

Artikel Penelitian (Teknik Mesin)

Optimasi Interval Penggantian Oli Hidrolik dan Suhu Operasi untuk Meningkatkan Kinerja Sistem Hidrolik pada Excavator Komatsu PC2000-11

Chandra Ajik Prakoso, Althesa Androva^{*}, Muhamad Safi'i

Fakultas Teknik dan Informatika, Program Studi Teknik Mesin, Universitas PGRI Semarang, Semarang, Indonesia

INFORMASI ARTIKEL

Diterima Redaksi: 11 Mei 2026
Revisi Akhir: 12 Juni 2026
Diterbitkan Online: 17 Juli 2026

KATA KUNCI

Oli Hidrolik
Oil Analysis
Total Acid Number
Sistem Hidrolik
Performa Hidrolik

KORESPONDENSI^(*)

Phone: +62 812-2722-7033
E-mail: althesaandrova@upgris.ac.id

A B S T R A K

Kondisi oli hidrolik dan temperatur operasi berpengaruh terhadap keandalan sistem hidrolik pada alat berat. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh umur pakai oli dan temperatur operasi terhadap degradasi oli serta kondisi sistem hidrolik pada excavator Komatsu PC2000-11. Metode penelitian dilakukan secara eksperimental melalui analisis oli pada empat variasi umur pakai, yaitu 2.709, 3.199, 3.706, dan 3.986 jam. Sampel oli diuji menggunakan metode *Oil Spectrometric Analysis (OSA)* dengan parameter viskositas, *Total Acid Number (TAN)*, dan kandungan logam keausan besi (Fe), serta didukung pemantauan temperatur operasi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan umur pakai oli menyebabkan kenaikan kandungan Fe dari 3 ppm menjadi 31,3 ppm, disertai perubahan viskositas dari 7,4 cSt menjadi 6,7 cSt. Temperatur maksimum sistem juga meningkat dari 79°C menjadi 95°C yang mengindikasikan meningkatnya beban termal dan percepatan degradasi oli. Temuan lapangan berupa akumulasi partikel keausan pada *return filter*, kebocoran seal, dan retakan *hose* hidrolik mendukung hasil analisis laboratorium. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan oli mendekati batas penggantian 4.000 jam dan temperatur operasi yang tinggi mempercepat degradasi oli serta meningkatkan risiko keausan komponen. Oleh karena itu, penerapan *condition based maintenance (CBM)* berbasis analisis oli diperlukan untuk menentukan interval penggantian oli yang lebih sesuai dengan kondisi operasi aktual.

PENDAHULUAN

Pada alat berat seperti *excavator* berkapasitas besar tipe Komatsu PC2000-11, sistem hidrolik memegang peranan sentral dengan memanfaatkan fluida bertekanan untuk menyalurkan energi menuju 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 guna mempertahankan performa sistem pada tingkat yang 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 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 performa sistem hidrolik dan percepatan 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 mengakselerasi 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].

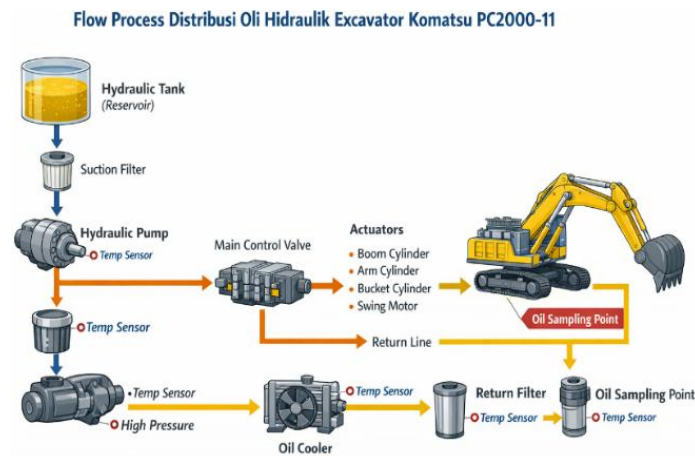
Kajian mengenai perencanaan perawatan *preventif* dan korektif pada sistem hidrolik *excavator* Komatsu PC2000-8 pernah dilakukan dengan memvariasikan interval waktu perawatan, yaitu 60 jam, 250 jam, dan 2.500 jam. Hasilnya memperlihatkan bahwa perawatan *preventif* dengan interval 60 jam memberikan hasil terbaik dalam hal memperpanjang umur pakai komponen sistem hidrolik sesuai dengan batas *lifetimenya* [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%, sementara oli SAE 46 mencapai efisiensi 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 turut 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 dalam 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 diperhitungkan. 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 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 kondisi operasi aktual, sehingga berkontribusi pada peningkatan keandalan sistem hidrolik dan efisiensi operasional alat berat di sektor industri pertambangan.

TINJAUAN PUSTAKA

Model Fisik

Model fisik sistem hidrolik yang ditampilkan pada Gambar 1 mengilustrasikan alur distribusi oli hidrolik pada *excavator* Komatsu PC2000-11 yang beroperasi menggunakan sistem *closed-loop*. Pemahaman terhadap model fisik ini diperlukan untuk mendeskripsikan pola sirkulasi oli hidrolik selama proses operasi berlangsung, sehingga dapat diidentifikasi titik-titik pengamatan beserta parameter-parameter yang menjadi fokus analisis dalam penelitian ini



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

Oli Hidrolik

Penelitian ini menggunakan oli hidrolik jenis Pertamina Turalik ISO VG 46 yang secara luas diaplikasikan pada sistem hidrolik alat berat, mengingat karakteristik viskositasnya yang mampu beradaptasi terhadap berbagai kondisi temperatur maupun tekanan kerja. Penentuan jenis oli yang digunakan didasarkan pada rekomendasi dari pihak pabrikan serta mempertimbangkan kondisi operasional yang berlaku di lingkungan industri pertambangan. Sifat-sifat utama oli hidrolik ISO VG 46 yang dijadikan acuan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1, mencakup viskositas kinematik, densitas, viscosity index, titik nyala, kandungan logam keausan, serta tingkat kebersihan oli yang mengacu pada standar internasional yang berlaku.

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/m ³	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

Alur Kerja Sistem Hidrolik

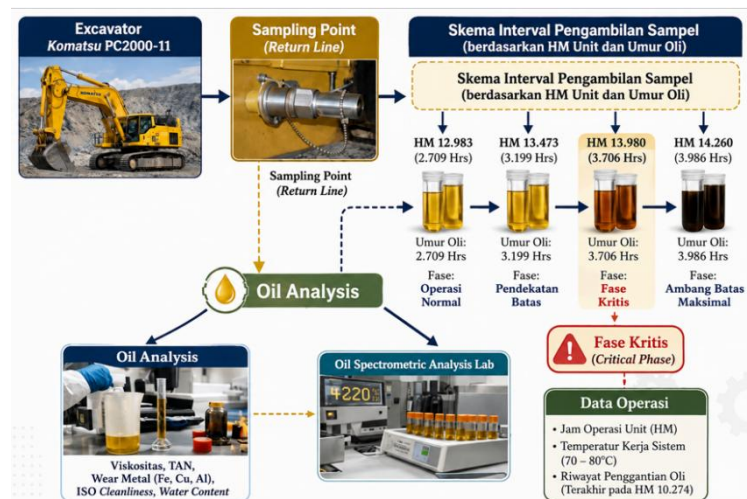
Gambar 1 turut menggambarkan alur kerja sistem hidrolik secara keseluruhan, dimana sirkulasi oli hidrolik berawal dari *hydraulic tank* menuju *hydraulic pump*, kemudian diteruskan ke *main control valve* dan selanjutnya didistribusikan ke berbagai aktuator seperti *boom cylinder*, *arm cylinder*, *bucket cylinder*, dan *swing motor*. Setelah melewati aktuator, oli dikembalikan ke tangki melalui *return line* dan *oil cooler* guna mempertahankan kestabilan temperatur sistem. Dalam sistem ini terdapat sejumlah titik pengambilan sampel (*oil sampling point*) serta sensor temperatur yang berfungsi untuk memantau kondisi oli selama proses operasi berlangsung.

Oli hidrolik tersimpan di dalam *hydraulic tank* (reservoir) sebagai sumber utama pasokan fluida, yang kemudian dialirkan melalui *suction filter* untuk menyaring kontaminan sebelum memasuki pompa hidrolik utama. Pada tahap pemompaan, energi mekanik yang bersumber dari mesin dikonversi menjadi energi hidrolik dalam bentuk fluida bertekanan tinggi, yang disertai dengan kenaikan temperatur sebagai akibat dari gesekan dan kompresi fluida. Fluida bertekanan tersebut selanjutnya diarahkan menuju *main control valve* untuk mengatur arah aliran, besaran tekanan, dan debit sebelum didistribusikan ke masing-masing aktuator, baik berupa silinder hidrolik maupun motor hidrolik. Pada tahap ini, energi

hidrolik dikonversi kembali menjadi energi mekanik untuk melakukan kerja, sehingga titik ini menjadi lokasi utama terjadinya pembebanan sekaligus peningkatan temperatur sistem.

Setelah melewati aktuator, oli mengalir kembali melalui *return line* menuju *oil cooler* untuk menurunkan temperatur operasional. Oli kemudian disaring kembali menggunakan *return filter* sebelum akhirnya kembali ke reservoir. Keseluruhan proses ini berlangsung secara berkelanjutan dalam satu siklus operasi sistem hidrolik. Pengambilan sampel oli dilaksanakan pada *return line* karena posisi ini dianggap representatif dalam mencerminkan kondisi oli setelah menyelesaikan satu siklus kerja penuh. Sementara itu, pengukuran temperatur dilakukan pada titik-titik kritis seperti pompa dan saluran bertekanan tinggi, guna mengidentifikasi distribusi panas yang terjadi pada sistem hidrolik.

Proses Kerja Sistem Hidrolik



Gambar 2. *Set Up* Eksperimen.

Gambar 2 mengilustrasikan konfigurasi pengujian (*set up* eksperimen) yang diterapkan pada sistem hidrolik excavator Komatsu PC2000-11. Pengujian dirancang melalui metode pengambilan sampel oli hidrolik secara berkala berdasarkan interval waktu operasi unit. Oli hidrolik yang digunakan dalam eksperimen ini adalah Pertamina Turalik ISO VG 46 yang beroperasi pada sistem hidrolik *closed-loop* dengan kondisi tekanan tinggi dan karakteristik kerja yang dinamis. Pengambilan sampel dilaksanakan pada *return line* karena posisi tersebut dinilai paling representatif dalam menggambarkan kondisi oli setelah menyelesaikan satu siklus operasi secara penuh, yang mencakup proses pemompaan, distribusi tekanan, kerja aktuator, hingga pendinginan fluida. Penelitian ini membedakan secara tegas antara jam operasi total unit (Hour Meter/HM) dengan umur pakai aktual oli (*oil lifetime*). Berdasarkan catatan riwayat perawatan, penggantian oli hidrolik terakhir kali dilakukan pada HM 10.274. Dengan demikian, korelasi kronologis antara waktu pengambilan sampel dan umur pakai oli disajikan secara terukur 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 engaja dirancang secara progresif untuk mengevaluasi laju degradasi fluida tepat sebelum menyentuh batas maksimal 4.000 jam yang direkomendasikan oleh *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 mengakselerasi 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.

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 cerminan 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, maka 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:

$$\Delta v (\%) = \frac{v_t - v_0}{v_0} \times 100\% \quad (1)$$

Dalam hal ini v_t adalah viskositas pada waktu operasi tertentu (cSt) dan v_0 adalah viskositas oli baru (cSt). Nilai perubahan viskositas ini digunakan untuk menilai kestabilan oli terhadap temperatur kerja, di mana temperatur yang tinggi cenderung menyebabkan penurunan viskositas. Selain itu, tingkat degradasi kimia oli dievaluasi menggunakan perubahan nilai *Total Acid Number* (TAN), yang dihitung sebagai:

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

Pada konteks ini, TAN_t merepresentasikan nilai Total Acid Number pada waktu operasi tertentu, sedangkan TAN_0 menunjukkan nilai TAN awal dari oli baru. Kenaikan nilai TAN mengindikasikan terjadinya proses oksidasi pada oli yang dipengaruhi oleh tingkat temperatur operasi serta durasi penggunaan oli. Di samping itu, laju keausan sistem hidrolik dievaluasi berdasarkan akumulasi kandungan logam keausan yang terdeteksi, khususnya unsur besi (Fe). Analisis dilakukan untuk memetakan hubungan antara temperatur operasi dan degradasi oli melalui perbandingan tren perubahan viskositas, TAN, serta kandungan logam keausan terhadap kenaikan temperatur pada rentang 70–80°C. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi apakah peningkatan temperatur operasi berkontribusi dalam mengakselerasi proses degradasi oli serta menurunkan performa sistem hidrolik. Hasil yang diperoleh dari ketiga parameter tersebut selanjutnya dibandingkan dengan batas-batas standar yang direkomendasikan oleh ASTM, ISO, maupun standar yang ditetapkan oleh pabrikan. Berdasarkan evaluasi tersebut, kondisi oli dinilai apakah masih berada dalam batas kelayakan penggunaan atau telah mencapai ambang kritis yang mengharuskan penggantian. Selain itu, pengaruh interval penggantian oli dan temperatur operasi terhadap performa sistem hidrolik secara keseluruhan dianalisis lebih mendalam guna menghasilkan rekomendasi yang komprehensif.

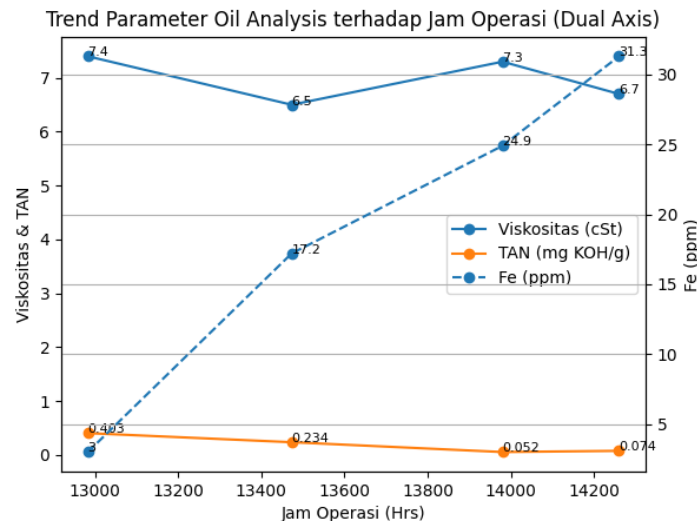
HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Interval Waktu Operasi Terhadap Performa Sistem Hidrolik

Pengujian analisis oli dilaksanakan guna mengevaluasi perubahan kondisi oli hidrolik pada berbagai interval waktu operasi. Parameter yang dikaji mencakup viskositas kinematik, *Total Acid Number* (TAN), dan kandungan logam

keausan, yang ketiganya difungsikan sebagai indikator utama dalam menilai tingkat degradasi oli serta laju keausan komponen pada sistem hidrolik. Data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tren perubahan setiap parameter terhadap jam operasi, dengan tujuan mengidentifikasi pola degradasi oli sepanjang masa penggunaannya.

Gambar 3 menyajikan hasil analisis oli yang menggambarkan keterkaitan antara interval waktu operasi dengan perubahan parameter kondisi oli. Data analisis tersebut digunakan untuk menjelaskan mekanisme degradasi oli beserta dampaknya terhadap performa sistem hidrolik secara keseluruhan. Hasil analisis menunjukkan bahwa perpanjangan interval waktu operasi oli hidrolik memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kondisi oli maupun kinerja sistem hidrolik. Parameter utama yang menjadi fokus analisis meliputi kandungan logam keausan besi (Fe), viskositas, dan *Total Acid Number* (TAN), sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Laporan Analisa Oli

Berdasarkan data yang ditampilkan pada Gambar 3, kandungan logam Fe menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan, yakni dari 3 ppm pada interval 12.983 jam operasi menjadi 31,3 ppm pada interval 14.260 jam operasi, dengan kenaikan bertahap yang melalui nilai 17,2 ppm dan 24,9 ppm. Tren peningkatan tersebut mengindikasikan terjadinya akumulasi keausan komponen yang dipicu oleh menurunnya kapasitas pelumasan oli secara bertahap. Secara mekanis, penguraian aditif anti-wear dan penurunan kualitas lapisan pelumas menyebabkan intensitas kontak langsung antar permukaan logam semakin meningkat, sehingga menghasilkan partikel keausan dalam jumlah yang lebih besar.

Nilai *Total Acid Number* (TAN) menunjukkan tren yang tidak linear, di mana terjadi penurunan drastis dari 0,403 mg KOH/g (HM 12.983) menjadi 0,052 mg KOH/g (HM 13.473), sebelum akhirnya merangkak naik kembali ke angka 0,074 mg KOH/g (HM 14.260). Fenomena penurunan nilai keasaman yang ekstrem ini bukan merepresentasikan fase stabilisasi fluida, melainkan mengindikasikan terjadinya deplesi (*depletion*) aditif secara masif pada fase awal pengamatan.

Dalam ilmu tribologi, *aditif anti wear* dan *antioxidant* konvensional seperti *Zinc Dialkyldithiophosphate* (ZDDP) secara alamiah mengandung senyawa *sulfur fosfor* yang terdeteksi sebagai asam lemah saat prosedur titrasi TAN awal dilakukan. Ketika oli mengalami tegangan geser (*shear stress*) yang intensif disertai paparan termal yang tinggi, molekul-molekul aditif ini akan pecah dan habis karena mengorbankan diri untuk melindungi permukaan logam, sehingga menyebabkan nilai TAN turun secara artifisial. Setelah aditif pelindung tersebut mengalami kerusakan total (*depleted*), molekul minyak dasar (*base oil*) mulai terserang oleh oksigen secara langsung. Proses oksidasi lanjutan di bawah temperatur operasi tinggi inilah yang memicu pembentukan asam karboksilat berantai pendek, yang bermanifestasi pada kenaikan kembali nilai TAN di akhir pengujian (HM 14.260) [3],[6].

Sementara itu, nilai viskositas mengalami fluktuasi dalam rentang 6,5–7,4 cSt, dengan pola penurunan dari 7,4 cSt menjadi 6,5 cSt, kemudian meningkat kembali ke angka 7,3 cSt, dan akhirnya turun ke nilai 6,7 cSt. Fluktuasi tersebut mencerminkan pengaruh gabungan dari degradasi termal, tegangan geser (*shear stress*), serta kontaminasi terhadap karakteristik aliran oli. Penurunan viskositas berdampak pada menipisnya lapisan pelumas yang terbentuk, sehingga secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan laju keausan komponen.

Secara keseluruhan, perpanjangan interval waktu operasi terbukti menginduksi degradasi oli secara progresif, yang tercermin dari peningkatan kandungan logam keausan, perubahan nilai viskositas, dan indikasi oksidasi oli yang semakin nyata. Kondisi ini mempertegas bahwa penggunaan oli yang melampaui interval penggantian optimal berpotensi

menurunkan efektivitas pelumasan dan mempertinggi risiko keausan komponen, yang pada akhirnya memberikan dampak negatif terhadap performa sistem hidrolik secara keseluruhan.

Pengaruh Interval Waktu Operasi Terhadap Performa Sistem Hidrolik

Pengaruh temperatur operasi terhadap performa sistem hidrolik dievaluasi melalui integrasi data temperatur dengan parameter hasil analisis oli pada berbagai interval waktu operasi. Parameter yang diamati dalam evaluasi ini mencakup viskositas, *Total Acid Number* (TAN), kandungan logam keausan besi (Fe), serta temperatur rata-rata dan temperatur maksimum sistem. Keterkaitan antar variabel tersebut dimanfaatkan sebagai dasar penilaian terhadap pengaruh kondisi termal dalam mendorong terjadinya degradasi oli serta dampaknya terhadap performa sistem hidrolik secara menyeluruh. Data eksperimen yang disajikan pada Tabel 3 memperlihatkan adanya korelasi yang dapat diidentifikasi antara kenaikan temperatur operasi dengan perubahan parameter kondisi oli seiring dengan bertambahnya jam operasi unit. Analisis ini selanjutnya digunakan untuk mengkaji sejauh mana peranan temperatur dalam mengakselerasi proses degradasi oli serta dampak yang ditimbulkannya terhadap performa sistem hidrolik secara keseluruhan

Tabel 3. Integrasi Data *Oil Analysis* dan Temperatur Kerja.

Jam Operasi (Hrs)	Viscosity (cSt)	TAN (mg KOH/g)	Fe (ppm)	Rata-rata Temperatur (°C)	Temperatur Maksimal (°C)
12,983	7.4	0.403	3.0	72	79
13,473	6.5	0.234	17.2	73	85
13,980	7.3	0.052	24.9	72	90
14,260	6.7	0.074	31.3	72	95

Berdasarkan data yang tercantum pada Tabel 3, temperatur operasi sistem hidrolik memperlihatkan kecenderungan peningkatan pada nilai temperatur maksimum seiring bertambahnya jam operasi, yakni dari 79°C pada interval 12.983 jam hingga mencapai 95°C pada interval 14.260 jam. Di sisi lain, temperatur rata-rata cenderung stabil pada kisaran 70–73°C. Kondisi ini mengindikasikan adanya peningkatan beban termal yang tidak selalu tergambarkan melalui nilai temperatur rata-rata, melainkan tampak dalam bentuk lonjakan temperatur pada kondisi operasi tertentu. Peningkatan temperatur maksimum tersebut turut disertai oleh perubahan pada parameter analisis oli, khususnya kenaikan kandungan logam keausan besi (Fe) dan fluktuasi nilai viskositas.

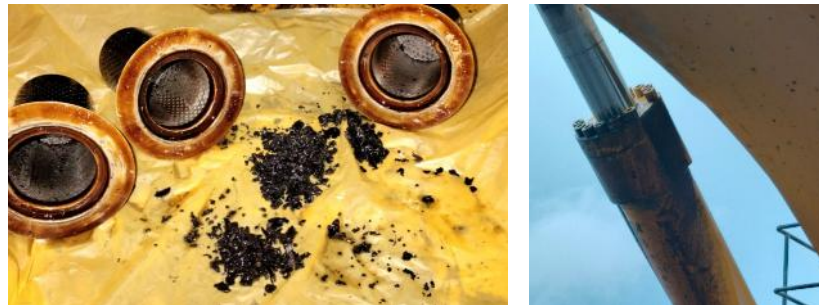
Hal ini menunjukkan bahwa temperatur yang tinggi berperan dalam mengakselerasi degradasi oli, baik dari aspek fisik maupun kimiawi. Secara umum, kenaikan temperatur operasi cenderung menurunkan viskositas oli dan mempercepat proses oksidasi, sehingga kemampuan oli dalam mempertahankan lapisan pelumas yang stabil menjadi semakin terbatas. Di samping itu, peningkatan temperatur juga berkorelasi dengan bertambahnya kandungan kontaminan dan produk hasil degradasi di dalam oli, yang pada akhirnya berkontribusi terhadap peningkatan laju keausan komponen sistem hidrolik. Kondisi tersebut mempertegas bahwa temperatur operasi tidak semata-mata dipengaruhi oleh beban kerja, tetapi juga dipengaruhi oleh penurunan kualitas oli selama periode penggunaan berlangsung.

Berdasarkan data historis *maintenance* unit, penggantian oli hidrolik secara menyeluruh terakhir dilakukan pada HM 10.274. Dengan demikian, pengambilan sampel pada HM 12.983 merepresentasikan kondisi oli dengan umur pakai 2.709 jam, sedangkan pada HM 14.260 umur pakai oli telah mencapai 3.986 jam. Nilai tersebut menunjukkan fase kritis karena berada sangat dekat dengan batas interval penggantian 4.000 jam yang direkomendasikan dalam *Operation and Maintenance Manual* (OMM) Komatsu. Pada periode yang sama, temperatur operasi maksimum meningkat dari 79°C menjadi 95°C dan diikuti kenaikan kandungan logam keausan Fe dari 3 ppm menjadi 31,3 ppm.

Kondisi operasi *excavator* Komatsu PC2000-11 di lingkungan pertambangan terbuka berpotensi mempercepat degradasi oli dibandingkan kondisi operasi normal yang menjadi dasar rekomendasi pabrikan. Beban kerja siklik yang tinggi (*heavy duty cyclic load*), paparan debu abrasif, serta temperatur operasi yang tinggi dapat meningkatkan laju oksidasi oli, mempercepat penurunan kualitas aditif, dan memperbesar laju keausan komponen sistem hidrolik. Temuan ini sejalan dengan penelitian Sharma et al. [16] yang melaporkan bahwa peningkatan umur pakai oli menyebabkan kenaikan kandungan logam keausan dan perubahan karakteristik viskositas. Schneider dan Blossfeld [15] juga menyatakan bahwa temperatur operasi yang tinggi dapat mempercepat degradasi oli dan meningkatkan risiko kerusakan komponen hidrolik.

Akumulasi pengaruh faktor-faktor tersebut menyebabkan terjadinya penuaan (*aging process*) pada *seal* dan *hose* hidrolik yang ditandai dengan penurunan elastisitas, pengerasan material, serta meningkatnya potensi kebocoran fluida. Selain itu, penurunan kualitas oli dan menipisnya lapisan film pelumas (*oil film thickness*) memperbesar kemungkinan terjadinya kontak langsung antar-permukaan logam yang memicu peningkatan partikel keausan. Kondisi ini tercermin dari temuan lapangan berupa kebocoran *seal*, retakan *hose* hidrolik, dan akumulasi partikel keausan pada sistem filtrasi. Hasil tersebut

menunjukkan bahwa interval penggantian oli yang ditetapkan berdasarkan waktu operasi saja belum tentu sepenuhnya mewakili kondisi aktual di lingkungan tambang yang agresif, sehingga pendekatan *condition based maintenance* (CBM) berbasis analisis oli menjadi penting untuk menjaga keandalan sistem hidrolik.



Gambar 4. Gram pada Return Filter dan Kebocoran Seal Cylinder Hidraulik.

Secara keseluruhan, hasil yang tersaji pada Tabel 3 mengonfirmasi bahwa temperatur operasi memegang peranan krusial dalam mengakselerasi proses degradasi oli sekaligus menurunkan performa sistem hidrolik. Kenaikan temperatur maksimum menjadi indikator utama bahwa sistem beroperasi dalam kondisi beban berat, sehingga diperlukan pengendalian temperatur yang efektif serta pemantauan kondisi oli secara berkala guna menjaga keandalan sistem secara berkelanjutan. Analisis pada Tabel 3 juga mengungkapkan bahwa peningkatan temperatur operasi, terutama pada nilai temperatur maksimum, berkontribusi terhadap percepatan degradasi oli dan peningkatan akumulasi partikel keausan pada sistem hidrolik. Kondisi ini tidak hanya tercermin dari perubahan parameter analisis oli, tetapi juga dapat diidentifikasi secara langsung melalui fenomena kerusakan komponen yang ditemukan di lapangan. Fenomena tersebut diperlihatkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, yang menampilkan akumulasi partikel keausan (gram) pada *return filter* serta kerusakan berupa kebocoran *seal* dan retakan pada selang hidrolik. Visualisasi ini memberikan bukti fisik atas proses degradasi oli dan dampak nyata dari tingginya temperatur operasi yang sebelumnya telah teridentifikasi melalui hasil analisis parameter.

Akumulasi partikel keausan yang ditampilkan pada Gambar 4 mengindikasikan terjadinya degradasi mekanis pada sistem hidrolik yang bersumber dari keausan komponen seperti pompa, *control valve*, dan aktuator. Kondisi ini timbul sebagai akibat dari menurunnya kemampuan oli dalam mempertahankan lapisan pelumas yang efektif, seiring bertambahnya usia pakai oli dan meningkatnya temperatur operasi. Konsekuensinya, intensitas kontak langsung antar permukaan logam semakin meningkat sehingga menghasilkan partikel keausan melalui mekanisme keausan abrasif dan adhesif. Partikel-partikel tersebut selanjutnya mengakselerasi proses keausan berikutnya melalui mekanisme abrasi tiga benda (*three-body abrasion*). Dampak dari degradasi tersebut tampak jelas pada Gambar 4 dan Gambar 5, yang memperlihatkan terjadinya kebocoran *seal* dan retakan pada selang hidrolik. Oli yang telah mengalami degradasi ditambah dengan tingginya temperatur operasi mempercepat proses penuaan material elastomer, yang bermanifestasi dalam bentuk penurunan elastisitas, pengerasan material, serta terbentuknya retakan mikro. Kondisi ini secara bertahap meningkatkan risiko kebocoran, pembengkakan material, hingga kegagalan total pada selang hidrolik.

Guna memitigasi permasalahan tersebut, penerapan *condition based maintenance* (CBM) melalui pemantauan kondisi oli dan temperatur operasi secara berkesinambungan menjadi suatu kebutuhan yang mendesak, disertai dengan pengendalian sistem filtrasi dan pendinginan secara optimal. Di samping itu, inspeksi berkala terhadap *seal* dan selang hidrolik perlu dilaksanakan secara rutin untuk mendeteksi potensi kerusakan sejak tahap awal dan memastikan keandalan sistem hidrolik tetap terjaga.



Gambar 5. Crack pada Hose Hidraulik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, interval penggunaan oli hidrolik dan temperatur operasi terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem hidrolik secara keseluruhan. Pertambahan waktu operasi dari 12.983 jam hingga 14.260 jam mengakibatkan kenaikan kandungan logam keausan besi (Fe) dari 3 ppm menjadi 31,3 ppm, yang mengindikasikan terjadinya akumulasi keausan komponen sebagai dampak dari menurunnya kapasitas pelumasan oli selama masa pemakaian. Di samping itu, temperatur operasi sistem yang berada pada kisaran 70–80°C dengan puncak temperatur maksimum mencapai 95°C terbukti mengakselerasi degradasi oli melalui mekanisme penurunan viskositas dan intensifikasi proses oksidasi, sehingga stabilitas pelumasan sistem mengalami penurunan yang cukup berarti. Kombinasi antara interval operasi yang berkepanjangan dan kondisi temperatur tinggi berkontribusi terhadap terbentuknya partikel keausan yang semakin mempercepat kerusakan komponen, seperti kebocoran *seal* dan retakan pada selang hidrolik. Dengan demikian, pengoperasian sistem yang melampaui interval penggantian oli yang optimal pada kondisi temperatur tinggi secara langsung berdampak pada penurunan performa dan keandalan sistem hidrolik. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan pengendalian temperatur yang efektif serta penerapan *condition based maintenance* (CBM) berbasis analisis oli guna menetapkan interval penggantian oli yang lebih optimal sekaligus mencegah terjadinya kegagalan sistem secara dini.

UCAPAN TERIMA KASIH

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] H. P. Bloch and F. K. Geitner, *Machinery Failure Analysis and Troubleshooting*, 5th ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2019.
- [2] S. Braun, *Mechanical Signature Analysis: Theory and Applications*, 2nd ed. London: Academic Press, 2018.
- [3] Caterpillar Inc., *Caterpillar Hydraulic Systems Operation Manual*. Peoria: Caterpillar Inc., 2018.
- [4] J. C. Fitch and D. Troyer, *Oil Analysis Basics*, 2nd ed. Tulsa: Noria Corporation, 2018.
- [5] R. W. Fox, P. J. Pritchard, and A. T. McDonald, *Introduction to Fluid Mechanics*, 9th ed. New York: John Wiley & Sons, 2015.
- [6] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.
- [7] T. Mang and W. Dresel, Eds., *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] L. R. Rudnick, *Lubricant Additives: Chemistry and Applications*, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [10] M. M. Khonsari and E. R. Booser, *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication*, 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.
- [11] R. K. Mobley, *Maintenance Engineering Handbook*, 8th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- [12] A. Heng, S. Zhang, A. C. C. Tan, and J. Mathew, "Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, no. 3, pp. 724–739, 2019.
- [13] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 4406: Hydraulic Fluid Power—Fluids—Method for Coding the Level of Contamination by Solid Particles*. Geneva: ISO, 2017.
- [14] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2017.
- [15] K. Schneider and M. Blossfeld, "Condition monitoring strategies for hydraulic systems in mining equipment," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 215, p. 107821, 2021.
- [16] V. Sharma, A. Kumar, and B. Singh, "Analysis of hydraulic oil degradation and wear characteristics in heavy equipment systems," *Tribol. Int.*, vol. 168, p. 107425, 2022.

- [17] J. M. Wakiru, L. Pintelon, P. N. Muchiri, and P. K. Chemweno, "Maintenance optimization: Application of condition-based maintenance using oil analysis," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 188, pp. 174–185, 2019.
- [18] L. Wang, *Condition Monitoring and Fault Diagnosis in Hydraulic Systems*. Singapore: Springer, 2018.
- [19] F. Aulia, Turmizi, and Arifin, "Perencanaan Perawatan Preventive dan Corrective pada Komponen Sistem Hidrolik Excavator Komatsu PC200-8," *JMS Terapan*, vol. 1, no. 1, pp. 25–31, 2017.