Jurnal Ilmiah jurutera
Journal of Applied Engineering
ISSN 2356-5438

Analysis of Hydraulic Oil Replacement Intervals and Operating Temperature for Enhancing Hydraulic System Performance in Komatsu Excavator PC2000-11

Chandra Ajik Prakoso[1], Muhamad Safi'i[2*], Althesa Androva[3]

[1,2,3] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia Semarang, Semarang 50232, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat Artikel:
Dikirim 08 Juni 2026
Direvisi dari 17 Juni 2026
Diterima 24 Juni 2026
Dipublikasi 30 Juni 2026

***Keywoard's*:**
hydraulic oil,
oil analysis,
oil replacement interval,
operating temperature,
hydraulic system performance

DOI:
doi.org/10.55377/jurutera.v13i01.14494

A B S T R A K

Kinerja sistem hidrolik pada alat berat dipengaruhi oleh kondisi oli hidrolik, terutama interval penggantian oli dan temperatur operasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kedua faktor tersebut terhadap performa sistem hidrolik excavator Komatsu PC2000-11. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimen melalui analisis oli dan pemantauan temperatur operasi pada interval kerja 12.983; 13.473; 13.980; dan 14.260 jam. Sampel oli dianalisis menggunakan metode Oil Spectrometric Analysis (OSA) dengan parameter viskositas, Total Acid Number (TAN), dan kandungan logam keausan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kandungan logam besi (Fe) dari 3 ppm menjadi 31,3 ppm seiring bertambahnya jam operasi, yang mengindikasikan terjadinya keausan pada komponen. Temperatur operasi sistem berada pada rentang 70–80°C, dengan suhu maksimum mencapai 95°C, yang dapat mempercepat degradasi oli melalui perubahan viskositas dan peningkatan oksidasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa interval penggantian oli dan temperatur operasi berpengaruh signifikan terhadap degradasi oli dan performa sistem hidrolik. Oleh karena itu, pemantauan kondisi oli secara berkala diperlukan untuk menentukan interval penggantian oli yang optimal serta menjaga efisiensi sistem hidrolik.

A B S T R A C T

The performance of hydraulic systems in heavy equipment is influenced by hydraulic oil condition, particularly oil replacement intervals and operating temperature. This study aims to analyse the effect of these factors on the hydraulic system performance of a Komatsu PC2000-11 excavator. The research employed an experimental approach through oil analysis and operating temperature monitoring at intervals of 12,983; 13,473; 13,980; and 14,260 operating hours. Oil samples were analysed using the Oil Spectrometric Analysis (OSA) method with parameters including viscosity, Total Acid Number (TAN), and wear metal content. The results showed that iron (Fe) wear metal concentration increased from 3 ppm to 31.3 ppm as operating hours increased, indicating progressive component wear. The hydraulic system operated within a temperature range of 70–80°C, with a maximum temperature of 95°C, accelerating oil degradation through viscosity changes and oxidation. The study concludes that oil replacement intervals and operating temperature significantly affect oil degradation and hydraulic system performance. Therefore, periodic oil condition monitoring is necessary to determine optimal oil replacement intervals and maintain hydraulic system efficiency.

© 2026 Jurnal Ilmiah JURUTERA. Di kelola oleh Fakultas Teknik. Hak Cipta Dilindungi.

E-mail Coresponden : muhamadsafii@upgris.ac.id
© 2026 ISSN. 2356-5438. Fakultas Teknik Universitas Samudra

1. Pendahuluan

Pada alat berat seperti *excavator* berkapasitas besar tipe Komatsu PC2000-11, sistem hidrolik memegang peranan sentral dengan memanfaatkan fluida bertekanan untuk menyalurkan energi ke aktuator mekanis. Di samping fungsinya sebagai penyalur daya, oli hidrolik turut berperan sebagai pelumas, pendingin, serta media transfer panas yang secara langsung memengaruhi efisiensi energi, kestabilan operasional, dan keandalan sistem secara menyeluruh [1]–[5]. Dengan demikian, pemeliharaan kualitas dan kondisi oli hidrolik menjadi keharusan untuk mempertahankan performa sistem pada tingkat optimal [6,7]. Dalam kondisi standar, *Operation and Maintenance Manual (OMM)* yang dikeluarkan oleh Komatsu menetapkan batas waktu penggantian oli hidrolik hingga 4.000 jam operasi [8]. Akan tetapi, dalam praktik di lapangan pertambangan, rentang waktu tersebut kerap diperpanjang dengan alasan efisiensi biaya dan untuk meminimalkan waktu henti alat [8],[9]. Kondisi semacam ini berpotensi memicu degradasi oli yang ditandai oleh penurunan viskositas, kenaikan *Total Acid Number (TAN)*, serta penumpukan kontaminan dan partikel logam sisa keausan, yang pada akhirnya berdampak pada melemahnya kinerja sistem hidrolik dan mempercepat laju kerusakan komponen [10],[11].

Selain persoalan interval penggantian oli, temperatur operasional juga merupakan variabel kritis yang turut memengaruhi kinerja sistem hidrolik. Kenaikan suhu yang dipicu oleh beban kerja berlebih, gesekan internal, dan kompresi fluida dapat mempercepat proses oksidasi, merusak stabilitas viskositas, serta mempercepat penguraian aditif yang terkandung dalam oli [12,13]. Temperatur yang terlalu tinggi tidak hanya mengurangi kapasitas pelumasan dan pendinginan, tetapi juga melemahkan stabilitas fluida sehingga mempercepat degradasi oli secara keseluruhan dan menurunkan efisiensi sistem [14],[7]. Strategi perawatan berbasis waktu *(time-based maintenance)* memang menawarkan kemudahan dalam aspek penjadwalan, namun pendekatan ini tidak memperhitungkan kondisi operasi aktual seperti fluktuasi beban kerja dan variasi temperatur. Akibatnya, penggantian oli bisa terjadi lebih awal dari yang dibutuhkan sehingga membengkakkan biaya perawatan, atau justru terlambat sehingga meningkatkan risiko kerusakan komponen [15],[16]. Sebagai solusi alternatif, pendekatan *condition based maintenance (CBM)* melalui analisis oli memungkinkan penilaian kondisi oli secara langsung berdasarkan sejumlah parameter, antara lain viskositas, TAN, kandungan logam keausan, serta tingkat kontaminasi partikel dan kadar air [6],[17],[18].

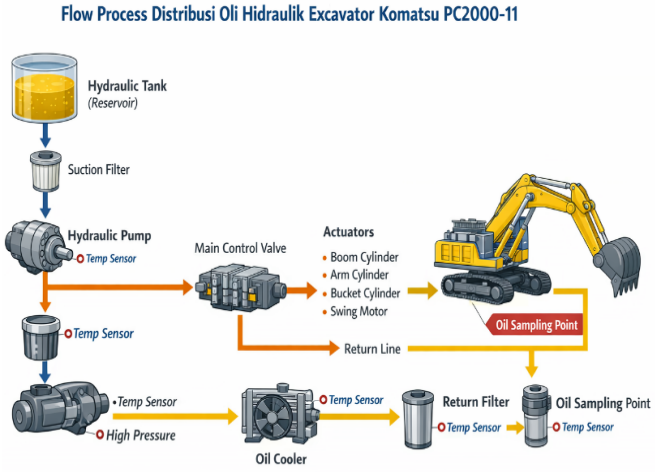
Kajian mengenai perencanaan perawatan *preventif* dan korektif pada sistem hidrolik *excavator* Komatsu PC2000-8 pernah dilakukan dengan memvariasikan interval waktu perawatan, yaitu 60 jam, 250 jam, dan 2.500 jam. Hasilnya menunjukkan bahwa perawatan preventif dengan interval 60 jam memberikan hasil terbaik dalam memperpanjang umur pakai komponen sistem hidrolik sesuai dengan batas *lifetime*-nya [19]. Penelitian lain mengkaji degradasi oli hidrolik dan karakteristik keausan pada alat berat melalui pendekatan eksperimental dengan memvariasikan viskositas oli SAE 32 dan SAE 46 terhadap efisiensi kerja sistem hidrolik. Hasil pengujian menunjukkan bahwa oli SAE 32 menghasilkan efisiensi sebesar 70%, sedangkan oli SAE 46 menghasilkan efisiensi sebesar 81% [16]. Studi tentang *predictive maintenance* dan *proactive maintenance* pada sistem hidrolik juga telah dilakukan dengan mempertimbangkan durasi *downtime*. Temuan penelitian tersebut mengungkapkan bahwa pendekatan *proactive maintenance* memberikan performa terbaik dengan nilai *downtime* mencapai 12.000 jam, sekaligus membuktikan bahwa metode ini layak diterapkan secara praktis di lapangan [17]. Pemantauan *multi-fault* pada sistem hidrolik juga dilakukan untuk mengukur tingkat efektivitas sistem. Penelitian tersebut mengusulkan variasi interval waktu sebesar 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 jam, dan hasilnya menunjukkan bahwa interval 50 jam memberikan nilai efektivitas tertinggi, yakni sebesar 78%, sehingga dapat dijadikan acuan dalam menyusun prosedur perawatan sistem hidrolik [18].

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa analisis oli terbukti efektif untuk meningkatkan keandalan sistem hidrolik. Pemantauan degradasi oli dilaporkan mampu memperpanjang umur pakai oli hingga lebih dari 20% [16],[17], meskipun penelitian tersebut belum memasukkan pengaruh temperatur operasi sebagai variabel yang dipertimbangkan. Selain itu, ditemukan pula bahwa peningkatan TAN dan kandungan logam keausan memiliki korelasi langsung dengan penurunan performa sistem, namun analisis yang dilakukan masih terbatas pada parameter kimiawi tanpa mengintegrasikan faktor temperatur operasi [16]. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh interval penggantian oli serta temperatur operasi terhadap performa sistem hidrolik pada *excavator* Komatsu PC2000-11. Penelitian ini dirancang menggunakan metode eksperimental dengan mengamati perubahan viskositas, laju degradasi oli, dan kandungan logam keausan pada berbagai interval operasi, yaitu 12.983, 13.473, 13.980, dan 14.260 jam, serta pada kondisi temperatur lingkungan sebesar 28°C, 30°C, dan 33°C. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi landasan ilmiah dalam menetapkan interval penggantian oli yang lebih tepat sesuai dengan kondisi operasi aktual, sehingga berkontribusi pada peningkatan keandalan sistem hidrolik dan efisiensi operasional alat berat di sektor industri pertambangan.

2. Metode Penelitian

2.1. Model Fisik

Model fisik sistem hidrolik yang ditunjukkan pada Gambar 1 menggambarkan konfigurasi sirkulasi oli hidrolik pada satu unit *excavator* Komatsu PC2000-11 yang beroperasi menggunakan sistem hidrolik tertutup *(closed-loop)*. Model ini digunakan sebagai dasar untuk memahami mekanisme distribusi fluida selama siklus kerja, mulai dari *hydraulic tank*, *hydraulic pump*, *main control valve*, aktuator, hingga kembali ke tangki melalui *return line*. Berdasarkan konfigurasi tersebut, ditentukan titik-titik observasi yang meliputi lokasi pengambilan sampel oli dan pengukuran temperatur operasi sebagai parameter utama yang dianalisis dalam penelitian. Identifikasi terhadap jalur aliran fluida dan titik pengamatan tersebut menjadi acuan dalam pelaksanaan pengambilan data, sehingga hasil pengujian dapat merepresentasikan kondisi aktual sistem hidrolik saat beroperasi.



Gambar 1. Model Fisik dan *Flow* Proses Distribusi Oli Hidrolik Excavator Komatsu PC2000-11.

2.2. Oli Hidrolik

Penelitian ini menggunakan oli hidrolik Pertamina Turalik ISO VG 46 sebagai fluida kerja pada sistem hidrolik excavator Komatsu PC2000-11. Pemilihan oli didasarkan pada rekomendasi pabrikan karena memiliki karakteristik viskositas yang sesuai untuk mendukung proses pelumasan, perpindahan daya, dan pelepasan panas pada sistem hidrolik yang beroperasi dalam kondisi beban tinggi. Kondisi oli dievaluasi berdasarkan beberapa parameter utama, yaitu viskositas kinematik, Total Acid Number (TAN), dan kandungan logam keausan (wear metal), yang dianalisis menggunakan metode Oil Spectrometric Analysis (OSA). Selain itu, karakteristik dasar oli seperti densitas, viscosity index, flash point, pour point, tingkat kebersihan oli, dan kadar air dijadikan sebagai nilai acuan dalam mengevaluasi perubahan kondisi oli selama penelitian. Spesifikasi oli beserta standar pengujiannya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Utama Oli Hidrolik ISO VG 46.

No	Parameter	Unit	Standard Value	Reference
1	Kinematic Viscosity (40°C)	cSt	42 – 50	ISO 3448
2	Kinematic Viscosity (100°C)	cSt	6.5 – 7.5	ASTM D445
3	Density (15°C)	kg/m³	860 – 880	Mang et al., 2020
4	Specific Heat (Cp)	kJ/kg·K	1.7 – 2.0	Incropera et al., 2011
5	Thermal Conductivity	W/m·K	0.13 – 0.15	Incropera et al., 2011
6	Viscosity Index	–	≥ 95	ASTM D2270
7	Flash Point	°C	≥ 200	ASTM D92
8	Pour Point	°C	≤ -15	ASTM D97
9	Wear Metal (Fe)	ppm	< 50 (alert limit)	ASTM D5185
10	ISO Cleanliness Code	–	≤ 17/15/12	ISO 4406
11	Initial Total Acid Number (TAN)	mg KOH/g	≤ 0.5	ASTM D974
12	Water Content	ppm	< 200	ASTM D6304

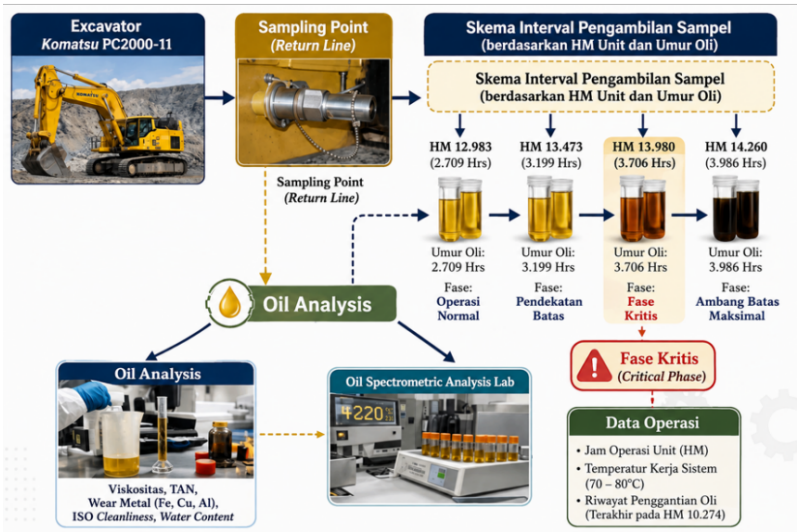
2.3. Alur Kerja Hidrolik

Gambar 1 menunjukkan alur kerja sistem hidrolik pada *excavator* Komatsu PC2000-11 yang diawali dari *hydraulic tank* sebagai tempat penyimpanan oli. Oli kemudian dialirkan melalui *suction filter* menuju *hydraulic pump* untuk menghasilkan fluida bertekanan, selanjutnya diteruskan ke main *control valve* sebelum didistribusikan ke aktuator, seperti *boom cylinder, arm cylinder, bucket cylinder, dan swing motor*. Setelah menyelesaikan siklus kerja, oli mengalir kembali melalui *return line*, melewati *oil cooler* dan *return filter*, lalu kembali ke hydraulic tank sehingga membentuk sistem sirkulasi tertutup *(closed-loop)*.

Pengambilan sampel oli dilakukan pada *return line* karena lokasi tersebut mampu merepresentasikan kondisi oli setelah melewati seluruh rangkaian kerja pada sistem hidrolik. Sementara itu, temperatur operasi dipantau pada titik-titik yang mengalami beban termal tinggi, seperti *hydraulic pump* dan saluran bertekanan (*pressure line*), untuk memperoleh data temperatur selama unit beroperasi. Penentuan kedua titik pengamatan tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi hubungan antara kondisi oli, temperatur operasi, dan performa sistem hidrolik..

2.4. Set Up Eksperimen

Gambar 2 menunjukkan konfigurasi setup eksperimen yang digunakan pada sistem hidrolik excavator Komatsu PC2000-11. Pengujian dilakukan melalui pengambilan sampel oli hidrolik secara berkala pada interval waktu operasi unit. Oli yang digunakan adalah Pertamina Turalik ISO VG 46 yang berfungsi sebagai fluida kerja pada sistem hidrolik closed-loop dengan karakteristik operasi bertekanan tinggi dan beban kerja yang bervariasi. Sampel oli diambil pada return line karena titik tersebut dianggap paling representatif untuk mencerminkan kondisi oli setelah menyelesaikan satu siklus sirkulasi, mulai dari proses pemompaan, distribusi tekanan, penggerakan aktuator, hingga melewati sistem pendinginan. Dalam penelitian ini, jam operasi total unit (Hour Meter/HM) dibedakan dari umur pakai aktual oli (oil lifetime). Berdasarkan riwayat perawatan, penggantian oli hidrolik terakhir dilakukan pada HM 10.274, sehingga hubungan antara waktu pengambilan sampel dan umur pakai oli dapat ditentukan dengan jelas sebagaimana disajikan pada **Tabel 2**.



Gambar 2. *Set Up* Eksperimen.

Dalam penelitian ini, jam operasi total unit (*Hour Meter*/HM) dibedakan dari umur pakai aktual oli (*oil lifetime*). Berdasarkan riwayat perawatan, penggantian oli hidrolik terakhir dilakukan pada HM 10.274. Umur pakai aktual oli (*oil lifetime*) dihitung sebagai selisih antara jam operasi unit (*Hour Meter*/HM) pada saat pengambilan sampel dan jam operasi unit pada saat oli terakhir diganti. Dengan demikian, interval analisis pada penelitian ini didasarkan pada umur pakai aktual oli, sedangkan nilai HM digunakan sebagai acuan kronologis operasi unit. Hubungan antara jam operasi unit dan umur pakai oli selanjutnya disajikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Korelasi Jam Operasi Unit (HM) dan Umur Pakai Aktual Oli (*Oil Lifetime*).

No	Pengambilan Sampel (HM)	Umur Oli	Keterangan
1	12.983	2.709 Jam	Fase Operasi Normal
2	13.473	3.199 Jam	Fase Pendekatan Batas
3	13.980	3.706 Jam	Fase Kritis
4	14.260	3.986 Jam	Ambang Batas Maksimal

Pengambilan sampel sengaja dirancang secara progresif untuk mengevaluasi laju degradasi fluida tepat sebelum mencapai batas maksimal 4.000 jam yang direkomendasikan dalam *Operation and Maintenance Manual* (OMM) Komatsu. Selama proses operasi berlangsung, sejumlah data pendukung turut dicatat, meliputi jam kerja unit (hour meter/HM), temperatur operasi sistem hidrolik, serta riwayat penggantian oli. Temperatur operasi normal tercatat berada pada kisaran 70–80 °C, yang merepresentasikan kondisi kerja berat dan berpotensi mempercepat proses degradasi oli melalui mekanisme penurunan viskositas serta peningkatan laju oksidasi.

Sampel oli yang telah diperoleh selanjutnya dianalisis di laboratorium menggunakan metode *Oil Spectrometric Analysis* (OSA) untuk mengevaluasi berbagai parameter kondisi oli, di antaranya viskositas, *Total Acid Number* (TAN), dan kandungan logam keausan. Hasil pengujian kemudian dikaji secara komparatif berdasarkan interval operasi dan kondisi temperatur guna mengidentifikasi pengaruh kedua variabel tersebut terhadap kualitas oli maupun performa sistem hidrolik secara keseluruhan. Hasil analisis ini selanjutnya dimanfaatkan sebagai landasan evaluasi kesesuaian interval penggantian oli terhadap kondisi operasi aktual, sekaligus sebagai dasar penetapan rekomendasi interval penggantian oli yang lebih optimal.

2.5. Reduksi Data Eksperimen

Parameter-parameter yang dikaji dalam penelitian ini mencakup perubahan viskositas, peningkatan *Total Acid Number* (TAN), serta laju akumulasi logam keausan sebagai indikator utama degradasi oli sekaligus mencerminkan kondisi sistem hidrolik secara menyeluruh. Perubahan viskositas dianalisis untuk mengevaluasi sejauh mana pengaruh temperatur operasi dan durasi pemakaian terhadap karakteristik aliran oli hidrolik. Nilai perubahan viskositas diperoleh dengan membandingkan viskositas oli pada kondisi operasi aktual terhadap viskositas oli dalam kondisi baru. Semakin besar nilai perubahan viskositas yang terukur, semakin tinggi pula tingkat degradasi oli yang terjadi, yang pada gilirannya dapat menurunkan kemampuan pelumasan dan efisiensi sistem hidrolik secara keseluruhan. Perubahan viskositas dinyatakan melalui persamaan berikut:

$$\Delta v\ (\%) = \frac{vt - v_0}{v_0} \text{ x } 100\% \qquad (1)$$

Persamaan (1) digunakan untuk menghitung persentase perubahan viskositas oli terhadap kondisi awal. Nilai perubahan viskositas digunakan sebagai indikator degradasi sifat fisik oli selama periode operasi. Semakin besar perubahan viskositas yang terjadi, semakin tinggi tingkat degradasi oli yang berpotensi menurunkan kemampuan pelumasan dan efisiensi sistem hidrolik. Selain itu, tingkat degradasi kimia oli dievaluasi menggunakan perubahan nilai *Total Acid Number* (TAN), yang dihitung sebagai:

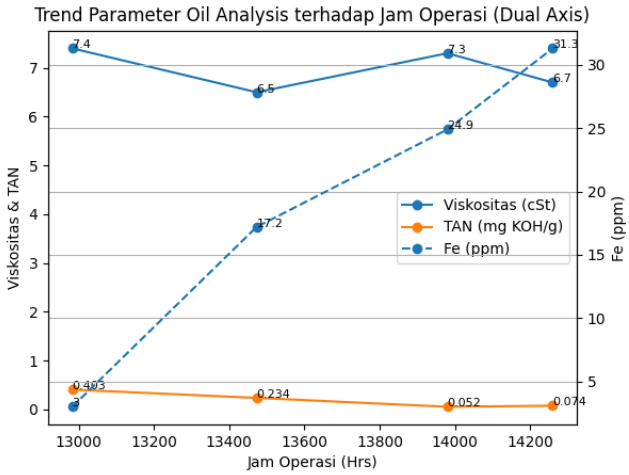
$$\Delta TAN = TAN_t - TAN_0 \qquad (2)$$

Persamaan (2) digunakan untuk menentukan perubahan nilai *Total Acid Number* (TAN) selama masa operasi. Peningkatan nilai TAN menunjukkan terjadinya proses oksidasi dan degradasi kimia pada oli yang dipengaruhi oleh umur pakai dan temperatur operasi. Selanjutnya, hasil perhitungan perubahan viskositas dan TAN dianalisis bersama data kandungan logam keausan untuk mengidentifikasi kecenderungan degradasi oli pada setiap interval operasi. Seluruh parameter kemudian dibandingkan dengan batas standar ASTM, ISO, dan rekomendasi pabrikan sebagai dasar evaluasi kelayakan oli serta penentuan interval penggantian yang optimal.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengaruh Interval Waktu Operasi terhadap Performa Sistem Hidrolik

Gambar 3 menyajikan hasil analisis kondisi oli hidrolik pada empat interval umur pakai *(oil lifetime)*, yaitu 2.709 jam, 3.199 jam, 3.706 jam, dan 3.986 jam. Parameter yang dianalisis meliputi viskositas, *Total Acid Number* (TAN), dan kandungan logam keausan besi (Fe), yang digunakan sebagai indikator perubahan kondisi fisik dan kimia, serta tingkat keausan pada sistem hidrolik selama periode operasi. Ketiga parameter tersebut dianalisis secara komparatif untuk mengidentifikasi kecenderungan degradasi oli seiring bertambahnya umur pakai serta kaitannya dengan kondisi operasional *excavator* Komatsu PC2000-11.



Gambar 3. Laporan Analisa Oli

Selain hasil *oil analysis*, kondisi operasi sistem hidrolik selama periode pengamatan turut dievaluasi berdasarkan temperatur operasi serta catatan pemeliharaan yang diperoleh dari lapangan. Data pendukung tersebut digunakan untuk memberikan konteks terhadap perubahan karakteristik oli pada setiap interval pengambilan sampel, sehingga interpretasi hasil tidak hanya didasarkan pada parameter laboratorium, tetapi juga mempertimbangkan kondisi operasi aktual unit. Ringkasan temperatur operasi dan catatan lapangan pada setiap interval pengambilan sampel disajikan pada **Tabel 3.**

Tabel 3. Ringkasan Hasil *Oil Analysis*.

HM	Oil Lifetime	Viskositas (cSt)	TAN (mg KOH/g)	Fe (ppm)
12.983	2.709	7,4	0,403	3,0
13.473	3.199	6,5	0,234	17,2
13.980	3.706	7,3	0,052	25,6
14.260	3.986	6,7	0,074	31,3

Berdasarkan Tabel 3, temperatur rata-rata sistem hidrolik berada pada kisaran 71,8–72,9°C, sedangkan temperatur maksimum berkisar antara 78,6–79,8°C selama periode pengambilan sampel. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem hidrolik umumnya beroperasi dalam rentang temperatur kerja yang normal. Selain itu, catatan pemeliharaan menunjukkan adanya penambahan oli hidrolik *(top-up oil) pada interval umur oli 3.706 jam dan 3.986 jam akibat kebocoran pada selang* sistem hidrolik. Kondisi tersebut perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan hasil oil analysis karena penambahan oli baru berpotensi memengaruhi karakteristik fisik dan kimia oli yang sedang digunakan.

Berdasarkan **Gambar 3**, setiap parameter menunjukkan kecenderungan perubahan yang berbeda selama interval pengamatan. Kandungan logam keausan besi (Fe) meningkat secara bertahap seiring bertambahnya umur pakai oli, sedangkan nilai viskositas dan TAN menunjukkan pola fluktuasi. Perbedaan kecenderungan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kondisi oli tidak berlangsung secara linier, melainkan dipengaruhi oleh interaksi berbagai mekanisme degradasi yang terjadi selama oli digunakan dalam sistem hidrolik.

3.2. Pengaruh Temperatur Operasi terhadap Performa Sistem Hidrolik

Pengaruh temperatur operasi terhadap kondisi sistem hidrolik dievaluasi dengan mengintegrasikan data temperatur kerja dengan hasil oil analysis pada setiap interval pengambilan sampel. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi keterkaitan antara kondisi termal sistem dengan perubahan karakteristik oli, yang meliputi viskositas, *Total Acid Number* (TAN), dan kandungan logam keausan besi (Fe). Ringkasan hasil integrasi data tersebut disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Integrasi Data *Oil Analysis* dan Temperatur Kerja.

Jam Operasi (HM)	Umur Oli (Jam)	Viskositas (cSt)	TAN (mg KOH/g)	Fe (ppm)	Temperatur Rata-rata (°C)	Temperatur Maksimum (°C)	Catatan Lapangan
12.983	2.709	7,4	0,403	3,0	72,4	79,1	Kondisi operasi normal, tidak ditemukan indikasi kebocoran maupun kontaminasi sistem.
13.473	3.199	6,5	0,234	17,2	72,9	84,8	Operasi berlangsung dengan fluktuasi beban, temperatur maksimum meningkat namun masih dalam batas operasi.
13.980	3.706	7,3	0,052	24,9	72,3	89,7	Dilakukan **penambahan oli (*make-up oil*)** akibat kebocoran pada *hose* hidrolik. Filter hidrolik menunjukkan akumulasi partikel keausan.
14.260	3.986	6,7	0,074	31,3	71,8	95,0	Penambahan oli kembali dilakukan karena kebocoran *hose* masih terjadi. Inspeksi menunjukkan retakan pada *hose* dan peningkatan kontaminan pada filter hidrolik.

Berdasarkan Tabel 4, temperatur rata-rata sistem hidrolik selama periode pengamatan berada pada kisaran 71,8 – 72,9°C, sedangkan temperatur maksimum meningkat secara bertahap dari 79,1°C menjadi 95,0°C pada interval pengamatan terakhir. Meskipun kenaikan tersebut tidak terjadi secara kontinu, beberapa puncak temperatur menunjukkan bahwa sistem mengalami variasi beban operasi selama periode pengamatan. Pada periode yang sama, kandungan Fe meningkat dari 3,0 ppm menjadi 31,3 ppm, sedangkan viskositas dan TAN menunjukkan pola perubahan yang fluktuatif.

Peningkatan temperatur maksimum tersebut mengindikasikan adanya kecenderungan peningkatan beban *termal* sistem yang berpotensi berkontribusi terhadap proses degradasi oli selama periode operasi. Temperatur yang lebih tinggi secara teoretis dapat mempercepat reaksi oksidasi oli dan memengaruhi stabilitas viskositas. Namun, berdasarkan hasil penelitian ini, perubahan karakteristik oli tidak sepenuhnya mengikuti pola temperatur. Hal ini menunjukkan bahwa degradasi oli kemungkinan dipengaruhi oleh kombinasi beberapa faktor, termasuk umur pakai oli, kondisi pembebanan sistem, serta keausan komponen hidrolik. Selain perubahan viskositas dan kandungan Fe, pola *Total Acid Number* (TAN) juga menunjukkan karakteristik yang menarik. Nilai TAN menurun dari 0,403 mg KOH/g menjadi 0,052 mg KOH/g sebelum kembali meningkat menjadi 0,074 mg KOH/g pada interval pengamatan terakhir. Secara kimia, fenomena ini mengindikasikan bahwa proses degradasi oli tidak hanya dipengaruhi oleh akumulasi produk oksidasi, tetapi juga oleh efektivitas aditif deterjen dan dispersan dalam menetralkan senyawa asam. Penurunan TAN juga berpotensi dipengaruhi oleh penambahan oli baru *(top-up oil) akibat kebocoran pada selang* hidrolik yang tercatat selama periode pengamatan. Penambahan oli baru dapat menghasilkan efek pengenceran *(dilution effect)* sehingga konsentrasi senyawa asam dalam oli sementara menurun. Seiring bertambahnya umur pakai oli dan berkurangnya efektivitas aditif, proses oksidasi kembali menjadi dominan sehingga nilai TAN kembali meningkat pada interval pengamatan terakhir.

Catatan inspeksi lapangan menunjukkan adanya akumulasi kontaminan pada *filter* hidrolik serta kerusakan berupa retakan pada *hose* hidrolik, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4 dan 5. Temuan tersebut memberikan bukti bahwa selama periode pengamatan, sistem tidak hanya mengalami degradasi oli, tetapi juga menunjukkan indikasi penurunan kondisi pada beberapa komponen hidrolik. Selain menyebabkan perlunya penambahan oli (*top up oil*), kebocoran pada *hose* berpotensi meningkatkan risiko masuknya kontaminan ke dalam sistem apabila tidak segera ditangani.



Gambar 4. Temuan inspeksi lapangan berupa akumulasi partikel pada return filter dan kebocoran pada seal silinder hidrolik.

Temuan inspeksi tersebut memperkuat hasil *oil analysis* bahwa partikel logam hasil keausan tidak hanya terdeteksi melalui peningkatan kandungan Fe, tetapi juga terakumulasi pada media filtrasi sistem hidrolik. Akumulasi partikel pada filter menunjukkan bahwa partikel hasil keausan berhasil ditangkap oleh media filtrasi selama sistem beroperasi. Kondisi ini sejalan dengan peningkatan kandungan Fe yang diperoleh dari hasil *oil analysis*, sehingga mengindikasikan berlangsungnya proses keausan secara bertahap pada komponen hidrolik. Meskipun demikian, penelitian ini tidak dapat memastikan bahwa peningkatan kandungan Fe hanya dipengaruhi oleh temperatur operasi, karena faktor pembebanan, durasi penggunaan, dan kondisi komponen juga berpotensi memengaruhinya.



Gambar 5. *Crack* pada *Hose* Hidraulik.

Retakan pada *hose* hidrolik, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5, menunjukkan indikasi penurunan integritas material akibat penggunaan jangka panjang pada kondisi operasi yang dinamis. Selain berpotensi menyebabkan kehilangan fluida hidrolik, kerusakan tersebut juga memerlukan penambahan oli *(top up oil)* untuk mempertahankan volume oli di dalam sistem. Kondisi ini menjadi salah satu faktor yang perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan perubahan karakteristik oli selama periode pengamatan.

Tabel 5. Rekomendasi *Threshold Condition-Based Maintenance*.

Parameter	Threshold	Tindakan
Fe	>30 ppm	Ganti oli dan inspeksi pompa, valve, actuator
Viskositas	±15%	Ganti oli
TAN	>1 mg KOH/g	Ganti oli
Temperatur maksimum	>95°C berulang	Inspeksi cooling system dan hydraulic circuit
Kebocoran hose	Ada	Perbaikan sebelum operasi berikutnya
Filter kotor	Ada gram	Ganti filter

Secara keseluruhan, integrasi data temperatur operasi, hasil *oil analysis*, dan temuan inspeksi lapangan menunjukkan bahwa evaluasi kondisi sistem hidrolik sebaiknya dilakukan secara multidimensi dan tidak hanya didasarkan pada satu parameter pengamatan. Kombinasi indikator fisik, kimia, dan bukti visual kondisi komponen memberikan dasar yang lebih komprehensif untuk mengidentifikasi kecenderungan degradasi pada sistem. Pendekatan ini mendukung penerapan *Condition Based Maintenance* (CBM) sehingga keputusan pemeliharaan dapat dilakukan berdasarkan kondisi aktual peralatan sebelum berkembang menjadi kegagalan komponen yang lebih serius

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, kandungan logam keausan besi (Fe) merupakan parameter yang menunjukkan perubahan paling signifikan dibandingkan viskositas dan TAN. Nilai Fe meningkat hingga 31,3 ppm, yang telah melampaui batas kewaspadaan (warning threshold) 30 ppm yang umum digunakan dalam pemantauan kondisi sistem hidrolik. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan penerapan *Condition-Based Maintenance* (CBM) dengan menjadikan kandungan Fe sebagai indikator utama untuk menentukan waktu penggantian oli. Penggantian oli disarankan apabila kandungan Fe melebihi 30 ppm, atau apabila disertai dengan peningkatan temperatur maksimum di atas 95°C, perubahan viskositas melebihi ±15% terhadap kondisi awal, atau peningkatan TAN yang melampaui 1,0 mg KOH/g, sehingga keputusan pemeliharaan didasarkan pada kondisi aktual oli dan sistem hidrolik, bukan hanya interval jam operasi. Penerapan Condition Based Maintenance (CBM) yang mengintegrasikan parameter oil analysis, temperatur operasi, dan hasil inspeksi lapangan memberikan pendekatan yang lebih adaptif dibandingkan dengan pemeliharaan berbasis interval jam operasi semata. Sebagai acuan pengambilan keputusan pemeliharaan, penggantian oli hidrolik direkomendasikan apabila kandungan Fe melebihi 30 ppm, perubahan viskositas mencapai lebih dari ±15% dibandingkan kondisi awal, nilai TAN menunjukkan peningkatan hingga mendekati 1,0 mg KOH/g, atau temperatur maksimum sistem secara berulang mencapai ≥95°C. Pendekatan berbasis threshold tersebut diharapkan mampu meningkatkan keandalan sistem hidrolik, mengoptimalkan umur pakai oli dan komponen, serta meminimalkan risiko unscheduled downtime akibat degradasi oli yang tidak teridentifikasi sejak dini.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Konversi Energi Universitas PGRI Semarang yang berlokasi di Jl. Pawitan Luhur III No.1, Bendan Duwur, Kecamatan Gajahmungkur, Kota Semarang, Jawa Tengah 50233, Indonesia. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Departemen Plant PAMA BAYA yang berlokasi di Desa Buana Jaya, Kecamatan Tenggarong Seberang, Kabupaten Kutai Kartanegara, Kalimantan Timur 75572, Indonesia, atas dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Bloch HP, Geitner FK. Machinery failure analysis and troubleshooting. 5th ed. Houston: Gulf Professional Publishing; 2019.

[2] Braun S. Mechanical signature analysis: theory and applications. 2nd ed. London: Academic Press; 2018.

[3] Caterpillar Inc. Caterpillar Hydraulic Systems Operation Manual. Peoria (IL): Caterpillar Inc.; 2018.

[4] Fitch JC, Troyer D. Oil analysis basics. 2nd ed. Tulsa (OK): Noria Corporation; 2018.

[5] Fox RW, Pritchard PJ, McDonald AT. Introduction to fluid mechanics. 9th ed. New York: John Wiley & Sons; 2015.

[6] Stachowiak GW, Batchelor AW. Engineering tribology. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2014.

[7] Mang T, Dresel W, editors. Lubricants and lubrication. 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH; 2020.

[8] Komatsu Ltd. Operation and maintenance manual PC2000-11 hydraulic excavator. Tokyo: Komatsu Ltd.; 2019.

[9] Rudnick LR. Lubricant additives: chemistry and applications. 3rd ed. Boca Raton (FL): CRC Press; 2017.

[10] Khonsari MM, Booser ER. Applied tribology: bearing design and lubrication. 3rd ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2017.

[11] Mobley RK. Maintenance engineering handbook. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2019.

[12] Heng A, Zhang S, Tan ACC, Mathew J. Rotating machinery prognostics: state of the art, challenges and opportunities. Mech Syst Signal Process. 2009;23(3):724-739.

[13] International Organisation for Standardisation. ISO 4406:2017 Hydraulic fluid power—Fluids—Method for coding the level of contamination by solid particles. Geneva: ISO; 2017.

[14] Jardine AKS, Lin D, Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. Mech Syst Signal Process. 2006;20(7):1483-1510.

[15] Schneider K, Blossfeld M. Condition monitoring strategies for hydraulic systems in mining equipment. Reliab Eng Syst Saf. 2021;215:107821.

[16] Sharma V, Kumar A, Singh B. Analysis of hydraulic oil degradation and wear characteristics in heavy equipment systems. Tribol Int. 2022;168:107425.

[17] Wakiru JM, Pintelon L, Muchiri PN, Chemweno PK. Maintenance optimisation: application of condition-based maintenance using oil analysis. Reliab Eng Syst Saf. 2019;188:174-185.

[18] Wang L. Condition monitoring and fault diagnosis in hydraulic systems. Singapore: Springer; 2018.

[19] Aulia F, Turmizi, Ariefin. Perencanaan perawatan preventif dan korektif pada komponen sistem hidrolik excavator Komatsu PC200-8. Jurnal Mesin Sains Terapan. 2017;1(1):25-31.