

Identifikasi kebocoran pada cylinder head mesin Wärtsilä 18V32DF menggunakan metode RCA

Anju Fernando Purba ^{*1}, Adhe Arysuan ^{1*}

* Politeknik Negeri Batam

Program Studi Teknik Mesin

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

¹E-mail: anjufernando05@gmail.com

Abstrak

Cylinder head merupakan salah satu komponen kritis pada mesin Wärtsilä 18V32DF yang berfungsi menjaga kerapatan ruang bakar serta mendukung kelancaran proses pembakaran. Gangguan fungsional berupa kebocoran pada cylinder head dapat menurunkan efisiensi termal, memicu kontaminasi fluida, hingga menyebabkan unplanned downtime pada unit pembangkit. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi akar penyebab kegagalan (root cause) yang memicu terjadinya kebocoran pada cylinder head mesin Wärtsilä 18V32DF di PT. Batamindo Investment Cakrawala. Metode penelitian yang diterapkan adalah Root Cause Analysis (RCA) dengan pendekatan Diagram Fishbone dan Analisis 5 Whys untuk memetakan faktor kegagalan dari empat aspek utama, yaitu manusia (man), metode kerja (method), bahan (material), dan mesin (machine). Data diperoleh melalui observasi langsung saat proses overhaul, pencatatan riwayat kerusakan pada maintenance log, serta wawancara terstruktur bersama tim mekanik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa akar penyebab masalah pada aspek material dipicu oleh kelelahan logam (fatigue) pada sleeve injector yang melewati batas usia pakai, menyebabkan solar bocor dan mengontaminasi air pendingin sehingga merusak karet O-ring valve seat. Pada aspek machine, terjadi degradasi kepresisian dimensi akibat alat ukur (inside micrometer) yang tidak terkalibrasi secara berkala. Faktor method dipengaruhi oleh pengondisian suhu komponen yang tidak optimal akibat desakan waktu operasional sistem (downtime singkat), sementara faktor man bermuara pada ketiadaan program pelatihan overhaul yang terstruktur bagi teknisi. Sebagai langkah solutif, direkomendasikan penerapan jadwal kalibrasi alat ukur yang ketat, manajemen penggantian komponen kritis berbasis jam operasi (time-based maintenance), serta penyusunan program pelatihan kompetensi mekanik secara periodik.

Kata Kunci: Kepala Silinder, Wärtsilä 18V32DF, Analisis Penyebab Utama, Dudukan Katup, Selongsong Injektor.

Abstract

The cylinder head is one of the critical components of the Wärtsilä 18V32DF engine, serving to maintain combustion chamber integrity and support the smooth combustion process. Functional failures, such as leaks in the cylinder head, can reduce thermal efficiency, lead to fluid contamination, and even cause unplanned downtime at the power plant. This study aims to identify the root causes of failures that lead to leaks in the cylinder head of the Wärtsilä 18V32DF engine at PT. Batamindo Investment Cakrawala. The research method applied was Root Cause Analysis (RCA) using the Fishbone Diagram and the 5 Whys Analysis to map failure factors across four main aspects: human (man), work method (method), material (material), and machine (machine). Data was obtained through direct observation during the overhaul process, recording of damage history in the maintenance log, and structured interviews with the mechanical team. The research results indicate that the root cause of the problem in the "material" aspect was triggered by metal fatigue in the injector sleeve, which had exceeded its service life, causing diesel fuel to leak and contaminate the coolant, thereby damaging the valve seat O-ring. Regarding the machine aspect, dimensional accuracy degradation occurred due to the measuring instrument (inside micrometer) not being calibrated regularly. The "method" factor is influenced by suboptimal temperature conditioning of components due to operational time constraints (short downtime), while the "human" factor stems from the lack of a structured overhaul training program for technicians. As a solution, it is recommended to implement a strict calibration schedule for measuring instruments, time-based maintenance for critical components, and the development of periodic mechanical competency training programs.

Keywords: Cylinder Head, Wärtsilä 18V32DF, Root Cause Analysis, Valve Seat, Injector Sleeve.

1. Pendahuluan

Di era transisi energi global saat ini, industri maritim dan sektor pembangkitan listrik (*captive power plant*) dihadapkan pada regulasi lingkungan yang sangat ketat. Kebijakan internasional seperti IMO (*International Maritime Organization*) Tier III menuntut pengurangan emisi gas buang permesinan secara signifikan, terutama senyawa Nitrogen Oksida (NO_x) dan Sulfur Oksida (SO_x)[1]. Menjawab tantangan tersebut, teknologi mesin *Dual-Fuel* (DF) menjadi pilihan utama karena fleksibilitasnya dalam menggunakan Gas Alam Cair (LNG) sebagai bahan bakar utama yang ramah lingkungan, dengan tetap mempertahankan bahan bakar cair (*diesel*) sebagai cadangan operasional[2].

Salah satu mesin *prime mover* yang paling banyak diandalkan dalam skala industri dan kapal-kapal besar adalah **Wärtsilä 18V32DF**. Mesin dengan konfigurasi 18 silinder berbentuk "V" ini dirancang untuk menghasilkan efisiensi termal dan densitas daya yang tinggi melalui kombinasi dua prinsip kerja, yaitu siklus Otto saat menggunakan mode gas dan siklus Diesel ketika beroperasi dengan mode bahan bakar cair[3]. Untuk menjaga performa mekanis tetap stabil, mencegah kerusakan mendadak yang dapat mengakibatkan trip pada mesin, serta meminimalkan risiko operasional, prosedur perawatan menyeluruh (*overhaul*) secara berkala wajib diterapkan pada seluruh komponen ruang bakar[4].

Dalam menjaga mesin tersebut, **Cylinder Head (Kepala Silinder)** memegang peranan yang sangat vital. Komponen struktural ini berfungsi membatasi ruang bakar untuk menahan tekanan ledakan tinggi, sekaligus menjadi rumah bagi katup masuk (*intake valve*), katup buang (*exhaust valve*), katup bahan bakar gas (*gas admission valve*), serta injektor. Akibat letaknya yang krusial, *cylinder head* secara konstan terpapar oleh beban termomekanis yang ekstrem. yang dihasilkan dari kombinasi fluktuasi temperatur ruang bakar yang tinggi dan tekanan puncak silinder (*peak cylinder pressure*)[5]

Meskipun dirancang dengan material besi cor paduan berkekuatan tinggi, *cylinder head* Wärtsilä 18V32DF pada operasionalnya di lapangan sering kali mengalami degradasi struktural dan kegagalan mekanis berupa keretakan (*cracking*), keausan (*wear*), hingga kelengkungan fisik (*warping*). Kerusakan berulang (*recurrent failure*) dalam waktu singkat sering dijumpai pada operasional permesinan berat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa langkah perbaikan konvensional yang dilakukan oleh kru teknis di lapangan cenderung hanya menyembuhkan gejala kerusakan fisik luarnya saja, tanpa memahami secara mendalam faktor-faktor fundamental yang memicu kegagalan tersebut[6].

Apabila *cylinder head* mengalami keretakan mendalam, komponen tersebut tidak lagi dapat direkondisi melalui proses permesinan (*machining*) standar seperti *cutting*, *lapping*, atau *grinding*, melainkan harus diganti secara utuh dengan unit yang baru[7]. Kebijakan penggantian ini berdampak sistemik pada kerugian finansial yang sangat besar akibat tingginya harga komponen, serta memicu terjadinya *unplanned shutdown* (pemberhentian operasional tidak terencana) yang memperlama durasi *downtime* sistem. Oleh karena itu, diperlukan sebuah investigasi terstruktur menggunakan metode **Root Cause Analysis (RCA)** untuk membedah masalah hingga ke akar penyebabnya secara komprehensif, baik dari aspek teknis, prosedural, maupun operasional perawatan permesinan

Agar penelitian ini lebih terfokus dan mendalam, batasan masalah yang ditetapkan adalah: Objek penelitian difokuskan pada kerusakan komponen *cylinder head* pada mesin Wärtsilä 18V32DF, Analisis kegagalan didasarkan pada data riwayat parameter operasi permesinan, riwayat perawatan, serta investigasi bentuk kerusakan fisik di lapangan, Metode identifikasi akar masalah dibatasi menggunakan pendekatan *Root Cause Analysis* (RCA) melalui alat bantu teknik *5 Whys* dan *Fishbone Diagram* (Diagram Tulang Ikan).

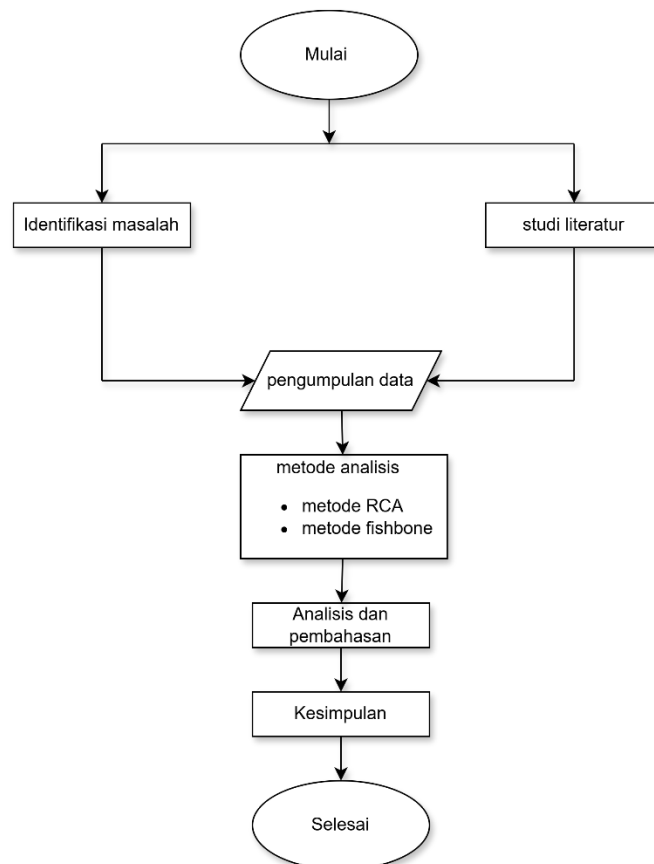
Tujuan diselenggarakannya penelitian ini adalah: Mengidentifikasi kerusakan yang terjadi pada komponen *cylinder head* Wärtsilä 18V32DF melalui investigasi visual terstruktur, Menemukan akar penyebab utama (*root cause*) terjadinya kegagalan permesinan dengan menerapkan metode *Root Cause Analysis* (RCA), Merumuskan usulan tindakan korektif (*corrective action*).



gambar 1. *Cylinder head*

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi kasus yang bersifat deskriptif analisis, dengan tujuan untuk mengidentifikasi dan menemukan akar masalah penyebab kerusakan komponen *cylinder head Wartsila 18V32DF*. Melalui metode *Root Cause Analysis (RCA)*.



gambar 2. Diagram alur penelitian

diagram ini menggambarkan tahapan sistematis yang ditempuh dalam proses penelitian untuk mengevaluasi kerusakan pada *cylinder head Wartsila 18V32DF*.

2.1. Lokasi penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT. Batamindo investment cakrawala yang beralamat di Jalan Rasamala 1 Muka Kuning Batam 29433, Indonesia. Jarak Lokasi penelitian ke kampus politeknik negeri batam sekitar 9 km dengan memakan waktu kurang lebih 20 menit.

2.2. Peralatan Dan Bahan

1. Hydraulic Tightening Tool / Jack
2. Over Head Crane
3. Valve Guide & Seat Tool
4. Dial Indicator, Jangka Sorong, cylinder bore gauge, inside micrometer ,outside micrometer
5. Lapping Tool
5. Nitrogen
6. High-Pressure Hydraulic Pump
7. Valve Spring Compressor
8. Hand Tools Set

2.3. Identifikasi Masalah

Berdasarkan pengamatan yang dilakukan ada beberapa masalah pada *cylinder head* yang menjadi penyebab terjadinya kebocoran diantaranya *sleeve injector*, *valve seat*, dan *crack* pada *cylinder head*. Masalah tersebut tentu dapat menimbulkan pertanyaan “mengapa” dan “apa” penyebab utamanya hal tersebut bisa terjadi. Hal ini menjadi latar belakang peneliti untuk melakukan proses penelitian mengenai Tindakan yang perlu dilakukan *improvement* yang tepat agar dapat menekan jumlah kasus masalah yang terjadi pada *cylinder head*

2.4. Pengumpulan Data

Pada tahap ini, peneliti melakukan proses pencarian data dan pengumpulan data langsung. Pada proses pengumpulan data dibagi menjadi 2 teknik pengumpulan data yaitu:

1. Observasi

Peneliti melakukan pengamatan secara langsung. Metode ini dilakukan untuk mengetahui lebih jelas masalah yang terjadi pada *cylinder head*. Dan mengetahui standar pengukuran dan cara pengukuran pada *cylinder head* dan komponen *cylinder head* yang mengikuti *spesifikasi manual book* Wartsila yang bisa dilihat pada table 1.

Table 1. Standar Pengukuran

Komponen	inlet(mm)	exhaust(mm)
Pocket	<112,05	<122,05
Valve seat	107,2	105,5
Valve springs	>145 (outer)	>135 (inner)
Valve	9,0 (min 7,0)	
Sleeve	48,04	

Table 2. Ketelitian Alat Ukur

Alat Ukur	Ketelitian
Dial gauge	0,001 mm
Cylinder bore gauge	0,01 mm
Vernier caliper	0,02 mm dan 0,05 mm
Micrometer inside	0,01 mm
Micrometer outside	0,01 mm

Berikut adalah beberapa proses pengukuran komponen *cylinder head*:



gambar 3. Pengukuran valve seat



gambar 4. Pengukuran sleeve injector



gambar 5. Pengukuran pocket



gambar 6. Pengukuran valve



(a) *spring inner*



(b) *spring outer*

Gambar 7. Pengukuran spring valve

Pada gambar di atas adalah beberapa cara pengambilan ukuran komponen pada *cylinder head* yang mengikuti prosedur pada manual book Wartsila

2. Wawancara

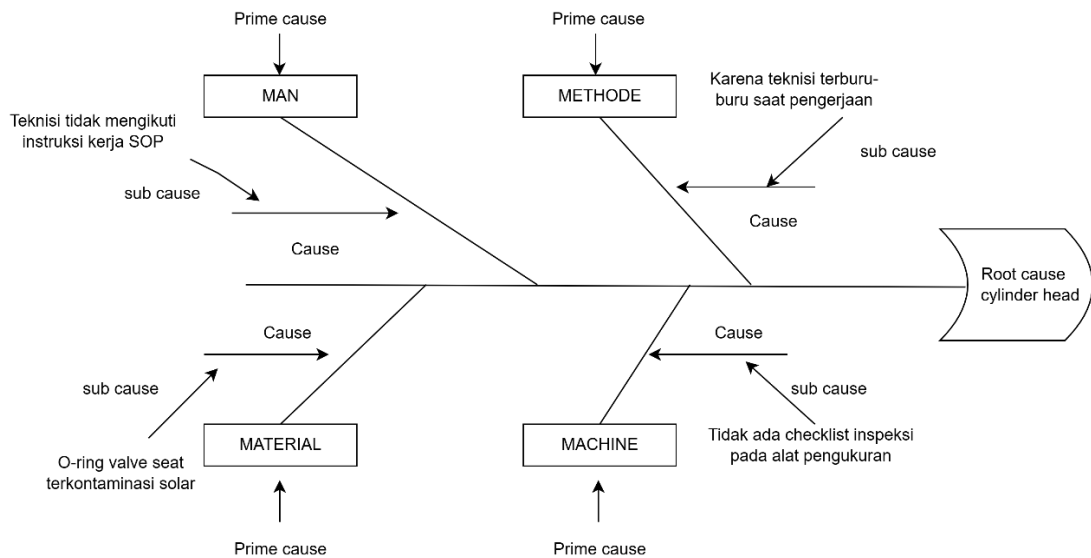
Peneliti melakukan proses tanya jawab kepada beberapa narasumber yang terkait untuk memperoleh informasi yang akurat, guna untuk membantu penulisan laporan ini, dalam hal ini yang bertindak sebagai narasumber adalah dua mekanik senior dan supervisor sebagai otoritas pengambilan keputusan.

2.5. Metode *Root Cause Analysis* (RCA)

Penelitian ini menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA) yaitu dengan sebuah metode yang digunakan sebagai alat pendekatan pemecahan masalah yang terstruktur untuk menyelidiki insiden, masalah, kekhawatiran, atau ketidaksesuaian yang teridentifikasi. RCA mengharuskan peneliti menemukan solusi untuk masalah yang mendesak, memahami akar atau penyebab dari situasi tersebut, dan menanganinya dengan tepat untuk mencegah masalah yang sama terulang kembali. Metode *Root Cause Analysis* disebut juga penyelidikan lima whys, lima whys sepenuhnya sesuai untuk digabungkan dengan grafik tulang ikan untuk menyelidiki apakah setiap alasan masalah merupakan pendorong utama masalah atau alasan masalah hanya merupakan dampak dari penyebab yang berbeda[8]. *Root Cause* adalah bagian dari beberapa faktor (kejadian, kondisi, faktor organisasional) yang memberikan kontribusi, atau menimbulkan kemungkinan penyebab dan diikuti oleh akibat yang tidak diharapkan. RCA dilakukan dengan beberapa tahapan antara lain: inventarisasi data, penyusunan diagram sebab – akibat, analisa penyebab akar permasalahan, dan penyusunan rekomendasi

2.6. Metode *Fishbone*

Analisis *fishbone* atau disebut diagram sebab akibat adalah alat yang digunakan untuk mengidentifikasi akar masalah dari sebuah masalah[9]. Dalam konteks *cylinder head Wartsila 18V32df*, analisis *fishbone* dapat digunakan untuk mengidentifikasi berbagai penyebab potensial terkait masalah *cylinder head*, seperti kerusakan atau kebocoran. Tujuan menggambarkan masalah dalam suatu diagram atau gambar adalah untuk lebih memudahkan kita memahami gambaran permasalahan dan faktor-faktor penyebab munculnya permasalahan dalam suatu diagram atau gambar. Konsep dasar dari diagram *fishbone* adalah permasalahan mendasar diletakkan pada bagian kanan dari diagram atau pada bagian kepala dari kerangka tulang ikannya, penyebab permasalahan diletakkan pada sirip dan durinya, seperti contoh diagram pada gambar 8.



Gambar 8. Contoh diagram fishbone

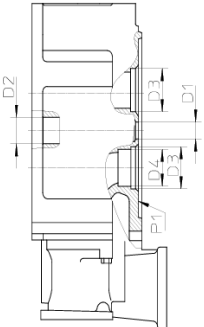
3. Analisis Data Dan Pembahasan

3.1 Hasil Pengumpulan Data

Dari proses pengumpulan data yang sudah dilakukan sebelumnya di perolehlah hasil pengukuran pada *cylinder head* dan komponen *cylinder head*, setelah hasil diperoleh maka akan dilakukan diskusi terhadap supervisor untuk melanjutkan proses pekerjaan. Berikut merupakan hasil dari data pengukuran pada *cylinder head* dan komponen *cylinder head* yang dapat dilihat pada gambar 9 – 13.

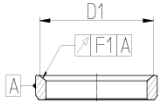
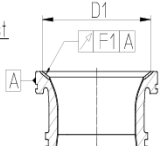
1

Cylinder head. Serial Number ; 807

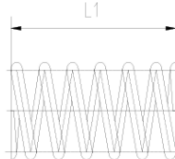


No.	Check criterion	Reference		Results			
IN		Int.	Exh.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
1	Fit diameter D3 [mm]	<112,05 (STD)	<122,05 (STD)	112,05		122,01	122,01
1.1	Condition of valve seat	OK/NOK	OK/NOK	ok	ok	ok	ok
2	Fit diameter D4 [mm]		<110,06			ok	ok
3	Visual check (D3, D4)	OK / NOK		ok	ok	ok	ok
4	Fit diameter D1 [mm]	<48.04		48,025			
5	Red-white-crack detection	OK / NOK		ok			
6	Bore for relief valve equipment						
	Visual check	OK / NOK		ok			
7	Bore for nozzle equipment						
	Visual check	OK / NOK		ok			
8	Sealing surface of the cyl. head						
	Visual check (P1 Lapping)	OK / NOK		ok			
9	Visual check of o-ring grooves (sealing to liner)	OK / NOK		ok			
OUT							
10	Pressure test 10 bar	OK / NOK		ok			

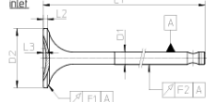
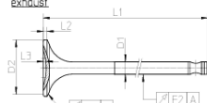
Gambar 9. Hasil pengukuran cylinder head

2 Valve seats (intake / exhaust)								
inlet  exhaust 	No.	Check criterion	Reference		Intake		Exhaust	
			Int.	Exh.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
	1	Seat edge diameter D1 [mm]	107,2		107.15	107,1		
	2	Visual check	OK / NOK		ok	ok	ok	ok
			Int.	Exh.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
			N / R		R	R	R	R
	1	Seat edge diameter D1 [mm]		105,5			105.15	105.10
	2	Seat roundness F1 [mm]	< 0,03					
	3	Surface contact area	OK / NOK		ok	ok	ok	ok
	4	Re-white-crack detection	OK / NOK		ok	ok	ok	ok
	5	Visual check	OK / NOK		ok	ok	ok	ok

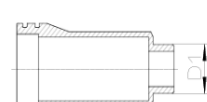
Gambar 10. Hasil pengukuran pada *valve seat*

3 Valve springs								
	No.	Check criterion	Reference		Intake		Exhaust	
			Int.	Exh.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
		Outer valve spring	R / NEW		R	R	R	R
	1	Length L1 [mm]	>145		151.8	151.75	150.45	151.40
	2	Visual check	OK / NOK		ok	ok	ok	ok
		Inner valve spring	R / NEW		R	R	R	R
	1	Length L1 [mm]	>135		138.55	138.25	139.10	139.15
	2	Visual check	OK / NOK		ok	ok	ok	ok

Gambar 11. Hasil pengukuran pada *valve springs*

4 Valves								
inlet  exhaust 	No.	Check criterion	Reference		Intake		Exhaust	
			Int.	Exh.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
	1	Height of valve head L2 [mm]	9,0 (min 7,0)		8.85	8.90	8.90	8.95
	2	Stem diameter D1 [mm]	23,97(m;23,95)		23.90	23.85	23.90	23.95
		Check criterion	Reference		Intake		Exhaust	
			Int.	Exh.	Pos.1	Pos.2	Pos.3	Pos.4
			R / NEW		R	R	R	R
	1	Runout stem F2 [mm]	< 0,03		0.025	0.025	0.005	0.005
	2	Run out seat F1 [mm]	< 0,06		0.06	0.04	0.015	0.05

Gambar 12. Hasil dari pengukuran *valves*

5 Sleeve				
	No.	Check criterion	Reference	Sleeve
			R / NEW	R
	1	Outer diameter D1 [mm]	>48.04	47.95
	2	check creack	OK / NOK	ok

Gambar 13. Hasil dari pengukuran *sleeve injector*

Dari hasil pengukuran *cylinder head* dan komponen *cylinder head* ditemukan sebuah masalah yang dimana pada komponen *valve seat intake* bagian posisi 1 dan *valve seat exhaust* pada posisi 3 dan 4 harus di *oversize* dikarenakan *pocket* di *cylinder head* mengalami keropos yang dapat di lihat pada gambar 14.



Gambar 14. Kondisi *pocket* yang mengalami keropos

3.2 Pengolahan Hasil Data

Berdasarkan hasil data yang didapatkan maka akan dilakukan proses *cutting* pada bagian *pocket* yang dimana pada posisi *valve seat inlet* di *cutting* sebanyak 1,5 mm dan pada posisi *valve exhaust* di *cutting* pada posisi 3 sebanyak 1,5 mm dan pada posisi 4 1,0 mm. Dan untuk Batasan *oversize* dimulai dari 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm, dan batas maksimal 3 mm,

Parameter dan Rumus Perhitungan

- Parameter Dasar yang Dibutuhkan:

D_{std} : Diameter luar *valve seat* standar (mm).

Oversize: Ukuran penambahan diameter (+1,0 mm dan +1,5 mm).

Δi (*Interference Fit*): Besarnya nilai sesakan tekan standar Wärtsilä (umumnya berkisar 0,10 mm - 0,14 mm untuk *cast iron cylinder head W32*).

$D_{pocket\ lama}$: Diameter *pocket* eksisting/bekas keausan yang diukur dengan *inside micrometer / bore gauge*.

- Rumus Perhitungan Target Diameter *Pocket* (D_{pocket})

Langkah A: hitung diameter luar *valve seat* baru ($D_{seat_oversize}$)

$$D_{seat_oversize} = D_{std} + oversize$$

Untuk +1.0 mm: $D_{seat_oversize} = D_{std} + 1,00\text{ mm}$

Untuk +1.5 mm: $D_{seat_oversize} = D_{std} + 1,50\text{ mm}$

Langkah B: hitung target diameter pemesian *pocket* (D_{target})

$$D_{target} = D_{seat_oversize} - \Delta i$$

Simulasi Perhitungan

Diameter luar *valve seat inlet* standar = 112,00 mm

Diameter luar *valve seat exhaust* standar = 122,00 mm

Interference fit (Δi) = 0,10 mm

Ukuran *pocket inlet* lama = 112,05 mm

Ukuran *pocket exhaust* lama = 122,01 mm

Kasus 1. *Valve seat inlet* P1 (*oversize* 1,50 mm)

- Diameter *valve seat* baru:

$$D_{seat} = 112,00 + 1,50 = 113,50\text{ mm}$$

- Target diameter *pocket* yang di bore:

$$D_{target} = 113,50 - 0,10 = 113,40\text{ mm}$$

Kasus 2. *Valve seat exhaust* P3 (*oversize* 1,50 mm)

- Diameter *valve seat* baru:

$$D_{seat} = 122,00 + 1,50 = 123,50\text{ mm}$$

- Target diameter *pocket* yang di bore:

$$D_{target} = 123,50 - 0,10 = 123,40\text{ mm}$$

Kasus 3. *Valve seat exhaust* P4 (*oversize* 1,0 mm)

1. Diameter *valve seat* baru:

$$D_{seat} = 122,00 + 1,00 = 123,00 \text{ mm}$$

2. Target diameter *pocket* yang di bore:

$$D_{target} = 123,00 - 0,10 = 122,90 \text{ mm}$$

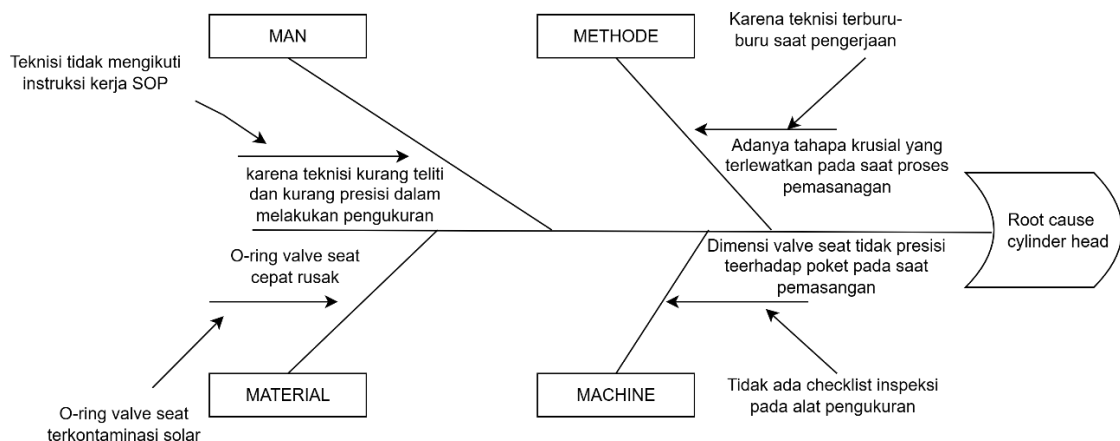
Berdasarkan visualisasi dan simulasi perhitungan pemessinan di atas, didapatkan bahwa target diameter akhir pembubutan (*re-boring*) pada lubang *pocket cylinder head* adalah sebesar 113,40 mm untuk katup masuk (*valve seat inlet* P1 dengan *oversize* 1,5 mm), 123,40 mm untuk katup buang (*valve seat exhaust* P3 dengan *oversize* 1,5 mm), dan 122,90 mm untuk katup buang (*valve seat exhaust* P4 dengan *oversize* 1,0 mm).

Selisih dimensi sebesar 0,10 mm yang disisakan dari diameter luar (*Outer Diameter*) fisik *seat ring* baru tersebut merupakan aspek kritis yang sengaja direncanakan. Pengurangan ukuran lubang *pocket* ini bertujuan untuk mempertahankan nilai kesesakan mekanis standar bawaan pabrik (*interference fit*), yang secara teoritis harus berada pada rentang 0,08 mm hingga 0,14 mm. Ketepatan dimensi ini sangat vital karena deviasi mikro pada area kontak tekan komponen permesinan berat terbukti mempercepat laju keausan (*wear rate*) akibat gesekan friksi dinamis[10]

Namun, pengerjaan mekanis yang presisi ini tidak akan berjalan optimal tanpa didukung oleh ketepatan metode kerja dan kualitas material pendukung di lapangan. Karakteristik material besi cor paduan berkekuatan tinggi (*high-strength alloyed cast iron*) yang digunakan pada kepala silinder menuntut pemahaman mendalam terkait batas regangan maksimum guna menghindari deformasi permanen saat menerima beban kejut mekanis[11]. Guna mengidentifikasi mengapa kegagalan fungsional berupa kebocoran kompresi dan fluida pada *cylinder head* Wärsilä 18V32DF ini masih terjadi di PT. Batamindo Investment Cakrawala, penelitian ini dilanjutkan dengan memetakan akar masalah (*root cause*) menggunakan pendekatan Diagram Fishbone dan Analisis 5 Whys yang menelaah empat faktor utama, yaitu: *Man*, *Method*, *Material*, dan *Machine*

3.3 Pendalaman Analisis *Fishbone* Dengan Pendekatan 4M dan 5 *why's*

Analisi *fishbone* yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab kebocoran pada *cylinder head* di perkuat dengan pendekatan 4M (*Man*, *Material*, *Method*, *Machine*) dan teknik 5 *why's*. Pendekatan ini memungkinkan pengalian penyebab secara lebih mendalam dari setiap aspek penyumbang kerusakan.



Gambar 15. Diagram *fishbone* *cylinder head* yang mengalami kebocoran

Diagram *fishbone* dengan pendekatan 4M (*Man*, *Material*, *Method*, *Machine*) yang di perdalam menggunakan metode 5 *why's*

Pembahasan:

1. **Man** (manusia)
Mengapa *cylinder head* mengalami kebocoran?

- Why 1: karena teknisi kurang teliti dan kurang presisi dalam melakukan pengukuran serta pemasangan *valve seat*.
Mengapa teknisi kurang teliti dan kurang presisi?
- Why 2: karena teknisi tidak menerapkan atau mengikuti instruksi kerja dalam SOP pengantian *valve seat* secara konsisten.
Mengapa SOP penggantian *valve seat* tidak diterapkan secara konsisten?
- Why 3: karena teknisi belum pernah mendapatkan pelatihan formal dan terstruktur mengenai *overhaul* komponen spesifik mesin Wartsila 18V32DF.
Mengapa teknisi belum mendapatkan pelatihan formal tersebut?
- Why 4: karena program pelatihan kompetensi khusus kru mekanik internal tidak dijadwalkan secara berkala oleh Perusahaan.
Mengapa jadwal pelatihan tidak dijadwalkan secara berkala?
- Why 5 (*Root Cause*): Karena sistem *training* di perusahaan masih bersifat reaktif (tergantung pemanggilan langsung dari *training center*), bukan berdasarkan analisis kebutuhan kompetensi tahunan.

2. **Method** (metode)

Mengapa *cylinder head* mengalami kebocoran?

- Why 1: karena terdapat tahapan krusial yang terlewatkan pada prosedur pemasangan *valve seat*, yaitu pengondisian suhu komponen tidak mencapai titik optimal.
Mengapa tahap pengondisian suhu komponen bisa terlewatkan?
- Why 2: karena teknisi melakukan proses penyetoran dan pemasangan *valve seat* secara terburu-buru sebelum perbedaan suhu ideal tercapai.
Mengapa teknisi terburu-buru dalam melakukan pemasangan?
- Why 3: karena target waktu pengerjaan yang diberikan oleh *manajemen* sangat singkat.
Mengapa target waktu pengerjaan dibuat sangat singkat?
- Why 4: karena unit mesin Wartsila tersebut dituntut untuk segera beroperasi kembali secepatnya.
Mengapa mesin harus segera beroperasi kembali?
- Why 5 (*Root Cause*): karena tingginya beban kelistrikan/operasional sistem sehingga mesin harus segera masuk jaringan guna mencegah terjadinya beban berlebihan (*overload*) serta pemadaman pada unit mesin lainnya.

3. **Material** (bahan)

mengapa *cylinder head* mengalami kebocoran?

- Why 1: karena *o-ring valve seat* mengalami kerusakan dini.
Mengapa *o-ring valve seat* cepat rusak?
- Why 2: karena material karet *o-ring* terdegradasi akibat kontaminasi solar yang bercampur dengan air.
Mengapa terjadi kontaminasi solar bercampur dengan air?
- Why 3: karena *o-ring* pada *injector* putus/rusak.
Mengapa *o-ring injector* bisa putus?
- Why 4: karena terjadinya retakan (*crack*) pada komponen *sleeve injector*.
Mengapa terjadinya retakan pada *sleeve injector*?
- Why 5 (*Root Cause*): karena material *sleeve injector* telah mengalami kelelahan logam akibat usia pakai komponen yang sudah mencapai batas maksimal operasional (*running hours*).

4. **Machine** (mesin)

Mengapa *cylinder head* mengalami kebocoran?

- Why 1: karena dimensi komponen *valve seat ring* tidak presisi terhadap lubang dudukan (*pocket*) saat terpasang.
Mengapa dimensi *pocket* tidak presisi?
- Why 2: karena penyimpangan ukuran atau keovalan pada lubang *pocket* tidak terdeteksi sebelum pemasangan komponen baru.
Mengapa penyimpangan ukuran lubang *pocket* tidak terdeteksi?
- Why 3: karena hasil pengukuran dimensi tidak akurat akibat alat ukur (*inside micrometer/bore gauge*) mengalami penurunan fungsi atau kerusakan.
Mengapa alat ukur bisa rusak atau tidak akurat?

- Why 4: karena alat ukur tidak pernah dikalibrasi secara berkala sebelum digunakan untuk inspeksi *overhaul*.
Mengapa tidak dilakukan kalibrasi secara berkala pada alat ukur?
- Why 5 (Root Cause): karena tidak ada jadwal terstruktur dan prosedur pemeliharaan khusus untuk alat-alat ukur presisi.

3.4 Analisis Akar Masalah dengan RCA (Root Cause Analysis)

Berdasarkan investigasi visual, pencatatan *maintenance log*, dan penelusuran menggunakan kombinasi metode Diagram *Fishbone* serta Analisis *5 Whys*, didapatkan hasil identifikasi terstruktur mengenai penyebab kebocoran pada *cylinder head* Wärtsilä 18V32DF sebagai berikut:

Faktor Material (Bahan)

- **Temuan Lapangan:** Ditemukan komponen *sleeve injector* mengalami keretakan mikro (*crack*) dan karet *O-ring valve seat* dalam kondisi hancur/terdegradasi dini.
- **Alur Hasil RCA:** Keretakan pada *sleeve injector* dipicu oleh kelelahan logam (*fatigue*) karena usia pakainya telah melampaui batas maksimal jam operasional mesin (*running hours*). Hal ini mengakibatkan bahan bakar solar bertekanan bocor dan masuk ke kompartemen air pendingin (*jacket cooling water*). Solar yang bercampur air tersebut bertindak sebagai zat pelarut (*solvent*) yang mengikis kekenyalan material karet *O-ring valve seat* hingga hancur. Akibatnya, air pendingin menyusup ke area lubang duduk katup dan memicu korosi-erosi (keropos) pada permukaan besi cor *pocket*.

Faktor Mesin (Machine)

- **Temuan Lapangan:** Penyimpangan ukuran atau tingkat keovalan lubang *pocket* di atas batas toleransi standar ($<0,02$ mm) gagal terdeteksi sebelum perakitan.
- **Alur Hasil RCA:** Tidak terdeteksinya keovalan lubang ini terjadi karena alat ukur presisi (*inside micrometer* atau *bore gauge*) yang digunakan oleh mekanik mengalami penurunan fungsi akurasi (tidak presisi). Penurunan fungsi ini berakar dari tidak adanya jadwal pemeliharaan terstruktur dan prosedur kalibrasi alat ukur secara berkala di bengkel.

Faktor Metode Kerja (Method)

- **Temuan Lapangan:** Pengondisian perbedaan suhu komponen saat perakitan *valve seat ring* baru tidak mencapai titik optimal.
- **Alur Hasil RCA:** Proses pembekuan *seat ring* dengan nitrogen cair (seharusnya mencapai suhu -25°C) dan pemanasan *cylinder head* (seharusnya 100°C) terabaikan akibat teknisi melakukan pengetokan secara terburu-buru. Ketergesaan ini dipicu oleh desakan manajemen operasional untuk meminimalkan waktu *downtime maintenance*, karena unit generator Wärtsilä 18V32DF tersebut harus segera masuk ke dalam jaringan kelistrikan sistem (*running*) untuk mencegah terjadinya beban berlebih (*overload*) pada unit mesin lainnya.

Faktor Manusia (Man)

- **Temuan Lapangan:** Teknisi kurang teliti dan kurang presisi saat melakukan pengukuran dimensi serta penyetulan komponen *overhaul*.
- **Alur Hasil RCA:** Ketidaktelitian tersebut terjadi karena teknisi di lapangan tidak mengikuti instruksi kerja dalam SOP penggantian *valve seat* secara konsisten. Pengabaian SOP ini disebabkan oleh belum adanya program pelatihan (*training*) formal, terencana, dan terstruktur dari perusahaan terkait perawatan mesin spesifik tipe Wärtsilä 32DF. Sistem manajemen pelatihan di perusahaan masih bersifat reaktif (menunggu pemanggilan dari *training center* pusat), bukan berdasarkan analisis kebutuhan kompetensi (*Training Needs Analysis*) berkala.

3.5 Rekomendasi Tindakan Korektif Kebocoran *Cylinder Head* Wartsila 18V32DF

Table 3. Rekomendasi Tindakan Korektif dan Preventif

Faktor RCA	Akar Masalah (<i>Root Cause</i>)	Tindakan Korektif (<i>Corrective Action</i>)	Tindakan Preventif (<i>preventive Action</i>)
MAN (Manusia)	Sistem <i>training</i> masih bersifat reaktif (tergantung pemanggilan <i>training</i> center pusat) dan belum ada analisis kebutuhan kompetensi khusus	Mengirimkan teknisi senior dan junior untuk mengikuti penyegaran (<i>refreshment</i>) prosedur <i>overhaul cylinder head</i>	Membuat program <i>training Needs Analysis</i> (TNA) tahunan dan menyelenggarakan pelatihan internal secara berkala
METHOD (Metode Kerja)	Prosedur pengondisian suhu terabaikan (terburu-buru) karena desakan manajemen akibat tingginya beban kelistrikan operasional sistem	Memastikan perbedaan suhu komponen tercapai secara optimal sebelum pemasangan <i>valve seat</i> di dinginkan ke -25° C dengan nitrogen	Mengoptimalkan pembagian beban (<i>load sharing</i>) antara unit generator lain saat proses <i>maintenance</i> , serta memperketat pengawasan pengisian <i>Checklist SOP</i> pemasangan <i>valve seat</i>
MATERIAL (Bahan)	Keretakan (<i>crack</i>) pada komponen <i>sleeve injector</i> akibat kelelahan logam karena usia pakai komponen melewati batas jam operasional (<i>running hours</i>)	Melakukan penggantian satu set <i>sleeve injector</i> baru dan memastikan penggunaan material <i>O-ring valve seat</i> yang memiliki ketahanan tinggi terhadap kontaminasi solar	Memasukan komponen <i>sleeve injector</i> ke dalam daftar komponen kritis yang wajib diganti secara berkala berdasarkan jam operasi tanpa menunggu komponen retak
MACHINE (Mesin)	Tidak adanya jadwal terstruktur dan prosedur pemeliharaan khusus alat- alat ukur presisi.	Melakukan kalibrasi ulang sesegera mungkin terhadap semua alat ukur yang mengalami penurunan fungsi atau kerusakan sebelum digunakan Kembali untuk <i>overhaul</i> .	Membuat jadwal rutin <i>Preventive Maintenance Checklist</i> khusus kalibrasi internal alat ukur presisi setiap sebelum dan sesudah pengerjaan <i>overhaul</i> , serta kalibrasi eksternal bersertifikat secara tahunan.

3.6 Pembahasan

Berdasarkan korelasi antar-faktor 4M yang telah dipetakan, penelitian ini mengidentifikasi bahwa **faktor Material, yaitu kelelahan logam (*fatigue*) pada *sleeve injector* akibat telah melewati batas jam operasional (*running hours*), merupakan akar masalah yang paling dominan**. Faktor ini dinilai paling dominan karena bertindak sebagai pemicu utama yang mengawali rentetan kegagalan mekanis pada komponen *cylinder head*.

Keretakan mikro pada *sleeve injector* menyebabkan bahan bakar solar bertekanan bocor masuk ke dalam kompartemen air pendingin (*jacket cooling water*). Solar yang bersifat pelarut hidrokarbon ini kemudian merusak ikatan kimia material karet *O-ring valve seat*, menyebabkan karet mengalami pembengkakan, mengeras, dan hancur dini. Hilangnya fungsi penyegelan dari *O-ring* inilah yang menjadi penyebab langsung masuknya fluida ke ruang bakar dan memicu korosi erosi (keropos) pada permukaan lubang *pocket*.

Meskipun faktor *Machine* (alat ukur tidak akurat) dan *Method* (pemasangan terburu-buru) ikut berkontribusi terhadap hilangnya kepresisian nilai kesesakan (*interference fit*) saat *overhaul*, kedua faktor tersebut bersifat kondisional saat proses perawatan. Sebaliknya, kegagalan material pada *sleeve injector* terjadi secara konstan di dalam mesin selama operasi dan langsung merusak komponen protektif lainnya. Oleh karena itu, memprioritaskan manajemen penggantian *sleeve injector* berbasis waktu (*time-based maintenance*) adalah kunci paling krusial untuk menghentikan siklus kegagalan berulang (*recurrent failure*) pada *cylinder head* Wärtsilä 18V32DF.

4. Kesimpulan

Secara keseluruhan, hasil analisis *Root Cause Analysis* (RCA) dalam penelitian ini tidak hanya mengidentifikasi penyebab teknis kegagalan, tetapi juga memberikan kontribusi praktis dan dasar strategis bagi manajemen perusahaan dalam tiga area utama:

1. **Optimasi *Preventive Maintenance*:** Menjadi acuan untuk menerapkan kebijakan penggantian komponen kritis berbasis jam operasi (*time-based maintenance*), khususnya pada komponen *sleeve injector*, guna mencegah kerusakan beruntun (*secondary damage*) pada material di sekitarnya.
2. **Sistem Pemeliharaan Alat Kerja:** Menegaskan urgensi penyusunan jadwal kalibrasi terstruktur untuk alat ukur presisi guna menjamin akurasi inspeksi dimensi makro di bengkel.
3. **Pengembangan Kompetensi:** Menjadi landasan dalam merancang program pelatihan teknis terstruktur (*In-House Training*) yang disesuaikan dengan kebutuhan kompetensi nyata (*Training Needs Analysis*) kru mekanik di lapangan.

Dengan demikian, rekomendasi yang dirumuskan dari penelitian ini dapat menjadi solusi komprehensif bagi perusahaan untuk menekan angka kegagalan berulang (*recurrent failure*), mengoptimalkan biaya pemeliharaan, serta meminimalkan risiko *unplanned downtime* pada unit pembangkit Wärtsilä 18V32DF.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IMO Marine Environment Protection Committee, "Adoption of the Amendments to the Technical Code on Control of Emission of Nitrogen Oxides from Marine Diesel Engines (NOx Technical Code 2008)," International Maritime Organization, London, UK, Standard IMO-MEPC.251(67), 2017.
- [2] P. G. Scholar, "Diesel to Dual Fuel Conversion Process Development," *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3.6, pp. 306-310, 2018.
- [3] J. Babicz, *Wartsila Encyclopedia of Ship Technology*, 2nd ed. Helsinki, Finland: Wärtsilä Corporation, 2015, pp. 105–121.
- [4] Wärtsilä Corporation, "Maintenance Schedule for WÄRTSILÄ® 32 Engines," *Service Manual Guide V32-PA-1*, Helsinki, Finland, Oct. 2016.
- [5] M. Cattarinussi, A. Leppaen, J. Konno, and T. Frondelius, "Cylinder head design of experiments by using the Wartsila Digital Platform," *Journal of Structural Mechanics*, vol. 51, no. 4, pp. 215-228, 2018.
- [6] A. Heri et al., "Investigasi Kebocoran Valve Cylinder Head terhadap Kinerja Motor Diesel," *Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik*, vol. 10, no. 2, pp. 45-52, 2020.
- [7] H. Van Hoten, H. Gustriranda, and N. Nurbaiti, "Recondition Cylinder Head Engine Wartsila Diesel 18V32DF," *METAL: Jurnal Sistem Mekanik dan Termal*, vol. 3, no. 2, pp. 73-78, 2020.
- [8] R. S. Prasetyo, "Analisis Akar Masalah (RCA) pada Kegagalan Komponen Kritis Motor Diesel Stasioner," *Jurnal Teknik Mesin dan Sistem Energi*, vol. 8, no. 3, pp. 112-120, 2022.
- [9] K. Widiyanto and S. Raharjo, "Analisis Deviasi Prosedur Kerja Mekanik pada Pemasangan Komponen Mesin Pembangkit Daya Stasioner," *Jurnal Manajemen Pemeliharaan Industri*, vol. 6, no. 4, pp. 201-209, 2024.
- [10] T. R. Pramono and J. Suwandi, "Analisis Laju Keausan Komponen Katup pada Motor Diesel Putaran Medium," *Jurnal Tribologi dan Aplikasi Material*, vol. 12, no. 1, pp. 34–41, 2022. S. M.
- [11] S. M.Hadi and W. Utomo, "Karakteristik Termomekanis dan Batas Deformasi Besi Cor Paduan Tinggi untuk Komponen Mesin Pembangkit," *Jurnal Metalurgi dan Sains Material*, vol. 9, no. 2, pp. 115–123, 2023.

LAMPIRAN



Gambar a



Gambar b

Pada hasil pengukuran *valve seat exhaust oversize 1 mm* di temukan dua hasil pengukuran yang tidak sama pada pengukuran gambar a diperoleh hasil 122,10 mm dan pada gambar b diperoleh hasil 122,15 mm.

Table 4. jadwal pergantian komponen *cylinder head*

Komponen	Batas jam oprasional	Keterangan
Valve seat	24.000 – 48.000 hours	Tergantung kondisi poket apakah terjadi korosi atau tidak
Sleeve injector	24.000 – 48.000 hours	Di ganti setiap 2 kali <i>overhaul</i>
O-ring valve seat	16.000 – 24.000 hours	Di Ganti apabila <i>valve seat</i> dilepaskan / dibuka
Valve	24.000 – 48.000 hours	Di Ganti apabila terjadi ketidaksesuaian atau melampaui toleransi standar pabrikan