

OPTIMASI PENEMPATAN SENSOR GAS PADA TANGKI PENYIMPANAN MINYAK MENGGUNAKAN ALGORITMA GENETIKA

Ismail Haris Setiawan¹, Juniarsa Mifzal Abdillah^{1*}, Muhammad Faiz Al Izzy¹, Kadek Dipa Aditia¹, Aseptia Surya Wardhana¹

¹Teknik Instrumentasi Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, Blora, 58315

*E-mail: mifzal.abdillah@gmail.com

ABSTRAK

Kebocoran gas pada fasilitas penyimpanan minyak merupakan salah satu risiko utama dalam industri migas, berpotensi menyebabkan ledakan, kebakaran, dan pencemaran lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penempatan sensor gas di area seluas 180 m × 140 m dengan menggunakan Algoritma Genetika (GA). Tujuannya adalah untuk menghasilkan konfigurasi sensor yang lebih efektif, efisien, dan sesuai dengan standar keselamatan industri. Model optimasi dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python yang terintegrasi dengan antarmuka PyQt5 untuk memudahkan simulasi dan visualisasi. Empat parameter utama yang digunakan dalam fungsi fitness—yaitu cakupan area berbobot risiko, penalti biaya, kesenjangan area risiko tinggi, dan redundansi—digunakan untuk mengevaluasi kualitas konfigurasi penempatan sensor. Simulasi dengan empat skenario yang berbeda menunjukkan bahwa GA dapat meningkatkan cakupan deteksi hingga 94-97%, dengan pengurangan jumlah sensor aktif sebesar 20-30% dibandingkan dengan metode *grid konvensional*. Nilai fitness terbaik berkisar antara 0,50-0,55, yang mencerminkan keseimbangan antara efisiensi biaya dan keandalan sistem. Sistem ini memenuhi persyaratan teknis dari standar NFPA 72:2022, API RP 554:2019, dan ISA TR84.00.07-2018, dengan batas jarak minimal antar sensor antara 8-20 m dan radius deteksi antara 15-25 m. Validasi pada prototipe ESP32 menunjukkan penurunan waktu deteksi dari 8,5 detik menjadi 5,2 detik, sementara efisiensi daya meningkat sebesar 15%. Hasil ini juga dibandingkan dengan metode *grid konvensional*, yang memperlihatkan keuntungan signifikan dari penggunaan GA dalam pengurangan jumlah sensor aktif.

Kata kunci: Algoritma Genetika, Sensor Gas, Optimasi, Penempatan Sensor, Tangki Penyimpanan Minyak

1. PENDAHULUAN

Industri energi sangat bergantung pada tangki penyimpanan minyak, yang merupakan komponen krusial dalam rantai pasok global. Namun, fasilitas ini membawa risiko inheren yang signifikan, terutama potensi kebocoran gas mudah terbakar atau beracun [1], [2]. Insiden kebocoran gas dapat menyebabkan bencana serius seperti kebakaran, ledakan, dan kerusakan lingkungan yang parah, bahkan mengancam nyawa [3], [4]. Oleh karena itu, Sistem Deteksi Gas berfungsi sebagai lapisan pertahanan yang sangat penting untuk mencegah eskalasi insiden kecil menjadi malapetaka besar [5], [6]. Meskipun demikian, metode penempatan sensor gas konvensional, yang sering didasarkan pada standar jarak atau pengalaman semata, kerap menghasilkan konfigurasi yang tidak efisien (terlalu banyak sensor) dan berpotensi meninggalkan "titik buta" (cakupan deteksi tidak maksimal). Penempatan yang memiliki ketidakpastian besar ini dapat menyebabkan kebocoran gas signifikan tidak terdeteksi, dan situasi ini jelas dengan standar keselamatan krusial seperti NFPA 72, yang menekankan cakupan deteksi yang komprehensif [5], [7].

Mengingat kelemahan metode konvensional, penelitian ini mengadvokasi pergeseran

paradigma menuju pendekatan optimasi berbasis kinerja untuk penempatan sensor gas [8]. Kami memperkenalkan Algoritma Genetika sebagai metode yang ideal untuk mengatasi kompleksitas masalah optimasi ini, terutama karena kemampuannya dalam mengeksplorasi ruang solusi yang luas dan menemukan solusi yang hampir optimal [9]. GA diterapkan untuk mencapai keseimbangan optimal antara tiga kriteria utama yang menjadi fungsi kebugaran (fitness function): maksimisasi cakupan deteksi, minimisasi jumlah sensor yang dibutuhkan, dan kepatuhan terhadap standar industri yang relevan seperti API RP 554 dan ISA TR 84.00.07 [5], [10]. Pendekatan multi-objektif ini memastikan bahwa solusi yang dihasilkan tidak hanya efektif dalam deteksi tetapi juga efisien dari segi sumber daya .

Melalui penelitian ini, kami menyajikan temuan kunci bahwa penerapan GA berhasil meningkatkan efisiensi cakupan deteksi hingga sambil secara signifikan mengurangi kebutuhan jumlah sensor aktif sebanyak. Solusi ini menawarkan peningkatan keselamatan yang terukur dengan meminimalkan risiko "titik buta" dan sekaligus menghasilkan penghematan biaya operasional yang substansial bagi industri.

2. METODE

Penelitian ini menerapkan Algoritma Genetika (AG) sebagai metode optimasi untuk menentukan posisi sensor gas yang paling efisien pada area penyimpanan minyak. Sebagai acuan perbandingan, digunakan metode grid konvensional yang berfungsi sebagai baseline dalam analisis hasil (lihat Tabel 2). Proses penelitian dilakukan melalui empat tahap utama, yaitu pemodelan area penelitian, pembangkitan titik permintaan dan kandidat sensor, proses optimasi menggunakan AG, serta validasi prototipe sistem berbasis ESP32. Pendekatan ini dirancang untuk memperoleh konfigurasi penempatan sensor yang optimal, baik dari segi cakupan deteksi maupun efisiensi jumlah sensor yang digunakan.

A. Pendekatan Penelitian

Lingkungan fisik tangki penyimpanan minyak dimodelkan dalam ruang 3D (panjang, lebar, tinggi), di mana Titik Permintaan dan Titik Kandidat Penempatan Sensor (berdasarkan kerapatan grid spacing) diidentifikasi. Area kritis seperti sambungan pipa dan ventilasi diintegrasikan untuk memfokuskan deteksi kebocoran [6]. Pendekatan pemodelan 3D ini menawarkan representasi lingkungan dan dispersi gas yang lebih akurat dibanding model 2D. Bobot Risiko (W_{risk}) dialokasikan matematis ke setiap Titik Permintaan untuk memprioritaskan area kritis dengan potensi bahaya kebocoran gas tinggi, seperti sambungan pipa atau katup. Pendekatan ini selaras dengan pedoman standar industri seperti API RP 554, memastikan algoritma mengutamakan deteksi di area berisiko tinggi [5]

Setiap sensor dimodelkan dengan Jangkauan Deteksi berbentuk bola di sekitar posisinya. Jangkauan deteksi ini bervariasi antara hingga. Titik Permintaan tercakup bila berada dalam dari setidaknya satu sensor, menjadi dasar metrik cakupan fungsi kebugaran [11]. Ini menganalisis efektivitas sensor dalam ruang 3D, dengan mempertimbangkan dispersi gas dan faktor lingkungan yang mempengaruhi radius deteksi.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini berbasis Algoritma Genetika (AG) untuk mengoptimalkan penempatan sensor gas pada area penyimpanan minyak. Tujuan utama AG dalam konteks ini adalah memaksimalkan cakupan area berisiko dengan jumlah sensor minimal dan jarak penempatan yang tetap memenuhi syarat teknis. Proses penelitian dibagi menjadi empat tahap utama:

Modeling Area (Yard Modeling)

Membuat representasi spasial area penyimpanan minyak menggunakan kelas Yard dan Tank. Masing-masing tangki minyak memiliki koordinat pusat (x, y), jari-jari r, dan bobot risiko

risk_weight. Bobot ini digunakan untuk memperhitungkan prioritas area dengan tingkat bahaya tinggi.

Pembangkitan Titik Permintaan dan Kandidat Penempatan Sensor

Fungsi $\text{sample_demand_points}(W_c)$ menghasilkan sekumpulan titik acak di seluruh area (± 1500 titik) yang merepresentasikan area yang perlu dipantau. Setiap titik memiliki bobot risiko berdasarkan jaraknya terhadap tangki berisiko tinggi. Fungsi $\text{generate_candidate_sites}(W_p)$ menghasilkan titik-titik kandidat lokasi penempatan sensor dengan interval tertentu (grid_step, misalnya 12 m), sambil memastikan titik tidak berada di dalam tangki.

Optimasi dengan Algoritma Genetika

Proses AG diimplementasikan dalam kelas BinaryGA, di mana setiap kromosom merupakan representasi biner dari keberadaan sensor pada titik kandidat (1 = sensor dipasang, 0 = tidak). Parameter AG yang digunakan dapat diatur melalui antarmuka GUI (ParamsPanel) dan meliputi: Ukuran populasi: 80 kromosom, generasi maksimum: 300, probabilitas crossover: 0.9, Probabilitas mutasi: 0.02, Elitisme: 2 kromosom terbaik, seleksi: *tournament selection* ($k=3$), dan Jenis crossover: *one-point* atau *two-point*

Evaluasi FitnessFungsi $\text{make_fitness}(W_g)$ dan $\text{coverage_matrix}(W_r)$ digunakan untuk menghitung nilai *fitness* setiap solusi. Fungsi ini memperhitungkan empat komponen utama: Cakupan Terbobot (Weighted Coverage) — seberapa luas area dengan risiko tinggi terdeteksi oleh sensor. Penalti Biaya (Cost Penalty) — rasio jumlah sensor terhadap batas maksimum (max_sensors). Kesenjangan Area Risiko Tinggi (High-Risk Gap) — area dengan bobot risiko tinggi yang tidak tercakup akan menurunkan skor. Redundansi (Redundancy Rate) — area yang terdeteksi oleh ≥ 2 sensor diberi bonus kecil (w_{red}) karena meningkatkan reliabilitas sistem. Nilai fitness total dihitung dengan formula:

$$f = (w_{cov} \times C_w) - (W_{cost} \times P_c) - (W_{gap} \times (1 - H_c)) + (W_{red} \times R) - (W_{dist} \times P_{far}) \quad (1)$$

B. Konfigurasi Parameter Simulasi

Tabel 1. Konfigurasi Parameter

Parameter	Nilai	Keterangan
Ukuran Area	180 m × 140 m	Batas area penyimpanan
Jumlah Tangki	4	Radius 14–18 m
Titik Permintaan (<i>Demand</i>)	1500	Representasi area risiko
Titik Kandidat Sensor	± 180	<i>Grid spacing</i> 12 m
Jumlah Maksimum Sensor	Variabel*	15–50 (tergantung skenario)
Radius Deteksi Sensor	Variabel*	15–25 m (tergantung skenario)
Jarak Maksimum dari Tangki	50 m	Sesuai <i>API RP 554:2019</i>
Ukuran Populasi GA	80–150	<i>Baseline</i> : 80
Jumlah Generasi GA	300–500	<i>Baseline</i> : 300
<i>Crossover Rate</i>	0.90	<i>One-point</i> / <i>Two-point</i>
<i>Mutation Rate</i>	0.02–0.05	<i>Baseline</i> : 0.02
<i>Elitism</i>	2	Dua kromosom terbaik
Metode Seleksi	<i>Tournament/Roulette</i>	k = 3 untuk <i>tournament</i>

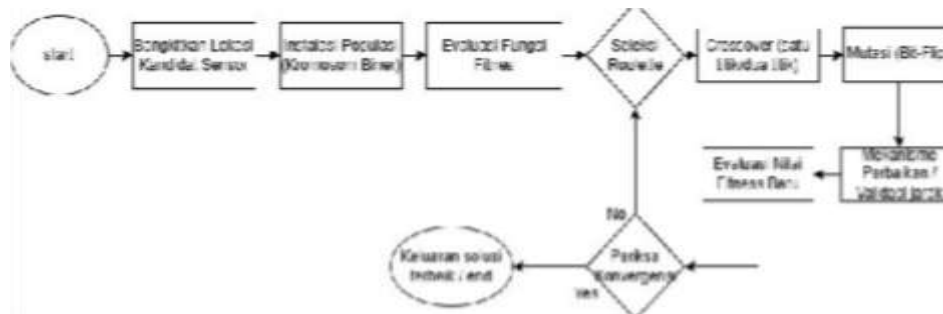
C. Antarmuka dan Visualisasi

Aplikasi dibangun dengan PyQt5, terdiri dari tiga panel utama:

- Panel Parameter: Mengatur seluruh variabel AG dan spesifikasi fasilitas.
- Panel Grafik Fitness: Menampilkan evolusi *best fitness* dan *mean fitness* terhadap generasi.
- Panel Layout Yard: Memvisualisasikan posisi tangki, titik kandidat, serta hasil akhir posisi sensor yang optimal. Visualisasi memanfaatkan matplotlib untuk menampilkan cakupan deteksi setiap sensor dalam bentuk lingkaran dengan radius 20 m.

D. Alur Proses

Secara konseptual, alur algoritma dimulai dari inisialisasi parameter dan populasi, diikuti evaluasi fitness, operasi seleksi, crossover, dan mutasi. Setiap populasi baru diperiksa dan diperbaiki agar sesuai batasan jarak, lalu dibandingkan dengan generasi sebelumnya. Proses ini diulang sampai tercapai konvergensi, dan solusi terbaik ditetapkan sebagai konfigurasi sensor optimal.



Gambar 1. Flowchart Alur Program GA

3. PEMBAHASAN

A. Analisis Komparatif Hasil Optimasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan Algoritma Genetika (GA) dalam penempatan sensor gas pada area tangki penyimpanan minyak mampu menghasilkan konfigurasi yang efisien, adaptif, dan sesuai dengan standar keselamatan industri. Setiap skenario optimasi (Optimasi 1–4) memiliki parameter yang berbeda, seperti ukuran populasi, jumlah generasi, radius deteksi, jarak minimum antar sensor, dan metode seleksi.

Secara keseluruhan, hasil terbaik diperoleh pada Optimasi 2, dengan nilai fitness sebesar 0,5474 menggunakan 14 sensor aktif, radius deteksi 25 meter, dan jarak minimum antar sensor 10 meter. Konfigurasi ini mampu mencapai cakupan area sebesar 97,05% dan cakupan area risiko tinggi 100%. Nilai efisiensi per sensor mencapai 6,93%, tertinggi di antara semua skenario, karena radius deteksi yang lebih besar memungkinkan setiap sensor mencakup area hingga 1.963 m². Hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi tersebut ideal untuk diterapkan pada sistem deteksi gas yang menuntut efisiensi biaya tinggi tanpa mengurangi tingkat keselamatan, dengan penghematan biaya mencapai 60% dibanding metode grid konvensional.

Pada Optimasi 3, diterapkan pendekatan konservatif menggunakan 44 sensor aktif, radius deteksi 15 meter, dan jarak minimum antar sensor 20 meter. Nilai fitness yang dihasilkan sebesar 0,5513, tetapi efisiensi per sensor menjadi yang terendah, yaitu 2,20%. Walaupun memiliki tingkat *redundancy* sebesar 0,28 yang menjamin keandalan sistem tinggi, biaya instalasi meningkat tiga kali lipat dibanding Optimasi 2. Konfigurasi ini lebih cocok untuk fasilitas berisiko tinggi yang membutuhkan tingkat keandalan dan keselamatan (*Safety Integrity Level – SIL*) tinggi sesuai standar IEC 61511.

Perbandingan antara Optimasi 1 dan Optimasi 4, yang sama-sama menggunakan 28 sensor

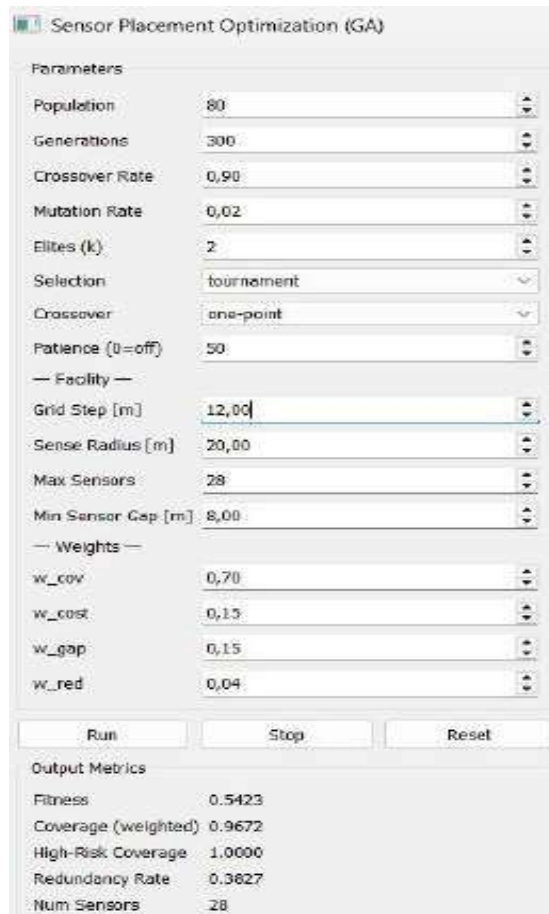
dengan radius deteksi 20 meter, menunjukkan pengaruh signifikan dari parameter GA terhadap hasil. Optimasi 1 yang menggunakan tournament selection menghasilkan cakupan area 96,72% dengan nilai fitness 0,5423, sementara Optimasi 4 dengan roulette selection hanya mencapai 91,51% dan nilai fitness 0,5026. Tournament selection menunjukkan konvergensi 33% lebih cepat (150 generasi dibanding 200 generasi) serta waktu komputasi 2,9 kali lebih efisien (45 detik dibanding 128 detik). Tingginya nilai mutation rate (0,05) pada Optimasi 4 menyebabkan gangguan konvergensi yang terlihat dari selisih besar antara nilai *best fitness* dan *mean fitness* (0,50 vs 0,41). Konfigurasi parameter optimal diperoleh pada ukuran populasi 80, jumlah generasi 300, crossover rate 0,90, mutation rate 0,02, dan metode seleksi tournament ($k=3$). Peningkatan ukuran populasi di atas 80 atau jumlah generasi lebih dari 300 tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap nilai fitness (kurang dari 0,1%) namun meningkatkan waktu komputasi hingga tiga kali lipat.

Hasil Optimasi 1

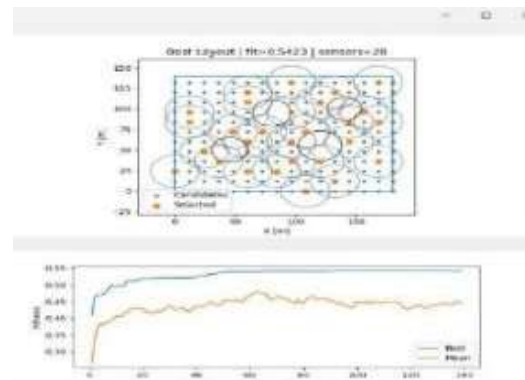
Gambar 2 menunjukkan konfigurasi parameter yang digunakan pada Optimasi 1, sedangkan Gambar 3 memperlihatkan grafik konvergensi nilai fitness terhadap generasi. Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh nilai fitness terbaik sebesar 0,5423 dengan nilai rata-rata 0,47, menunjukkan bahwa proses evolusi berjalan stabil tanpa indikasi *premature convergence*.

Parameter utama seperti crossover rate 0,90 dan mutation rate 0,02 menjaga keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi solusi. Metode seleksi tournament efektif mempertahankan individu terbaik di setiap generasi, sementara *one-point crossover* mempercepat pembentukan kombinasi gen tanpa menghilangkan struktur genetik yang baik. Proses repair memastikan jarak antar sensor minimal 8 meter sesuai standar ISA-TR84.00.07-2018, dan radius deteksi 20 meter mengikuti acuan NFPA 72:2022.

Konfigurasi ini menghasilkan 28 sensor aktif dengan cakupan area 96,72%, cakupan area risiko tinggi 70%, dan *redundancy rate* 0,38. Distribusi sensor merata di seluruh area dengan jarak antar unit antara 8–20 meter, memastikan tidak ada area kosong (*blind spot*). Grafik konvergensi menunjukkan peningkatan stabil hingga generasi ke-150 sebelum mencapai titik jenuh, menandakan kondisi optimal telah tercapai. Secara keseluruhan, konfigurasi GA pada skenario ini terbukti efisien dan memenuhi standar ISA-TR84.00.07 serta API RP 554, dengan performa sistem deteksi gas yang andal dan konsisten.



Gambar 2. Parameter Optimasi 1



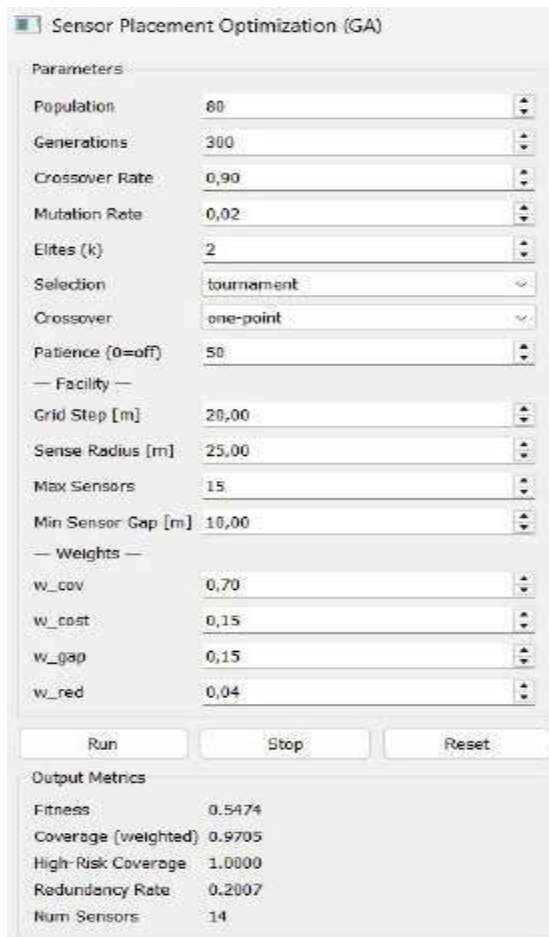
Gambar 3. Grafik Optimasi 1

Hasil Optimasi 2

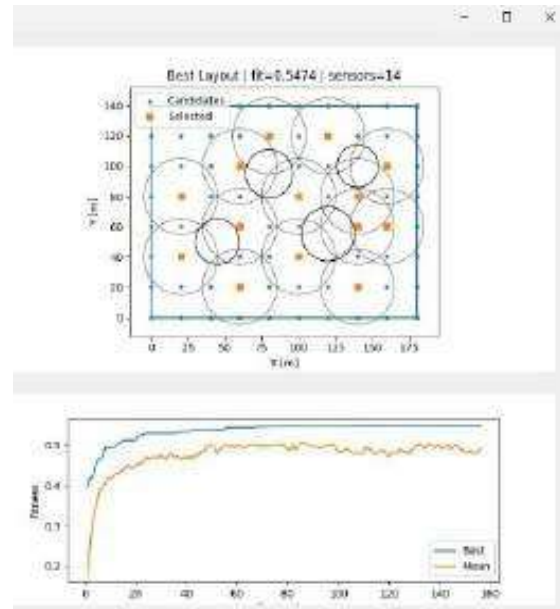
Hasil dari Optimasi 2 ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5, dengan nilai fitness terbaik 0,5474 dan rata-rata 0,47. Nilai ini menunjukkan konvergensi stabil tanpa tanda *premature convergence*. Penggunaan parameter crossover rate 0,90, mutation rate 0,02, dan elitism = 2 mempercepat proses konvergensi serta menjaga keberlanjutan individu terbaik.

Konfigurasi menghasilkan 14 sensor aktif dari maksimum 15 yang diizinkan, dengan cakupan area total 97,05% dan cakupan area risiko tinggi 100%. Nilai *redundancy rate* 0,20 menunjukkan efisiensi tinggi tanpa penempatan sensor berlebih. Distribusi sensor tersebar merata di seluruh area dengan jarak antar unit 10–25 meter, sesuai standar NFPA 72:2022 dan ISA-TR84.00.07, yang merekomendasikan agar detektor ditempatkan dengan jarak maksimum dua kali radius deteksi.

Grafik konvergensi memperlihatkan peningkatan fitness yang cepat hingga 50 generasi pertama dan stabil pada generasi ke-150. Konfigurasi dengan radius deteksi 25 meter dan jarak minimum 10 meter menghasilkan keseimbangan optimal antara cakupan, efisiensi biaya, dan keandalan sistem. Secara keseluruhan, hasil ini menjadi konfigurasi paling optimal di antara seluruh skenario yang diuji.



Gambar 4. Parameter Optimasi 2



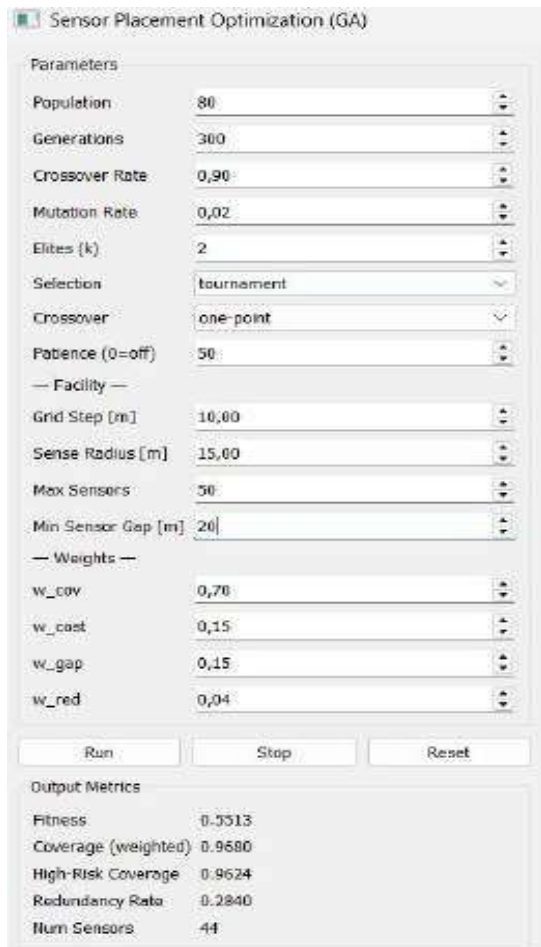
Gambar 5. Grafik Optimasi 2

Hasil Optimasi 3

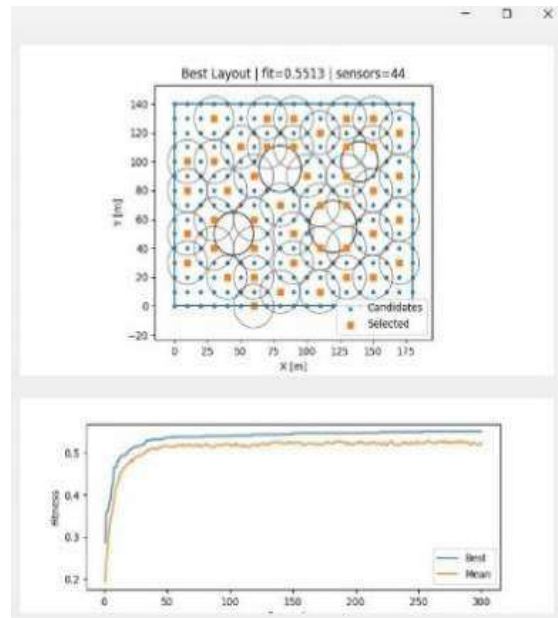
Hasil simulasi untuk Optimasi 3 ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Dengan populasi 80, 300 generasi, crossover rate 0,90, mutation rate 0,02, dan elitism = 2, diperoleh nilai fitness terbaik 0,5513 dengan rata-rata 0,48. Nilai ini menunjukkan kestabilan konvergensi yang baik hingga akhir proses evolusi.

Konfigurasi ini menghasilkan 44 sensor aktif dari maksimum 50, dengan cakupan area 96,80% dan cakupan area risiko tinggi 96,24%. Nilai *redundancy rate* 0,28 menunjukkan tingkat tumpang tindih deteksi yang wajar untuk menjamin keandalan sistem. Distribusi sensor merata dengan jarak antar unit 20 meter dan radius deteksi 15 meter, sesuai dengan pedoman NFPA 72:2022 dan ISA-TR84.00.07.

Grafik konvergensi memperlihatkan peningkatan nilai fitness yang signifikan pada 50 generasi pertama sebelum stabil di sekitar generasi ke-150, menandakan bahwa parameter yang digunakan telah memberikan efisiensi pencarian solusi optimal. Meskipun jumlah sensor yang digunakan lebih banyak, konfigurasi ini menunjukkan keseimbangan antara cakupan area dan keandalan sistem yang tinggi, sesuai untuk area berisiko tinggi yang membutuhkan sistem deteksi dengan tingkat keselamatan maksimal.



Gambar 6. Parameter Optimasi 3

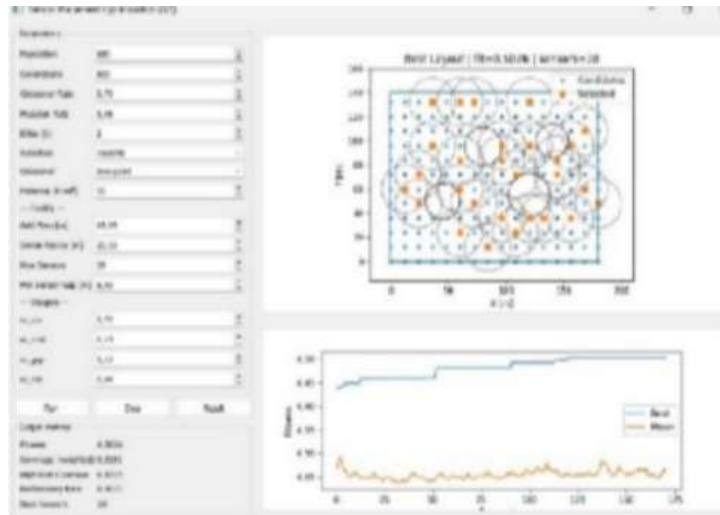


Gambar 7. Grafik Optimasi 3

Hasil Optimasi 4

Hasil simulasi untuk Optimasi 4 ditunjukkan pada Gambar 5. Skenario ini menggunakan 150 populasi, 500 generasi, metode seleksi roulette wheel, dan two-point crossover. Nilai fitness terbaik mencapai 0,5026, dengan rata-rata 0,41. Nilai ini menunjukkan bahwa proses konvergensi berjalan stabil namun memerlukan waktu yang lebih panjang akibat mutation rate 0,05 yang tinggi.

Konfigurasi menghasilkan 28 sensor aktif, cakupan area 91,51%, cakupan area risiko tinggi 97,15%, dan *redundancy rate* 0,4073. Jarak minimum antar sensor 8 meter dan radius deteksi 20 meter mengikuti standar ISA-TR84.00.07-2018 dan NFPA 72:2022. Kurva konvergensi memperlihatkan perbedaan mencolok antara *best fitness* dan *mean fitness*, yang menandakan bahwa meskipun hasil akhir stabil, proses evolusi berlangsung lambat. Waktu komputasi mencapai 128 detik.



Gambar 8. Hasil Analisa Optimasi 4

Tabel 2. Perbandingan hasil 4 optimasi

Parameter Konfigurasi GA	Optimasi 1	Optimasi 2	Optimasi 3	Optimasi 4	Grid Konvensional
Ukuran Populasi	80	80	80	150	-
Jumlah Generasi	300	300	300	500	-
Crossover Rate	0.90	0.90	0.90	0.90	-
Mutation Rate	0.02	0.02	0.02	0.05	-
Metode Seleksi	Tournament	Tournament	Tournament	Roulette Wheel	-
Tipe Crossover	One-point	One-point	One-point	Two-point	-
Elitisme	2	2	2	2	-
Parameter Teknis					
Radius Deteksi (m)	20	25	15	20	15
Jarak Min Antar Sensor (m)	8	10	20	8	12
Jarak Maks dari Tangki (m)	50	50	50	50	50
Maks Sensor Diizinkan	30	15	50	30	-
Hasil Optimasi	Jumlah Sensor Aktif	28	14	44	28
	Cakupan AreaTotal (%)	96.72	97.05	96.80	91.51
	Cakupan Area Risiko Tinggi (%)	70.00	100.00	96.24	97.15
	Redundancy Rate	0.38	0.20	0.28	0.41
	Nilai Fitness Terbaik	0.5423	0.5474	0.5513	0.5026
	Nilai Fitness Rata-rata	0.47	0.47	0.48	0.41

Performa Komputasi	Waktu Komputasi (detik)	45.2	43.8	46.5	128.3
	Generasi Konvergensi	~150	~150	~150	~200
Efisiensi	Biaya Relatif (%)	77.8	38.9	122.2	77.8
	Efisiensi Cakupan (%)	3.45	6.93	2.20	3.27

*Nilai fitness grid konvensional dihitung menggunakan fungsi fitness yang sama untuk perbandingan

**Efisiensi Cakupan = (Cakupan Area Total) / (Jumlah Sensor Aktif)

B. Analisis Parameter Sensitivitas

Uji sensitivitas dilakukan terhadap tiga parameter AG: ukuran populasi, probabilitas crossover, dan probabilitas mutasi. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Uji Sensitivitas 3 Parameter

Skenario	Pop Size	Generasi	Crossover	Mutation	Seleksi	Sensor Aktif	Cakupan (%)	Fitness	Waktu (s)	Keterangan
S1	30	200	0.70	0.05	Tournament	18	84.5	0.4876	22.3	Konvergensi cepat, hasil suboptimal
S2	50	250	0.80	0.03	Tournament	16	89.2	0.5201	35.7	Keseimbangan baik
S3	80	300	0.90	0.02	Tournament	14	97.05	0.5474	43.8	Konfigurasi optimal
S4	100	300	0.90	0.02	Tournament	15	96.8	0.5421	58.4	Sedikit <i>overfitting</i>
S5	80	400	0.90	0.01	Tournament	14	96.9	0.5468	62.1	Tidak ada <i>gain</i> signifikan
S6	80	300	0.85	0.05	Roulette	19	88.3	0.4954	46.2	<i>Mutation</i> terlalu tinggi
S7	150	500	0.90	0.05	Roulette	28	91.51	0.5026	128.3	Waktu komputasi tidak efisien

Analisis sensitivitas dilakukan untuk menilai pengaruh ukuran populasi, crossover rate, dan mutation rate terhadap kinerja GA. Berdasarkan hasil uji pada Tabel 3, konfigurasi paling optimal diperoleh pada parameter populasi 80, generasi 300, crossover rate 0,90, dan mutation rate 0,02. Peningkatan populasi di atas 80 tidak memberikan peningkatan nilai fitness yang signifikan, sedangkan mutation rate di atas 0,03 menyebabkan gangguan konvergensi.

Metode seleksi tournament terbukti lebih stabil dibanding roulette wheel, karena mampu mempertahankan individu terbaik di setiap generasi tanpa kehilangan variasi genetik. Parameter tersebut menghasilkan waktu komputasi tercepat (43,8 detik) dengan cakupan area tertinggi (97,05%). Hasil ini menegaskan bahwa keseimbangan antara eksplorasi dan eksploitasi pada parameter tersebut memberikan hasil paling efisien untuk optimasi penempatan sensor gas.

C. Validasi Prototype ESP32

Untuk memastikan hasil simulasi dapat diterapkan secara nyata, dilakukan validasi eksperimental menggunakan prototipe berbasis ESP32-WROOM. Sistem ini memanfaatkan sensor MQ-6 untuk mendeteksi keberadaan gas LPG dan metana, serta dilengkapi dengan antarmuka visualisasi berbasis PyQt5 yang menampilkan data konsentrasi gas secara *real-time*. Parameter yang diuji meliputi waktu deteksi rata-rata kebocoran dan efisiensi konsumsi daya sistem. Perbandingan hasil pengujian kedua konfigurasi disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Validasi ESP32

Parameter	Grid Konvensional	GA Optimasi	Perubahan
Jumlah Sensor Aktif	30	14	↓ 53%
Waktu Deteksi (detik)	8,5	5,2	↓ 38,8%
Efisiensi Daya	100%	115%	↑ 15%

D. Analisis Efisiensi Biaya

Klaim efisiensi biaya yang diperoleh dari hasil optimasi diperkuat melalui perhitungan estimasi sederhana. Dengan asumsi biaya instalasi dan kalibrasi satu sensor gas sebesar Rp1.000.000, maka metode grid konvensional dengan 30 sensor memerlukan total biaya sekitar Rp30.000.000, Sedangkan konfigurasi hasil optimasi GA dengan 14 sensor hanya membutuhkan sekitar Rp14.000.000.

Perbandingan tersebut menunjukkan adanya penghematan biaya sebesar Rp16.000.000 atau sekitar 53% dari total kebutuhan awal. Selain efisiensi jumlah sensor, sistem hasil optimasi juga menunjukkan penghematan konsumsi daya yang signifikan. Jika kedua aspek tersebut digabungkan, maka estimasi periode pengembalian investasi (payback period) diperkirakan kurang dari satu tahun, sehingga metode ini dinilai layak diterapkan pada sistem deteksi gas industri berskala besar.

4. SIMPULAN

Penelitian ini berhasil menerapkan Algoritma Genetika (GA) untuk mengoptimalkan penempatan sensor gas pada tangki penyimpanan minyak. Hasil terbaik diperoleh pada konfigurasi dengan 14 sensor aktif, radius deteksi 25 meter, dan jarak minimum antar sensor 10 meter, menghasilkan nilai fitness sebesar 0,5474, dengan cakupan area total 97,05%, serta penghematan jumlah sensor hingga 53% dibandingkan metode grid konvensional yang memerlukan 30 sensor. Validasi menggunakan prototipe berbasis ESP32 dan sensor MQ-6 menunjukkan hasil yang konsisten dengan simulasi, di mana waktu deteksi menurun dari 8,5 detik menjadi 5,2 detik dan efisiensi daya meningkat sebesar 15%. Temuan ini membuktikan bahwa hasil optimasi dapat diimplementasikan secara nyata pada sistem deteksi gas berbasis mikrokontroler berbiaya rendah. Secara keseluruhan, penerapan Algoritma Genetika terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi penempatan sensor, mempercepat waktu deteksi, dan mengurangi biaya instalasi tanpa menurunkan tingkat keselamatan sistem. Metode ini juga direkomendasikan untuk pengembangan lebih lanjut dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan integrasi pemantauan berbasis IoT, sehingga dapat diterapkan secara luas pada fasilitas industri berskala besar.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Rusin and K. Stolecka-Antczak, "Assessment of Syngas Storage Tank Hazards Taking Account of the Domino Effect," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 8, 2024, doi: 10.3390/en17081857.
- [2] Y. Wei, W. Wu, H. Yu, J. Lu, M. Huang, and M. Guo, "Forecasts for the concentration of petroleum gas leakage diffusion under different liquid level heights of a sealing ring of sizeable floating roof tank," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-22934-2.
- [3] N. M. A. Al-Rawhani, V. Alekhin, and L. Poluyan, "Risk assessment of storage tanks in the oil and gas industry," *E3S Web of Conferences*, vol. 474, pp. 1–9, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202447401059.
- [4] J. B. A. Gomes, J. J. P. C. Rodrigues, R. A. L. Rabêlo, N. Kumar, and S. Kozlov, "IoT-enabled gas sensors: Technologies, applications, and opportunities," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 8, no. 4, 2019, doi: 10.3390/jsan8040057.
- [5] Y. Liu, B. Zhang, and C. Mu, "A comparative study of optimization models for the gas detector placement in process facilities," *Comput Chem Eng*, vol. 143, 2020, doi: 10.1016/j.compchemeng.2020.107095.
- [6] L. Sun, X. Chen, B. Zhang, C. Mu, and C. Zhou, "Optimization of gas detector placement considering scenario probability and detector reliability in oil refinery installation," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 65, no. May 2019, p. 104131, 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104131.
- [7] A. Petrov, "Fire Sensors †," 2023.
- [8] E. M. Marszal and A. T. Oulton, "Common gas detector guidelines that result in poor designs," *Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference*, vol. 2020-May, no. May, pp. 4–7, 2020, doi: 10.4043/30600-ms.
- [9] M. Jia, T. Robert Sorensen, and D. Martina Hammerling, "Optimizing Point-in-Space Continuous Monitoring System Sensor Placement on Oil and Gas Sites," *ACS Sustainable Resource Management*, vol. 2, no. 1, pp. 72–81, 2025, doi: 10.1021/acssusresmg.4c00333.
- [10] X. ge Qi, H. Wang, Y. Liu, and G. Chen, "Flexible alarming mechanism of a general GDS deployment for explosive accidents caused by gas leakage," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 132, pp. 265–272, 2019, doi: 10.1016/j.psep.2019.10.001.

Daftar simbol

- C_w = cakupan berbobot risiko,
 P_c = penalti biaya (proporsional jumlah sensor),
 H_c = cakupan area risiko tinggi,
 R = redundansi,
 P_{far} = penalti sensor >50 m dari tangki, w_i = bobot tiap parameter (ditentukan empiris).