

Inovasi Sistem *Electronic Nose* untuk Monitoring Kualitas Oli dan Deteksi Dini Kerusakan Ring Piston pada Mesin Kapal Nelayan (Studi Kasus: Kampung Nelayan Desa Kronjo)

Ikhwanuddin^{1*}, M. Anang Jatmiko², A. Nur Fajri Irwan³, Ferro Hidayah⁴, Juliaster Marbun⁵

^{1*,2,3,4}Program Studi Teknika, Sekolah Tinggi Ilmu Pelayaran Jakarta, Jakarta, Indonesia

⁵Program Studi Pendidikan Fisika, Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan, Universitas HKBP Nommensen, Medan, Indonesia

Email: ^{1*}ikhwanudin@stipjakarta.ac.id

Abstract

Electronic Nose system to optimize fishing vessel engine maintenance through in situ oil quality monitoring. This system integrates four gas sensors (TGS 813, TGS 822, TGS 2600, TGS 2602) with a DC pump and Arduino Uno, enabling early detection of piston ring damage without disassembling the engine. It detects volatile compounds in the oil, such as heavy metals and acidic substances caused by piston friction, using the iontophoresis method. Sensor readings for normal piston rings are: TGS2600 (410–600 mV), TGS2602 (200–210 mV), TGS813 (55–60 mV), TGS822 (70–110 mV); for worn rings: TGS2600 (540–730 mV), TGS2602 (330–350 mV), TGS813 (100–107 mV), TGS822 (90–150 mV); and for scratched rings: TGS2600 (480–690 mV), TGS2602 (220–245 mV), TGS813 (80–90 mV), TGS822 (100–200 mV). With real-time damage detection, this technology reduces repair time, cuts operational costs, and extends engine life. Additionally, it supports lower carbon emissions and oil waste, contributing to environmental sustainability. The adoption of Nautical Guardian is expected to improve the productivity and income of fishermen, particularly in Kronjo Fishing Village, Tangerang City

Keywords: *Electronic Nose Sensor, Oil Quality, Fishing Vessel Engine.*

Abstrak

Inovasi sistem *Electronic Nose* yang dirancang untuk mengoptimalkan perawatan mesin kapal nelayan melalui analisis kualitas oli secara in situ. Inovasi ini memanfaatkan kombinasi empat sensor gas (TGS 813, TGS 822, TGS 2600, dan TGS 2602) yang terintegrasi dengan pompa DC dan Arduino Uno untuk mendeteksi dini kerusakan ring piston tanpa memerlukan pembongkaran mesin. Teknologi ini mengidentifikasi senyawa volatil dalam oli, seperti logam berat dan senyawa asam, yang dihasilkan akibat gesekan piston, menggunakan metode iontophoresis. Hasil penelitian diperoleh bahwa untuk ring piston normal (TGS2600: 410 mV – 600 mV, TGS2602: 200 mV – 210 mV, TGS813: 55mV-60mV, dan TGS822: 70mV-110mV), ring piston aus (TGS2600: 540 mV-730 mV, TGS2602: 330 mV-350 mV, TGS813: 100-107 mV dan TGS822: 90 mV-150 mV) dan ring piston tergores (TGS2600: 480 mV-690 mV, TGS2602: 220 mV-245 mV, TGS813: 80 mV-90 mV, dan TGS822: 100 mV – 200 mV). Dengan kemampuan mendeteksi kerusakan secara real-time, teknologi ini mampu mengurangi waktu perbaikan, menekan biaya operasional, dan meningkatkan umur mesin. Selain itu, inovasi ini berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dan limbah oli, sejalan dengan tujuan keberlanjutan lingkungan. Implementasi Nautical Guardian diharapkan dapat meningkatkan produktivitas dan pendapatan nelayan, khususnya di Kampung Nelayan Desa Kronjo, Kota Tangerang.

Kata Kunci: *Electronic Nose Sensor, Kualitas Oli, Mesin Kapal Nelayan.*

1. PENDAHULUAN

Dalam era kemajuan teknologi yang pesat, sektor perikanan menjadi salah satu pilar penting bagi kehidupan masyarakat pesisir, terutama di Kampung Nelayan Desa Kronjo, Kota Tangerang, Banten, yang merupakan salah satu daerah penghasil ikan laut dengan mayoritas penduduk yang berprofesi sebagai nelayan. Menurut data dari Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Tangerang pada tahun 2021, sektor perikanan menyumbang sekitar 4,5% dari Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) wilayah tersebut, menunjukkan pentingnya sektor ini bagi ekonomi lokal. Selain itu, data tersebut mencerminkan bahwa keberlangsungan hidup masyarakat nelayan secara langsung bergantung pada efektivitas kegiatan perikanan yang salah satu faktor penentunya adalah kondisi dan performa transportasi laut yang digunakan. Transportasi laut adalah tulang punggung bagi nelayan di Desa Kronjo, yang tidak hanya digunakan untuk kegiatan penangkapan ikan tetapi juga untuk mendukung mobilitas sosial dan ekonomi lainnya. Mesin kapal yang andal dan terawat menjadi penentu utama dalam menjamin produktivitas dan keselamatan nelayan saat melaut. Menurut laporan Dinas Perhubungan Kota Tangerang, sekitar 80% nelayan di Desa Kronjo mengandalkan kapal kecil dengan mesin diesel sebagai sarana transportasi utama mereka. Ketergantungan tinggi pada mesin diesel ini menjadi tantangan tersendiri karena banyak nelayan menghadapi hambatan dalam hal pemeliharaan, baik karena keterbatasan biaya, pengetahuan teknis, maupun akses terhadap teknologi diagnostik yang memadai. Dalam konteks ini, isu perawatan mesin kapal menjadi semakin relevan, karena kerusakan yang tidak terdeteksi sejak dini dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang besar, baik berupa biaya perbaikan maupun kehilangan potensi hasil tangkapan.

Salah satu komponen yang sering mengalami kerusakan adalah ring piston. Piston merupakan komponen yang berfungsi sebagai penekan udara masuk dan penerima tekanan hasil pembakaran yang terhubung ke poros engkol (*crankshaft*) melalui setang piston (*connecting rod*), sehingga tenaga yang dihasilkan setelah pembakaran dapat tersalurkan. Pada piston dilengkapi ring yang memisahkan dua bagian yaitu piston dan silinder linear yang terbuat dari besi tuang atau baja campuran dan digunakan sebagai penekan arah radial ke dinding silinder untuk membentuk suatu seal (Hermawati, 2020). Ring piston terbagi dua jenis yaitu ring kompresi dan ring oli. Ring kompresi secara normal dipasang pada bagian atas dan terdiri dari dua cincin yang berfungsi sebagai perapat untuk mencegah udara atau gas dalam ruang pembakaran masuk ke dalam bak mesin. Sedangkan ring oli dipasang pada bagian bawah dan merupakan ring tunggal yang berfungsi untuk pengontrolan lapisan minyak pelumas pada dinding silinder serta mengalirkan kembali ke karter oli serta juga berfungsi menyalurkan panas ke silinder (Kumar, 2022). Piston maupun ring pada mesin kapal sering mengalami kerusakan akibat lamanya pemakaian, kurangnya pelumasan, keadaan oli mesin yang sudah lama digunakan, serta viskositas oli yang tidak sesuai. Hal tersebut berdampak pada pemborosan konsumsi bahan bakar, kehilangan tekanan kompresi baik gas berlebih maupun naik-turun, menyebabkan ring retak, aus dan tergores, peningkatan emisi gas buang, kehilangan minyak pelumas, penurunan daya dan akselerasi, bahkan kegagalan mesin total (Pirro, 2016). Semua kondisi tersebut sangat merugikan nelayan karena berdampak langsung terhadap hasil tangkapan, waktu tempuh, serta biaya operasional. Tantangan ini semakin kompleks karena minimnya teknologi yang dapat membantu proses perawatan mesin secara berkala dengan mempertimbangkan parameter penting seperti kualitas dan kandungan oli pelumas yang mencerminkan kondisi internal mesin. Maka dari itu, diperlukan suatu metode deteksi cacat ring piston tanpa pembongkaran mesin, karena metode konvensional seperti Endoskop, OBD II Scanner, dan Leak-Down

Tester masih memiliki banyak kelemahan. Di antaranya adalah kebutuhan saluran kecil, ketergantungan terhadap kondisi lingkungan, harga perangkat yang relatif mahal, serta keterbatasan dalam mendeteksi secara visual maupun fisik melalui tekanan kompresi rendah (Lu, 2021 dan Liu, 2022).

Dalam perkembangan teknologi sensorik, *electronic nose* (e-nose) menjadi salah satu inovasi yang menarik untuk dikembangkan dalam konteks ini. Teknologi ini telah banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti industri makanan, lingkungan, dan kesehatan, dan mulai diaplikasikan dalam deteksi kerusakan mesin melalui pengenalan senyawa volatil dari oli. Studi oleh Adelkhani dan Daneshkhah (2025) menunjukkan bahwa e-nose dapat mendeteksi senyawa aromatik seperti asam oleat, asam asetat, benzena, heksana, toluena dan metana yang mengindikasikan degradasi oli akibat gesekan antar komponen mesin. Penelitian lain oleh Yang *et al.* (2023) dan Agocs *et al.* (2023) menambahkan bahwa kerusakan internal mesin menghasilkan senyawa volatil seperti aldehida, keton, dan logam berat (Fe, Al, Cu) serta asam lemak dari zat aditif yang terdegradasi, yang semuanya berkontribusi terhadap profil aroma oli yang abnormal. Meskipun demikian, penggunaan e-nose untuk mendeteksi kerusakan *spesifik* seperti ring piston pada mesin diesel nelayan secara *in situ*, belum banyak dikembangkan secara komprehensif. Inilah yang menjadi celah sekaligus dasar kebaruan dari penelitian ini, yaitu mengembangkan e-nose berbasis sensor gas terintegrasi untuk mendiagnosis kerusakan ring piston secara dini tanpa perlu pembongkaran mesin.

Pada inovasi ini diusung suatu teknologi *electronic nose* yang terdiri dari kombinasi empat sensor gas yaitu TGS 813, TGS 822, TGS 2600, dan TGS 2602, yang terintegrasi dengan pompa DC dan sistem Arduino Uno. Teknologi ini menganalisis aroma/bau/gas yang dikandung oleh oli, yang selama proses pembakaran akan terkontaminasi partikel logam akibat gesekan ring piston dan silinder. Kontaminasi tersebut menghasilkan senyawa volatil yang dapat terdeteksi sebagai aroma asam, metalik, terbakar, atau kimia/korosif. Senyawa-senyawa ini, seperti asam oleat, asam stearat, aldehida, dan logam Fe, Al, Cu, akan dianalisis secara *in situ* melalui metode iontophoresis. Pompa DC akan mengalirkan gas dari oli ke dalam sensor yang kemudian mengalami ionisasi dan perubahan resistivitas, membentuk pola beda potensial dari masing-masing sensor. Data tersebut dikonversi dalam bentuk digital oleh sistem Arduino Uno untuk diinterpretasikan lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mengembangkan sistem pendeteksi dini kerusakan ring piston pada mesin diesel kapal nelayan berbasis teknologi *electronic nose* yang murah, portabel, dan dapat diaplikasikan secara langsung oleh pengguna di lapangan. Penelitian ini juga bertujuan mengevaluasi sensitivitas dan akurasi sensor terhadap berbagai senyawa volatil dalam oli, serta menilai efektivitas sistem sebagai solusi alternatif pengganti metode konvensional yang mahal dan sulit diakses oleh nelayan. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi praktis dalam mendukung keberlanjutan sektor perikanan melalui penguatan teknologi perawatan mesin kapal nelayan.

1.1 Ring Piston dan Relevansinya terhadap Monitoring Oli

Ring piston merupakan komponen vital dalam sistem kerja mesin, khususnya pada siklus pembakaran di ruang silinder. Cincin torak atau *ring piston* berfungsi sebagai perapat untuk menahan gas selama proses kompresi dan usaha, serta mengatur film oli pada dinding silinder agar tidak masuk ke ruang bakar (Hase, 2020). Berdasarkan fungsinya, ring piston terbagi menjadi dua jenis utama: ring kompresi dan ring oli. Ring kompresi, biasanya berjumlah dua buah, berfungsi mencegah kebocoran tekanan gas ke ruang engkol, sedangkan ring oli bertugas menyapu kelebihan pelumas dan menyisakan

lapisan tipis untuk mencegah keausan. Dalam praktiknya, kerusakan pada ring piston tidak hanya menyebabkan penurunan performa mesin tetapi juga mengindikasikan kondisi pelumasan yang buruk. Ring piston yang aus, macet, atau patah dapat menimbulkan gesekan abnormal pada dinding silinder, mengakibatkan kontaminasi oli oleh partikel logam, dan menciptakan aroma khas akibat degradasi termal dan kimia pelumas (Hanifuddin, 2011; Rusdiansyah dan Rantau, 2018).

1.2 Kerusakan Oli Mesin dan Indikator Kerusakannya Ring Piston

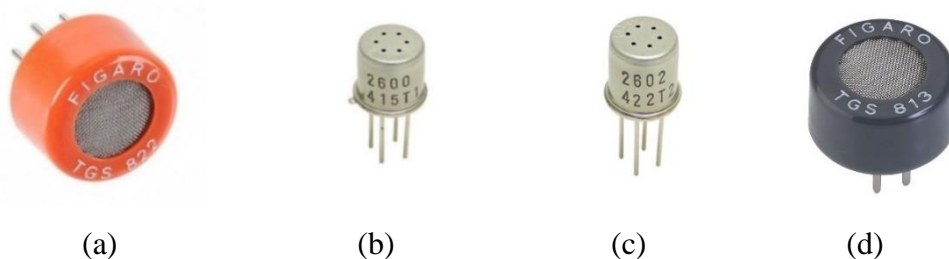
Minyak pelumas (*lubricating oil*) tidak hanya berperan dalam mengurangi gesekan, tetapi juga sebagai pendingin, peredam suara, dan agen pembersih pada sistem mesin (Galbi, 2016). Pelumas ideal harus memenuhi berbagai sifat fisis dan kimia, di antaranya viskositas, titik tuang, titik nyala, kestabilan terhadap oksidasi, serta kemampuan membentuk lapisan film yang stabil. Namun, dalam kondisi operasi ekstrem atau akibat kerusakan komponen seperti ring piston, oli dapat mengalami degradasi. Kerusakan ini dapat ditandai oleh perubahan **aroma oli**, yang menjadi indikator non-destruktif untuk mendeteksi kondisi internal mesin (Gao, 2020). Beberapa jenis aroma yang berkorelasi dengan kerusakan antara lain:

- a. Aroma busuk akibat asam: terdapat aroma asam oleat, asam asetat, benzene, heksana, toluena dan metana.
Aroma ini muncul akibat proses oksidasi termal dari oli yang terpapar suhu tinggi secara terus-menerus. Ketika ring piston mengalami aus, kompresi bocor, dan pembakaran menjadi tidak sempurna, serta suhu lokal dalam silinder meningkat. Hal ini mempercepat reaksi oksidatif minyak pelumas, menghasilkan senyawa volatil berbau asam. Kondisi ini mengindikasikan ring piston sudah tidak lagi mampu menyekat panas dan tekanan secara efektif.
- b. Aroma logam atau metalik seperti karat dikarenakan terdapat partikel logam Zat Fe, Al dan Cu)
Dihasilkan akibat kontaminasi logam dari keausan mekanis antara ring piston dan dinding silinder. Ketika ring piston mengalami goresan atau pecah sebagian, partikel logam kecil akan terlepas dan ikut bersirkulasi dalam oli. Oksidasi partikel logam tersebut menghasilkan bau khas metalik, sering kali bersamaan dengan peningkatan kandungan *wear* metal dalam oli (Ali, *et al.* 2017). Aroma ini menandakan gesekan langsung antar komponen logam, yang dapat berkembang menjadi kerusakan lebih luas pada dinding silinder dan piston.
- c. Aroma terbakar: terdapat aroma aldehida, keton dan hidrokarbon aromatik/alifatik
Menunjukkan pembakaran tidak sempurna serta pelumas yang terbakar sebagian di ruang bakar. Hal ini biasanya terjadi ketika ring piston tidak mampu menahan oli di bawah ruang kompresi, sehingga oli masuk ke dalam ruang pembakaran. Pembakaran oli menghasilkan senyawa aromatik yang mudah tercium, menandakan kebocoran oli akibat ring piston tidak lagi elastis atau celahnya terlalu besar.
- d. Aroma kimia: terdapat aroma dari zat aditif yang terdegradasi seperti asam palmitat, oleat dan asam stearat
Aditif dalam oli berfungsi sebagai anti-aus dan anti-oksidan. Ketika ring piston macet atau tidak bergerak bebas, tekanan lokal pada oli meningkat, mempercepat degradasi aditif. Ini menghasilkan senyawa volatil berbau kimia yang tajam. Aroma ini menjadi penanda dini bahwa fungsi perlindungan oli mulai hilang, dan dalam jangka panjang akan mempercepat kerusakan ring piston dan silinder.

1.3 Prinsip Kerja dan Aplikasi *Electronic Nose*

Electronic nose (E-nose) merupakan sistem berbasis sensor gas (umumnya TGS series) yang meniru mekanisme penciuman manusia dalam mendeteksi aroma dan senyawa volatil (Herlambang, 2022). E-nose terdiri atas lima komponen utama: ruang sampel, ruang sensor, sistem akuisisi data dan kontrol, catu daya, dan antarmuka komputer. Sensor ini mampu mengenali pola bau spesifik dari sampel melalui respon konduktivitas yang berubah tergantung senyawa kimia yang terdeteksi. Pada aplikasinya dalam mesin kapal, E-nose menawarkan keunggulan dibandingkan metode deteksi konvensional (misalnya pemeriksaan visual, uji viskositas laboratorium, atau analisis spektrometri), yaitu:

- Deteksi non-destruktif dan real-time
- Tidak memerlukan reagen kimia tambahan
- Respon cepat dan sensitif terhadap perubahan komposisi kimia oli
- Kemampuan klasifikasi dan kuantifikasi aroma secara spesifik melalui sistem pola sensor



Gambar 1. Bentuk Sensor sensor electronic nose dari kiri ke kanan dengan jenis sensor: (a). TGS822, (b). TGS2600, (c). TGS2602 dan (d). TGS813

Beberapa jenis sensor TGS seperti TGS822, TGS2600, TGS2602, dan TGS813 masing-masing memiliki sensitivitas terhadap kelompok senyawa tertentu, yang memungkinkan sistem E-nose untuk mengenali berbagai jenis degradasi oli secara spesifik (Gambar 1). Oleh karena itu, integrasi E-nose menjadi solusi yang relevan dan efisien untuk mendeteksi kondisi ring piston secara tidak langsung melalui monitoring aroma oli. Meskipun demikian, untuk memahami posisi keunggulan E-nose secara utuh, penting pula meninjau metode-metode konvensional yang telah digunakan dalam mendeteksi kerusakan ring piston. Berbagai pendekatan tersebut memiliki kelebihan dan keterbatasan masing-masing. Salah satu metode yang umum digunakan adalah analisis laboratorium oli, yang mampu memberikan data kuantitatif terkait viskositas, kandungan logam, dan degradasi aditif. Metode ini sangat akurat, namun bersifat tidak real-time, mahal, dan memerlukan peralatan serta teknisi khusus. Di sisi lain, uji kompresi mesin sering dipilih karena praktis dan dapat dilakukan di lapangan untuk mendeteksi kebocoran kompresi. Namun, metode ini tidak dapat mengidentifikasi secara spesifik komponen mana yang mengalami kerusakan, seperti apakah permasalahan berasal dari ring piston, katup, atau dinding silinder. Adapun inspeksi visual langsung melalui proses overhaul memberikan informasi paling meyakinkan karena memungkinkan pengamatan fisik secara langsung terhadap ring piston. Namun, pendekatan ini bersifat destruktif, mahal, serta hanya dilakukan saat perawatan besar sehingga kurang ideal sebagai metode deteksi dini.

2. METODOLOGI PENELITIAN

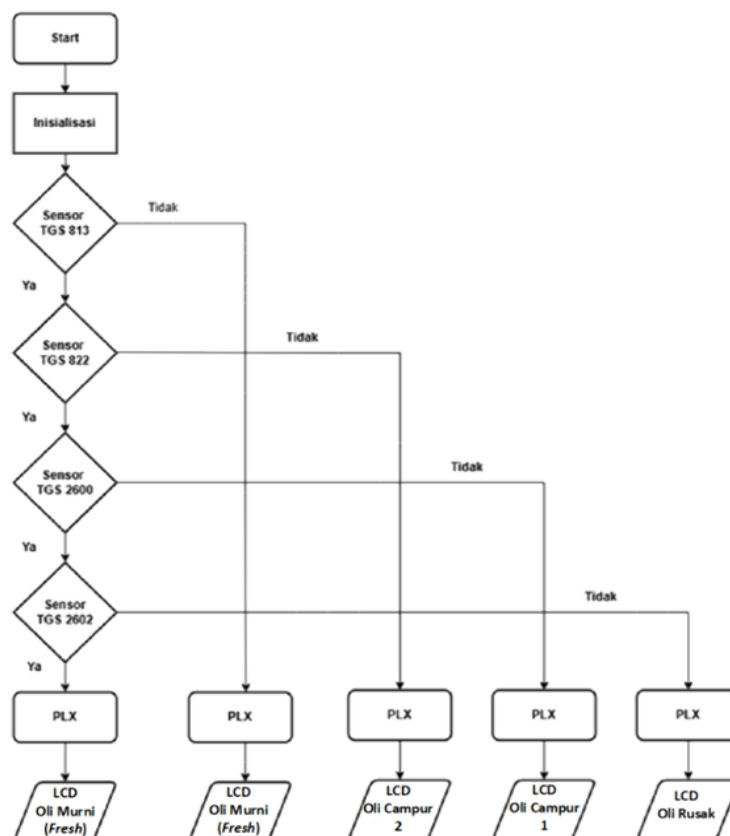
2.1 Tahapan Penelitian

2.1.1 Tahap Perancangan

Proses perancangan sistem pendeteksi kualitas pelumas terdiri atas enam komponen utama, yaitu empat sensor gas, sistem akuisisi data elektronik, sistem penampil data, dan sistem penstabil tegangan. Pada tahap ini, seluruh komponen dikonstruksi dan disusun berdasarkan posisi penempatan yang tepat dan efisien. Sistem ini memanfaatkan prinsip gelembungisasi berbasis Arduino Uno yang menggunakan mikrokontroler ATmega328, serta diintegrasikan dengan pompa DC tipe ROHS Motor yang memiliki spesifikasi tegangan kerja 9–14,4 V, arus maksimum (I_{\max}) 6 A, daya 70 W, laju aliran 6 liter/menit, dan tekanan maksimum (P_{\max}) 0,9 MPa.

2.1.2 Desain Teknis

Pengevaluasi kualitas pelumas didesain untuk bekerja dengan metode gelembungisasi berbasis sensor *electronic nose*. Evaluasi ini dianalisis bau pelumas yang terkontaminasi berdasarkan karakteristik bau busuk atau asam (terdapat bau asam oleat, asam asetat, benzene, heksana, toluena dan metana), bau metalik (terdapat bau zat Fe, Al dan Cu), bau terbakar (terdapat bau aldehida, keton dan hidrokarbon bautik atau alifatik) dan bau kimia atau korosi (terdapat bau dari zat aditif yang terdegradasi seperti asam palmitat, oleat dan asam stearat) secara iontophoresis yang mana mekanisme iontophoresis terjadi ketika senyawa volatil hasil reaksi pelumas rusak terbawa gelembung gas yang menginduksi perubahan medan listrik mikro di sekitar sensor, sehingga memengaruhi nilai resistansi sensor gas. Data resistansi yang terbaca kemudian diolah oleh Arduino dengan metode interpolasi dan klasifikasi untuk menentukan tingkat kerusakan pelumas secara *real-time*.



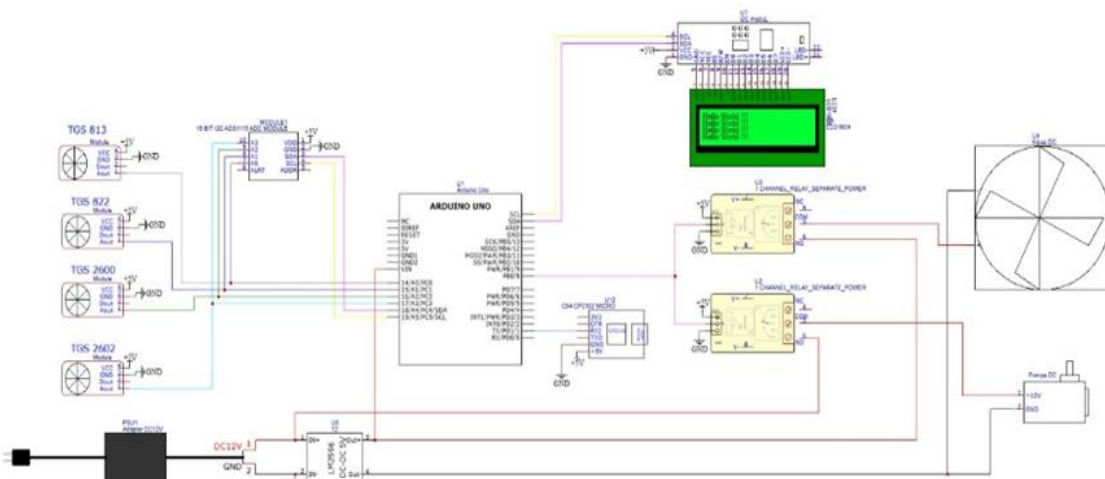
Gambar 2. Diagram Alir Sistem Kerja Alat Monitoring Kualitas Oli dan Deteksi Kerusakan Ring Piston

2.1.3 Pemilihan Bahan dan Pengadaan Perlengkapan Penunjang

Peralatan yang dibutuhkan dalam sistem ini meliputi sensor electronic nose yang terdiri dari empat jenis sensor gas, yaitu TGS 813, TGS 822, TGS 2600, dan TGS 2602, modul WiFi ESP8266, Arduino Uno berbasis mikrokontroler Atmega328, adaptor, LCD 16 x 2, push button, kabel panjang, saklar, timah solder, *heatsink*, *housing sensor*, kipas, pompa DC 12V 6L/min 0.9MPa, selang pipa akuarium, bahan HDPE dan akrilik, serta alat analisis AAS (*Atomic Absorption Spectroscopy*) dan berbagai komponen elektronik pendukung lainnya. Kombinasi sensor gas TGS yang digunakan dipilih berdasarkan kemampuan masing-masing dalam mendeteksi spektrum senyawa volatil berbeda yang mewakili karakteristik kerusakan pelumas akibat degradasi ring piston.

- TGS 813 memiliki sensitivitas tinggi terhadap gas-gas hidrokarbon dan pelarut organik, cocok untuk mendeteksi sisa bahan bakar atau pembakaran tidak sempurna.
- TGS 822 dirancang untuk mendeteksi pelarut volatil seperti alkohol dan benzena, yang umum muncul dalam pelumas yang terkontaminasi.
- TGS 2600 memiliki sensitivitas terhadap gas reduktif seperti hidrogen dan karbon monoksida, mewakili senyawa hasil oksidasi pelumas.
- TGS 2602 efektif mendeteksi gas hasil dekomposisi organik seperti amonia dan H₂S, yang muncul akibat reaksi kimia pada pelumas yang mengalami degradasi berat.

Kombinasi keempat sensor ini memberikan cakupan spektrum bau yang luas, sehingga mampu menghasilkan profil deteksi yang lebih akurat dan komprehensif terhadap berbagai tingkat kerusakan pelumas. Adapun bahan yang digunakan dalam pengujian meliputi pelumas jenis SAE10W40H sebagai pelumas murni, pelumas campuran, pelumas rusak, serta pelumas yang digunakan pada kondisi ring piston normal, tergores, dan aus. Silika gel juga digunakan sebagai penyerap kelembaban untuk menjaga kestabilan lingkungan uji pada ruang sensor.



Gambar 3. Rangkaian Keseluruhan Alat *Electronic Nose*

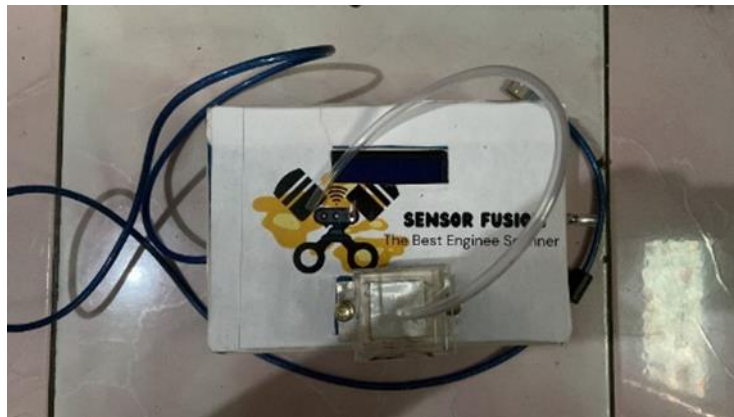
2.1.4 Kalibrasi Alat dan Pengujian di Lingkungan Operasional

a. Kalibrasi Alat

Proses kalibrasi alat dilakukan untuk memastikan sensitivitas dan akurasi pembacaan sensor terhadap berbagai tingkat kerusakan pelumas. Kalibrasi dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan output (V_{out}) yang dihasilkan oleh sensor saat mendeteksi empat jenis sampel: pelumas baru (murni), pelumas campuran dengan rasio 1:1 (antara pelumas murni dan rusak), pelumas rusak, dan pelumas murni yang telah ditambahkan logam Fe dalam konsentrasi 0.1 ppm, 1 ppm, dan 10 ppm. Rentang

konsentrasi logam Fe ini dipilih karena merepresentasikan tingkat kontaminasi logam yang wajar ditemukan pada pelumas bekas akibat keausan ring piston dan komponen mesin lainnya.

Selama kalibrasi, setiap sampel diuji sebanyak lima kali untuk memperoleh nilai V_{out} rata-rata dan standar deviasi sebagai dasar analisis kestabilan sinyal sensor. Data hasil pembacaan sensor kemudian dianalisis menggunakan metode statistik deskriptif untuk mengevaluasi sebaran data dan analisis regresi linier untuk mengidentifikasi hubungan antara kadar kontaminan logam dan respons sensor. Hasil kalibrasi ini menjadi acuan dalam pemetaan pola deteksi, klasifikasi kondisi pelumas, serta validasi keakuratan sistem dalam membedakan pelumas dalam berbagai tingkat kerusakan.



Gambar 4. Prototipe Sistem *Electronic Nose* Dalam Monitoring Kualitas Oli dan Kerusakan Ring Piston

b. Uji Coba Alat di Lingkungan Operasional

Uji coba alat dilakukan pada pelumas yang diambil dari mesin kapal operasional, dengan fokus pada tiga kondisi berbeda dari ring piston: normal, tergores, dan aus. Ketiga kondisi ini diidentifikasi berdasarkan riwayat pemeliharaan mesin, karakteristik performa mesin saat beroperasi, serta hasil inspeksi visual terbatas oleh teknisi kapal, karena pemeriksaan mendalam seperti boroskop tidak dapat dilakukan di semua unit. Sampel pelumas diambil setelah kapal beroperasi sejauh 1000 km (jarak tempuh ekuivalen laut), kemudian dilanjutkan pengambilan sampel ulang dari oli yang sama pada titik 2400 km dan 3750 km dalam satu trip pelayaran. Dengan demikian, sistem diuji untuk mendeteksi perubahan kualitas pelumas secara bertahap, bukan menggunakan sampel terpisah. Pengujian ini secara khusus memantau tegangan output (V_{out}) dari *electronic nose* sebagai indikator utama kondisi pelumas. Pada tahap ini, pengukuran parameter lingkungan seperti suhu dan kelembaban belum dilakukan, karena sistem masih difokuskan pada validasi fungsional sensor terhadap sinyal gas volatil dari pelumas. Namun, ke depannya, pengembangan alat akan diarahkan untuk menambahkan sensor lingkungan guna meningkatkan ketelitian dan mengurangi potensi variabilitas pengukuran. Kendati demikian, hasil uji ini tetap memberikan gambaran yang representatif terhadap performa alat dalam kondisi operasional nyata di kapal, sekaligus menunjukkan potensi alat sebagai sistem pemantau kualitas pelumas secara real-time di lingkungan maritim.

c. Evaluasi Data

Evaluasi data dilakukan dengan menggunakan Analisis Variansi (ANAVA) satu arah untuk mengetahui pengaruh kondisi oli yang berbeda terhadap respons sensor *electronic nose*. Variabel independen dalam analisis ini adalah jenis oli (fresh, fresh + 0.1 ppm, fresh + 1 ppm, fresh + 10 ppm, campuran, dan rusak), sedangkan variabel

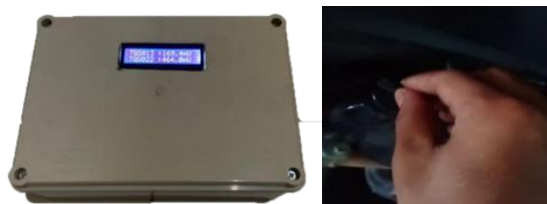
dependennya adalah nilai standar deviasi tegangan (mV) dari masing-masing sensor (TGS813, TGS822, TGS2600, TGS2602) yang diperoleh dari 30 kali pengulangan. ANAVA digunakan untuk menguji hipotesis apakah terdapat perbedaan signifikan pada respons sensor terhadap jenis oli yang mengalami degradasi berbeda. Selain itu, untuk mendukung penilaian efektivitas teknologi sensor, dilakukan pengujian kandungan logam pada oli jenis SAE10W40 dengan jarak tempuh berbeda (2400 km dan 3750 km). Hasil kandungan logam (Fe, Al, Cu, Pb, Zn, Cr) digunakan untuk mengamati pola degradasi oli secara kimiawi dan dikaitkan dengan perubahan respons sensor sebagai bukti validitas sistem deteksi secara elektrik.

Seluruh data hasil pengujian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik menggunakan perangkat lunak OriginLab, yang digunakan untuk membuat kurva beda potensial tiap sensor terhadap perubahan kadar kontaminan pada oli. Pendekatan ini mendukung analisis visual dan numerik dalam mengevaluasi kepekaan dan ketelitian sensor terhadap degradasi pelumas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Sensor *Electronic Nose*

Sensor electronic nose merupakan gabungan beberapa sensor gas yang terdiri atas tipe sensor TGS 813, sensor TGS822, sensor TGS 2600, dan sensor TGS 2602 yang terintegrasi dengan pompa DC dan sistem arduino uno yang berfungsi untuk mendeteksi kerusakan ring piston pada motor bakar secara *non destructive testing* (NDT) dengan menganalisis aroma yang dihasilkan oleh oli yang terkontaminasi oleh logam berat maupun asam akibat proses gesekan pada ring piston. Teknologi ini memanfaatkan rinteraksi langsung dengan zat bau pada oli dimana interaksi ini melibatkan reaksi elektroforesis, polarisasi, dan iontoporesis.

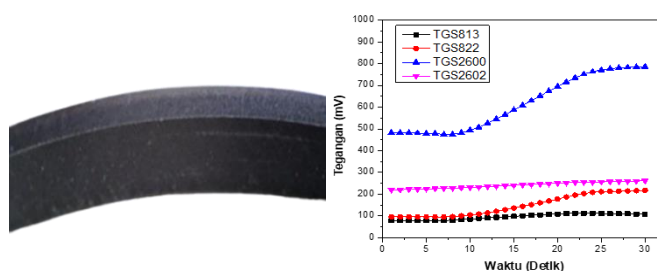


Gambar 5. Ilustrasi Sensor *Electronic nose* Sebagai Diagnostik Kerusakan Ring Piston

Teknologi *electronic nose* telah dilakukan pengujian skala laboratorium dengan mendeteksi bau oli pada keadaan ring piston baik, tergores dan aus.

3.1.1 Ring Piston Normal

Teknik dalam pengambilan data resistivitas listrik oli melalui gas dengan meletakkan sensor electronic nose ke lubang tangki oli/botol chamber oli dengan tegak lurus dan digelembungisasi dengan pompa DC agar aroma oli dapat keluar dan diekspos ke permukaan perangkat sensor



Gambar 6. Analisis Hubungan Tegangan Output dengan Lamanya Pengeksposan

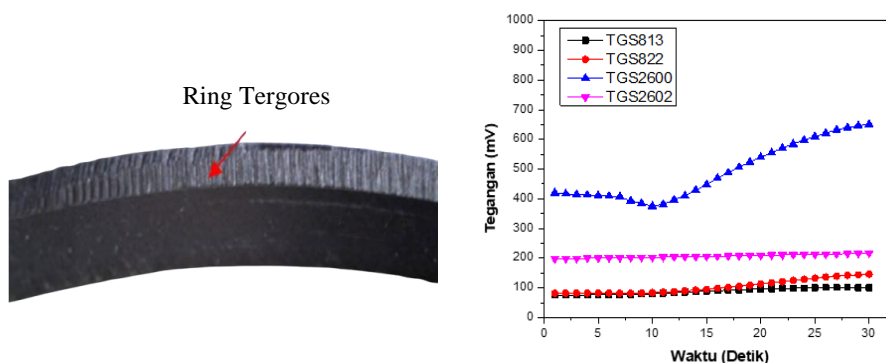
Gambar 6 menunjukkan bahwa aroma oli dari ring piston yang masih dalam kondisi baik menghasilkan tegangan output yang relatif stabil dan rendah pada keempat sensor dengan pola untuk sensor TGS2600: 410 mV – 600 mV, sensor TGS2602: 200 mV – 210 mV, sensor TGS813: 55 mV-60 mV, dan sensor TGS822: 70 mV-110 mV. Adapun jenis gas yang ditangkap oleh *electronic nose* diantaranya:

- TGS2600: mendeteksi jenis gas yang mudah terbakar, metana (CH_4) dan propana yang merupakan produk awal dari degradasi hidrokarbon dalam oli. Pada ring piston normal, produksi gas ini rendah karena proses pembakaran berjalan sempurna dan oli belum mengalami kerusakan termal berat.
- TGS2602: mendeteksi gas beracun, karbon monoksida (CO) dan hidrogen sulfida. Gas-gas ini biasanya meningkat seiring dengan terjadinya pembakaran tidak sempurna akibat kebocoran kompresi atau degradasi aditif dalam oli pada kondisi normal, konsentrasinya masih rendah
- TGS813: mendeteksi gas amonia (NH_3) yang dapat muncul akibat degradasi nitrogen organik dari pelumas atau aditif oli berbasis amina. Pada ring piston yang masih baik, senyawa ini jarang muncul, sehingga sinyal tetap rendah. Kenaikan amonia umumnya menjadi indikator awal adanya degradasi aditif atau kontaminasi nitrogen hasil gesekan logam-logam tinggi.
- TGS822: mendeteksi hidrogen (H_2), karbon monoksida dan senyawa organik volatil (VOC). VOC muncul dari evaporasi ringan pelumas atau degradasi termal minor; karena oli masih dalam kondisi stabil, maka output tegangan tetap rendah

Dengan demikian, sensor *electronic nose* mampu merekam pola kimiawi uap oli pada kondisi ring piston normal sebagai *baseline* pembanding, yang sangat penting untuk membedakan dari kondisi kerusakan seperti aus, gores, atau patah. Keempat sensor menunjukkan konsistensi rendahnya intensitas gas yang terkait langsung dengan minimnya degradasi pelumas maupun gesekan antar komponen logam, sehingga mengonfirmasi bahwa sistem masih bekerja optimal.

3.1.2 Ring Piston Tergores

Pengambilan sampel oli dengan kondisi piston tergores panjang dan tebal mengindikasikan adanya partikel logam yang banyak ikut tercampur oleh oli pada proses pembakaran yang menyebabkan terbentuknya aroma metalik, kimia dan bau terbakar yang memiliki pola interval tegangan pada sensor *electronic nose* yaitu:

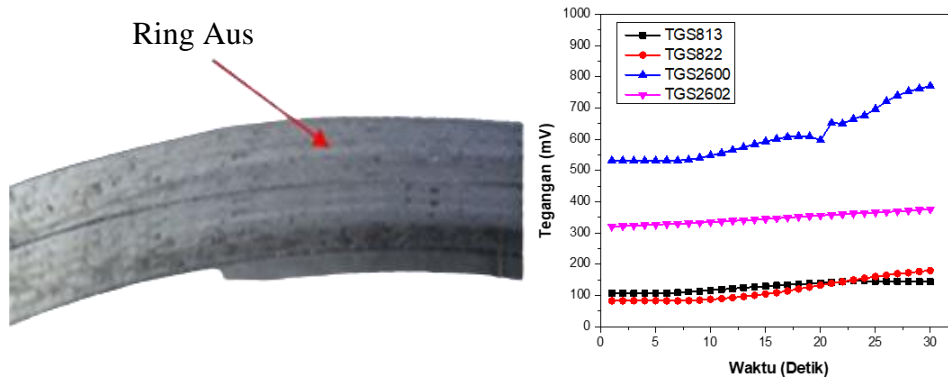


Gambar 7. Analisis Tegangan Output Pada Oli Dengan Kondisi Ring Piston Tergores

Gambar 7 menunjukkan bahwa sensor *electronic nose* menunjukkan hasil pengukuran tegangan output pada aroma oli pada saat ring piston tergores memiliki pola yang cukup tinggi yaitu untuk sensor TGS2600: 480 mV - 690 mV, sensor TGS2602: 220 mV - 245 mV, sensor TGS813: 80 mV - 90 mV, dan sensor TGS822: 100 mV – 200 mV.

3.1.3 Ring Piston Aus

Pengambilan sampel oli dengan kondisi piston aus akibat gesekan antar ring piston dan silinder piston yang menyebabkan terdegradasinya menghasilkan mikropartikel yang tercampur oleh oli yang berdampak terjadinya kerusakan oli dan menghasilkan aroma metalik dan asam yang diuji menghasilkan interval tegangan pada sensor electronic nose yaitu:



Gambar 8. AnalisisTegangan Output Pada Oli Dengan Kondisi Ring Piston Aus

Gambar 8. menunjukkan bahwa sensor electronic nose menunjukkan hasil pengukuran tegangan output pada aroma oli pada saat ring piston aus memiliki pola yang cukup tinggi yaitu untuk sensor TGS2600: 540 mV - 730 mV, sensor TGS2602: 330 mV - 350 mV, sensor TGS813: 100 mV - 107 mV dan sensor TGS822: 90 mV-150 mV. Pada masing-masing sensor terjadi peningkatan nilai tegangan listrik dikarenakan banyaknya mikropartikel logam yang membuat zat volatil meningkat sehingga aroma yang dievaporasi oli semakin menyengat. Hasil kalibrasi untuk jenis oli dengan pengambilan data standar deviasi pada perulangan 30 kali.

Tabel 1. Pengujian Oli Fresh, Oli Kontrol, Oli Campuran dan Oli Rusak

Sensor Electronic nose	STDEV Repeatability Sensor Electronic nose Untuk Tiap Oli (mV) 30 kali					
	Oli Fresh	Oli Fresh + 0,1 ppm	Oli Fresh + 1 ppm	Oli Fresh + 10 ppm	Oli Campuran	Oli Rusak
TGS2600	500,914±9,75	516,558±10,12	546,802±11,31	568,304±12,21	585,915±12,88	635,664±15,24
TGS2602	205,661±4,11	217,581±4,35	222,607±4,78	232,897±5,32	298,615±6,91	341,869±8,17
TGS813	57,531±1,15	63,123±1,33	69,689±1,45	74,116±1,56	86,742±2,17	103,527±2,81
TGS822	90,517±1,91	108,572±2,22	127,699±2,74	138,233±2,98	150,664±3,41	125,355±2,85

Tabel 1 menyajikan data rata-rata *tegangan output* sensor *electronic nose* (dalam satuan mV) terhadap berbagai sampel oli, mulai dari oli fresh hingga oli rusak—yang masing-masing diuji sebanyak 30 kali. Dari data tersebut terlihat adanya tren peningkatan nilai tegangan seiring dengan bertambahnya konsentrasi logam (0,1 ppm hingga 10 ppm) dan kondisi oli yang semakin tercemar (campuran dan rusak). Seperti pada sensor TGS2600, tegangan meningkat dari 500,91 mV pada *oli fresh* menjadi 635,66 mV pada oli rusak. Hal ini menunjukkan bahwa sensor mampu merespon perubahan komposisi kimia akibat kontaminasi logam dan degradasi oli. Sensor TGS2602 dan TGS813 juga menunjukkan respons yang tajam terhadap akumulasi senyawa berbahaya seperti CO, H₂S, dan NH₃, yang muncul sebagai hasil pembakaran tidak sempurna atau reaksi oksidasi aditif pada oli rusak. Peningkatan tegangan ini mencerminkan kenaikan intensitas gas volatil yang dihasilkan dari degradasi pelumas dan keausan logam, yang secara langsung menunjukkan sensitivitas dan selektivitas sensor dalam mendeteksi kerusakan atau kontaminasi pada sistem pelumasan.

Tabel 2. Pengujian Kandungan Partikel Logam Pada Oli Jenis SAE10W40H dengan Jarak Tempuh yang Berbeda

Sampel Oli	Kandungan % Konsentrasi Logam (µg/ml)					
	Fe	Al	Cu	Pb	Zn	Cr
SAE10W40 (2400 km)	5.13	5,68	0,04	0.10	0.93	0.27
SAE10W40 (3750 km)	2.19	3,96	0.04	0.16	1.30	0.33

Hasil pengujian oli SAE10W40 dengan jarak tempuh berbeda menunjukkan variasi kandungan partikel logam yang mencerminkan tingkat keausan komponen mesin, khususnya ring piston. Pada jarak 2400 km, kandungan logam Fe (5,13 µg/ml) dan Al (5,68 µg/ml) relatif lebih tinggi dibandingkan jarak 3750 km (Fe: 2,19 µg/ml; Al: 3,96 µg/ml), yang mengindikasikan bahwa proses keausan awal ring piston dan dinding silinder terjadi lebih signifikan di fase awal siklus pakai, kemungkinan karena belum terbentuknya lapisan pelumas stabil. Logam-logam tersebut berasal dari material utama ring piston dan silinder, sehingga peningkatan konsentrasinya mencerminkan kontak langsung dan gesekan antar komponen logam. Meskipun kandungan Cu dan Pb tetap rendah, adanya peningkatan Zn dan Cr pada oli 3750 km menunjukkan degradasi aditif dan potensi goresan mikro pada permukaan berlapis krom, seiring dengan usia pakai oli. Temuan ini berkorelasi erat dengan data output sensor electronic nose, di mana peningkatan kandungan logam ini turut memengaruhi komposisi senyawa volatil pada oli, yang terdeteksi oleh sensor TGS seperti TGS2600 (metana, propana), TGS2602 (CO, H₂S), dan TGS822 (H₂, VOC). Misalnya, degradasi aditif Zn menghasilkan senyawa organik volatil yang meningkatkan respons sensor, sementara partikel Fe dan Al yang teroksidasi turut menciptakan aroma logam yang khas. Dengan demikian, data kandungan logam tidak hanya menunjukkan derajat keausan ring piston secara kimiawi, tetapi juga memperkuat validitas sensor E-nose sebagai sistem pemantauan berbasis aroma untuk mendeteksi dini kerusakan komponen mesin.

Untuk memperkuat validitas eksternal dari temuan ini, dilakukan perbandingan dengan studi sejenis oleh Adelkhani dan Daneshkhah (2025) dalam jurnal *Machines*, yang menggunakan sistem *electronic nose* berbasis sensor MOS (termasuk TGS822 dan TGS813) untuk mengklasifikasikan kualitas oli menggunakan pendekatan kecerdasan buatan (*support vector machine*, SVM). Dalam penelitian tersebut, oli 10W-40 diuji pada enam level kualitas (A–F), dan hasilnya menunjukkan bahwa respons sensor meningkat signifikan seiring degradasi oli, mirip dengan pola yang ditemukan pada penelitian ini. Secara kuantitatif, studi Adelkhani mencatat bahwa perubahan kualitas oli menyebabkan peningkatan densitas dan viskositas, serta perubahan nyata pada tegangan output sensor MQ dan TGS, yang digunakan sebagai basis klasifikasi kualitas oli. Dengan menggunakan model SVM, mereka mencapai akurasi klasifikasi hingga 95,44% dengan kernel polinomial, dan sensitivitas tertinggi berada pada kualitas oli level A dan B (97,99% dan 97,37%), serta menurun pada kualitas oli rusak (F) menjadi 94,59%. Temuan ini sejalan dengan hasil dalam penelitian ini, yang menunjukkan bahwa sensor TGS2600 dan TGS822 mengalami peningkatan output dari ±500 mV menjadi ±635 mV untuk kondisi oli rusak, serta mampu membedakan sampel oli dengan berbagai tingkat kontaminasi logam. Artinya, baik pendekatan berbasis beda potensial langsung (seperti pada penelitian ini), maupun pendekatan machine learning seperti pada Adelkhani, keduanya memberikan hasil yang konsisten dalam mendeteksi degradasi pelumas.

Temuan penelitian ini memiliki implikasi praktis yang signifikan, khususnya bagi nelayan di wilayah pesisir Kronjo yang mengandalkan mesin perahu diesel dalam aktivitas melaut. Dengan memanfaatkan teknologi *electronic nose* berbasis sensor gas, nelayan dapat melakukan deteksi dini terhadap degradasi oli secara cepat, murah, dan non-destruktif tanpa perlu peralatan laboratorium canggih. Hal ini sangat penting untuk

mencegah kerusakan fatal pada ring piston akibat penggunaan oli yang telah tercemar atau aus, yang selama ini sulit dideteksi secara kasatmata. Melalui pemantauan pola aroma dan output sensor, sistem ini memungkinkan nelayan menentukan waktu penggantian oli secara tepat, sehingga mampu menekan biaya operasional, memperpanjang usia mesin, dan mengurangi risiko kerusakan di tengah laut. Dengan demikian, hasil penelitian ini bukan hanya relevan secara akademis, tetapi juga memiliki dampak langsung dalam meningkatkan efisiensi, keselamatan, dan ketahanan ekonomi masyarakat nelayan lokal.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa teknologi *electronic nose* berbasis sensor gas (TGS2600, TGS2602, TGS813, TGS822) mampu mendeteksi dini kerusakan ring piston melalui analisis aroma dari oli mesin secara non-destruktif. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan signifikan pada output tegangan sensor seiring bertambahnya tingkat degradasi oli, seperti pada sensor TGS2600 yang meningkat dari $500,91 \pm 9,75$ mV (oli fresh) menjadi $635,66 \pm 15,24$ mV (oli rusak). Temuan ini konsisten dengan peningkatan kandungan logam (Fe, Al, Zn) dalam oli bekas berdasarkan jarak tempuh, serta didukung oleh studi Adelhkhani (2025) yang mencatat akurasi klasifikasi oli hingga 95,44% menggunakan pendekatan serupa. Dengan integrasi sensor dan mikrokontroler, sistem ini menawarkan solusi pemantauan real-time yang efektif, murah, dan dapat dioperasikan oleh pengguna awam. Secara praktis, inovasi ini sangat potensial untuk diterapkan pada kapal nelayan di wilayah seperti Kronjo, guna meningkatkan efisiensi perawatan mesin, mengurangi risiko kerusakan, dan menekan biaya operasional secara signifikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada ECADIN (*Energy Academy Indonesia*) dan Shell Indonesia atas dukungan dan pendanaan melalui program *Think Efficiency* bidang inovasi Tribologi, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

REFERENCES

- Adelhkhani, A., and Daneshkhah, E. 2025. Investigation of Engine Lubrication Oil Quality Using a Support Vector Machine and Electronic Nose. *Machines*, 13(2), p.121.
- Agocs, A., Nagy, A. L., Ristic, A., Tabakov, Z. M., Raffai, P., Besser, C., and Frauscher, M. 2023. Oil Degradation Patterns in Diesel and Petrol Engines Observed in the Field—An Approach Applying Mass Spectrometry. *Lubricants*, 11(9), p.404.
- Ali, M. K. A., Ezzat, F. M., Abd El-Gawwad, K. A., & Salem, M. M. M. (2017). Effect of lubricant contaminants on tribological characteristics during boundary lubrication reciprocating sliding. *arXiv preprint arXiv:1710.04448*.
- Belopukhov, V., Blinov, A., Borovik, S., Luchsheva, M., Muhutdinov, F., Podlipnov, P., and Sekisov, Y. 2022. Monitoring metal wear particles of friction pairs in the oil systems of gas turbine power plants. *Energies*, 15(13), p.4896.
- Galbi, M. and Ishak, A., 2016. Prediksi penggantian minyak pelumas motor diesel generator set berdasarkan laju perubahan viskositas dan total base number dengan pendekatan linieritas. *Bina Teknika*, 12(1), pp.111-120

- Gao, Y., Pan, X., Xu, S., Liu, Z., Wang, J., Yu, K., Wang, C., Yuan, H. and Wu, S., 2020. Fluorescence-enhanced microfluidic sensor for highly sensitive in-situ detection of copper ions in lubricating oil. *Materials & Design*, 191, p.108693.
- Han, Z., Wang, Y. and Qing, X., 2017. Characteristics study of in-situ capacitive sensor for monitoring lubrication oil debris. *Sensors*, 17(12):2851-2855.
- Hanifuddin, M., 2021. Analisa kerusakan komponen mesin diesel melalui uji fisika kimia minyak lumpur API CF-4. *Lembaran publikasi minyak dan gas bumi*, 45(3):205-210.
- Hase, A., 2020. Early detection and identification of fatigue damage in thrust ball bearings by an acoustic emission technique. *Lubricants*, 8(3), p.37.
- Herlambang, M.D., 2022. Detection and Extraction of Aroma Characteristics of Fuel Oil Using Gas Sensors Through Electronic-Nose System. *Journal of Technomaterial Physics*, 4(2), pp.150-156.
- Hermawati, L., Mujiarto, I. and Kundori, S.H., 2020. Analisa Pengukuran Cylinder Liner dan Piston pada Overhaul Diesel Engine. *Accurate: Journal of Mechanical Engineering and Science*, 1(2), pp.6-12.
- Kumar, S. and Kumar, M., 2022. Tribological and mechanical performance of coatings on piston to avoid failure—a review. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(4), pp.1346-1369.
- Mukhammad, J.A., 2020. Analisis Patahnya Piston Ring Pada Mesin Induk Di Mv. Kt 05 (Doctoral dissertation, Politeknik Ilmu Pelayaran Semarang).
- Li, Y., Wu, J. and Guo, Q., 2020. Electromagnetic sensor for detecting wear debris in lubricating oil. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(5), pp.2533-2541.
- Li, Z., Meng, Z. and Gibson, A., 2023. Detection of nonmetallic contaminants in lubricating oil using a microwave rectangular cavity resonator sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 72(1):1-10
- Liu, Z., Liang, F., Zhai, L. and Meng, X., 2022. A comprehensive experimental study on tribological performance of piston ring–cylinder liner pair. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 236(1), pp.184-204.
- Lu, P., Powrie, H.E., Wood, R.J., Harvey, T.J. and Harris, N.R., 2021. Early wear detection and its significance for condition monitoring. *Tribology International*, 159, p.106946.
- Pirro, D.M., Webster, M. and Daschner, E., 2016. *Lubrication fundamentals, revised and expanded*. CRC Press.
- Rusdiansyah, R. and Rantau, F., 2018. Sistem Pakar Untuk Mendiagnosa Kerusakan Mesin Sepeda Motor Matic Dengan Metode Forward Chaining. *Jurnal Pilar Nusa Mandiri*, 14(1), pp.35-42.
- Wei, H., Wenjian, C., Shaoping, W. and Tomovic, M.M., 2018. Mechanical wear debris feature, detection, and diagnosis: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 31(5), pp.867-882.
- Yang, S., Cao, N., and Yu, B. 2023. Wear debris measurement in lubricating oil based on inductive method: A review. *Measurement and Control*, 56(7-8), pp.1422-1435.
- Zhu, X., Zhong, C. and Zhe, J., 2017. Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring—A review. *Tribology International*, 109, pp.473-484.