

# ANALISIS KEGAGALAN GEARBOX KOMPRESOR ATLAS COPCO GA 90+ MENGGUNAKAN FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS DI PACKING PLANT PT SEMEN PADANG

Karnova Yanel, Rozi Saferi\*

*Program Studi Teknik Mesin Sarjana, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Padang*

\*Corresponding Author: [rozisaferi.2015@gmail.com](mailto:rozisaferi.2015@gmail.com)

## Abstrak

Kegagalan gearbox pada kompresor Atlas Copco GA 90+ di sistem unloading semen menyebabkan penghentian operasi dan meningkatkan risiko kehilangan produksi. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi mode kegagalan dominan, menentukan prioritas risikonya, dan merumuskan tindakan mitigasi menggunakan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Penelitian menggunakan studi kasus deskriptif pada satu unit gearbox yang gagal di Packing Plant PT Semen Padang. Data diperoleh melalui observasi pembongkaran, pemeriksaan visual komponen, dokumen pemeliharaan, pengamatan kondisi oli, serta kuesioner penilaian severity, occurrence, dan detection kepada delapan teknisi. Empat mode kegagalan teridentifikasi, yaitu tooth fracture, surface pitting, kontaminasi logam pada oli, dan kerusakan permukaan housing. Surface pitting memiliki Risk Priority Number (RPN) tertinggi sebesar 288,75, diikuti tooth fracture 287,28, kontaminasi logam 181,90, dan kerusakan permukaan 82,62. Kedekatan RPN dua mode utama menunjukkan bahwa kelelahan kontak permukaan dan fraktur lentur gigi harus ditangani secara bersamaan. Bukti visual memperlihatkan patahan gigi, pitting, dan serpihan logam dalam oli. Akar penyebab yang paling mungkin adalah kombinasi ketidakselarasan poros, beban kejutan saat unloading, degradasi pelumas, interval penggantian oli yang tidak memadai, dan lemahnya deteksi dini. Rekomendasi utama meliputi pemantauan getaran, laser alignment berkala, penggantian oli setiap 2.000 jam disertai magnetic plug dan filtrasi yang lebih baik, optimasi urutan unloading, serta penggunaan gear dengan ketahanan fatigue yang lebih tinggi. Hasil penelitian memberikan dasar prioritas preventive dan predictive maintenance, tetapi verifikasi lanjutan melalui analisis getaran, pengujian oli laboratorium, dan fraktografi mikroskopis tetap diperlukan.

**Kata kunci:** analisis kegagalan; FMEA; gearbox; kompresor screw; Risk Priority Number.

## Abstract

Gearbox failure in an Atlas Copco GA 90+ compressor used for cement unloading caused operational interruption and increased production-loss risk. This study identifies dominant failure modes, prioritizes their risks, and formulates mitigation actions using Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). A descriptive case-study approach was applied to one failed gearbox at the Packing Plant of PT Semen Padang. Data were obtained from dismantling observations, visual component inspection, maintenance documents, lubricant-condition observations, and severity, occurrence, and detection assessments provided by eight maintenance technicians. Four failure modes were identified: tooth fracture, surface pitting, metallic contamination of the lubricant, and damage to the housing surface. Surface pitting produced the highest Risk Priority Number (RPN) of 288.75, followed by tooth fracture at 287.28, metallic contamination at 181.90, and surface damage at 82.62. The nearly equal RPN values of the two dominant modes indicate that contact-fatigue damage and tooth bending fracture must be mitigated concurrently. Visual evidence showed fractured teeth, pitted surfaces, and metallic debris in the oil. The most plausible root causes were shaft misalignment, unloading shock loads, lubricant degradation, unsuitable oil-change intervals, and inadequate early detection. Recommended actions include vibration monitoring, periodic laser alignment, 2,000-hour oil changes combined with magnetic plugs and improved filtration, unloading-sequence optimization, and the use of gears with higher fatigue resistance. The findings support prioritized preventive and predictive maintenance; however, further verification using vibration analysis, laboratory oil analysis, and microscopic fractography is required.

**Keywords:** failure analysis; FMEA; gearbox; screw compressor; Risk Priority Number

## 1. PENDAHULUAN

Sistem udara bertekanan merupakan utilitas penting dalam industri semen karena digunakan untuk aktuasi, transportasi material, pembersihan, dan pengoperasian berbagai peralatan proses. Walaupun

demikian, sistem ini memiliki efisiensi energi yang relatif rendah; sebagian besar energi listrik hilang sebagai panas, kebocoran, dan rugi-rugi sistem sehingga keandalan kompresor menjadi faktor penting bagi biaya operasi [1]. Pada Packing Plant PT Semen Padang, kompresor screw Atlas Copco GA 90+ memasok udara bertekanan untuk sistem unloading semen. Gangguan pada unit ini dapat menghentikan aliran material, menurunkan kapasitas pelayanan, dan meningkatkan waktu henti produksi.

Gearbox merupakan elemen transmisi yang menghubungkan motor listrik dengan air-end kompresor. Pasangan gear helix dan gear pinion bekerja pada putaran tinggi, menerima beban kontak berulang, serta bergantung pada keselarasan poros dan pembentukan film pelumas yang memadai. Kegagalan gearbox industri sering menimbulkan kerugian yang lebih besar daripada harga komponennya karena mencakup biaya pembongkaran, pengadaan suku cadang, waktu tunggu, dan kehilangan produksi. Parey dkk. [2] menunjukkan bahwa gearbox yang dirancang untuk umur operasi panjang dapat gagal prematur ketika kondisi beban, pelumasan, atau keselarasan tidak terkendali.

Dua mekanisme kerusakan utama pada roda gigi adalah bending fatigue dan surface contact fatigue. Bending fatigue diawali oleh retak pada akar gigi, yaitu lokasi dengan konsentrasi tegangan lentur tinggi. Retak kemudian merambat akibat pembebanan siklik hingga penampang tersisa tidak mampu menahan beban dan terjadi tooth fracture. Surface contact fatigue berkembang akibat tegangan kontak Hertzian berulang pada daerah permukaan atau subpermukaan. Bentuk awalnya dapat berupa micropitting, kemudian berkembang menjadi macropitting atau spalling yang meningkatkan getaran, kebisingan, dan ketidakseragaman distribusi beban [3].

Kondisi pelumas menentukan kemampuan kontak gigi bertahan terhadap keausan dan fatigue. Penurunan viskositas, oksidasi, kontaminasi air, atau keberadaan partikel logam dapat mengurangi ketebalan film oli. Partikel wear debris yang bersirkulasi berfungsi sebagai abrasif sekunder, mempercepat goresan, pitting, dan kerusakan bantalan. Pada saat yang sama, misalignment menggeser pola kontak ke salah satu sisi gigi sehingga beban tidak lagi terdistribusi merata. Kombinasi beban lokal tinggi dan pelumasan yang menurun menciptakan mekanisme kegagalan yang saling memperkuat.

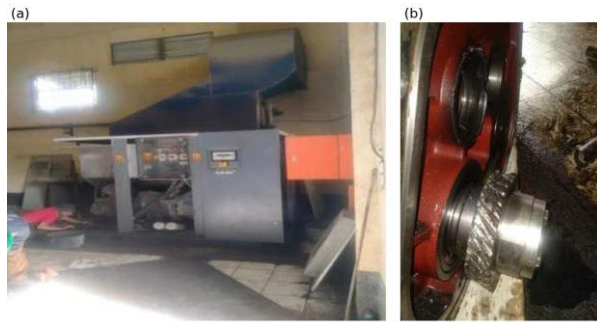
Analisis kegagalan tidak cukup hanya mengidentifikasi komponen yang rusak. Diperlukan metode yang mampu menghubungkan mode kegagalan, penyebab, dampak, kemampuan deteksi, dan prioritas tindakan. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) merupakan metode sistematis untuk mengevaluasi risiko dengan memberikan skor severity (S), occurrence (O), dan detection (D), kemudian menghitung Risk Priority Number (RPN) [4]. Pendekatan FMEA telah diterapkan dalam perencanaan perawatan kompresor untuk memusatkan sumber daya pada mode kegagalan yang paling kritis [5], [6].

Penelitian ini bertujuan: (1) mengidentifikasi mode kegagalan dominan pada gearbox kompresor Atlas Copco GA 90+; (2) menentukan prioritas risiko berdasarkan nilai S, O, D, dan RPN; serta (3) menyusun rekomendasi perbaikan yang dapat digunakan sebagai dasar preventive dan predictive maintenance. Kontribusi penelitian terletak pada integrasi bukti lapangan, penilaian teknisi, dan pemetaan risiko untuk kasus gearbox kompresor pada sistem unloading semen.

## **2. METODE PENELITIAN**

### **2.1 Desain dan objek penelitian**

Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif dengan studi kasus pada satu unit gearbox kompresor Atlas Copco GA 90+ yang mengalami kegagalan di Packing Plant PT Semen Padang, Teluk Bayur. Pemilihan sampel dilakukan secara purposif karena unit tersebut menunjukkan kegagalan aktual yang menyebabkan downtime. Kegiatan lapangan mencakup observasi unit, pembongkaran gearbox, dokumentasi kerusakan, penelusuran riwayat pemeliharaan, dan diskusi dengan personel maintenance.



Gambar 1. (a) Unit kompresor Atlas Copco GA 90+ dan (b) kondisi komponen gear setelah pembongkaran.

## 2.2 Pengumpulan data

Data primer diperoleh melalui inspeksi visual terhadap gear helix, gear pinion, housing, dan kondisi oli. Gejala yang dicatat meliputi patahan gigi, pitting, goresan, perubahan warna, kebocoran, dan keberadaan geram logam. Wawancara dan kuesioner diberikan kepada delapan teknisi perawatan mekanik yang berpengalaman menangani kompresor. Data sekunder terdiri atas catatan maintenance, riwayat penggantian oli, informasi downtime, dan dokumen pemeriksaan oli yang tersedia.

Investigasi visual digunakan untuk membedakan bentuk kerusakan. Tooth fracture diidentifikasi dari kehilangan sebagian gigi dan pola patahan yang berawal dari daerah akar. Surface pitting diidentifikasi dari lubang-lubang dan pengelupasan pada flank gigi. Kontaminasi logam ditetapkan berdasarkan temuan serpihan ferrous di dalam oli. Karena penelitian tidak menggunakan scanning electron microscopy, energy-dispersive spectroscopy, pengukuran kekerasan, maupun ferrography, interpretasi mekanisme patahan diposisikan sebagai diagnosis teknik berbasis bukti makroskopik.

## 2.3 Penilaian FMEA

Setiap mode kegagalan dianalisis berdasarkan fungsi komponen, efek kegagalan, penyebab potensial, dan pengendalian yang telah tersedia. Responden memberikan skor S, O, dan D pada skala 1-10. Severity menyatakan besarnya dampak terhadap operasi dan kerusakan sistem; occurrence menunjukkan kemungkinan atau frekuensi penyebab terjadi; sedangkan detection menunjukkan kesulitan mendeteksi kegagalan sebelum menimbulkan dampak. Nilai yang digunakan dalam analisis merupakan rata-rata penilaian delapan responden.

$$RPN = S \times O \times D$$

Mode kegagalan dengan RPN terbesar diprioritaskan untuk tindakan korektif. Namun, RPN tidak digunakan secara tunggal. Matriks severity-occurrence turut digunakan agar mode dengan dampak sangat tinggi tidak terabaikan hanya karena frekuensi atau kemampuan deteksinya berbeda. Pendekatan gabungan ini konsisten dengan perkembangan FMEA yang menekankan penggunaan informasi risiko secara lebih kontekstual [8].

Tabel 1. Sumber data dan keluaran analisis

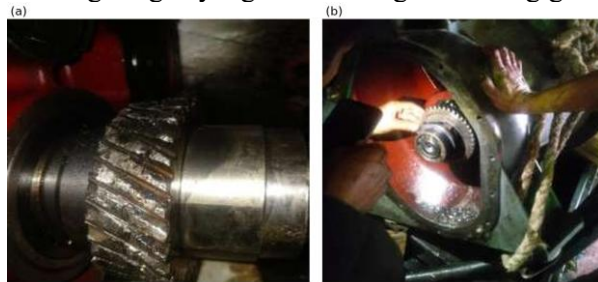
| Tahap        | Sumber data                   | Keluaran               |
|--------------|-------------------------------|------------------------|
| Identifikasi | Observasi, pembongkaran, foto | Mode kegagalan         |
| Penilaian    | Kuesioner 8 teknisi           | Nilai S, O, D          |
| Prioritas    | Perhitungan FMEA              | RPN dan matriks risiko |
| Mitigasi     | Diskusi teknis dan literatur  | Tindakan perbaikan     |

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Mode kegagalan dan bukti fisik

Pembongkaran menunjukkan empat kondisi utama: tooth fracture pada gear helix, surface pitting pada gear pinion, kerusakan permukaan housing akibat benturan serpihan, dan kontaminasi oli oleh

partikel logam. Tooth fracture merupakan mode kegagalan paling destruktif karena gigi tidak lagi mampu meneruskan daya secara stabil. Patahan menyebabkan ketidakseimbangan putaran dan menghasilkan serpihan yang dapat masuk ke daerah kontak lain. Secara visual, lokasi kerusakan berada pada gigi yang menerima pembebanan berulang; pola tersebut konsisten dengan mekanisme bending fatigue yang berkembang dari akar gigi.

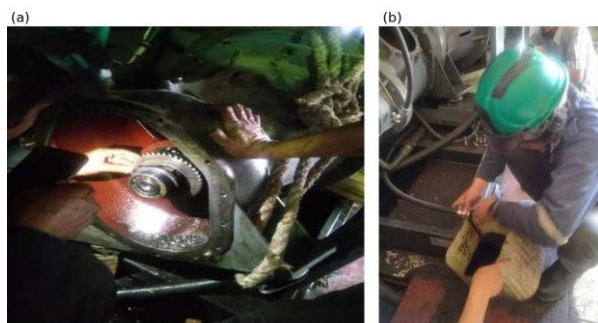


Gambar 2. Mode kegagalan dominan: (a) tooth fracture dan (b) surface pitting pada pasangan roda gigi.

Surface pitting tampak sebagai kerusakan permukaan pada flank gigi. Pitting mengubah profil kontak, meningkatkan konsentrasi tegangan pada tepi lubang, dan menyebabkan distribusi beban semakin tidak seragam. Jika tidak dihentikan, pitting dapat berkembang menjadi spalling dan memicu fraktur sekunder. Temuan ini relevan dengan model kelelahan kontak yang membedakan kegagalan yang dimulai dari permukaan dan subpermukaan berdasarkan kondisi film pelumas, kekasaran, dan tegangan kontak [3].

Housing mengalami goresan dan kerusakan lokal akibat benturan pecahan gear. Kerusakan ini memiliki dampak langsung yang lebih rendah dibandingkan kegagalan gigi, tetapi tetap penting karena dapat memengaruhi kebersihan internal, kedudukan komponen, dan keselarasan saat perakitan ulang. Inspeksi dimensi dan pemeriksaan retak pada housing diperlukan sebelum komponen digunakan kembali.

Oli menunjukkan adanya geram dan serpihan logam. Partikel tersebut merupakan indikator active wear dan sekaligus agen perusak karena terbawa ke daerah kontak. Ketika filtrasi tidak mampu menahan partikel, debris dapat menggores permukaan, mempercepat abrasive wear, dan meningkatkan jumlah partikel baru. Dengan demikian, kontaminasi logam bukan hanya akibat kegagalan gear, tetapi juga mekanisme yang mempercepat propagasi kerusakan.



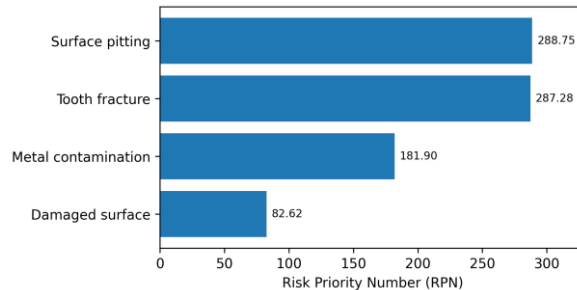
Gambar 3. (a) Geram logam dalam oli gearbox dan (b) pemeriksaan kondisi oli setelah kegagalan.

### 3.2 Nilai S, O, D, dan prioritas RPN

Hasil penilaian teknis menunjukkan bahwa dua mode kegagalan pada gigi memiliki severity lebih dari 7,5. Tooth fracture memperoleh  $S = 7,60$  karena dapat menyebabkan hilangnya transmisi daya dan downtime total. Surface pitting memperoleh  $S = 7,50$  karena dapat berkembang menjadi getaran berlebih, kehilangan efisiensi, dan fraktur. Nilai detection surface pitting sebesar 7,00 merupakan yang tertinggi, menunjukkan bahwa kerusakan ini relatif sulit dikenali sebelum gejalanya berkembang. Kontaminasi logam memiliki occurrence tertinggi, yaitu 6,00, sehingga merupakan indikator kuat kelemahan pengendalian kebersihan pelumas.

Tabel 2. Hasil penilaian FMEA

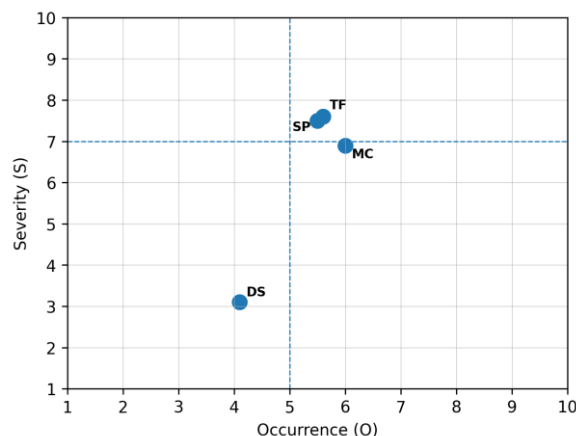
| Mode kegagalan      | S-O-D              | RPN    |
|---------------------|--------------------|--------|
| Surface pitting     | 7,50 - 5,50 - 7,00 | 288,75 |
| Tooth fracture      | 7,60 - 5,60 - 6,75 | 287,28 |
| Metal contamination | 6,89 - 6,00 - 4,40 | 181,90 |
| Damaged surface     | 3,10 - 4,10 - 6,50 | 82,62  |



Gambar 4. Perbandingan Risk Priority Number untuk empat mode kegagalan.

Surface pitting menghasilkan RPN 288,75, hanya 1,47 poin lebih tinggi daripada tooth fracture 287,28. Selisih yang sangat kecil menunjukkan bahwa keduanya harus diperlakukan sebagai satu rangkaian kegagalan kritis. Surface pitting dapat menjadi tahap awal yang mengubah profil gigi dan meningkatkan beban lokal, sedangkan tooth fracture merupakan tahap akhir yang menyebabkan kehilangan fungsi. Strategi pemeliharaan yang hanya mengganti gear patah tanpa mengendalikan pitting, alignment, dan pelumasan berisiko menghasilkan kegagalan berulang.

Metal contamination memiliki RPN 181,90. Meskipun di bawah dua mode utama, nilai occurrence tertinggi menunjukkan bahwa masalah kebersihan oli terjadi lebih sering dan berpotensi menjadi penyebab bersama. Damaged surface memiliki RPN 82,62 sehingga menjadi prioritas lebih rendah, tetapi tetap perlu dikendalikan pada tahap overhaul agar tidak mengganggu pemasangan dan keselarasan komponen baru.



Gambar 5. Posisi mode kegagalan pada matriks severity-occurrence.

### 3.3 Analisis akar penyebab

Akar penyebab tooth fracture diperkirakan merupakan kombinasi misalignment dan beban kejut. Ketidakselarasan poros menggeser kontak ke salah satu sisi gigi sehingga tegangan lentur dan kontak meningkat secara lokal. Saat proses unloading mengalami perubahan beban mendadak, torsi transien memperbesar tegangan pada akar gigi. Beban siklik kemudian menginisiasi retak dan mendorong perambatan fatigue. Diagnosis ini didukung oleh sifat kerusakan yang terkonsentrasi pada gigi dan dampak katastropik pada transmisi. Namun, karena data laser alignment sebelum kegagalan tidak tersedia, misalignment harus dipandang sebagai akar penyebab yang sangat mungkin, bukan hasil pengukuran langsung.

Surface pitting terutama dikaitkan dengan penurunan kualitas pelumas dan kondisi kontak yang tidak merata. Catatan penelitian menunjukkan interval penggantian oli aktual sekitar 3.000 jam, sedangkan

rekomendasi pemeliharaan yang digunakan dalam analisis adalah 2.000 jam. Interval yang terlalu panjang dapat meningkatkan oksidasi, penurunan viskositas, dan akumulasi wear debris. Penelitian over-heating pada screw compressor juga menunjukkan bahwa gangguan sirkulasi dan temperatur tinggi mempercepat degradasi pelumas serta menurunkan performa mesin [7].

Hubungan antara failure mode bersifat sirkular. Pitting menghasilkan partikel logam; partikel tersebut mempercepat abrasive wear; keausan meningkatkan backlash dan getaran; getaran serta pola kontak yang buruk memperbesar tegangan pada akar gigi; akhirnya tooth fracture menghasilkan serpihan berukuran lebih besar yang merusak housing dan sistem pelumasan. Karena itu, root cause analysis harus mencakup alignment, kualitas oli, filtrasi, beban transien, dan kemampuan deteksi, bukan hanya material gear.

Riwayat gearbox yang belum pernah diinspeksi sejak awal operasi memperlihatkan kelemahan strategi pemeliharaan. Preventive maintenance berbasis interval saja juga belum cukup jika kondisi beban dan kontaminasi berubah. Pendekatan condition-based maintenance diperlukan agar tren getaran, temperatur, dan karakteristik oli dapat digunakan untuk mendeteksi degradasi sebelum kerusakan menjadi katastrofik. Perencanaan perawatan kompresor berbasis risiko dan reliability dapat mengurangi ketergantungan pada tindakan korektif setelah mesin berhenti [5], [6].

### 3.4 Rekomendasi mitigasi

Tindakan pertama adalah meningkatkan deteksi dini melalui pemantauan getaran. Sensor getaran dipasang pada lokasi yang representatif di housing gearbox dan bearing. Data tidak hanya dibandingkan dengan satu nilai ambang, tetapi dianalisis sebagai tren overall velocity, spektrum frekuensi, harmonik gear mesh, sideband, dan impuls. Alarm harus dihubungkan dengan inspeksi oli dan pemeriksaan alignment sehingga keputusan maintenance tidak bergantung pada satu indikator [10].

Tindakan kedua adalah pengendalian alignment dan beban transien. Laser alignment dilakukan setelah penggantian komponen, setelah perubahan fondasi atau kopling, dan secara periodik setiap enam bulan. Soft foot, kondisi kopling, kekencangan baut, dan pertumbuhan termal perlu diperiksa karena dapat menghasilkan misalignment kembali setelah mesin beroperasi. Urutan unloading juga perlu dievaluasi untuk mengurangi torsional shock pada saat perubahan kondisi operasi.

Tindakan ketiga adalah memperbaiki manajemen pelumas. Interval penggantian oli dipersingkat menjadi 2.000 jam sebagai titik awal, kemudian disesuaikan berdasarkan hasil analisis kondisi. Magnetic plug dapat menangkap partikel ferrous berukuran relatif besar, sedangkan peningkatan filtrasi diperlukan untuk partikel yang lebih kecil. Pengambilan sampel oli harus dilakukan pada titik dan kondisi operasi yang konsisten. Parameter yang perlu dipantau meliputi viskositas, kadar air, jumlah partikel, elemen keausan, oksidasi, dan perubahan aditif. Pengkodean tingkat kontaminasi partikel dapat mengikuti ISO 4406 [11].

Tindakan keempat adalah meningkatkan ketahanan komponen. Gear pengganti harus memiliki material, proses pengerasan, kualitas permukaan, dan akurasi geometri yang memenuhi kebutuhan beban. Penelitian mengusulkan AISI 8620 dengan carburizing sebagai alternatif untuk meningkatkan ketahanan permukaan dan fatigue life. Pemilihan ini tetap harus diverifikasi melalui perhitungan tegangan bending dan contact, spesifikasi hardness case-core, kedalaman case, kualitas manufaktur, serta kompatibilitas dengan pasangan gear. Verifikasi kapasitas pitting dan kekuatan lentur dapat mengacu pada seri ISO 6336 [12], [13].

Tabel 3. Prioritas tindakan mitigasi

| Prioritas | Tindakan                                   | Tujuan risiko      |
|-----------|--------------------------------------------|--------------------|
| 1         | Vibration monitoring dan inspeksi spektrum | Menurunkan D       |
| 2         | Laser alignment dan evaluasi unloading     | Menurunkan O       |
| 3         | Oli 2.000 jam, magnetic plug, filtrasi     | Menurunkan O dan D |

| Prioritas | Tindakan                                | Tujuan risiko          |
|-----------|-----------------------------------------|------------------------|
| 4         | Gear tahan fatigue dan kontrol kualitas | Menurunkan O           |
| 5         | Inspeksi housing, bearing, dan kopling  | Mencegah efek sekunder |

Efektivitas tindakan tidak boleh dinyatakan hanya dari simulasi. Setelah rekomendasi diterapkan, nilai S, O, dan D perlu dinilai ulang menggunakan data periode operasi berikutnya. Indikator keberhasilan meliputi penurunan tren getaran gear mesh, kestabilan temperatur, kebersihan oli, berkurangnya frekuensi alarm, peningkatan mean time between failures, dan penurunan downtime. Re-rating FMEA kemudian digunakan untuk memeriksa apakah risiko benar-benar turun atau hanya berpindah ke mode kegagalan lain.

### 3.5 Keterbatasan penelitian

Penelitian dibatasi pada satu unit gearbox dan penilaian delapan teknisi, sehingga hasil RPN bersifat spesifik terhadap konteks operasi dan pengalaman responden. Bukti fraktur diperoleh secara visual tanpa SEM, EDS, metalografi, atau pengujian kekerasan. Data alignment, spektrum getaran sebelum kegagalan, dan laporan lengkap analisis oli tidak tersedia dalam naskah sumber. Oleh karena itu, hubungan antara misalignment, degradasi oli, pitting, dan tooth fracture merupakan inferensi teknik yang kuat tetapi belum merupakan pembuktian kausal eksperimental. Penelitian lanjutan perlu menggabungkan vibration analysis, ferrography, oil spectroscopy, dimensional inspection, dan fractography untuk memvalidasi akar penyebab.

### 3.6 Tahapan implementasi pemeliharaan

Rekomendasi teknis perlu diterjemahkan menjadi program implementasi yang mempunyai penanggung jawab, interval, indikator keberhasilan, dan mekanisme evaluasi. Tahap pertama adalah pemulihan setelah kegagalan. Gearbox dibongkar dan dibersihkan secara menyeluruh, jalur oli di-flushing, filter diganti, magnetic plug dipasang, serta housing, bearing, kopling, dan poros diperiksa. Pemasangan gear baru harus disertai pemeriksaan backlash, contact pattern, run-out, dan alignment. Mesin tidak langsung dikembalikan ke operasi penuh sebelum uji tanpa beban dan uji bertahap menunjukkan temperatur, suara, dan getaran yang stabil.

Tahap kedua adalah pembentukan baseline kondisi. Setelah commissioning, data getaran pada titik yang sama dikumpulkan pada kondisi beban dan putaran yang terdokumentasi. Sampel oli awal diambil sebagai referensi untuk viskositas, kadar air, kebersihan partikel, dan elemen keausan. Baseline ini penting karena nilai absolut yang sama dapat memiliki makna berbeda pada mesin dan kondisi operasi yang berbeda. Analisis tren lebih sensitif untuk mendeteksi perubahan dini dibandingkan keputusan yang hanya memakai satu nilai ambang.

Tahap ketiga adalah pelaksanaan route-based condition monitoring. Pemeriksaan operator dilakukan setiap shift melalui suara, kebocoran, temperatur, tekanan, dan alarm kontrol. Tim maintenance melakukan pengukuran getaran berkala, inspeksi magnetic plug, dan pengambilan sampel oli pada interval yang ditetapkan. Apabila tren gear-mesh, sideband, temperatur, atau jumlah partikel meningkat, interval inspeksi dipersingkat dan dilakukan pemeriksaan alignment serta kondisi kopling. Dengan cara ini, preventive maintenance berbasis waktu dipadukan dengan predictive maintenance berbasis kondisi [5], [6].

Tahap keempat adalah pengendalian berbasis FMEA. Setiap tindakan dicatat dalam action register yang memuat penanggung jawab, target penyelesaian, bukti implementasi, dan hasil verifikasi. Nilai occurrence dan detection dinilai ulang setelah tersedia data operasi yang cukup. Penurunan RPN hanya dapat dinyatakan apabila frekuensi kejadian, kemampuan deteksi, atau keduanya benar-benar membaik. Perusahaan juga perlu memantau mean time between failures, jumlah jam downtime, biaya suku cadang, biaya kehilangan produksi, dan persentase pekerjaan darurat. Indikator tersebut memberikan dasar untuk menilai kelayakan ekonomi program pemeliharaan tanpa menggunakan proyeksi yang belum tervalidasi.

Tabel 4. Rencana implementasi dan indikator verifikasi

| Horizon       | Tindakan utama                                       | Indikator                        |
|---------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Segera        | Overhaul, flushing, inspeksi gear-bearing-housing    | Tidak ada debris tersisa         |
| Commissioning | Alignment, contact pattern, baseline getaran dan oli | Parameter awal terdokumentasi    |
| Rutin         | Monitoring getaran, temperatur, oli, magnetic plug   | Tren stabil dan alarm terkendali |
| Evaluasi      | Re-rating FMEA dan audit downtime                    | RPN dan downtime terverifikasi   |

#### 4. KESIMPULAN

Analisis FMEA pada gearbox kompresor Atlas Copco GA 90+ mengidentifikasi surface pitting sebagai risiko tertinggi dengan RPN 288,75, diikuti tooth fracture 287,28, metal contamination 181,90, dan damaged surface 82,62. Dua mode utama memiliki nilai RPN hampir sama dan berada pada zona severity tinggi, sehingga harus ditangani sebagai rangkaian kegagalan yang saling berkaitan. Bukti lapangan berupa pitting, patahan gigi, dan geram logam menunjukkan kombinasi kelelahan kontak, kelelahan lentur, dan keausan abrasif.

Akar penyebab paling mungkin adalah misalignment poros, beban kejut saat unloading, degradasi pelumas, interval penggantian oli yang terlalu panjang, kontaminasi partikel, dan keterbatasan deteksi dini. Prioritas perbaikan meliputi vibration monitoring, laser alignment berkala, optimasi unloading sequence, penggantian oli setiap 2.000 jam disertai magnetic plug dan filtrasi, serta penggunaan gear dengan ketahanan fatigue lebih tinggi. Implementasi perlu diikuti pemantauan kondisi dan re-rating FMEA agar penurunan risiko dapat dibuktikan berdasarkan data operasi.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Padang, serta personel maintenance Packing Plant PT Semen Padang yang mendukung pengumpulan data dan investigasi lapangan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Mousavi, S. Kara, and B. Kornfeld, "Energy efficiency of compressed air systems," *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 313-318, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.06.026.
- [2] A. Parey, N. K. Jain, and S. C. Koria, "Failure analysis of air cooled condenser gearbox," *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, vol. 2, no. 2, pp. 150-156, 2014, doi: 10.1016/j.csefa.2014.08.003.
- [3] G. E. Morales-Espejel, B. Wainwright, and A. Kadiric, "Application of a contact fatigue life model to assess the relative risk of surface versus subsurface initiated fatigue in gears," *Wear*, vols. 578-579, art. 206216, 2025, doi: 10.1016/j.wear.2025.206216.
- [4] H. A. Aprianto and Nusyirwan, "Analisis kegagalan gas cooler pada sistem gas compressor menggunakan metode FMEA," *Seminar Nasional Teknik Mesin*, pp. 1216-1223, 2019.
- [5] A. D. Susanto and H. H. Azwir, "Perencanaan perawatan pada unit kompresor tipe screw dengan metode RCM di industri otomotif," *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, vol. 17, no. 1, p. 21, 2018, doi: 10.23917/jiti.v17i1.5380.
- [6] D. D. Susilo and E. P. Widjajati, "Usulan perawatan mesin air screw compressor secara preventive maintenance menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis dan Modularity

Design di PT XYZ,” Waluyo Jatmiko Proceeding, vol. 16, no. 1, pp. 41-50, 2023, doi: 10.33005/wj.v16i1.2.

[7] A. Candra, R. Abu, Mukhnizar, Zulkarnain, and A. Azman, “Analisis penyebab over heating untuk tindakan perawatan pada screw compressor di PT Semen Padang Unit Indarung IV,” Jurnal Teknik Industri Terintegrasi, vol. 6, no. 4, pp. 1313-1320, 2023, doi: 10.31004/jutin.v6i4.20695.

[8] D. Schneider, M. Woerle, J. Kagermeier, M. F. Zaeh, and G. Reinhart, “Sustainability risk assessment in manufacturing: A Life Cycle Assessment-based Failure Mode and Effects Analysis approach,” Sustainable Production and Consumption, vol. 47, pp. 617-631, 2024, doi: 10.1016/j.spc.2024.04.030.

[9] M. Delshah, A. Azari, R. Fatehi, X. Ji, and M. Akrami, “Effect of the liquid droplet and flow pattern on centrifugal compressor blade fatigue in an industrial olefin unit via CFD,” Results in Engineering, vol. 24, art. 102870, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102870.

[10] International Organization for Standardization, ISO 20816-3:2022, Mechanical vibration - Measurement and evaluation of machine vibration - Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min. Geneva: ISO, 2022.

[11] International Organization for Standardization, ISO 4406:2021, Hydraulic fluid power - Fluids - Method for coding the level of contamination by solid particles. Geneva: ISO, 2021.

[12] International Organization for Standardization, ISO 6336-2:2019, Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 2: Calculation of surface durability (pitting). Geneva: ISO, 2019.

[13] International Organization for Standardization, ISO 6336-3:2019, Calculation of load capacity of spur and helical gears - Part 3: Calculation of tooth bending strength. Geneva: ISO, 2019.

1.