RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik
2026, Vol. 4, No. 3, pp. 386-397
E-ISSN: 3025-9444

Analisis Keandalan Unit *Hydraulic Power Pack* Berbasis *Multi-Fluid Scheduled Oil Sampling*: Studi Kasus *Engine* Perkins 6 Silinder di Industri Migas

Muhammad Mukti Ali [1]✉, Ryan Effendi [2], Yuni Hermawan [3], Gaguk Jatisukamto [4]
(1) Magister Teknik Mesin, Universitas Jember, Jember, Indonesia
(2) Program Studi Teknik Mesin, Universitas Balikpapan, Balikpapan, Indonesia
(3, 4) Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jember, Indonesia

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan unit *Hydraulic Power Pack* berbasis metode *Multi-Fluid Scheduled Oil Sampling* (SOS) melalui evaluasi kondisi oli mesin, oli hidrolik, dan *coolant* radiator pada unit yang menggunakan *engine* Perkins 6 silinder dengan usia operasi lebih dari 10.000 jam selama ±11 tahun tanpa pernah dilakukan *General Overhaul* (GOH). Penelitian dilakukan menggunakan data hasil pengujian laboratorium SOS Trakindo Balikpapan yang meliputi parameter *fuel dilution*, viskositas, *Total Base Number* (TBN), oksidasi, kandungan logam aus, *Particle Quantifier Index* (PQI), tingkat kebersihan ISO 4406, konsentrasi *glycol*, kadar nitrit, pH, dan konduktivitas *coolant*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa oli mesin mengalami degradasi signifikan yang ditandai oleh *fuel dilution* sebesar 11,94%, penurunan viskositas hingga 9,807 cSt, peningkatan oksidasi, serta indikasi keausan komponen internal mesin yang mengarah pada penurunan keandalan sistem pelumasan. Oli hidrolik masih berada dalam kondisi operasional yang dapat diterima dengan viskositas dan kandungan logam aus yang normal, meskipun tingkat kebersihan fluida mencapai ISO Code 20/15 yang menunjukkan adanya kontaminasi partikel pada tahap awal. Sementara itu, *coolant* radiator menunjukkan kondisi fisik dan kimia yang relatif stabil dengan konsentrasi *glycol* 36%, pH 7,4, konduktivitas 2315 µS/cm, serta tidak ditemukan indikasi kontaminasi oli maupun gangguan pada sistem pendingin. Berdasarkan analisis terintegrasi ketiga fluida, mekanisme degradasi dominan terjadi pada sistem pelumasan mesin, sedangkan sistem hidrolik dan pendingin masih mempertahankan fungsi operasionalnya. Penelitian ini menunjukkan bahwa metode *Multi-Fluid Scheduled Oil Sampling* (SOS) efektif digunakan sebagai pendekatan *condition monitoring* dan analisis keandalan pada peralatan industri migas berusia operasi tinggi.

Article history:
Received: 04 June 2026
Revised: 09 July 2026
Accepted: 11 July 2026
Published: 14 July 2026

Kata Kunci :
Hidrolik, Multi-Fluida, Dijadwalkan, Mesin, Sampel Oli

Abstract: *This study aims to analyze the reliability of a Hydraulic Power Pack unit using the Multi-Fluid Scheduled Oil Sampling (SOS) approach by evaluating the condition of engine oil, hydraulic oil, and radiator coolant. The test object is a 6-cylinder Perkins engine with over 10,000 operational hours spanning ±11 years without any history of General Overhaul (GOH). The analysis utilizes laboratory test data from SOS Trakindo Balikpapan, covering parameters such as fuel dilution, viscosity, Total Base Number (TBN), oxidation, wear metals, Particle Quantifier Index (PQI), ISO 4406 cleanliness levels, glycol concentration, nitrite levels, pH, and coolant conductivity. The results indicate that the engine oil has undergone severe degradation, characterized by an extreme fuel dilution of 11.94%, a drastic drop in viscosity to 9.807 cSt, elevated oxidation, and internal wear metal signatures, signaling a decline in lubrication system reliability. Conversely, the hydraulic oil remains within acceptable operational limits despite early-stage particle contamination (ISO Code 20/15). The radiator coolant displays stable physical and chemical properties with 36% glycol concentration, pH 7.4, and a conductivity of 2315 µS/cm, showing no signs of oil cross-contamination. Integrated multi-fluid analysis reveals that the primary degradation mechanism is confined to the engine lubrication system, while the hydraulic and cooling systems maintain operational integrity. This study demonstrates that the Multi-Fluid SOS framework offers a more comprehensive and accurate diagnostic capability for high-operating-hour oil and gas equipment compared to traditional single-fluid monitoring.*

Keyword :
Hydraulic, Multi-Fluid, Scheduled, Engine, Oil Sampling

✉ *Corresponding author:* ***muhammadmukti16@gmail.com***

Copyright © 2026, the author(s)

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.

How to cite: Ali, M. M., Effendi, R., Hermawan, Y., Jatisukamto, G. (2026). Analisis Keandalan Unit Hydraulic Power Pack Berbasis Multi-Fluid Scheduled Oil Sampling: Studi Kasus Engine Perkins 6 Silinder di Industri Migas. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, *4*(3), 386–397. https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.576

PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas (migas) sangat bergantung pada keandalan operasional alat berat dan peralatan mekanis untuk menjaga kelangsungan produksi secara optimal (Sui et al., 2025; Rigolli et al≤ 2025;). Dalam lingkungan operasional yang memiliki beban kerja ekstrem, kegagalan komponen secara tak terduga tidak hanya mengakibatkan waktu henti operasional (*downtime*) yang menelan biaya tinggi, tetapi juga memicu risiko keselamatan dan lingkungan. Oleh karena itu, penerapan strategi pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) melalui program *condition monitoring* menjadi suatu keharusan untuk mendeteksi gejala keausan dan mencegah kerusakan fatal sedini mungkin.

Salah satu metode *condition monitoring* yang paling umum dan efektif diterapkan adalah *Scheduled Oil Sampling* (SOS) atau analisis fluida pelumas secara berkala (Liu et al., 2021). Metode ini memungkinkan teknisi dan peneliti untuk mengidentifikasi tingkat keausan logam, kontaminasi asing, serta degradasi bahan aditif di dalam sistem mekanis. Secara tradisional, berbagai standar pemeliharaan di industri mengandalkan analisis fluida ini untuk memantau kondisi internal komponen dan merencanakan jadwal perawatan tanpa harus melakukan pembongkaran (*teardown*).

Meskipun metode SOS konvensional telah terbukti memberikan manfaat, tinjauan terhadap berbagai literatur menunjukkan adanya *research gap* yang signifikan pada praktik pemantauan tersebut. Mayoritas penelitian terdahulu di bidang *condition monitoring* masih terfokus pada pendekatan pemantauan fluida tunggal (*single-fluid monitoring*), yang pada umumnya hanya memprioritaskan analisis pada oli mesin. Pendekatan parsial ini memiliki keterbatasan yang mendasar dalam mengidentifikasi masalah sistemik pada alat berat yang kompleks, di mana gangguan teknis sering kali tidak hanya bersumber dari satu area operasi mesin saja.

Kelemahan mendasar dari dominasi studi single-fluid monitoring terdahulu adalah ketidakmampuannya dalam mengisolasi bias kegagalan akibat interaksi mekanis lintas sistem. Sebagai contoh, gejala penurunan viskositas atau peningkatan laju oksidasi pada oli mesin sering kali langsung disimpulkan sebagai akibat dari degradasi termal alami atau beban kerja ekstrem. Padahal, anomali tersebut bisa saja dipicu oleh malafungsi eksternal, seperti hilangnya efisiensi perpindahan panas pada sistem pendingin (*cooling system*) atau overload mekanis akibat akumulasi kontaminan pada sistem hidrolik. Tanpa adanya sinkronisasi data dari ketiga fluida kerja ini, diagnosis yang dihasilkan bersifat spekulatif, berisiko memicu kesalahan tindakan korektif (*maintenance error*), dan gagal mengidentifikasi akar masalah (*root cause*) yang bersifat sistemik.

Untuk mengatasi kelemahan dari metode konvensional tersebut, pendekatan pemantauan multi-fluida (*multi-fluid monitoring*) menawarkan keunggulan diagnosis yang jauh lebih komprehensif. Pendekatan ini mengintegrasikan evaluasi terhadap tiga jenis fluida vital secara bersamaan, yaitu oli mesin, oli hidrolik, dan *coolant* (cairan pendingin). Keunggulan utama dari analisis terintegrasi ini adalah kemampuannya dalam mendeteksi kontaminasi silang dan kegagalan berantai, seperti kebocoran cairan pendingin ke dalam sistem pelumasan (*coolant leak*) atau degradasi tekanan hidrolik yang membebani kinerja mesin utama, yang sering kali tidak terdeteksi secara dini apabila pengujian hanya terbatas pada satu jenis fluida.

Penelitian ini bertujuan untuk mengisi celah literatur tersebut dengan memberikan kontribusi ilmiah yang secara eksplisit membedakannya dari praktik SOS konvensional. Kebaruan (*novelty*) dari studi ini terletak pada perumusan analisis korelasi antarsistem operasi (*engine*, *hydraulic*, dan *cooling system*) dalam satu kerangka kerja pemantauan yang tersinkronisasi. Melalui integrasi tiga parameter

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

fluida ini, penelitian tidak sekadar mengukur persentase keausan, melainkan menyajikan identifikasi akar masalah (*root cause analysis*) yang terukur dan menyeluruh untuk peralatan di sektor migas.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada evaluasi efektivitas pendekatan *multi-fluid monitoring* dibandingkan dengan metode pemantauan konvensional. Diharapkan, hasil dari penelitian ini dapat membuktikan secara empiris bahwa integrasi analisis oli mesin, oli hidrolik, dan *coolant* mampu memberikan akurasi yang lebih tinggi dalam memprediksi potensi kegagalan komponen. Pemahaman teknis ini pada akhirnya dapat dijadikan sebagai landasan bagi industri migas untuk mengoptimalkan strategi *maintenance*, menekan angka *downtime*, dan memperpanjang usia pakai peralatan.

METODE PENELITIAN

Unit *Hydraulic Power Pack*

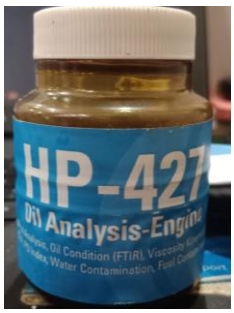
Objek penelitian ini adalah unit *Hydraulic Power Pack* yang digunakan pada operasi industri migas dengan spesifikasi sebagai berikut: *Engine* Perkins 6 Silinder (*inline diesel engine*); S/N *Engine*: **YA51063*U959655Y***; Tipe mesin diesel 4 langkah (*four-stroke diesel engine*); Sistem pendingin radiator (*liquid cooled system*); Aplikasi: *Hydraulic Power Pack* industri migas; *Running hours* >10.000 jam; Umur operasi ±11 tahun; Belum pernah *General Overhaul* (GOH).

Gambar 1. Unit *Hydraulic Power Pack Engine* Perkins

Metode Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel oli dilakukan dalam kondisi terkontrol untuk memastikan akurasi dan representatif data laboratorium

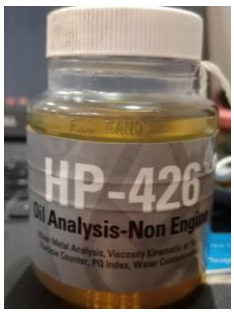
Pengambilan Sampel Oli mesin: Oli mesin: Pertamina SAE 15W-40; Viskositas awal: ±12–14 cSt; *Sampling* melalui *oil* pan (±100 mL oli awal dibuang untuk menghilangkan kontaminan stagnan); Suhu oli mesin pada rentang 25–35°C; Menggunakan botol SOS *Engine* HP-427



Gambar 2. Sampel Oli Mesin SOS *Engine* (HP-427)

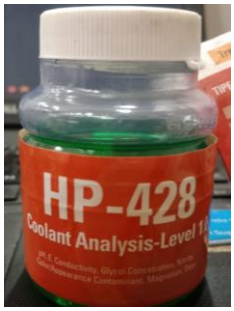
Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Pengambilan Sampel Oli Hidrolik: Oli hidrolik: Pertamina Turalik 52 ISO VG 68; *Sampling* melalui *port connection hydraulic valve* saat unit beroperasi normal; Menggunakan botol SOS *Non-Engine* HP-426.



Gambar 3. Sampel Oli Hidrolik SOS *Non-Engine* (HP-426)

Pengambilan Sampel *Coolant*: *Coolant* berbasis *glycol* produksi Pertamina; *Sampling* melalui *lower tank* radiator; Menggunakan botol SOS *Coolant* HP-428



Gambar 4. Sampel *Coolant* Radiator SOS *Coolant* (HP-428)

Interval dan Prosedur *Sampling*: *Sampling* dilakukan setiap ±500 *running hours*; Unit dalam kondisi operasi normal; Dilakukan *cleaning port*, *flushing* awal, dan pencegahan kontaminasi silang

Analisis Laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan di Laboratorium *Scheduled Oil Sampling* (SOS) Trakindo, Balikpapan, Kalimantan Timur.

Analisis Oli mesin: Persentase *fuel dilution* menggunakan spektroskopi inframerah; Kadar air (*water content*); Viskositas kinematik pada 40°C dan 100°C berdasarkan ASTM D445; *Total Base Number* (TBN) berdasarkan ASTM D2896; *Total Acid Number* (TAN) berdasarkan ASTM D974; Analisis oksidasi dan nitrasi menggunakan *Rotating Pressure Vessel Oxidation Test* (ASTM D2272); Pengukuran *Particle Quantifier Index* (PQI)

Analisis Oli Hidrolik: Analisis tingkat kebersihan berdasarkan standar ISO 4406; Penghitungan partikel pada ukuran 4 µm, 6 µm, dan 14 µm; Analisis oksidasi berdasarkan ASTM D6971 atau ASTM D2272; Pengukuran viskositas pada 100°C; Analisis unsur logam aus menggunakan spektrometri ICP (ASTM D5185); Pengukuran *Particle Quantifier Index* (PQI); Analisis kandungan air (*water content*)

Analisis *Coolant*: Konsentrasi *glycol*; Kadar nitrit (NO_2^-); Pengukuran pH; Pengukuran konduktivitas listrik (µS/cm); Analisis unsur inhibitor (boron dan silikat) menggunakan metode ICP atau titrasi; Inspeksi visual warna dan kejernihan *coolant*; Inspeksi indikasi fouling

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Desain Penelitian dan Alur Analisis Data

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus deskriptif-analitis dengan pendekatan kuantitatif berbasis eksperimen laboratorium longitudinal. Teknik analisis data dilakukan secara sistematis melalui tiga tahapan utama: (1) Evaluasi Batas Kritis (*Threshold Analysis*), yaitu membandingkan hasil uji laboratorium masing-masing fluida dengan standar teknis industri (ASTM, ISO 4406) dan limit rekomendasi OEM; (2) Analisis Korelasi Lintas Fluida (*Cross-Fluid Diagnostic*), yaitu memetakan hubungan kausalitas antar-parameter (misalnya, menguji apakah degradasi oli mesin berkorelasi dengan kondisi kimiawi *coolant* untuk mendeteksi leak); dan (3) Penilaian Risiko Keandalan (*Reliability Assessment*), untuk menentukan status kelaikan operasional unit (*Normal*, *Alert*, *atau Critical*) serta merumuskan rekomendasi tindakan prediktif.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Oli Mesin

Hasil Awal Pengujian (Oli Mesin): *Fuel dilution*: 11,94% dari volume oli; Kandungan air (*water*): tidak terdeteksi (*trace*); Viskositas pada 100°C: 9,807 cSt; *Total Base Number* (TBN): 7,2 mgKOH/g; *Particle Quantifier Index* (PQI): 8 (skala 0–10).

WEAR METAL/CONTAMINANT/ADDITIVES		
ELEMENTS (ppm)		
Cr	Chromium	1
Pb	Lead	0
Fe	Iron	37
Cu	Copper	8
Al	Aluminum	2
Sn	Tin	0
Ni	Nickel	0
B	Boron	44
K	Potassium	0
Na	Sodium	4
Si	Silicon	2
Ca	Calcium	1995
P	Phosphorus	880
Zn	Zinc	1071
Mg	Magnesium	627
Mo	Molybdenum	26

Gambar 5. *Metal Contaiminant Oil Engine Condition Test*

OIL CONDITION AND PHYSICAL/CHEMICAL TEST		
OIL CONDITION (JOAP)		
ST	Soot	0
OXI	Oxidation	38
NIT	Nitration	10
SUL	Sulfate By-Produc	30
FUEL CONTAMINATION		
F	Fuel	P
FUEL CONTENT (%)		
PFc	Percent Fuel	11.942
VISCOSITY AT 100°C (Centistokes)		
V100	Viscosity at 100 C	9.807
TOTAL BASE NUMBER (mg KOH/ g)		
TBN	Total Base Numbe	7.2
WATER CONTAMINATION		
W	Water	T
PARTICLE QUANTIFIER INDEX		
PQI	PQ Index	8

Gambar 6. *Chemical Contaiminant Oil Engine Condition Test*

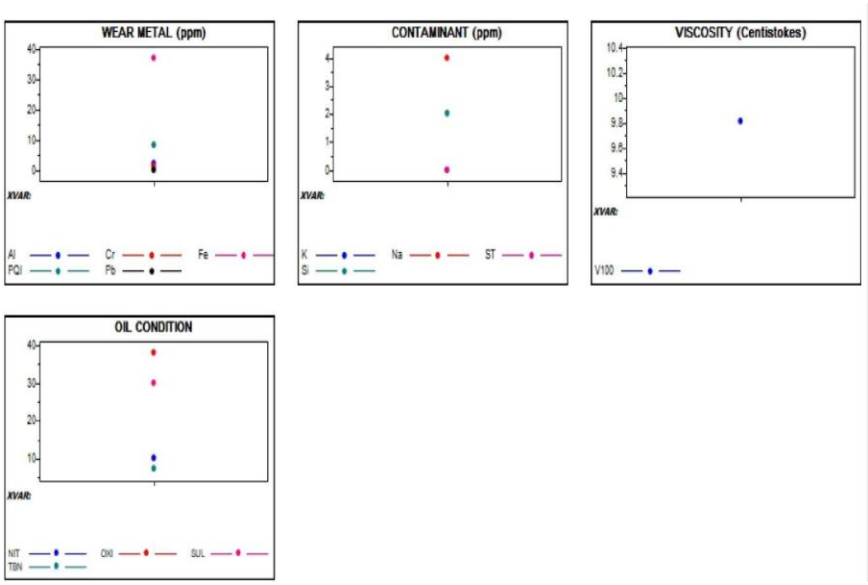
Analisis oli mesin menunjukkan adanya perilaku degradasi yang signifikan akibat operasi jangka panjang tanpa *overhaul*. Parameter paling dominan adalah *fuel dilution* sebesar 11,94%, yang jauh melebihi batas normal yang diperbolehkan (<1%). Tingginya kontaminasi bahan bakar tersebut mengindikasikan terjadinya pengenceran serius pada oli pelumas, sehingga menyebabkan penurunan viskositas secara drastis dari sekitar 15,2 cSt menjadi 9,8 cSt. Penurunan viskositas ini mengganggu pembentukan lapisan pelumasan hidrodinamis (*hydrodynamic lubrication film*), sehingga meningkatkan kontak antar logam (*metal-to-metal contact*) dan mempercepat proses keausan komponen internal mesin.

Tingkat oksidasi juga dilaporkan berada pada kondisi tinggi secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa oli mengalami paparan suhu operasi tinggi dalam jangka waktu lama serta kemungkinan adanya efek katalitik yang berasal dari logam keausan (*wear metals*). Proses oksidasi menyebabkan terjadinya degradasi kimia pada molekul oli, pembentukan deposit *varnish*, serta penurunan performa sistem pelumasan.

Nilai Total Base Number (TBN) mengalami penurunan hingga sekitar 6 mgKOH/g, yang mengindikasikan berkurangnya kandungan aditif alkalin yang berfungsi untuk menetralisir senyawa

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

asam hasil proses pembakaran. Kondisi ini menunjukkan bahwa oli telah kehilangan sebagian besar kemampuan proteksinya terhadap komponen internal mesin. Analisis logam keausan menunjukkan adanya peningkatan kandungan besi (Fe ≈ 37 ppm) yang berkaitan dengan keausan komponen internal seperti *cylinder liner* dan *piston ring*. Meskipun peningkatan tersebut masih tergolong moderat, keberadaannya yang disertai dengan tingginya *fuel dilution* dan oksidasi mengindikasikan terjadinya percepatan proses keausan. Kondisi oli mesin secara keseluruhan mencerminkan tingkat degradasi yang cukup berat serta penurunan keandalan pada sistem pelumasan mesin.



Gambar 7. Grafik *Contaiminant Oil Engine Condition*

Analisis Oli Hidrolik

Hasil Awal Pengujian (*Hydraulic Oil*): ISO *Cleanliness Code*: 20/15; Tingkat oksidasi (JOAP test): 4 mgs O_2/kg (rendah); Viskositas pada 100°C: 8,581 cSt; Kandungan air (*water*): tidak terdeteksi; *Particle Quantifier Index* (PQI): 0 (tidak terdapat partikel *ferrous* signifikan)

Logam keausan (*wear metals*, ICP ppm): Fe = 5 ppm; Cu = 3 ppm; Al = 0 ppm; Sn = 0 ppm; Cr = 1 ppm; Parameter lain berada pada level jejak normal (*normal trace level*)

Unsur aditif (*additive elements*): Ca = 51 ppm; P = 369 ppm; Zn = 481 ppm; Mg = 31 ppm; Menunjukkan karakteristik aditif *anti-wear* (*AW additives*) dalam kondisi normal.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

WEAR METAL/CONTAMINANT/ADDITIVES		
ELEMENTS (ppm)		
Cr	Chromium	1
Pb	Lead	0
Fe	Iron	5
Cu	Copper	3
Al	Aluminum	0
Sn	Tin	0
Ni	Nickel	0
B	Boron	1
K	Potassium	0
Na	Sodium	0
Si	Silicon	0
Ca	Calcium	51
P	Phosphorus	369
Zn	Zinc	481
Mg	Magnesium	31
Mo	Molybdenum	1

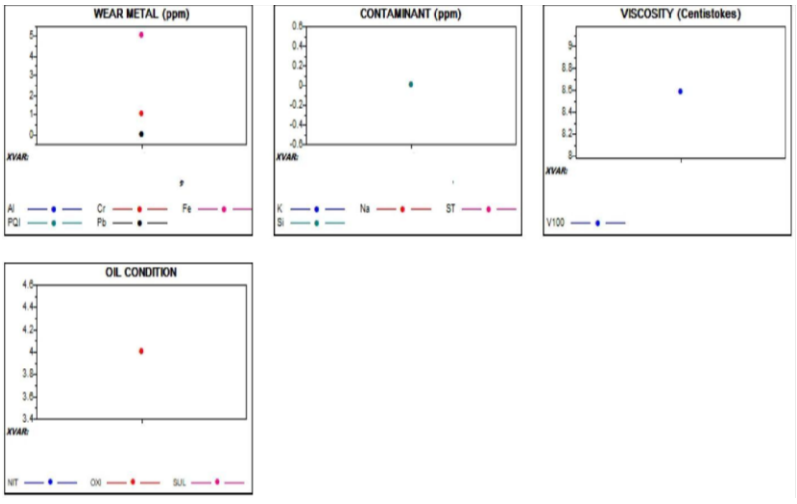
Gambar 8. *Metal Contaiminant Oil Hydraulic Condition Test*

WEAR METAL/CONTAMINANT/ADDITIVES		
OIL CONDITION (JOAP)		
OXI	Oxidation	4
VISCOSITY AT 100°C (Centistokes)		
V100	Viscosity at 100 C	8.581
WATER CONTAMINATION		
W	Water	N
PARTICLE QUANTIFIER INDEX		
PQI	PQ Index	0
PARTICLE COUNT (Count/mL)		
6µ	6µ	5613
14µ	14µ	271
ISO6	ISO6	20
ISO14	ISO14	15

Gambar 9. Chemical Contaiminant Oil Hydraulic Condition Test

Temuan utama pada hasil pengujian adalah meningkatnya nilai ISO *cleanliness code* hingga sekitar 20/15, yang sedikit berada di atas batas rekomendasi sebesar 18/15. Peningkatan ini menunjukkan adanya konsentrasi partikel kontaminan yang lebih tinggi, yang kemungkinan berasal dari kontaminasi eksternal (*external ingress*) maupun proses keausan internal komponen sistem hidrolik. Meskipun tingkat kontaminasi tersebut belum tergolong kritis, kondisi ini menunjukkan adanya deviasi dari kondisi operasi optimal.

Nilai viskositas masih berada dalam rentang yang dapat diterima, serta tidak ditemukan adanya kandungan air maupun kontaminasi bahan bakar dalam jumlah signifikan. Kandungan logam keausan (*wear metals*) juga masih berada pada batas normal, yang mengindikasikan bahwa komponen utama sistem hidrolik masih bekerja dalam kondisi yang cukup baik. Sistem hidrolik menunjukkan indikasi kontaminasi tahap awal (*early-stage contamination*), namun secara keseluruhan masih mempertahankan integritas dan keandalan operasional sistem.



Gambar 10. Grafik *Contaiminant Oil Hydraulic Condition*

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

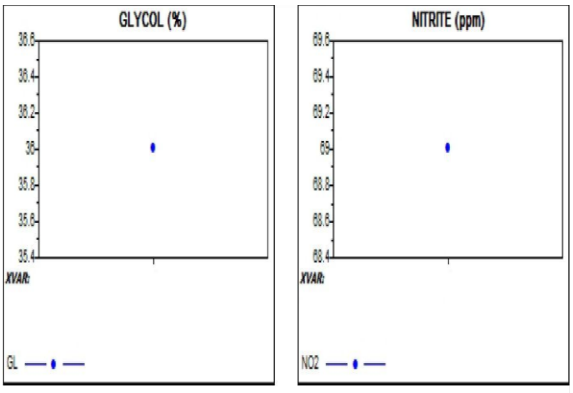
Analisis *Coolant* Radiator

Hasil Awal Pengujian (*Coolant*): Kadar nitrit (Nitrite / NO_2^-): 69 ppm; Konsentrasi *glycol*: 36%; pH: 7,4; Konduktivitas: 2315 µS/cm; Warna/Tampilan: jernih berwarna hijau, tanpa indikasi kontaminasi oli maupun pembentukan busa (foam).

WEAR METAL/CONTAMINANT/ADDITIVES		
NITRITE (ppm)		
NO2	Nitrite	69
GLYCOL (%)		
GL	Glycol (%)	36
pH		
pH	pH	7.4
CONDUCTIVITY (µS/cm)		
CON	Conductivity	2315

Gambar 11. *Chemical Contaiminant Radiator Coolant Condition Test*

Analisis *coolant* menunjukkan bahwa sifat kimia dan fisik fluida pendingin masih berada dalam kondisi stabil. Konsentrasi *glycol* masih berada pada rentang yang direkomendasikan, sehingga kemampuan perpindahan panas (*heat transfer capability*) dan perlindungan terhadap pembekuan (*freeze protection*) masih dapat bekerja secara optimal. Nilai pH berada pada rentang netral hingga sedikit basa (*slightly alkaline*), yang menunjukkan bahwa sistem pendingin masih memiliki kemampuan proteksi korosi yang efektif. Tidak ditemukan adanya kontaminasi oli pada *coolant*, sehingga mengindikasikan bahwa tidak terjadi kebocoran antara sistem pelumasan dan sistem pendingin mesin.



Gambar 12. Grafik *Contaiminant* Radiator *Coolant Condition*

Hasil pengujian tersebut menunjukkan bahwa sistem pendingin (*cooling system*) masih berfungsi dengan baik dan tidak memberikan kontribusi terhadap degradasi yang terjadi pada oli mesin.

Komparasi Hasil Pengujian dengan Standar Teknis dan Literatur Terdahulu

Tingkat fuel dilution sebesar 11,94% yang ditemukan pada oli mesin merupakan anomali yang sangat kritis apabila disandingkan dengan standar teknis industri dan rekomendasi *Original Equipment Manufacturer* (OEM). Pada umumnya, batasan toleransi maksimal untuk kontaminasi bahan bakar pada oli mesin diesel alat berat mengacu pada *standard Caterpillar Guidelines* dan ASTM D5967, yaitu berada pada rentang maksimal 4%. Kontaminasi yang melampaui batas kritis ini memicu fenomena tribologis

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

yang sangat merugikan, di mana pengenceran ekstrem secara drastis mengeliminasi kekuatan lapisan pelumasan hidrodinamik (*hydrodynamic lubrication film strength*). Kondisi ini terkonfirmasi oleh temuan Kaminski (2022) dan Sagin et al. (2022) yang menyatakan bahwa penurunan viskositas kinematik akibat fuel dilution di atas 10% akan merusak struktur molekul pelumas secara permanen, mempercepat metal-to-metal contact, dan memicu gesekan kering (dry friction) yang masif pada komponen crankshaft serta cylinder liner.

Pada sistem hidrolik, nilai ISO *Cleanliness Code* yang mencapai 20/15 perlu dievaluasi menggunakan standar kebersihan fluida internasional, seperti ISO 4406. Batas aman yang umumnya direkomendasikan untuk sistem hidrolik bertekanan tinggi adalah 18/15 atau lebih rendah. Peningkatan dua tingkat kode pada partikel berukuran >4 mikron (dari 18 ke 20) mengindikasikan bahwa jumlah partikel kontaminan telah berlipat ganda secara signifikan. Dalam konteks *predictive maintenance*, keberadaan partikel mikroskopis ini sangat berpotensi memicu *abrasive wear* pada celah toleransi yang sangat ketat di dalam *hydraulic pump* dan *servo valve*, meskipun pembacaan logam keausan (*wear metals*) melalui ICP saat ini masih terlihat normal (Novak et al., 2023; Wang et al., 2025; Guo et al., 2020).

Keunggulan pendekatan *multi-fluid monitoring* terlihat sangat jelas dalam memetakan letak kerusakan secara spesifik jika dibandingkan dengan studi terdahulu yang hanya menggunakan *single-fluid monitoring*. Apabila analisis hanya dilakukan pada oli mesin, tingginya tingkat oksidasi dan penurunan TBN mungkin akan diinterpretasikan secara keliru sebagai akibat dari kebocoran cairan pendingin (*coolant leak*) ke dalam ruang bakar. Namun, integrasi data dari analisis *coolant* yang menunjukkan stabilitas pH, level glikol (36%), dan absennya jejak oli memberikan bukti kuat untuk menyingkirkan hipotesis kebocoran sistem pendingin. Diagnosa silang ini mengarahkan fokus investigasi pemeliharaan secara presisi pada sistem injeksi bahan bakar (*fuel injection system*) sebagai akar masalah, sehingga memvalidasi efektivitas kerangka kerja *condition monitoring* yang komprehensif.

Analisis Terintegrasi

Beberapa titik risiko utama yang teridentifikasi meliputi :

Sistem Mesin

Tingginya *fuel dilution* menyebabkan penurunan kemampuan pembentukan lapisan pelumasan (*lubrication film strength*). Nilai viskositas mengalami penurunan sekitar 30% dibandingkan kondisi oli baru, sedangkan nilai TBN menunjukkan penurunan kapasitas proteksi aditif alkalin. Nilai PQI juga mengindikasikan adanya partikel logam hasil keausan internal.

Sistem Hidrolik:

Nilai ISO *cleanliness code* sebesar 20/15 berada di atas target ≤18/15, yang mengindikasikan adanya peningkatan partikel kontaminan. Partikel tersebut berpotensi menyebabkan *micro-wear* pada komponen hidrolik seperti *valve* dan *hydraulic pump*.

Sistem Pendingin

Konsentrasi *glycol* dan kondisi kimia *coolant* masih berada pada rentang operasional yang dapat diterima. Tidak ditemukan indikasi kontaminasi oli maupun degradasi signifikan pada sistem pendingin.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mekanisme degradasi dominan terjadi pada sistem pelumasan mesin yang ditandai oleh tingginya *fuel dilution*, penurunan viskositas, dan indikasi keausan internal, sehingga menjadi faktor utama penurunan keandalan unit *Hydraulic Power Pack*. Sistem hidrolik masih berada pada tingkat risiko moderat akibat peningkatan kontaminasi partikel, sedangkan sistem pendingin menunjukkan kondisi yang relatif stabil. Temuan ini menegaskan bahwa analisis fluida kerja (*fluid analysis*) melalui metode *Scheduled Oil Sampling* (SOS) dapat digunakan sebagai indikator

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

yang efektif dalam evaluasi keandalan (*reliability assessment*) peralatan industri *Migas*, *khususnya pada unit dengan jam operasi tinggi dan tanpa riwayat General Overhaul (GOH).*

KESIMPULAN

Metode Multi-Fluid *Scheduled Oil Sampling* (SOS) terbukti mampu memberikan evaluasi keandalan yang komprehensif terhadap kondisi unit *Hydraulic Power Pack* melalui analisis terintegrasi oli mesin, oli hidrolik, dan coolant radiator tanpa memerlukan pembongkaran komponen, *Sampling* oli mesin menunjukkan *fuel dilution* sebesar 11,94%, penurunan viskositas, dan peningkatan oksidasi yang mengindikasikan terjadinya degradasi berat pada sistem pelumasan engine, *Sampling* oli hidrolik menunjukkan nilai ISO *Cleanliness Code* sebesar 20/15 yang mengindikasikan adanya peningkatan kontaminasi partikel, *Sampling coolant* menunjukkan konsentrasi glycol, nilai pH, dan karakteristik visual yang masih berada dalam rentang normal, Studi kasus pada unit *Hydraulic Power Pack* dengan usia operasi lebih dari 10.000 *running hours* tanpa riwayat *General Overhaul* (GOH) menunjukkan bahwa pendekatan *condition-based reliability assessment* berbasis analisis fluida lebih representatif dalam menggambarkan kesehatan peralatan dibandingkan evaluasi yang hanya didasarkan pada umur operasi atau *running hours*.

Penelitian ini memberikan implikasi teoritis berupa penguatan model predictive maintenance, yang membuktikan bahwa integrasi parameter multi-fluida secara simultan mampu meminimalisir bias diagnosis (*false alarm*) dibandingkan metode single-fluid konvensional. Secara implikasi praktis, industri migas dapat mengadopsi kerangka kerja *Multi-Fluid* SOS ini sebagai SOP baru untuk menekan biaya *General Overhaul* (GOH) pada unit kritikal berjam operasi tinggi melalui deteksi dini sebelum breakdown terjadi. Namun, keterbatasan penelitian ini terletak pada penggunaan subjek tunggal (*single case study*) pada satu unit HPP Perkins, sehingga dinamika fluktuasi data belum dapat digeneralisasi untuk populasi alat berat yang lebih luas. Oleh karena itu, rekomendasi penelitian lanjutan adalah menerapkan metode ini pada skala populasi armada yang lebih besar (*fleet analysis*) serta mengintegrasikannya dengan sensor in-situ real-time guna membangun algoritma machine learning untuk prediksi sisa usia pakai (*Remaining Useful Life/RUL*) komponen secara otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

Adianus, Misbachudin, & Sabitah, A. (2025). Pengaruh jenis pendingin dan penambahan kipas pada radiator terhadap suhu kerja mesin Yamaha Aerox. *Journal of Mechanical Engineering MANOMETER*, *1*(1), 40–49.

Aditya, B., Apriana, A., & Almahdi, A. (2023). Preventive maintenance sistem pelumasan pada mesin diesel penggerak utama untuk menunjang kinerja kapal X. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 947-953.

Agocs, A., Nagy, A. L., Tabakov, Z., Perger, J., Rohde-Brandenburger, J., Schandl, M., Besser, C., & Dörr, N. (2021). Comprehensive assessment of oil degradation patterns in petrol and diesel engines observed in a field test with passenger cars. *Tribology International*, *161*, Article 107079. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107079

Christy, N. A., Pranoto, H., & Faturrahman, I. A. (2022). Analysis of 3516 B engine damage on a 793 C truck based on oil using laboratory test schedule oil Sampling (SOS) wear data with failure mode effect analysis method (FMEA). *International Journal of Advanced Technology in Mechanical, Mechatronics and Materials (IJATEC)*, *2*(2), 85-96.

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Chybowski, L. (2023). Study of the relationship between the level of lubricating oil contamination with distillation fuel and the risk of explosion in the crankcase of a marine trunk type engine. *Energies*, *16*(2), 683. https://doi.org/10.3390/en16020683

Debnath, V., Attar, H. M., Nadimi, E., & Wu, D. (2026). Performance, emissions, and lubricant oil analysis of a marine diesel engine powered by raw Schizochytrium sp. and its blends. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *20*(1), 136-154. https://doi.org/10.1002/bbb.70058

Dumatubun, H., & Amir, A. (2021). Pengaruh kerusakan precleaner terhadap sistem pelumasan pada excavator CAT type 349 PT. Trakindo Utama. *Jurnal Teknik AMATA*, *2*(2), 22-29.

Guo, R., Li, Y., Shi, Y., Li, H., Zhao, J., & Gao, D. (2020). Research on identification method of wear degradation of external gear pump based on flow field analysis. *Sensors*, *20*(14), 4058. https://doi.org/10.3390/s20144058

Hidayat, R., Santoso, B., & Nugraha, A. (2024). Analisis pengaruh kontaminasi bahan bakar terhadap laju oksidasi dan degradasi termal pelumas mesin diesel. *Jurnal Rekayasa Mesin*, *15*(1), 45-56.

Ikhwanuddin, Jatmiko, M. A., Irwan, A. N. F., Hidayah, F., & Marbun, J. (2025). Inovasi sistem electronic nose untuk monitoring kualitas oli dan deteksi dini kerusakan ring piston pada mesin kapal nelayan (Studi kasus: Kampung Nelayan Desa Kronjo). *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, *4*(4), 735-748. https://doi.org/10.55123/insologi.v4i4.5700

Kaminski, P. (2022). Experimental investigation into the effects of fuel dilution on the change in chemical properties of lubricating oil used in fuel injection pump of Pielstick PA4 V185 marine diesel engine. *Lubricants*, *10*(7), 162. https://doi.org/10.3390/lubricants10070162

Kurniawan, A., Budiyono, S., & Lestari, D. (2023). Identifikasi keausan silinder liner dan ring piston melalui analisis elemen logam Fe dan Cr pada oli bekas. *Jurnal Teknik Otomotif*, *11*(2), 112-121.

Liu, Z., Liu, Y., Zuo, H., Wang, H., & Fei, H. (2021). A lubricating oil condition monitoring system based on wear particle kinematic analysis in microfluid for intelligent aeroengine. *Micromachines*, *12*(7), 748. https://doi.org/10.3390/mi12070748

Novak, N., Trajkovski, A., Kalin, M., & Majdič, F. (2023). Degradation of hydraulic system due to wear particles or medium test dust. *Applied Sciences*, *13*(13), 7777. https://doi.org/10.3390/app13137777

Raposo, H., Farinha, J. T., Fonseca, I., & Galar, D. (2019). Predicting condition based on oil analysis - A case study. *Tribology International*, *135*, 342-353. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.01.041

Rigolli, D., Pompei, L., Manfredini, M., Vignoli, M., La Battaglia, V., & Giorgetti, A. (2025). The development of a predictive maintenance system for gearboxes through a statistical diagnostic analysis of lubricating oil and artificial intelligence. *Machines*, *13*(8), 693. https://doi.org/10.3390/machines13080693

Sagin, S., Madey, V., Sagin, A., Stoliaryk, T., Fomin, O., & Kučera, P. (2022). Ensuring reliable and safe operation of trunk diesel engines of marine transport vessels. *Journal of Marine Science and Engineering*, *10*(10), 1373. https://doi.org/10.3390/jmse10101373

Saputra, E., Faisal, M., & Kusuma, W. (2024). Real-time in-situ monitoring of lubricant degradation using gas sensor array. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, *73*, 1-10. https://doi.org/10.1109/TIM.2024.3354321

Sitanggang, H., Siahaan, E. W. B., & Sidabutar, R. A. (2024). Pengaruh variasi konsentrasi coolant dengan air mineral terhadap penurunan suhu cairan pada radiator motor bensin 1500 CC. *Juitech*.

Sui, X., Lu, X., Ji, Y., Yang, Y., Peng, J., Li, M., & Han, G. (2025). Intelligent oil production management system based on artificial intelligence technology. *Processes*, *13*(1), 133. https://doi.org/10.3390/pr13010133

Trajkovski, A., Novak, N., Kalin, M., & Majdič, F. (2023). Wear of hydraulic pump with real particles and medium test dust. *Wear*, *532–533*, 205101. https://doi.org/10.1016/j.wear.2023.205101

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.

Wang, T., Liu, S., Guo, Z., & Lu, Y. (2025). Influence of vibration on servo valve performance and vibration suppression in electro-hydraulic shaking table. *Machines*, *13*(10), 913. https://doi.org/10.3390/machines13100913

Copyright © 2026, the author(s). This is an open access article under the CC-BY-SA License.