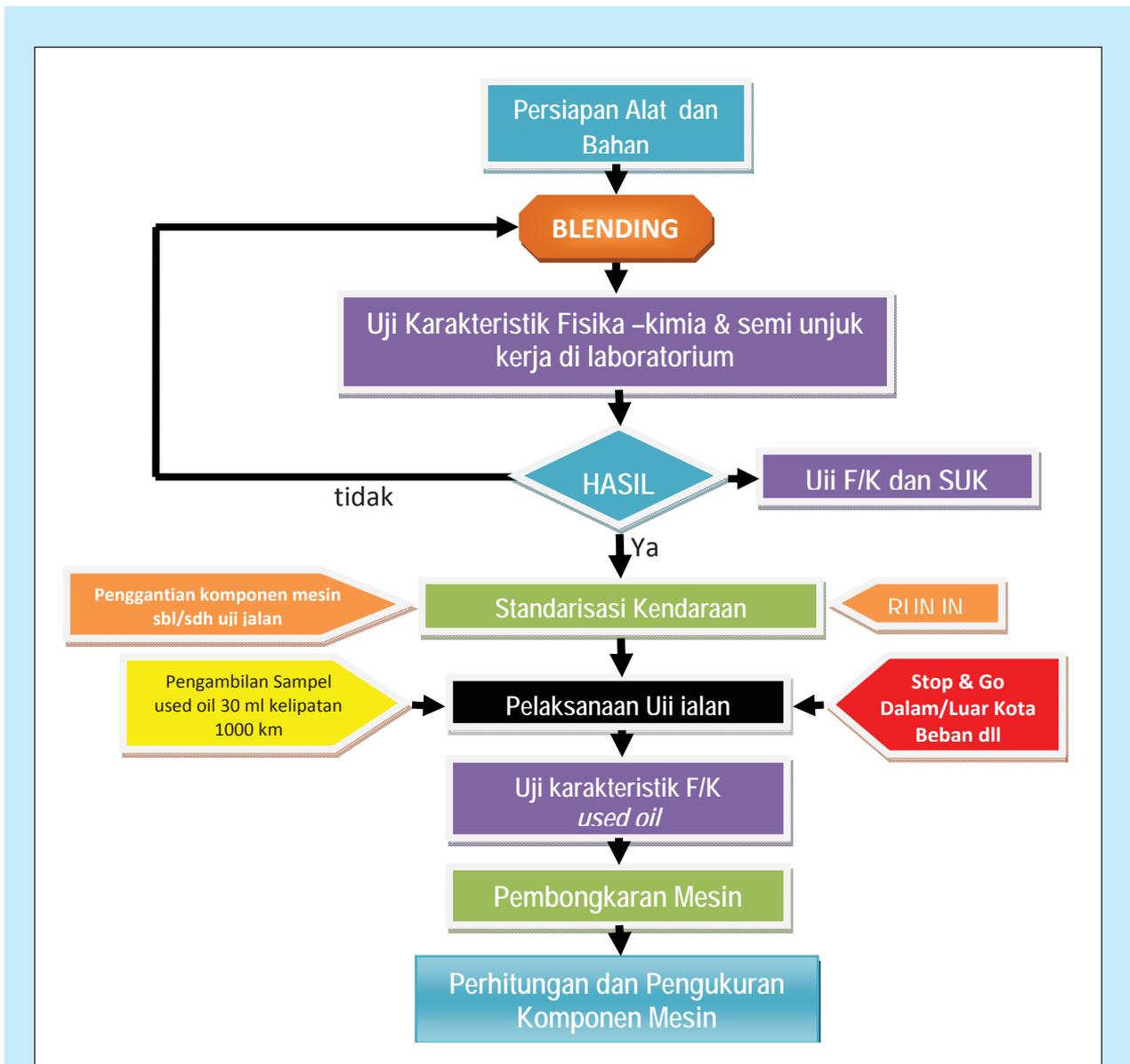
pada sistem hidrolis. Minyak lumas merupakan campuran *base oil* dan aditif dengan komposisi tertentu. Menurut Paul, 2006, bahan dasar minyak lumas adalah fraksi minyak bumi dengan dan atau tanpa aditif yang mempunyai kisaran titik didih antara 380°C - 550°C dan digunakan untuk maksud pelumasan.

Masyarakat dapat mengetahui kualitas minyak lumas dari karakteristik fisika kimia dan karakteristik unjuk kerjanya. Serta dari beberapa klasifikasi minyak lumas yaitu penggolongan tingkat kekentalan yang ditetapkan oleh lembaga berwenang seperti *Society of Automotive Engineers* (SAE) atau *International Organization of Standardization* (API). Produk minyak lumas harus memenuhi spesifikasi

viskositas dan juga unjuk kerjanya yaitu minyak lumas *monograde* atau *multigrade*.

Saat ini Jepang sebagai salah satu negara yang mendominasi sektor otomotif telah menetapkan standar spesifikasi untuk sepeda motor *Japan Automotive Standards Organization* (JASO T 903:2011). Ofunne, 1989 mengatakan pemenuhan kualitas pelumas sesuai standar tersebut erat kaitannya dengan peningkatan efisiensi energi yang dikonsumsi, serta berubah menuju ke arah teknologi ramah lingkungan (Ueda, 1996) yang disebabkan konsumsi bahan bakar lebih hemat serta waktu penggantian minyak lumas yang lebih lama (Malam, 2002).

Menurut Mohamed, 2014, Mesin sepeda motor



Gambar 1
Mekanisme Penyumbatan Rongga Pori Akibat Partikel Padatan Yang Masuk Ke Dalam Pori Batuan.

Tabel 1
Parameter Analisis Minyak Lumas

Parameter Analisa	Metode Analisa	Nilai Batas (<i>Warning Level</i>)
Viskositas, cSt	ASTM D 445	Perubahan > 25%
Viskositas Indeks	ASTM D 2270	>95
TBN, mgKOH/g	ASTM D 2896	< 2
TAN, mgKOH/g	ASTM D 664	> 5
Kandungan air, % berat	Hot plate	> 0.3
Oksidasi, A/0.1 mm	FTIR	> 1
Nitrasi, A/0.1 mm	FTIR	> 1
Fuel diluen, %	FTIR	> 6

Sumber : Petro-Canada Lubricants, Jan 2013

transmisi otomatis berteknologi modern terangkai dalam satu kompartemen sehingga pelumas akan melumasi berbagai komponen sekaligus yang menyebabkan terbebani *thermal stress* yang tinggi. Dibandingkan mesin mobil, mesin sepeda motor transmisi otomatis memiliki perbandingan antara kapasitas mesin dengan berat kendaraan dan keluaran tenaga yang jauh lebih besar. Dalam Skjoedt, et.al, 2008, teknologi pendingin mesin pada mesin sepeda motor umumnya memakai sistem pendinginan udara sehingga mesin sepeda motor mengalami *thermal stress* yang lebih besar dibanding yang berpendingin air. Berdasarkan kondisi di atas, maka mesin sepeda motor membutuhkan minyak lumas yang lebih berkualitas dibanding dengan mesin mobil.

Penggunaan minyak lumas yang tepat adalah mengacu pada rekomendasi pabrikan mesin kendaraan karena minyak lumas yang digunakan mengikuti desain dari mesin kendaraan. Desain

kendaraan antara lain perbandingan kompresi, daya maksimum, putaran maksimum, kepresisian komponen, material yang digunakan, bahan bakar, sistem pendinginan mesin, dan lain sebagainya. Karakteristik fisika-kimia merupakan parameter yang digunakan sebagai indikator untuk menentukan kualitas unjuk kerja minyak lumas (Skjoedt, et.al, 2008), sedangkan kualitas sebenarnya baru dapat diketahui melalui uji unjuk kerjanya pada mesin yang digunakan (Paul, F., 2006). Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja minyak lumas yang diformulasikan dan dibandingkan dengan minyak lumas referensi pada sepeda motor transmisi otomatis melalui uji jalan sampai dengan jarak tempuh 5000 kilometer.

II. BAHAN DAN ALAT

Penelitian dilakukan dengan menggunakan dua jenis minyak lumas SAE 10W-40, API SL/JASO MB

Tabel 2
Parameter Analisis Logam Keausan

Jenis Uji	Set	Nomor Sampel						Total Sampel
		Res. A		Res. B		Res. C		
		H	L	H	L	H	L	
Tekanan Kapiler Injeksi Merkuri	1	23B	25B	33B	43B	91A	84B	6
Kompatibilitas Air Terfilter	3	19A	30A	48C	43C	75C	85C	6
Kompatibilitas Air yang tidak Terfilter	4	19E	31A	48E	43F	78A	85E	6
Sensitivitas Air Formasi, efek air sungai terhadap air formasi	5	19I	31F	48I	43I	79C	85I	6
Jumlah Sampel		4	4	4		4	4	24

Sumber : Petro-Canada Lubricants, Jan 2013

hasil formula sendiri, yaitu minyak lumas dengan kode **ML-F** dan minyak lumas referensi dengan kode **ML-R**. Kendaraan uji yang dipakai adalah dua unit sepeda motor transmisi otomatis dengan spesifikasi sama.

III. HASIL DAN DISKUSI

Pengujian dilakukan di jalan raya yang mewakili kondisi lancar dan macet, yang dilakukan sampai jarak tempuh 5000 km. Minyak lumas yang dimasukkan ke sepeda motor sebanyak 1 L dan indikator tongkat ukur pada posisi *full* (F). Pengambilan minyak lumas dilakukan pada saat mesin dalam kondisi panas atau mesin baru dimatikan untuk menjaga homogenitas sampel uji, dengan jumlah pengambilan 30 ml dan pengisian ulang (*topping up*) dilakukan, apabila level minyak lumas sudah mencapai 1/2 – 3/4 bagian tongkat ukur (*dip stick*).

Analisis fisika kimia terhadap minyak lumas baru (*fresh oil*) dan minyak lumas bekas (*used oil*) dilakukan untuk parameter karakteristik viskositas

pada suhu 40°C dan 100°C, *Total Acid Number (TAN)*, *Total Base Number (TBN)* dan kandungan logam yang berasal dari keausan komponen mesin dan aditif. Hasil uji karakteristik fisika-kimia dan kandungan logam kemudian dibandingkan dengan acuan nilai batas (*warning level*) yang tersaji pada Tabel 1 dan Tabel 2.

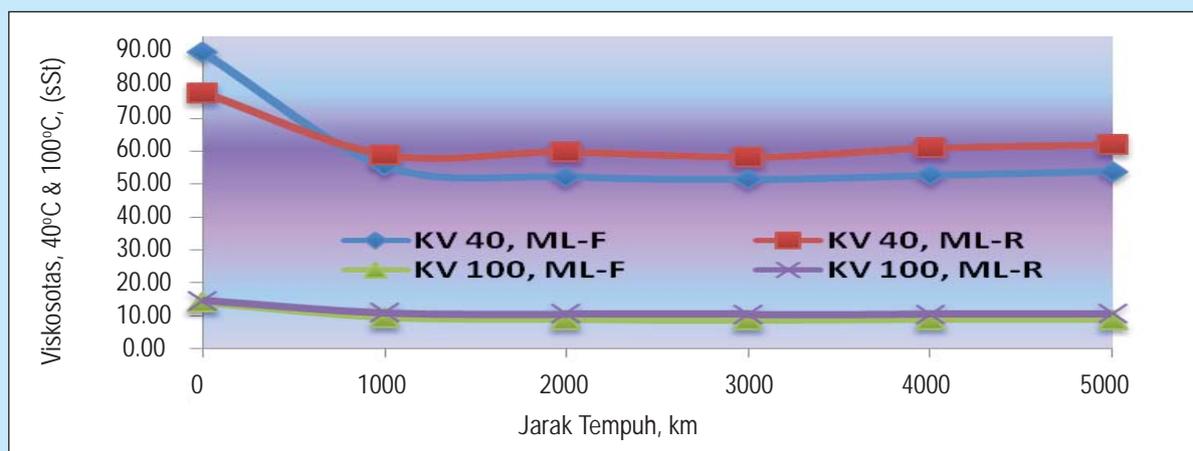
IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Minyak lumas sebagai lapisan pelindung berfungsi untuk memisahkan komponen yang saling bergerak. Dalam Rahimi, et.al, 2012, tanpa adanya sentuhan atau gesekan langsung, keausan bisa dianggap tidak terjadi. Tetapi pada saat beban berat yang melebihi kemampuan minyak lumas untuk memisahkan antar komponen, lapisan tersebut akan sobek sehingga menyebabkan terjadinya gesekan (kontak langsung) antar logam.

Pemantauan kondisi minyak lumas pada selang berurutan, pada jangka waktu atau jarak tertentu dapat digunakan untuk menentukan saat yang tepat

Tabel 3
Hasil Uji Minyak Lumas ML-F dan ML-R

No.	Karakteristik	Metode Uji	Satuan	ML-F	ML-R	Kepmen ESDM
						No. 2808 K/20/MEM/2006
1.	Viskositas 40°C	ASTM D 445	cSt	90,22	77,85	12.5-16.3
2.	Viskositas 100°C		cSt	14,18	14,74	
3.	Indeks Viskositas	ASTM D 2270	-	162	200	Min 125
4.	Viskositas suhu rendah	ASTM D 5293	cP	6670	5403	Maks 7000
5.	Total Base Number	ASTM D 4683	cP	9,21	5,5173	Min 5
6.	Pour Point	ASTM D 92	°C	-33	-45	Min -23
7.	Flash Point	ASTM D 97	°C	243	245	Min 200
8.	Sulfated Ash	ASTM D 2896	% massa	1,098	0,741	Min 0,6
9.	Evaporation loss	ASTM D 5800	% massa	10,51	7,66	Maks 15
10.	Metal Content					
	Ca	ASTM D 4628/ ASTM D 5185	% massa	0,2065	0,1011	spek produsen
	Mg			0,00205	0,00066	spek produsen
	Zn			0,12114	0,10411	Min 0,08
	P			0,0897	0,0896	Max 0,1
	Mo			0,0312	0,0634	spek produsen
11.	Foaming Tendency					
	sq 1	ASTM D 892	ml	nil/nil	5/nil	10/nil
	sq 2		ml	10/nil	10/nil	50/nil
	sq 3		ml	nil/nil	5/nil	10/nil
12.	Copper Strip Corrosion	ASTM D 130		1a	1a	Maks. 1b



Gambar 2
Grafik Kecenderungan Perubahan Viskositas

mengganti minyak lumpurnya [Mohamed, 2014]. Kehadiran metal keausan dan kontaminan berlebih yang tidak diinginkan seperti *fuel dilution*, kotoran, pasir dan debu juga dapat mengindikasikan perlunya penggantian minyak lumpur.

Hasil uji karakteristik fisika kimia minyak lumpur mesin transmisi otomatis SAE 10W-40, API SL/JASO MB, yaitu minyak lumpur hasil formulasi ML-F dan minyak lumpur pembanding dari pasaran ML-R yang digunakan untuk uji jalan ditunjukkan pada Tabel 3.

Hasil karakteristik minyak lumpur ML-F dan ML-R, seperti terlihat pada tabel di atas digunakan untuk mengevaluasi hasil akhir dari minyak lumpur ML-F dan ML-R sebelum dan setelah digunakan uji jalan. Pada Tabel 3. terlihat perbedaan nilai karakteristik minyak lumpur yang signifikan terutama pada nilai indeks viskositas, viskositas suhu rendah dan *total base number*; hal ini dapat dikarena jumlah komposisi dan jenis *base oil* maupun aditif berbeda, namun minyak lumpur ML-F hasil formulasi sebanding dengan minyak lumpur ML-R yang ada dipasaran, nilai karakteristiknya sesuai dengan SAE 10W40, API SL dan masih dalam batas toleransinya, jika dilihat dari peraturan yang ada di Indonesia Kepmen ESDM No. 2808 K/20/MEM/2006.

Viskositas Kinematik

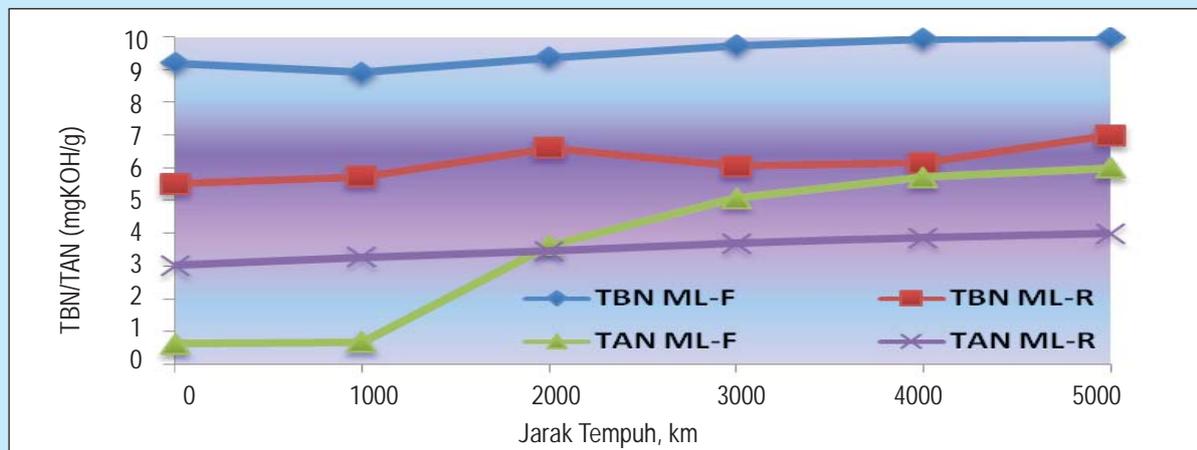
Viskositas kinematik merupakan salah satu parameter kunci untuk mengetahui kualitas minyak lumpur. Dalam aplikasinya menurut Carden, et al, 2013 pada kendaraan bermotor, viskositas bisa berubah menjadi lebih kental atau encer yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti temperatur, degradasi pelumas karena gaya geser, rembesan bahan bakar (*fuel diluent*), terbentuknya *sludge*,

terjadinya penguapan, dan masuknya kontaminan. Perubahan viskositas diamati selama uji jalan untuk mengetahui kondisinya, apakah masih dalam rentang nilai viskositas sesuai spesifikasinya, “*stay in grade*” atau sudah menyimpang, “*off-spec*”. Perubahan nilai viskositas kinematik minyak lumpur ML-F dan ML-R disajikan pada Gambar 2.

Pada Gambar 2 di atas, menunjukkan bahwa terjadi penurunan viskositas pada suhu 40°C untuk minyak lumpur ML-F dan ML-R yang cukup besar pada jarak tempuh 1000 km, dan kelipatan 1000 km selanjutnya tetap menunjukkan penurunan viskositas yang tidak signifikan sampai jarak tempuh 4000 km, namun saat akhir uji jalan yaitu 5000 km, nilai viskositas mengalami sedikit peningkatan. Sedangkan penurunan viskositas pada suhu 100°C untuk minyak lumpur ML-F dan ML-R, masih dalam rentang nilai viskositas sesuai spesifikasinya, “*stay in grade*”. Menurut Sylvain, 2008, fenomena terjadinya perubahan penurunan/kenaikan nilai viskositas selama pemakaian merupakan sesuatu yang umum terjadi, hal ini disebabkan oleh degradasi aditif yang terbuat dari polimer, yaitu karena adanya gaya *shear* dari pompa oli dan posisi letak *crankshaft* yang tercelup dalam karter minyak lumpur, sehingga memotong rantai polimer menjadi rantai dengan jumlah molekul yang lebih sedikit (pengenceran).

Bilangan Basa Total (TBN) dan Bilangan Asam Total (TAN)

Bilangan basa total merupakan karakteristik yang menunjukkan kemampuan deterjensi, dispersansi, dan netralisasi terhadap asam hasil oksidasi pada minyak lumpur. Kandungan sulfur pada bahan bakar yang digunakan (pertamax) sudah cukup rendah yaitu < 500 ppm, tetapi TBN masih merupakan



Gambar 3
Grafik Kecenderungan Perubahan TBT dan TAN

karakteristik yang penting untuk melindungi komponen mesin dari senyawa-senyawa asam yang korosif. Selain itu dengan adanya aditif deterjen dan dispersan, minyak lumas mampu membersihkan dan mencegah kotoran menempel pada komponen mesin seperti piston, ring, dan lain-lain yang dapat menyebabkan terbentuknya gumpalan-gumpalan, sehingga menyebabkan keausan terhadap komponen mesin.

Pada Gambar 3, memperlihatkan nilai bilangan basa total (TBN) dan nilai bilangan asam total (TAN) minyak lumas ML-F dan ML-R cenderung mengalami kenaikan selama masa uji jalan sampai jarak tempuh 5000 km. Secara teoretis, nilai TBN akan mengalami penurunan dan akan berpotongan dengan nilai TAN yang mengalami kenaikan selama masa uji jalan karena bereaksi dengan senyawa asam yang terbentuk. Bilangan asam total (TAN) minyak lumas ML-F naik sampai ± 5 mgKOH/g. Hal ini disebabkan terjadinya penguapan minyak lumas yang menyebabkan volume minyak lumas berkurang dan minyak lumas menjadi lebih pekat, sedangkan nilai TBN minyak lumas naik selama pemakaian yang disebabkan oleh adanya penambahan kembali (*top up*) minyak lumas baru atau *TBN booster*.

Penurunan nilai TBN merupakan indikator telah terbentuknya senyawa asam dalam minyak lumas dan bekerjanya aditif TBN dalam menetralkan asam-asam yang terbentuk. Skjoedt, et.all, 2008 menggunakan nilai TBN sebagai salah satu acuan dalam penggantian minyak lumas, yaitu jika nilainya turun lebih dari 50% dari nilai awal, dianggap sudah saatnya dilakukan penggantian minyak lumas. Shayler, et.all, 2007, menggunakan perbandingan nilai TBN dan TAN, apabila grafik TBN dan TAN

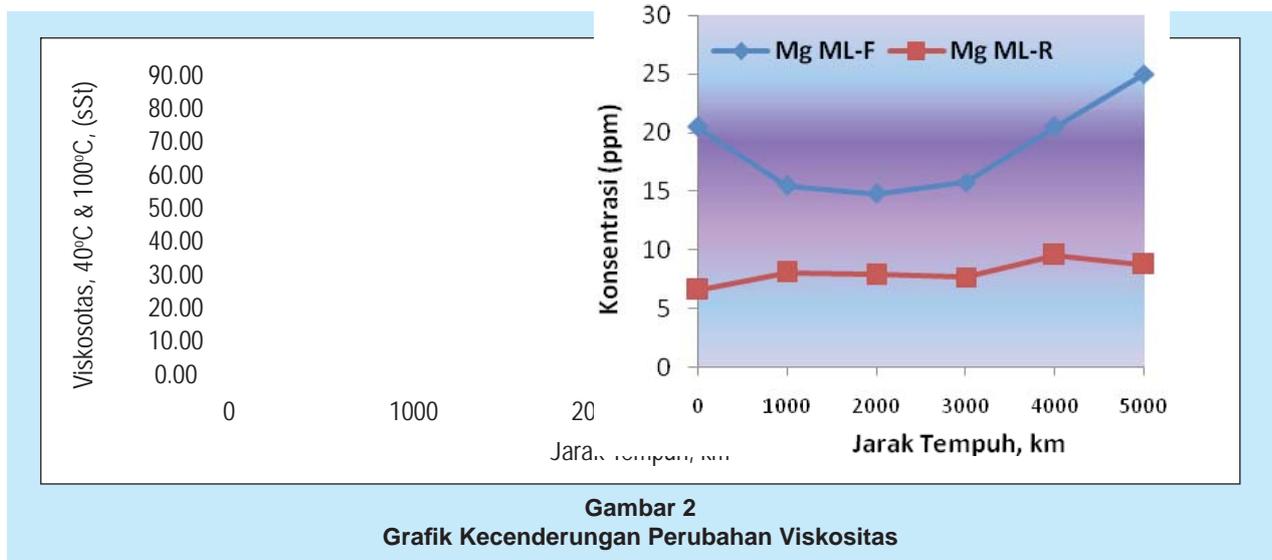
sudah berpotongan, artinya waktu pergantian minyak lumas diperlukan. Sander, et.all, 2015, juga dengan membatasi nilai minimal TBN sebesar 2 mgKOH/gr. Sesuai persyaratan yang mengacu pada Petro Canada, minyak lumas masih dapat digunakan selama masih memenuhi batas minimal, yaitu 3.0 – 4.0 mg KOH/gr.

Kandungan Logam Aditif

Kandungan logam merupakan salah satu indikator terjadinya keausan dalam komponen mesin kendaraan bermotor. Secara umum, kandungan logam dapat digolongkan menjadi 2 kategori, yaitu kandungan logam aditif dan kandungan logam keausan. Logam keausan pada umumnya berasal bantalan (*bearing*), ring piston, silinder piston, bagian-bagian mesin yang bergerak lainnya yang terbuat dari besi tuang [Kral jr, 2014].

Gambar 4. menunjukkan kecenderungan kenaikan kandungan logam yang berasal dari aditif antara lain logam kalsium (Ca), magnesium (Mg), dan zinc (Zn). pada minyak lumas formula ML-F dan ML-R dengan SAE 15W40, API SL, secara umum menunjukkan nilai karakteristik relatif naik. Hal ini dikarenakan logam tersebut, hanya berubah menjadi senyawa kimia yang berbeda sesuai fungsi dari aditif dalam minyak lumas. Logam Ca pada ML-F mengalami kenaikan yang sangat signifikan setelah pemakaian, hal ini disebabkan adanya kontaminasi debu yang mengandung kalsium pada daerah yang banyak batu kapurnya, dan fungsi dari logam Ca adalah menetralkan asam yang terjadi dari hasil pembakaran yang dapat dilihat juga dari nilai TAN yang sangat tinggi. Sedangkan logam Ca pada ML-R kenaikannya konstan setelah mencapai jarak tempuh 1000 km yang berarti

aditif deterjen pada ML-R bekerja dengan baik atau tahan terhadap asam.



Gambar 4. Grafik kecenderungan perubahan kandungan metal aditif

Keausan logam pada komponen mesin sepeda motor

No.	Langkah Kerja	Hasil	Catatan
<p>Uji Pendesakan Core untuk Sensitivitas Air Formasi (brine) Untuk sampel batuan permeabilitas tinggi (H) dan rendah (L) dari reservoir A, B, dan C</p>			
1	Bersihkan dan keringkan sampel Ukur Permeabilitas & Porositas	Data k and ϕ	Berdasarkan DSF Recipe untuk membuat air sintetik 2 sampel A (H & L) 2 sampel B (H & L) 2 sampel C (H & L) Persiapan: Dibutuhkan sintetik air formasi
2	Saturasi batuan dengan sintetik air formasi Letakkan dalam <i>core holder</i> (convining 400 psi)		
3	Injeksi dengan air formasi sintetik pada lajur alir konstan 2 cc/min Hitung k_w vs Vol <i>throughput</i>	Plot Grafik Vol. Injeksi vs k_w (1) k_{w1}	Dibutuhkan sintetik air formasi
4	Injeksi air formasi sintetik dengan pengenceran air sungai 50% pada lajur alir konstan 2 cc/min Hitung k_w vs Vol <i>throughput</i>	Plot Grafik Vol. Injeksi vs k_w (2) k_{w2}	Dibutuhkan air formasi yang telah dicampur dengan air sungai 50%
5	Injeksi air formasi sintetik dengan pengenceran air sungai 75% pada lajur alir konstan 2 cc/min Hitung k_w vs Vol <i>throughput</i>	Plot Grafik Vol. Injeksi vs k_w (3) k_{w3}	Dibutuhkan air formasi yang telah dicampur dengan air sungai 75%
6	Injeksi air formasi sintetik dengan pengenceran air sungai 90% pada lajur alir konstan 2 cc/min Hitung k_w vs Vol <i>throughput</i>	Plot Grafik Vol. Injeksi vs k_w (4) k_{w4}	Dibutuhkan air formasi yang telah dicampur dengan air sungai 90%
7	Injeksi air sungai 100% pada lajur alir konstan 2 cc/min Hitung k_w vs Vol <i>throughput</i>	Plot Grafik Vol. Injeksi vs k_w (5) k_{w5}	Dibutuhkan air sungai
8	Arah aliran dibalik menggunakan air sungai pada lajur alir konstan 2 cc/min Hitung k_w dari injeksi dengan arah aliran dibalik	k_w Rev	Untuk menentukan migrasi partikel halus
	Setelah uji aliran telah dilaksanakan, iris masing-masing sampel untuk: analisis petrografi setelah injeksi: SEM, EDX, XRD & TS		(6 sample @sebelum) (6 sample @setelah)

Gambar 3
Prosedur Uji Sensitivitas Air Formasi (brine).

I. PENDAHULUAN

Ketika minyak diproduksi, sejumlah air akan ikut terproduksi terutama pada sumur yang telah lama berproduksi. Jumlah air terproduksi sangat besar sehingga memerlukan manajemen pengelolaan tersendiri dengan biaya yang tidak sedikit. Oleh karenanya air terproduksi sering diinjeksikan kembali ke dalam sumur (Whalen 2012). Injeksi air

terproduksi dimaksudkan untuk menjaga kontinuitas produksi reservoir (*pressure maintenance*), sebagai fluida pendesak minyak (*waterflood*) untuk meningkatkan produksi, dan sebagai *killing fluid* pada kerja ulang sumur. Selain itu dapat juga dimanfaatkan sebagai sumber air untuk pembangkit uap (*steam generator*) yang akan diinjeksikan ke dalam reservoir untuk meningkatkan produksi lapangan minyak berat.

Jika air terproduksi tidak mencukupi, maka sumber air dari luar reservoir dapat digunakan. Sumber air eksternal berasal dari akuifer, air laut, air danau, dan air sungai. Namun demikian, penggunaan air dari eksternal reservoir potensial memperburuk kerusakan formasi dengan indikasi penurunan permeabilitas batuan. Konsekuensi lebih lanjut adalah terjadi penurunan produktivitas dan perolehan sumur. Untuk itu sebelum penerapan di lapangan perlu dilakukan studi laboratorium untuk mengetahui dampak interaksi air injeksi dengan batuan reservoir dan air formasi terhadap produktivitas reservoir. Hasil kajian laboratorium menjadi dasar pertimbangan

perusahaan memanfaatkan atau tidak air eksternal sebagai pengganti air terproduksi.

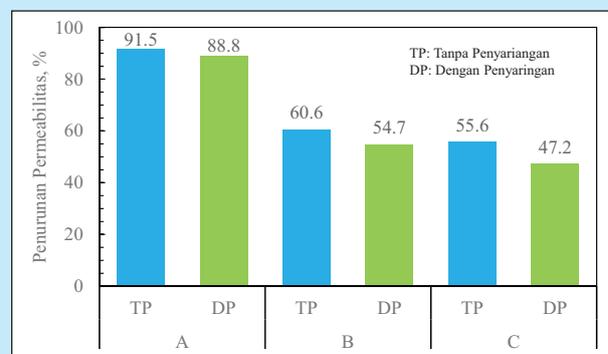
Makalah ini membahas studi kasus evaluasi penggunaan air sungai sebagai substitusi air terproduksi untuk keperluan, *waterflood*, *killing fluid*, dan pembangkit uap. Sebuah pendekatan sistematis dalam desain dan uji aliran pada batuan inti (*core*) untuk memperoleh data yang akurat dan realistis mengenai dampak kontak air sungai injeksi dengan batuan reservoir juga akan diuraikan dalam makalah ini. Uji aliran dilakukan menggunakan tiga buah sampel batuan dari lapisan reservoir produktif untuk investigasi perubahan permeabilitas akibat injeksi air sungai.

Tabel 5
Hasil Perhitungan Indeks Tendensi Pembentukan *Scale* CaCO_3 Dan CaSO_4 Pada Sampel Air Sintetik Reservoir B

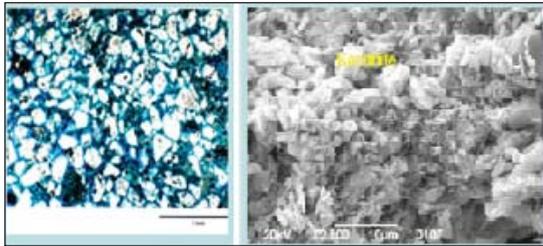
Hasil Uji	Satuan	Air Sintetik Reservoir B
Calcium, Ca^{2+}	mg/L	5,6
Bicarbonate, HCO_3^-	mg/L	491,0
Carbonate, CO_3^{2-}	mg/L	13,8
Sulfate, SO_4^{2-}	mg/L	28,2
pH @77°F		7,7
<i>CaCO₃ scaling index (SI)</i>		
SI pada 77°F		-0,45
SI pada 140°F		0,37
SI pada 175°F		0,73
Catatan:		
<i>Scale CaCO₃</i> pada 77°F		SI<0, tidak terbentuk
<i>Scale CaCO₃</i> pada 140°F		SI<0, terbentuk
<i>Scale CaCO₃</i> pada 175°F		SI<0, terbentuk
Konsentrasi aktual CaSO_4	meq/L	0,59
Kelarutan pada 77°F	meq/L	22,52
Kelarutan pada 140°F	meq/L	22,52
Kelarutan pada 175°F	meq/L	20,65
Catatan:		
<i>Scale CaSO₄</i>		kelarutan > konsentrasi actual, tidak terbentuk

Mekanisme Kerusakan Formasi

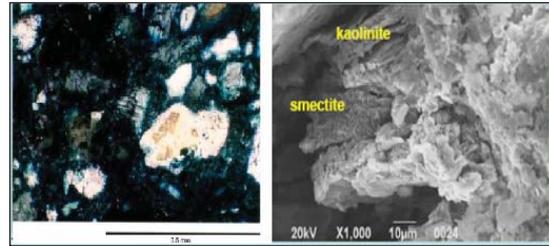
Keberhasilan produksi suatu sumur minyak ditandai dengan produktivitas yang tinggi yaitu besarnya fluida yang dapat dialirkan dari dalam reservoir sesuai dengan kemampuan sumur. Kondisi ini jarang dan sulit dicapai karena terjadinya



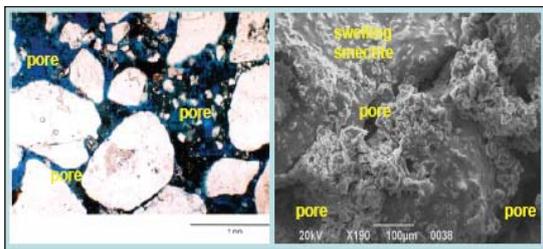
Gambar 5
Penurunan Permeabilitas Air Rata-Rata Pada Tiga Sampel Batuan Reservoir Yang Diuji Akibat Injeksi Air Sungai Tanpa dan Dengan Penyaringan.



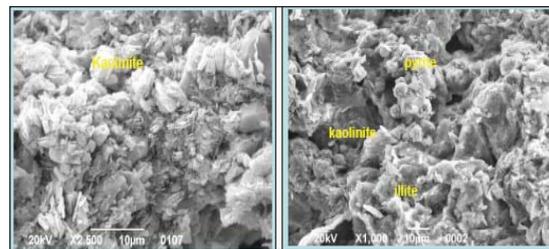
Gambar 6
Foto Sayatan Tipis Petrografi (kiri) dan Sem Sampel #19A Yang Menunjukkan Batupasir Reservoir A Tidak Terkonsolidasi Dengan Baik dan Mengandung Kaolinite.



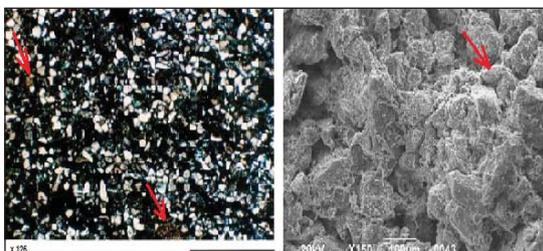
Gambar 7
Foto Petrografi Dari Sayatan Tipis (kiri) dan Photomicrographs Sem (kanan) Sampel Reservoir B Nomor #48A Yang Menunjukkan Mineral Smectite dan Kaolinite.



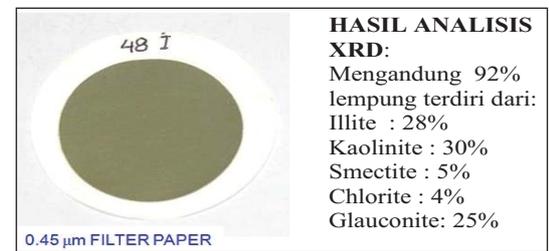
Gambar 8
Foto Petrografi Dari Sayatan Tipis (kiri) dan Photomicrographs Sem (kanan) Sampel Reservoir C Nomor #79C Yang Menunjukkan Kandungan Smectite.



Gambar 9
Foto Sem Dari Sampel #19A (kiri) dan Sampel #30A (kanan) Batuan Reservoir Yang Menunjukkan Kehadiran Mineral Kaolinite, Illite, dan Pirit.



Gambar 10
Foto Sayatan Tipis Petrografi (kiri) dan Sem (kanan) Sampel #85F Reservoir C Yang Menunjukkan Kandungan Pyrite Berwarna Oranye, Coklat.



Gambar 11
Endapan Lempung Pada Kertas Saring 0.45µm Dari Uji Sensisitivitas Air Formasi Dengan Sampel #48I Reservoir B.



Gambar 12
Perubahan Bentuk Core Plug Akibat Kompaksi.

Tabel 6
Ringkasan Hasil Analisis Distribusi Ukuran Pori

Reser- voar	Sam- pel#	Kedalaman feet	k mD	ϕ %	Distribusi Ukuran Pori, %PV					Median (50% MIPV)
					<0,1 μm	0.1-1 μm	1-10 μm	10-100 μm	>100 μm	
A	23B	350,0	981	37,8	12,0	17,3	17,5	28,3	10,5	4,12 μm
B	33B	514,3	1054	35,7	11,9	9,4	17,0	54,9	1,3	12,34 μm
C	84B	657,0	502	32,1	9,5	17,8	22,5	36,5	1,0	4,01 μm
A	25B	439,5	440	18,3	25,9	35,8	18,9	0,8	1,3	0,16 μm
B	43B	566,0	566	32,8	28,9	19,8	19,7	12,8	2,9	0,18 μm

kerusakan formasi di sekitar lubang sumur ditandai dengan penurunan permeabilitas di zona sekitar lubang sumur. Penurunan ini akibat invasi cairan asing ke dalam batuan reservoir. Cairan asing meliputi lumpur pemboran, kompleks, kerja ulang, dan stimulasi. Kerusakan formasi juga dapat terjadi karena interaksi antara fluida injeksi yang tidak cocok (*incompatible*) dengan fluida reservoir atau dengan batuan reservoir.

Interaksi fluida-fluida

Kualitas air yang akan dipakai baik untuk keperluan *pressure maintenance*, *waterflood* ataupun *killing well* perlu diketahui untuk menghindari terjadinya kerusakan formasi akibat terbentuknya *scale*. Kandungan ion-ion Ca^{2+} dan HCO_3^- dalam air injeksi dapat menyebabkan *scale* kalsium karbonat (CaCO_3). Bila air mengandung konsentrasi ion Ca^{2+} dan HCO_3^- pada kondisi pH tinggi maka kecenderungan membentuk *scale* CaCO_3 akan semakin tinggi. *Scale* berpotensi menyebabkan *plugging* atau penyumbatan pori-pori batuan sehingga mengakibatkan penurunan permeabilitas reservoir (Zuluaga dkk. 2011).

Interaksi fluida-batuan

Penyebab dan dampak kerusakan formasi spesifik tiap reservoir karena kondisi dan karakteristik reservoir berbeda pada setiap lapangan migas. Terganggunya keseimbangan kandungan ion dan anion air formasi karena efek salinitas atau interaksi fluida-batuan yang *incompatible* dapat menyebabkan pembengkakan mineral lempung (*swelling*), perubahan kebasahan batuan (*wettability*), dan pengendapan partikel asphaltik dan parafin yang terdapat dalam minyak (Mahmoud 2014, Olalekan 2014 dan Abbasi dkk. 2011). Penyumbatan pori-pori batuan oleh partikel halus (*fine migration*) juga dapat terjadi ketika kecepatan fluida injeksi melampaui kecepatan kritis. Aktifitas biologi juga dapat menyebabkan kerusakan formasi.

Sistem pori batuan merupakan jalan aliran fluida ke lubang sumur. Sistem aliran ini dapat tersumbat bila partikel-partikel halus berukuran 1/3 hingga 1/7 atau lebih dari ukuran rongga pori yang terbawa aliran fluida terendapkan di saluran rongga pori. Pengendapan tersebut dapat mengakibatkan penurunan permeabilitas (Usman 2015). Pada beberapa kasus bahkan dapat menutup rongga pori seperti ditunjukkan dalam Gambar 1 (Bennion 1992).

Pengaruh injeksi uap terhadap kerusakan formasi

Injeksi uap dan air panas adalah teknik untuk menambah produksi minyak. Diterapkan pada minyak dengan *API gravity* rendah dan reservoir hidrokarbon yang dangkal. Energi panas yang dialirkan ke dalam reservoir akan mengurangi viskositas minyak sehingga minyak dapat diproduksi. Mekanisme termal penyebab gangguan permeabilitas selama proses injeksi air panas atau uap berbeda dengan mekanisme konvensional sebagaimana telah diuraikan di atas. Mekanisme termal tersebut adalah:

Transformasi Mineral

Pada suhu lebih dari sekitar 200°C, transformasi mineral dapat terjadi ketika lempung yang relatif stabil (*inert*) seperti *kaolinite* berubah menjadi *smectite* yang sensitif terhadap air tawar. Kontak antara kondensat uap dengan lempung *smectite* yang reaktif terhadap air tawar menyebabkan perluasan struktur atau pembengkakan sehingga akan mengurangi permeabilitas sistem pori secara signifikan (Musharova dkk. 2012). Ketika sepenuhnya terhidrasi, ukuran lempung *smectite* bisa mencapai dua kali lipat dari ukuran 9,2 Angstrom menjadi lebih dari 17 Angstroms³. Interaksi air injeksi salinitas rendah atau air tawar temperatur tinggi dengan lempung *smectite* dalam matriks reservoir sangat potensial menimbulkan kerusakan formasi.

Tabel 7
Ringkasan Hasil Uji Kompatibilitas Batuan Dengan Air Sungai Yang Disaring dan Tanpa Disaring

Air Sungai tanpa Penyaringan						Air Sungai dengan Penyaringan					
Sample No	k _a mD	1st Air Form.	1st Air Form.	2nd Air Form.	2nd Air Form.	1st Air Form.	1st Air Form.	2nd Air Form.	2nd Air Form.	Aliran Balik Air Sungai	Aliran Balik Air Sungai
		k _{w1}	k _{w2}	k _{w3}	k _{w4}	k _{w1}	k _{w2}	k _{w3}	k _{w4}	k Rev	k Rev
Reservoar A											
19 E	1577	611.8062	130.872	101.923	49.308	330.366	51.200	14.398	9.783	11.815	11.815
		372.0618	79.9391	50.765	27.209	102.907	17.409	11.719	6.901	7.983	7.983
		Penurunan k _w , %:	39.19	50.19	44.82	68.85	66.00	18.60	29.46	32.44	32.44
31 A	97	4.7697	0.3423	0.067	0.040	0.2157	0.0187	0.0231	No Flow	No Flow	No Flow
		0.8208	0.0988	0.019	0.011	0.0631	0.0141	0.0116			
		Penurunan k _w , %:	82.79	71.14	72.32	70.75	24.60	49.78			
Reservoar B											
48 E	4303	992.782	510.293	462.637	302.163	431.652	302.458	207.484	121.005	125.326	125.326
		617.992	414.649	306.979	185.921	287.365	190.166	122.267	88.478	96.543	96.543
		Penurunan k _w , %:	37.75	18.74	33.65	38.47	37.13	41.07	26.88	22.97	22.97
43 F	322.4	58.559	25.829	17.329	12.658	0.0544	0.047	Undetermined test	0.017	0.017	0.017
		33.855	16.406	10.798	8.097	0.0155	0.006	(water hardly to flow)	0.0046	0.0046	0.0046
		Penurunan k _w , %:	42.19	36.48	37.69	71.51	87.23		72.94	72.94	72.94
Reservoar C											
78 A	10164	1445.922	824.153	740.836	513.557	1086.474	816.791	676.192	476.981	391.217	391.217
		923.851	613.203	576.480	370.737	721.340	670.157	391.315	333.293	258.203	258.203
		Penurunan kw, %:	36.11	25.60	22.19	27.81	17.95	42.13	30.12	34.00	34.00
85 E	368	69.256	31.564	21.668	14.509	89.794	47.386	29.207	30.107	24.341	24.341
		38.593	19.454	12.665	8.862	36.606	25.574	22.790	16.045	18.120	18.120
		Penurunan kw, %:	44.27	38.37	41.55	59.23	46.03	21.97	46.71	25.56	25.56

Tabel 8
Ringkasan Hasil Uji Sensitivitas Air Formasi

Sampel No.	k_a , mD	Permeabilitas Air, mD										Aliran Balik - Air Sungai k_w Rev
		100% Air Formasi (brine) k_{w1}	50% Brine + 50% Air Sungai k_{w2}	Penurunan Perm. Relatif thd k_{w1} , %	25% Brine + 75% Air Sungai k_{w3}	Penurunan Perm. Relatif thd k_{w1} , %	10% Brine + 90% Air Sungai k_{w4}	Penurunan Perm. Relatif thd k_{w1} , %	100% Air Sungai k_{w5}	Penurunan Perm. Relatif thd k_{w1} , %		
Reservoir A												
19I	1017	636.4905	278.5311	56.24	132.2576	79.22	75.5588	88.13	46.5909	92.68	84.9270	
Penurunan k_w, %:		598.9818	163.6559	72.68	82.1887	86.28	48.1062	91.97	33.6648	94.38	54.9935	
		5.89	41.24		37.86		36.33		27.74		35.25	
31F	165	32.3058	1.1033	96.58	0.0851	99.74	No Flow		-		-	
Penurunan k_w, %:		1.0736	0.2083	80.60	0.0318	97.04						
		96.68	81.12		62.63							
Reservoir B												
48I	5163	1118.2020	484.1844	56.70	364.4496	67.41	243.6615	78.21	162.7951	85.44	197.39	
Penurunan k_w, %:		654.1752	396.4943	39.39	233.6928	64.28	168.9295	74.18	122.9346	81.21	158.544	
		41.50	18.11		35.88		30.67		24.49		19.68	
43I	2.58	No flow										
Reservoir C												
79C	6847	745.6640	545.8502	26.80	340.6204	54.32	244.7403	67.18	192.4763	74.19	217.8241	
Penurunan k_w, %:		572.4742	388.6304	32.11	243.7987	57.41	193.6735	66.17	161.8122	71.73	154.3519	
		23.23	28.80		28.43		20.87		15.93		29.14	
85I	271	49.6363	14.8253	70.13	12.5174	74.78	10.1440	79.56	9.3388	81.19	18.0936	
Penurunan k_w, %:		25.1345	11.9674	52.39	10.1815	59.49	8.9045	64.57	7.8444	68.79	13.8128	
		49.36	19.28		18.66		12.22		16.00		23.66	

Tabel 9
Perbandingan Permeabilitas (K_a) dan Porositas (ϕ) Yang Diukur Sebelum dan Sesudah Uji Aliran

Sampel	Kedalaman	Sebelum	Pengujian	Setelah	Pengujian	Penurunan
No.	Feet	K_a , mD	ϕ , %	K_a , mD	ϕ , %	K_a , %
19G	336,60	3.222	34.33	1.896	30.47	41.2
19I	337,45	1.017	31.32	821	26.28	19.3
19J	337,60	1.273	34.46	712	29.48	44.1
31C	447,50	51	30.87	10	23.83	80.0
48G	576,85	3.882	34.14	2725	31.38	29.8
79B	652,00	11.351	34.01	3833	30.48	66.2
85G	673,30	382	36.67	276	28.05	27.8

Pelarutan dan Pengendapan

Peningkatan kelarutan baik karbonat dan silika di dalam air sejalan dengan naiknya suhu (Tang 2012). Hal ini dapat mengakibatkan disolusi atau pelarutan sebagai bagian dari deformasi yang berdampak pelarutan sebagian material karbon atau silikat sehingga melepaskan partikel halus yang sebelumnya diam tidak bergerak kemudian bermigrasi ke leher pori dan menyebabkan penurunan permeabilitas. Mineral yang jenuh dengan air formasi, karena bergerak lebih dalam ke formasi, akan mendingin sehingga kehilangan kemampuan mempertahankan kelarutannya di dalam air formasi tersebut. Hal ini menyebabkan pengendapan kembali (*re-precipitation*) padatan kalsium, magnesium atau silikat. Jumlah dan lokasi *re-precipitation* berpotensi menurunkan permeabilitas.

Perubahan Sifat Wettability

Tingkat adsorpsi minyak pada permukaan mineral di dalam reservoir dikendalikan oleh suhu. Dengan demikian, injeksi panas ke dalam reservoir akan menyebabkan perubahan sifat *wettability* batuan (Talal dkk. 2011). Hampir semua mineral di alam pada keadaan murni cenderung mempunyai sifat kebasahan air (*water wet*). Hasil studi para ahli menyatakan bahwa hampir setengah dari seluruh batupasir dan sekitar 90% dari semua reservoir minyak karbonat menunjukkan sifat kebasahan netral atau minyak (*oil wet*). Sifat kebasahan ini akan terganggu dengan meningkatnya temperatur dalam reservoir.

II. BAHAN DAN METODE

Serangkaian uji aliran telah dilakukan untuk mengamati pengaruh penggunaan air sungai terhadap permeabilitas sampel batuan *core*. Sampel

batuan *core* sepanjang 205,5 meter mewakili tiga reservoir target yaitu A mewakili formasi bagian atas, B mewakili formasi bagian tengah, dan C merepresentasikan formasi bagian bawah. Lapisan batuan reservoir ini merupakan bagian dari formasi yang berumur Miosen Awal dengan interval kedalaman antara 300 - 750 kaki.

Analisis komposisi dan distribusi ukuran partikel dilakukan pada sampel air sungai yang diambil pada kondisi musim hujan dan musim kemarau, serta tiga sampel air formasi dari reservoir A, B, dan C. Disamping itu dilakukan juga uji kompatibilitas antar fluida reservoir dengan air sungai dan penentuan tendensi terbentuknya *scale* berdasarkan perhitungan dengan metode *Stiff and Davis* untuk *scale* kalsium karbonat dan metode *Carberg and Matches* untuk *scale* kalsium sulfat.

Uji aliran terdiri atas uji kompatibilitas fluida-batuan reservoir dan uji sensitivitas air formasi untuk mengetahui efek air sungai terhadap perubahan salinitas air formasi. Jenis uji dan jumlah sampel yang digunakan diberikan dalam Tabel 1. Sebanyak 24 sampel *core* telah diseleksi untuk digunakan dalam berbagai pengujian. Duplikasi sampel diperlukan dan titik pengambilan sampel duplikat ini di bor dekat dengan kedalaman sampel utama yang telah dipilih sebelumnya. Dengan demikian diharapkan akan mempunyai nilai permeabilitas dan porositas yang mirip. Sampel kemudian diberi kode alpabet dibelakang nomor sampel agar.

Prosedur uji kompatibilitas air sungai dengan batuan ditampilkan dalam Gambar 2. Dari setiap sampel akan diperoleh empat data permeabilitas, yaitu k_{w1} hingga k_{w4} . Pada kondisi akhir pengukuran akan diperoleh nilai permeabilitas, diukur pada kondisi arah aliran berlawanan (*reversed flow direction*), yaitu k_{Rev} . Uji aliran ini dilakukan dengan menggunakan air sungai tanpa disaring

(*unfiltered*) dan yang telah disaring (*filtered*) menggunakan kertas saring berukuran 0,45 μm . Sebanyak dua belas sampel disiapkan untuk uji kompatibilitas dan dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama terdiri dari enam sampel #19A, #30A, #48C, #43C, #75C, dan #85C digunakan untuk pengujian menggunakan air sungai yang telah disaring. Kelompok kedua juga terdiri dari enam sampel sisanya untuk uji kompatibilitas dengan air sungai tanpa disaring yaitu sampel #19E, #31A, #48E, #43F, #78A, dan #85E. Di dalam setiap kelompok sampel ini, batuan reservoir A, B, dan C masing-masing diwakili oleh dua sampel yang mempunyai permeabilitas tinggi dan rendah.

Uji sensitivitas air formasi dilakukan pada enam sampel #19I, #31F, #43I, #48I, #79C, dan #85I, dimana masing-masing batuan reservoir dua sampel. Pengujian dilakukan dengan pencampuran air formasi dengan air injeksi secara bertahap mulai dari 50%, 75%, 90%, dan 100% air sungai dengan penyarian. Gambar 3 menunjukkan prosedur uji sensitivitas air formasi.

Pengukuran distribusi ukuran pori batuan dilakukan dengan metode injeksi merkuri (*mercury injection capillary pressure*, MICP). Dengan membandingkan distribusi ukuran partikel yang terkandung di dalam air sungai dengan distribusi ukuran pori batuan dapat diketahui potensi penyumbatan (*plugging*). Analisis petrografi, *Scanning Electron Microscopy* (SEM), *Energy Dispersive X-ray* (EDX), dan *X-ray Diffraction* (XRD) juga dilakukan pada beberapa sampel untuk mendukung investigasi kerusakan formasi yang terjadi.

III. HASIL

Hasil Analisa Air

Hasil analisa air formasi reservoir A, B, dan C yang masing-masing diambil dari sumur D-1, D-2 dan D-3 mempunyai kandungan total *dissolved solid* (TDS) antara 2240 dan 4170 mg/liter dengan kandungan bikarbonat tertinggi yaitu 3142,6 mg/L diperoleh dari reservoir A. Hasil pengukuran konsentrasi TSS sampel air sungai yang diambil pada musim kemarau dan musim hujan masing-masing 34,09 dan 18,5 mg/L. Konsentrasi ini termasuk konsentrasi TSS 'tinggi' (Wilson, 2014 dan Lunn, dkk., 2014) bila dibandingkan dengan batas kualitas air yang baik 8-10 mg/L. Air dengan TSS tinggi bila diinjeksikan ke dalam reservoir dengan

kualitasnya air formasi kurang baik cenderung memberikan indeks *plugging* relatif (RPI) tinggi, yaitu $RPI > 15$. Hasil analisa air selengkapnya disajikan dalam Tabel 2 dan 3.

Hasil perhitungan indeks tendensi terbentuknya *scale* kalsium karbonat dan kalsium sulfat menunjukkan bahwa air sungai memiliki ion kalsium dan ion bikarbonat dengan konsentrasi rendah. Dengan nilai $pH < 7$ diperoleh indeks *scale* kalsium karbonat (CaCO_3) negatif (Tabel 4). Tendensi terbentuknya *scale* kalsium sulfat (CaSO_4) tidak ditemukan pada sampel air sungai. Sedangkan hasil perhitungan pada sintetik air formasi cenderung membentuk *scale* kalsium sulfat yang dijumpai pada suhu 140°F (60°C) dan 175°F (79°C) yang menunjukkan *scale* positif (Tabel 5).

Hasil pengukuran distribusi ukuran partikel yang terkandung dalam sampel air sungai musim kemarau relatif lebih tinggi dibanding air sungai musim hujan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Pada 50% kumulatif distribusi, ukuran partikel sampel air musim kemarau dan hujan masing-masing 8,11 dan 7,33 mikron (μm).

Hasil uji kompatibilitas antara air sungai dan air formasi menunjukkan bahwa air sungai kompatibel dengan air formasi dari reservoir A, B, dan C. Hal ini ditunjukkan oleh hasil analisa kompatibilitas dimana kandungan TSS menurun pada setiap pencampuran air injeksi dengan air formasi, atau dengan kata lain tidak terbentuk endapan baru selama pengujian.

Hasil Analisa Sampel Batuan

Pengukuran distribusi ukuran pori telah dilakukan pada enam sampel, dua sampel mewakili masing-masing lapisan reservoir A, B, dan C. Enam sampel tersebut adalah sampel nomor #23B, #25B, #33B, #43B, #84B, dan #91A. Namun pada proses penyiapan pengukuran, sampel nomor #91A pecah karena tergolong batuan pasir lunak (*unconsolidated sand*). Sehingga pengujian hanya dilakukan terhadap lima sampel.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa sampel permeabilitas tinggi yang diwakili sampel #23B, #33B, dan #84B dengan permeabilitas absolut 981 mD, 1054mD, dan 502 mD sebagian besar mempunyai ukuran diameter pori antara 10 sampai 100 μm , dengan volume sebesar 54,9%, 28,3% dan 36,5% dari total volume pori. Sampel permeabilitas rendah yang diwakili oleh sampel nomor #43B, dan #25B dengan permeabilitas absolut 32,8 mD dan 18,3 mD, bukaan 'leher' pori (pore throat) sebagian besar berdiameter 0,1 sampai 1 μm , menempati volume sekitar 19,8%, dan 35,8% dari total volume pori.