

TUGAS BESAR
DASAR INTELEGENSI ARTIFISIAL IF3070
PENCARIAN SOLUSI DIAGONAL MAGIC CUBE DENGAN
ALGORITMA LOCAL SEARCH



Disusun oleh:
Kelompok 70

Muhammad Reffy Haykal	18222103
Samuel Franciscus Togar Hasurungan	18222131
Hanan Fitra Salam	18222133
Salsabila Azzahra	18222139

PROGRAM STUDI SISTEM DAN TEKNOLOGI INFORMASI
SEKOLAH TEKNIK ELEKTRO DAN INFORMATIKA
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
2024

DAFTAR ISI

DESKRIPSI PERSOALAN	3
PEMBAHASAN	5
1. Pemilihan objective function	5
2. Penjelasan implementasi algoritma local search (deskripsi fungsi/kelas + source codenya)	7
2.1 Magic Cube	7
2.2 Steepest Ascent Hill-climbing	10
2.3 Simulated Annealing	12
2.4 Genetic Algorithm	16
3. Hasil eksperimen dan analisis (disertai dengan visualisasi dari program yang telah dibuat)	21
3.1 Steepest Ascent Hill-Climbing	21
3.2 Simulated Annealing	24
3.3 Algoritma Genetic	27
KESIMPULAN DAN SARAN	34
PEMBAGIAN TUGAS SETIAP KELOMPOK	35
REFERENSI	37

67	18	119	106	5
116	17	14	73	95
40	50	81	65	79
56	120	55	49	35
36	110	46	22	101

- Terdapat satu angka yang merupakan magic number dari kubus tersebut (Magic number tidak harus termasuk dalam rentang 1 hingga n^3 , magic number juga bukan termasuk ke dalam angka yang harus dimasukkan ke dalam kubus)
- Jumlah angka-angka untuk setiap baris sama dengan magic number
- Jumlah angka-angka untuk setiap kolom sama dengan magic number
- Jumlah angka-angka untuk setiap tiang sama dengan magic number
- Jumlah angka-angka untuk seluruh diagonal ruang pada kubus sama dengan magic number
- Jumlah angka-angka untuk seluruh diagonal pada suatu potongan bidang dari kubus sama dengan magic number

Dalam tugas ini, kami diharuskan mengimplementasikan algoritma local search untuk memecahkan Diagonal Magic Cube berukuran $5 \times 5 \times 5$, dimana kami akan mengusahakan kubus agar bisa mendekati keadaan/state sempurna, yaitu properti tertentu terkait baris, kolom, tiang, serta diagonal bidang dan ruang kubus mencapai *magic number*. Untuk mencapai *magic number*

ini, setiap algoritma local search akan melakukan iterasi perubahan state dari kubus dengan langkah utama berupa penukaran posisi dua angka secara acak pada setiap iterasi.

Tiga algoritma local search yang akan diimplementasikan adalah salah satu varian dari Hill-Climbing yaitu Steepest-Ascent Hill Climbing, Simulated Annealing, dan Genetic Algorithm. kami diharapkan untuk tidak hanya menjalankan algoritma ini, tetapi juga mengeksplorasi parameter-parameter yang relevan seperti jumlah iterasi, populasi dalam Genetic Algorithm, serta batasan sideways move dalam Hill-Climbing. Tujuannya adalah untuk memahami bagaimana masing-masing algoritma bekerja dalam menemukan solusi optimal (global optima) untuk masalah Diagonal Magic Cube, dengan mengevaluasi efisiensi dan efektivitas setiap pendekatan melalui perbandingan hasil akhir, durasi pencarian, dan analisis terhadap pola stuck di local optima.

Melalui eksperimen ini, kami akan mengumpulkan data berupa nilai objective function, state awal dan akhir kubus, jumlah iterasi, serta durasi pencarian untuk setiap algoritma. Hasil eksperimen tersebut akan dianalisis untuk menilai kedekatan solusi yang dicapai oleh masing-masing algoritma terhadap global optima dan melihat bagaimana iterasi dan populasi dalam Genetic Algorithm mempengaruhi kinerja algoritma.

PEMBAHASAN

1. Pemilihan objective function

objective function adalah fungsi matematis yang digunakan untuk mengevaluasi seberapa baik suatu solusi memenuhi kondisi terbaik dalam masalah optimasi. Dalam permasalahan diagonal magic cube, kondisi terbaik yang bisa diraih adalah jika setiap baris, kolom, tiang, dan diagonal menghasilkan *magic number* jika dijumlahkan.

Magic number dari suatu kubus dapat dicari dengan rumus berikut:

$$M_3(n) = \frac{n(n^3 + 1)}{2}$$

Magic number kubus dilambangkan sebagai $M_3(n)$. Karna pada kasus ini kubus yang dipakai adalah kubus 5 sisi (n), maka kita akan mensubstitusi n pada rumus tersebut. Hasil *magic number* yang didapat pada magic cube sisi 5 ini adalah **315**.

Setelah mengetahui hasil terbaik yang ingin dicapai dari permasalahan *diagonal magic cube* ini, *objective function* dapat dibuat. Kami ingin *objective function* yang kami buat berfungsi sebagai ukuran seberapa jauh kondisi kubus saat ini dari kondisi ideal dengan melihat berapa selisih jumlah angka yang ada saat ini dengan *magic number*. Oleh karena itu, kami membuat *objective function* dengan menghitung selisih jumlah angka yang ada pada setiap baris, kolom, tiang, dan diagonal kubus dengan *magic number*, dan mengakumulasi nya. Semakin kecil selisih yang ada, semakin dekat dengan hasil terbaik. Karena menggunakan pendekatan menghitung selisih, hasil terbaik yang kami harapkan dari *objective function* ini adalah 0.

objective function yang kami gunakan untuk kasus ini adalah sebagai berikut:

$$f(c) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} (|S_r(i,j) - M| + |S_c(i,j) - M| + |S_d(i,j) - M|) + |S_{D1} - M| \\ + |S_{D2} - M| + |S_{D3} - M| + |S_{D4} - M|)$$

- $S_r(i,j)$ = Jumlah elemen pada baris ke- i dan lapisan ke- j .
- $S_c(i,j)$ = Jumlah elemen pada kolom ke- i dan lapisan ke- j .
- $S_d(i,j)$ = Jumlah elemen pada diagonal dari lapisan ke- i dan lapisan ke- j .
- $S_{D1}, S_{D2}, S_{D3}, S_{D4}$ = Jumlah elemen pada empat diagonal ruang pada kubus.

Dalam rumus tersebut, kami menghitung total keseluruhan dari baris, kolom, tiang, dan diagonal karena syarat pada kubus ajaib baru terpenuhi jika semua elemen tersebut sesuai dengan magic number.

Alasan kami mendefinisikan rumus *objective function* seperti ini adalah karena pada saat angka bertukar, kondisi kubus dapat berubah dan yang terpengaruh bukan hanya satu komponen, melainkan beberapa. Sebagai contoh, kita bisa melihat gambar alas kubus berikut.

	45	67	80	99	71
	40	89	59	100	10
	23	2	121	77	3
	47	88	91	90	54
	44	61	8	43	12

Gambar 1: Visualisasi *layer* pada kubus 5 x 5 x 5

Angka “45” dan “47” berada pada satu baris. Namun ketika angka-angka ini bertukar, yang terpengaruh bukan hanya barisnya, melainkan juga kolom, tiang, dan diagonal ruang yang memiliki "45" atau "47" sebagai anggotanya. Kondisi mereka juga ikut berubah saat pertukaran terjadi.

M sebagai magic number adalah kondisi ideal yang ingin diraih kubus. Oleh karena itu, kita bisa menghitung seberapa dekatnya kondisi kubus ke ideal melalui selisih antara magic number dan jumlah angka dari baris, kolom, tiang, dan diagonal ruang kubus. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa **solusi terbaik akan ditemukan ketika objective function memiliki nilai yang sama dengan 0.**

$$[f(c) = 0]$$

2. Penjelasan Implementasi Algoritma Local Search

2.1 Magic Cube

Class MagicCube digunakan untuk membuat struktur *magic cube* ukuran 5x5x5 serta metode-metode untuk menghitung skor dan menghasilkan tetangga dari suatu kondisi kubus.

Fungsi/ Prosedur	Prosedur <i>init</i>
Deskripsi	Inisialisasi awal objek MagicCube. Prosedur ini menerima parameter <i>self</i> untuk menunjuk <i>class</i> -nya sendiri, <i>N</i> untuk menentukan ukuran kubus, dan <i>magic_number</i> untuk menetapkan target baris, kolom, nilai total awal kubus. Setelah itu, prosedur ini akan menyimpan ukuran kubus, menentukan target nilai magic number, dan inisialisasi kubus dengan angka acak.
Kode	<pre>def __init__(self, N=5, magic_number=315): self.N = N self.MAGIC_NUMBER = magic_number self.cube = self.initialize_cube()</pre>

Fungsi/ Prosedur	Fungsi <i>initialize_cube</i>
Deskripsi	<i>Function initialize_cube</i> digunakan untuk menginisialisasi kubus secara acak. Menerima parameter <i>self</i> untuk menunjuk kelasnya sendiri. Fungsi ini akan membuat array dengan angka 1 hingga N^3 . Lalu akan mengacak angka dan mengembalikan array yang sudah diacak membentuk $N \times N \times N$.
Kode	<pre>def initialize_cube(self): numbers = np.arange(1, self.N**3 + 1) np.random.shuffle(numbers) return numbers.reshape((self.N, self.N, self.N))</pre>

Fungsi/ Prosedur	Fungsi <i>search</i>
Deskripsi	Fungsi ini adalah fungsi yang menghitung skor. Perhitungan skor dilakukan dengan <i>for loop</i> indeks <i>i</i> pada setiap layer, menghitung perbedaan antara jumlah elemen dalam setiap baris, kolom, dan diagonal

	dengan magic number, lalu menambahkannya pada variabel <i>score</i> . Fungsi ini akan mengembalikan skor.
Kode	<pre> def fitness(self, cube=None): if cube is None: cube = self.cube cube = np.array(cube) if cube.shape != (self.N, self.N, self.N): raise ValueError(f"Ukuran kubus adalah {cube.shape}, seharusnya {(self.N, self.N, self.N)}") # Menghitung skor dari setiap baris, kolom, dan diagonal score = 0 # Menghitung skor dari diagonal kubus score += abs(np.sum([cube[i, i, i] for i in range(self.N)]) - self.MAGIC_NUMBER) score += abs(np.sum([cube[i, i, self.N - i - 1] for i in range(self.N)]) - self.MAGIC_NUMBER) target = self.MAGIC_NUMBER * self.N for i in range(self.N): # Menghitung skor dari diagonal score += abs(np.sum(np.diagonal(cube[i, :, :])) - self.MAGIC_NUMBER) score += abs(np.sum(np.diagonal(np.fliplr(cube[i, :, :])) - self.MAGIC_NUMBER) score += abs(np.sum(np.diagonal(cube[:, i, :])) - self.MAGIC_NUMBER) score += abs(np.sum(np.diagonal(np.fliplr(cube[:, i, :])) - self.MAGIC_NUMBER) score += abs(np.sum(np.diagonal(cube[:, :, i])) - self.MAGIC_NUMBER) score += abs(np.sum(np.diagonal(np.fliplr(cube[:, :, i])) - self.MAGIC_NUMBER) </pre>

	<pre> score += abs(np.sum(cube[i, :, :]) - target) score += abs(np.sum(cube[:, i, :]) - target) score += abs(np.sum(cube[:, :, i]) - target) return score </pre>
--	---

Fungsi/ Prosedur	Fungsi <i>neighbors_function</i>
Deskripsi	<p>Digunakan untuk menghasilkan solusi tetangga, yang merupakan konfigurasi kubus di mana dua elemen dipertukarkan.</p> <p>Langkah-langkah utama dalam fungsi ini antara lain:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Inisialisasi <i>position</i> dengan koordinat x, y, z. 2. Iterasi tiap elemen untuk memeriksa dan menukar posisi tetangga. 3. Mengembalikan <i>neighbor</i> yang ditukar.
Kode	<pre> def neighbors_function(self, cube=None): if cube is None: cube = self.cube neighbors = [] positions = np.array(list(product(range(self.N), repeat=3))) for x, y, z in positions: for dx, dy, dz in product([-1, 0, 1], repeat=3): if dx == 0 and dy == 0 and dz == 0: continue nx, ny, nz = x + dx, y + dy, z + dz if 0 <= nx < self.N and 0 <= ny < self.N and 0 <= nz < self.N: swap_cube = cube.copy() swap_cube[x, y, z], swap_cube[nx, ny, nz] = swap_cube[nx, ny, nz], swap_cube[x, y, z] neighbors.append(swap_cube) return neighbors </pre>

2.2 Steepest Ascent Hill-climbing

Algoritma pencarian ini merupakan variasi dari Hill Climbing yang mempertimbangkan semua gerakan dari kondisi saat ini dan memilih yang terbaik sebagai kondisi berikutnya. Algoritma ini memeriksa semua tetangga dari status saat ini dan memilih satu tetangga yang paling dekat dengan status tujuan.

Class SteepestHillClimbing digunakan untuk mengimplementasikan algoritma ini ke *magic cube* yang telah di-generate.

Fungsi/ Prosedur	Prosedur <i>init</i>
Deskripsi	Digunakan untuk menjadi konstruktor untuk inisialisasi awal ketika objek <i>SteepestHillClimbing</i> dibuat. Prosedur ini memiliki parameter <i>self</i> untuk menunjuk <i>class</i> diri sendiri dan <i>max_iteration=1000</i> untuk membuat batas iterasi. Setelah itu, prosedur ini akan membuat objek <i>solver</i> untuk inisialisasi kubus dan fungsinya, <i>initial_state</i> untuk menyimpan keadaan awal dari kubus, <i>objective_function</i> untuk menghitung skor awal dengan fungsi <i>fitness</i> , <i>max_iterarions</i> untuk menentukan batas iterasi, dan <i>array history</i> untuk menyimpan perubahan skor tiap iterasi.
Kode	<pre>def __init__(self, max_iterations=1000): self.solver = MagicCube() self.initial_state = self.solver.cube self.objective_function = self.solver.fitness(self.initial_state) self.max_iterations = max_iterations self.history = []</pre>

Fungsi/ Prosedur	Fungsi <i>search</i>
Deskripsi	<i>Function search</i> digunakan untuk menjalankan algoritma <i>Steepest Ascent Hill-Climbing</i> . Fungsi ini mencari solusi terbaik secara bertahap di setiap iterasi dan menyimpan skornya. Langkah-langkah utama dalam fungsi ini antara lain: <ol style="list-style-type: none">1. <i>Iteration_count</i> dan <i>start_time</i> untuk inisiasi iterasi dan waktu.2. Fungsi <i>neighbors_function</i> untuk menghasilkan skor tetangga sekarang.3. Memilih tetangga terbaik dengan <i>for loop</i>. mengevaluasi skor dengan <i>fitness</i>.

	<ol style="list-style-type: none"> Memperbarui <i>initial_state</i>, <i>objective_function</i>, dan menyimpan <i>history</i> skor. Mengembalikan <i>initial_state</i>, <i>objective_function</i>, <i>execute_time</i>, <i>history</i>, dan <i>iteration_count</i>.
Kode	<pre> def search(self): iteration_count = 1 start_time = time.time() # Mencari tetangga terbaik dari kubus while iteration_count <= self.max_iterations: neighbors = self.solver.neighbors_function(self.initial_state) best_neighbor = min(neighbors, key=self.solver.fitness) best_score = self.solver.fitness(best_neighbor) # Mengganti kubus awal dengan kubus tetangga terbaik if best_score < self.objective_function: self.initial_state = best_score self.objective_function = best_score self.history.append(self.objective_function) print(f"Iterasi {iteration_count}: Skor sekarang = {self.objective_function}") if self.is_solved(self.objective_function): break else: break iteration_count += 1 execute_time = time.time() - start_time return self.initial_state, self.objective_function, execute_time, self.history, iteration_count </pre>
Fungsi/	Fungsi <i>is_solved</i>

Prosedur	
Deskripsi	Memeriksa apakah solusi sudah mencapai hasil optimum.
Kode	<pre>def is_solved(self, score): return score == 0</pre>

2.3 Simulated Annealing

Algoritma pencarian ini merupakan algoritma pencarian lokal yang akan memilih tetangga secara acak dan dihitung seberapa baik solusi tetangga tersebut dengan menghitung selisih skor heuristik dengan delta E. Jika lebih baik, maka solusi tersebut dapat dipilih menjadi *current state*. Solusi yang lebih buruk mungkin saja dipilih dengan menghitung terlebih dahulu probabilitas solusi tersebut dengan rumus ... Setiap pencarian solusi (iterasi) yang dilakukan, suhu akan menurun. Pencarian akan diterminasi jika suhu sudah mendekati 0.

Dalam implementasi penggunaan algoritma simulated annealing, *class SimulatedAnnealing* digunakan untuk mengimplementasikan algoritma ini ke *magic cube* yang telah di-generate. Berikut fungsi/prosedur yang digunakan dalam kelas *SimulateAnnealing*.

Fungsi/Prosedur	Prosedur <i>init</i>
Deskripsi	<p>Konstruktor dari kelas <i>SimulatedAnnealing</i>. Fungsi ini memiliki masukan <i>self</i> untuk menunjuk class diri sendiri dan juga memiliki parameter yang diinisialisasi, yaitu:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. <i>initial_temperature</i>=1000 2. <i>cooling_rate</i>=0.99 3. <i>temperature_threshold</i>=0.001 4. <i>stagnation_threshold</i>=50 <p>Dalam fungsi ini akan membuat objek <i>solver</i> yang merupakan objek dari kelas <i>MagicCube</i> yang akan menjalankan fungsi-fungsi dari kelas tersebut, seperti inisialisasi kubus, menghitung skor heuristik, dan memilih tetangga.</p>
Kode	<pre>def __init__(self, initial_temperature=1000, cooling_rate=0.99, temperature_threshold=0.001, stagnation_threshold=50): self.solver = MagicCube() self.current_state = self.solver.cube</pre>

	<pre> self.current_score = self.solver.fitness(self.current_state) self.temperature = initial_temperature self.cooling_rate = cooling_rate self.temperature_threshold = temperature_threshold self.stagnation_threshold = stagnation_threshold self.iteration_scores = [] self.probabilities = [] self.total_stuck_count = 0 </pre>
--	---

Fungsi/ Prosedur	Fungsi <i>search</i>
Deskripsi	<p>Proses pencarian solusi menggunakan simulated annealing dilakukan dalam fungsi ini. Fungsi ini memiliki masukan <i>self</i> dan memiliki keluaran <i>self.current_state</i>, kondisi kubus saat ini setiap pencarian solusi dilakukan, dan <i>self.current_score</i>, skor heuristik untuk setiap solusi yang dihasilkan.</p> <p>Langkah-langkah utama dalam fungsi <i>search</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Menjalankan looping dengan kondisi suhu masih lebih besar dari batas <i>temperature_threshold</i> 2. Mengambil tetangga secara acak dan menghitung <i>delta_E</i> 3. Jika <i>delta_E</i> lebih kecil dari 0 (solusi lebih baik dari current state), maka current state dan current score akan diperbarui 4. Jika <i>delta_E</i> lebih besar dari 0, akan dihitung probabilitas penerimaan solusi buruk berdasarkan persamaan $math.exp(-delta_E / temperature)$ 5. Jika tidak ada perbaikan selama beberapa iterasi berturut-turut, algoritma mencatat bahwa ia <i>stuck</i> pada <i>local optima</i>. 6. Setelah setiap iterasi, suhu dikurangi sesuai <i>cooling_rate</i>. Loop akan berhenti jika solusi optimal ditemukan atau suhu mencapai batas.
Kode	<pre> def search(self): iteration_count = 1 stagnation_counter = 0 start_time = time.time() while self.temperature > self.temperature_threshold: </pre>

```

        neighbors =
self.solver.neighbors_function(self.current_state)
        next_state = random.choice(neighbors)
        next_score = self.solver.fitness(next_state)

        delta_E = next_score - self.current_score
        probability = 1.0

        if delta_E < 0:
            self.current_state = next_state
            self.current_score = next_score
            stagnation_counter = 0
        else:
            probability = math.exp(-delta_E /
self.temperature)
            if random.random() < probability:
                self.current_state = next_state
                self.current_score = next_score
                stagnation_counter += 1

        self.iteration_scores.append(self.current_score)
        self.proBABILITIES.append(probability)

        if stagnation_counter >=
self.stagnation_threshold:
            self.total_stuck_count += 1
            print(f"Stuck di local optima pada iterasi
{iteration_count} dengan skor {self.current_score}")

            print(f"Iterasi {iteration_count}: Skor Heuristik
= {self.current_score}, Temperatur = {self.temperature:.4f},
Probabilitas = {probability:.4f}")

        if self.is_solved(self.current_score):
            break

        self.temperature *= self.cooling_rate
        iteration_count += 1

```

	<pre> end_time = time.time() print(f"Waktu yang dibutuhkan: {end_time - start_time} detik") print(f"Total frekuensi stuck di local optima: {self.total_stuck_count}") return self.current_state, self.current_score </pre>
--	--

Fungsi/ Prosedur	Fungsi <i>is_solved</i>
Deskripsi	Mengevaluasi apakah solusi sudah optimal dengan mengembalikan nilai True jika skor heuristik yang didapat sama dengan 0. Jika True, maka fungsi <i>search</i> akan berhenti.
Kode	<pre> def is_solved(self, score): return score == 0 </pre>

Fungsi/ Prosedur	Prosedur <i>plot_objective_function</i>
Deskripsi	Melakukan visualisasi selama proses pencarian solusi yang dilakukan. Hasil dari visualisasi ini adalah grafik objective function solusi yang dihasilkan (sumbu y) untuk setiap iterasi (sumbu x).
Kode	<pre> def plot_objective_function(self): plt.figure(figsize=(10, 5)) # Plotting Objective Function Value over Iterations plt.subplot(2, 1, 1) plt.plot(self.iteration_scores, label='Objective Function (Score)') plt.xlabel("Iteration") plt.ylabel("Objective Function Value (Score)") plt.title("Objective Function Value over Iterations in Simulated Annealing") plt.legend() </pre>

	<pre>plt.tight_layout() plt.show()</pre>
--	--

Fungsi/ Prosedur	Prosedur <i>plot_probability</i>
Deskripsi	Melakukan visualisasi selama proses pencarian solusi yang dilakukan. Hasilnya dari visualisasi ini adalah grafik nilai probabilitas solusi untuk setiap iterasi.
Kode	<pre>def plot_probability(self): plt.figure(figsize=(10, 5)) # Plotting Probability $e^{(-\delta_E / T)}$ over Iterations plt.subplot(2, 1, 2) plt.plot(self.probabilities, label='Probability (e^(-delta_E / T))', color='orange') plt.xlabel("Iteration") plt.ylabel("Probability") plt.title("Probability of Accepting Worse Solution over Iterations") plt.legend() plt.tight_layout() plt.show()</pre>

2.4 Genetic Algorithm

Algoritma ini dimulai dengan membentuk populasi awal yang terdiri dari banyak kubus yang *digenerate* dengan angka acak dari 1 sampai 125. Pada kali ini, populasi awal saya tentukan jumlahnya menjadi 2000 kubus. Dalam populasi ini dipilih 20 kandidat secara acak, dan dari kandidat dipilih dua parent terbaik untuk menjadi kandidat dalam proses *crossover*, di mana karakteristik dari kedua parent digabungkan untuk membentuk dua anak baru. Setelah anak baru terbentuk, proses mutasi akan diterapkan ke kedua anak tersebut untuk memperkenalkan variasi kecil yang tujuannya untuk mencegah solusi stagnan pada nilai yang kurang optimal. Setelah itu, anak-anak yang telah melalui proses mutasi ditambahkan ke populasi baru. Proses akan terulang kembali sampai populasi baru

sudah mencapai kuantitas yang sama dengan populasi awal. Jika sudah sama, populasi lama digantikan oleh populasi baru, dan populasi baru ini akan digunakan ke generasi berikutnya.

Pada akhir setiap generasi, algoritma mengevaluasi solusi terbaik saat ini berdasarkan nilai objektifnya, dan jika solusi terbaik mendekati atau mencapai nilai target, proses akan dihentikan lebih awal. Proses ini terus diulang hingga mencapai jumlah generasi yang ditentukan atau hingga menemukan solusi optimal. Selama proses ini, nilai objektif terbaik dari setiap generasi dicatat untuk melihat perkembangan. Setelah proses selesai, kode menampilkan konfigurasi terbaik dari cube yang ditemukan, persentase kesempurnaannya terhadap target, dan grafik regresi perkembangan nilai objektif dari setiap generasi.

Deskripsi fungsi/kelas

fungsi/prosedur	Deskripsi
<code>select_parent</code>	Fungsi ini bertugas untuk mengambil 20 kandidat secara acak dari 2000 populasi awal, dan memilih satu <i>parent</i> terbaik dari kandidat untuk <i>crossover</i> . Parent yang terpilih adalah kandidat terbaik, yaitu individu dengan nilai objektif paling dekat dengan target
<code>crossover</code>	Fungsi ini bertugas untuk mengeksekusi persilangan antar parent, dan menghasilkan 2 anak baru dari proses tersebut. Di proses ini, segmen tertentu dari parent pertama digabungkan ke child pertama, dan segmen dari parent kedua ke <i>child</i> kedua, lalu sisanya dilengkapi dengan elemen-elemen dari parent yang lain tanpa duplikasi.
<code>fill_remaining</code>	Fungsi ini bertugas untuk mengisi bagian-bagian kosong dalam <i>child</i> dengan elemen-elemen dari <i>parent</i> yang lain, tanpa mengulangi elemen yang sudah ada.
<code>genetic_algorithm</code>	Fungsi utama ini mengimplementasikan seluruh proses algoritma genetika untuk menemukan <i>state</i> magic cube yang terbaik
<code>mutate</code>	Fungsi ini bertugas untuk memperkenalkan variasi pada konfigurasi <i>magic cube</i> dengan menukar posisi elemen-elemen di dalamnya. Ini bertujuan agar solusi tidak terjebak di <i>local optimum</i> , memungkinkan

	terbukanya ruang baru eksplorasi.
--	-----------------------------------

3. Hasil Eksperimen dan Analisis

Dari algoritma pencarian lokal yang telah dikerjakan, kami akan melakukan eksperimen dengan menjalankan algoritma sebanyak 3 kali

3.1 Steepest Ascent Hill-Climbing

Berikut adalah tiga kali percobaan pada algoritma *Steepest Ascent Hill-Climbing*.

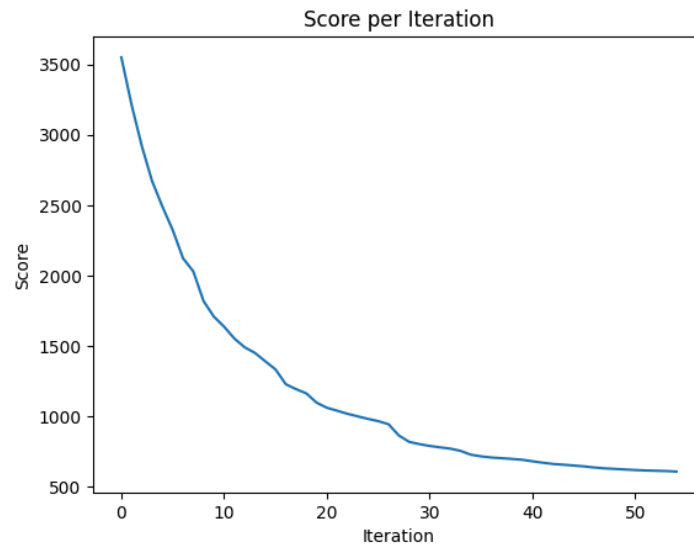
a. Percobaan pertama

Initial State of the Cube (Score: 4040)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
48 47 21 1 54	25 56 69 35 114	46 84 52 97 72	125 23 82 14 108	74 104 11 98 33
10 17 70 63 96	101 39 116 30 79	110 19 55 44 109	95 22 37 2 88	121 115 27 113 77
7 31 59 38 81	13 76 120 67 85	107 68 83 41 61	3 4 42 89 49	40 60 45 66 34
26 43 103 57 87	62 122 9 86 73	64 18 51 28 106	112 16 105 58 36	90 12 32 123 75
99 24 100 78 102	71 5 118 124 6	15 80 8 91 111	92 20 29 50 53	93 94 119 117 65

Final State of the Cube (Score: 610, Time: 25.74 seconds, Iteration: 55)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
48 70 17 114 59	25 116 54 21 1	56 95 97 109 72	125 115 82 14 108	23 104 11 2 33
13 47 30 52 96	62 69 101 35 79	19 46 55 39 44	84 22 42 98 88	121 74 60 113 77
10 110 63 38 81	31 76 120 85 73	107 68 105 51 61	112 4 41 89 49	40 66 32 27 34
26 43 103 57 87	7 118 28 86 67	71 83 37 6 111	3 16 80 58 36	90 45 123 119 75
99 5 124 78 100	64 24 122 102 9	18 20 8 91 106	94 15 29 117 53	93 92 12 50 65



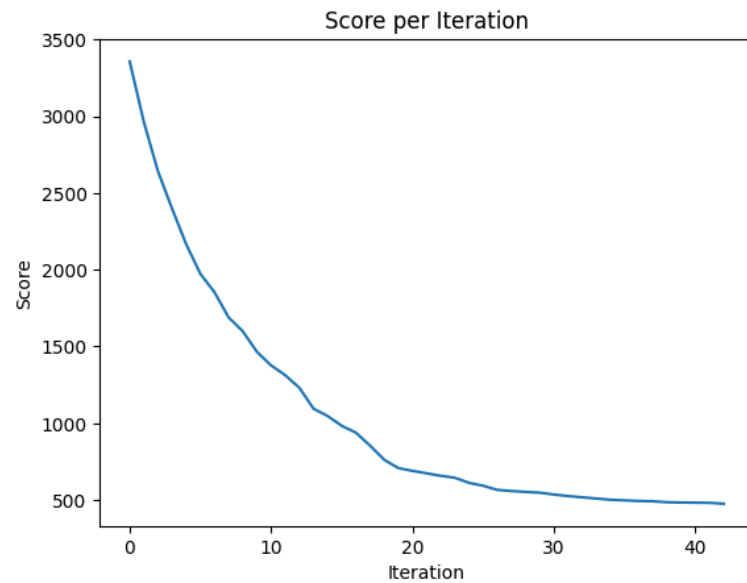
b. Percobaan kedua

Initial State of the Cube (Score: 4111)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
3 69 75 1 2	87 106 85 66 73	81 43 113 57 79	115 8 12 77 34	78 124 120 9 11
17 118 122 54 125	50 31 94 40 13	121 107 52 58 18	14 28 89 45 19	100 55 61 15 36
63 20 116 72 24	68 65 92 119 46	16 39 117 76 99	59 5 30 93 70	102 104 83 48 91
4 114 86 22 96	88 123 51 47 98	60 56 44 112 108	35 29 105 32 64	23 84 38 67 21
95 90 101 27 10	37 33 42 7 109	6 41 97 71 53	103 49 25 82 111	80 62 110 74 26

Final State of the Cube (Score: 476, Time: 20.05 seconds, Iteration: 43)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
17 65 75 1 54	87 106 85 66 73	81 43 113 57 79	115 12 28 11 34	78 89 120 9 77
3 118 122 2 125	50 69 94 45 13	121 107 52 76 19	16 8 124 117 18	102 55 61 15 36
63 20 72 101 24	68 31 22 119 46	88 14 44 58 99	84 29 5 93 91	100 104 83 48 70
4 114 90 98 96	37 123 7 40 116	56 60 47 32 64	59 105 25 112 111	23 35 38 67 21
95 86 27 92 10	41 33 42 53 109	6 39 97 71 51	80 49 30 110 108	103 62 74 82 26



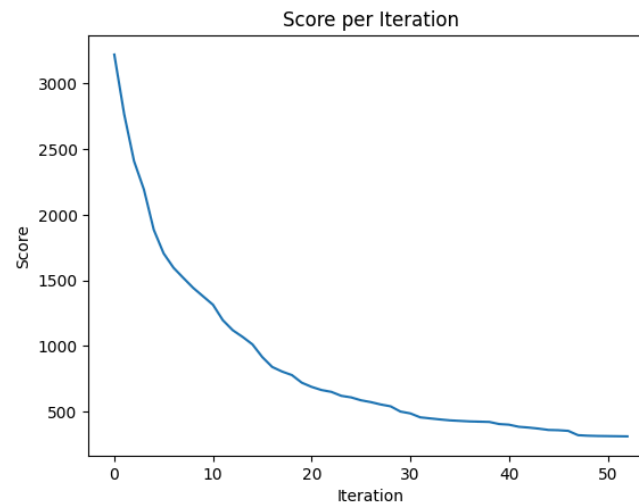
c. Percobaan ketiga

Initial State of the Cube (Score: 3818)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
82 77 106 102 118	5 79 73 49 99	112 90 88 10 34	104 35 19 3 9	26 113 60 89 20
16 115 124 117 83	57 4 68 72 53	42 93 18 59 91	61 29 14 119 100	110 69 28 121 81
95 41 48 39 63	56 65 85 122 38	111 21 7 43 54	105 8 51 1 17	58 94 123 47 87
84 13 27 40 98	12 114 78 109 103	24 15 92 120 80	2 86 44 125 75	50 96 45 74 25
22 52 71 76 32	30 33 36 70 66	64 23 6 107 116	97 55 31 62 11	67 37 108 46 101

Final State of the Cube (Score: 311, Time: 26.43 seconds, Iteration: 53)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
79 117 77 65 118	4 82 72 49 18	104 90 88 53 99	112 26 89 19 9	35 113 60 3 20
16 115 102 106 83	56 5 68 34 10	93 21 81 73 59	61 29 121 85 100	94 8 28 14 119
95 57 48 27 63	41 124 91 122 38	111 45 7 43 54	105 69 42 1 17	58 110 96 25 87
22 12 39 32 66	84 114 36 109 98	23 33 6 120 80	2 86 55 125 74	50 123 37 75 47
30 13 78 76 40	52 24 71 70 103	64 15 44 107 62	97 92 31 116 11	67 51 108 46 101



Setelah melakukan tiga kali eksperimen algoritma Steepest Ascent Hill-Climbing, beberapa analisis dapat dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dari algoritma ini. Hal pertama yang dapat dianalisa dari algoritma ini adalah seberapa dekat algoritma ini mendekati global optimum (skor *objective function* = 0). Didapat dari eksperimen, bahwa skor akhir yang didapatkan masih jauh dari global optimum. Hal ini disebabkan karena algoritma ini hanya mencari solusi hanya memilih solusi atau langkah terbaik dari solusi saat ini saja tanpa mempertimbangkan kemungkinan solusi yang lebih baik. Selain itu, kita ketahui juga bahwa algoritma ini sangat rentan terjebak pada lokal optimum saja.

Setelah itu, dapat dianalisis hasil akhir, durasi, dan iterasi pencarian dari tiap eksperimen. Berdasarkan hasil akhir, masih terdapat variasi hasil yang hasilnya juga tidak selalu konsisten. Variasi ini disebabkan karena proses pencarian dimulai dari kondisi yang berbeda-beda. Berdasarkan durasi proses pencarian, waktu pencariannya bervariasi antara 20 hingga 27 detik dimana tidak ada perbedaan yang terlalu lama. Iterasi proses juga bervariasi dari 40 hingga 55 iterasi. Dapat disimpulkan dari analisis tiga aspek tersebut bahwa algoritma ini sangat bergantung dengan *state* awal kubus dan banyaknya iterasi yang dilakukan. Iterasi yang lebih banyak memungkinkan algoritma ini mencapai solusi yang lebih baik, namun waktu eksekusi kemungkinan juga akan lebih lama.

Jika dibandingkan dengan algoritma pencarian lokal lain, algoritma Steepest Ascent Hill-Climbing memiliki durasi penyelesaian yang lebih cepat.

Tetapi jika dibandingkan dengan hasil akhir pencarian, algoritma ini memiliki solusi paling buruk. Hal ini disebabkan karena algoritma ini lebih memiliki kecenderungan terjebak di lokal optimum dibandingkan algoritma lain.

3.2 Simulated Annealing

Berikut adalah hasil dari tiga kali percobaan algoritma simulated annealing.

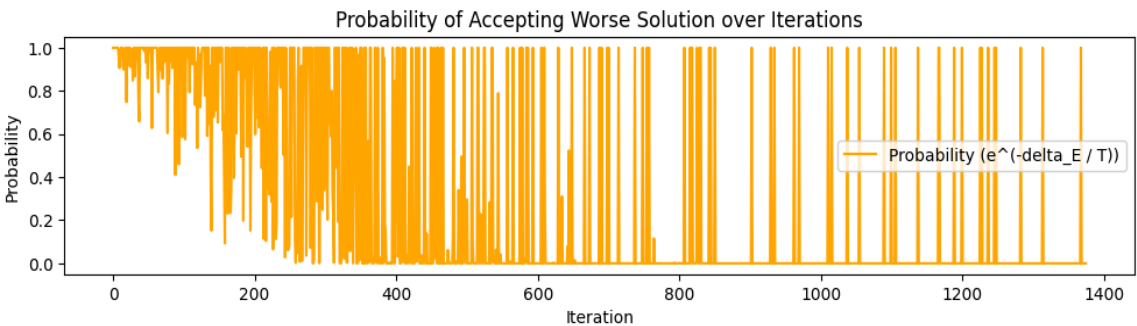
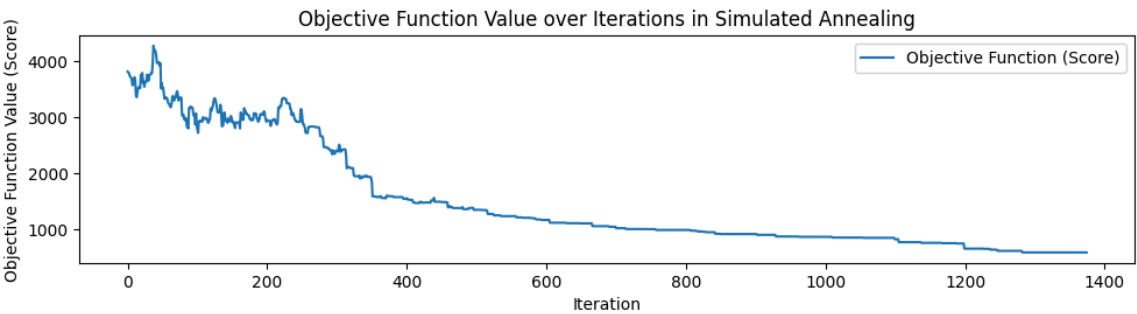
a. Percobaan pertama

Initial State of the Cube (Score: 3858)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
83 27 39 43 71	5 13 104 118 103	23 6 87 94 31	50 109 72 80 121	19 88 15 98 17
117 37 120 124 77	33 79 57 24 29	73 90 86 106 12	91 40 119 70 85	55 52 1 110 41
25 75 56 46 64	78 92 115 81 42	16 61 66 84 74	76 47 82 63 105	69 18 60 3 26
34 101 44 125 68	65 93 53 2 35	62 36 14 112 58	9 7 116 95 28	10 123 113 20 107
114 100 4 21 108	30 67 54 102 32	99 48 22 97 38	96 111 122 49 51	89 11 59 8 45

Final State of the Cube (Score: 578, Time: 8.49s, Total Stuck: 45)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
51 19 39 120 66	23 100 121 77 29	5 6 37 71 50	115 81 80 62 17	52 88 79 118 69
27 43 4 124 24	60 116 12 104 112	44 101 57 103 110	55 98 15 85 90	36 113 3 1 41
83 13 28 46 84	92 122 86 64 87	96 72 59 14 35	89 106 16 18 67	7 56 94 109 31
75 34 108 68 93	2 47 78 22 10	117 61 76 73 82	30 70 119 11 42	49 63 123 8 107
114 33 97 54 125	99 38 9 21 32	53 25 48 102 74	111 26 105 45 20	91 40 95 58 65



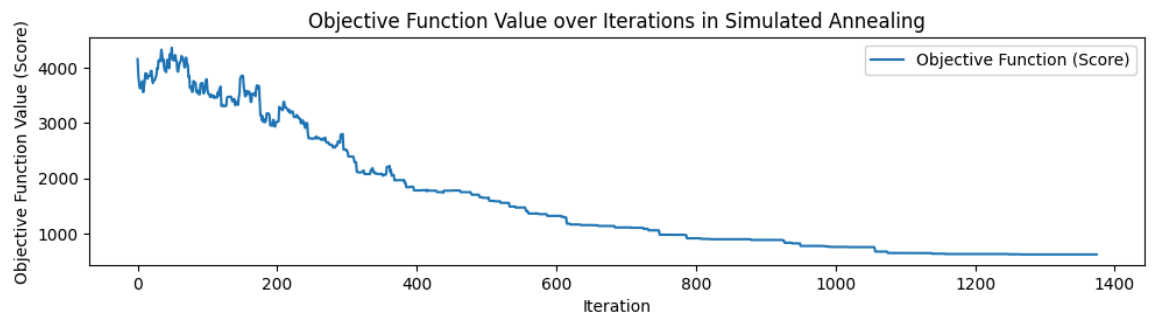
b. Percobaan kedua

Initial State of the Cube (Score: 4129)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
112 99 6 84 104	72 82 92 80 47	116 109 38 93 31	103 40 28 88 98	124 48 75 55 70
62 26 113 21 3	117 18 10 7 39	115 79 2 114 106	60 61 32 44 29	64 65 14 123 101
20 121 23 12 59	107 105 63 111 5	69 102 51 91 16	110 67 87 57 54	24 43 41 49 71
19 95 58 96 25	94 73 97 17 34	42 122 1 68 27	46 45 76 8 125	66 37 118 81 56
85 77 36 11 50	53 22 86 119 108	90 15 13 30 83	120 9 100 74 52	35 89 4 78 33

Final State of the Cube (Score: 620, Time: 8.67s, Total Stuck: 109)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
105 18 111 91 63	62 1 7 58 104	5 116 86 38 39	112 98 23 99 101	31 55 48 75 28
95 2 93 3 59	30 72 56 118 6	84 103 37 106 121	60 40 57 61 49	71 41 123 43 54
26 113 77 16 32	115 117 44 51 109	46 107 10 20 80	42 87 66 119 70	120 24 65 8 14
19 82 34 29 50	85 64 90 52 21	9 67 125 97 12	94 36 114 13 74	47 124 76 79 78
92 53 96 102 108	17 88 22 122 73	110 11 33 68 45	35 25 15 4 83	69 89 27 81 100



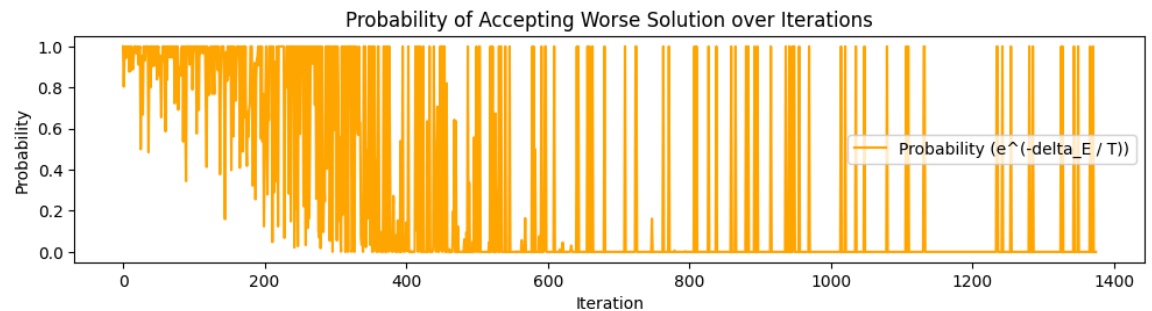
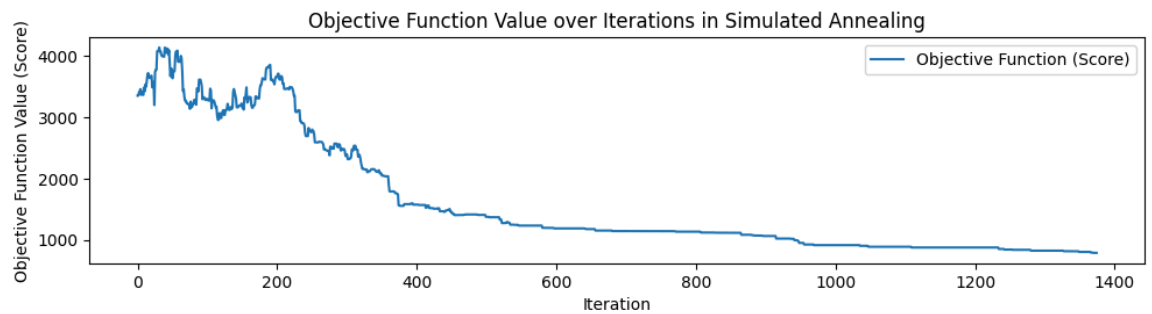
c. Percobaan ketiga

Initial State of the Cube (Score: 3430)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
88 77 103 9 123	112 91 109 7 85	61 19 57 62 38	99 63 79 73 10	30 95 40 72 4
66 35 18 93 92	2 24 11 15 86	71 37 12 105 74	48 67 53 51 76	90 81 111 52 47
6 41 125 49 117	32 42 29 70 118	34 26 69 102 104	28 3 50 87 31	110 82 13 43 96
75 44 120 121 21	55 100 115 8 16	23 58 27 116 113	20 60 83 114 94	108 25 17 59 68
97 89 45 64 22	80 124 46 5 84	14 65 119 101 122	56 78 36 1 54	33 98 107 106 39

Final State of the Cube (Score: 785, Time: 8.30s, Total Stuck: 103)

Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4	Layer 5
77 88 26 7 15	109 79 105 9 71	115 17 117 53 70	51 83 19 12 113	30 99 95 62 38
8 112 11 119 90	2 104 84 73 120	3 76 114 47 69	110 13 16 10 68	28 48 25 63 74
97 103 39 80 50	61 23 46 92 4	64 18 59 86 54	96 29 87 27 123	37 125 98 31 44
42 94 32 72 82	89 111 40 55 118	75 20 57 36 58	65 45 116 49 52	78 14 122 66 1
21 81 100 102 22	24 67 6 85 5	124 34 41 121 43	56 35 91 107 101	108 60 33 106 93



Setelah melakukan tiga kali percobaan dengan algoritma Simulated Annealing, beberapa analisis dapat dilakukan untuk mengevaluasi kinerja dari algoritma ini. Hal pertama yang dapat dianalisa adalah seberapa dekat algoritma ini mendekati global optimum (nilai *objective function* = 0). Dari hasil percobaan, kita dapat melihat nilai akhir yang didapatkan masih jauh dari global optimum. Hal ini bisa disebabkan salah satunya adalah karena ruang pencarian kurang banyak dan juga tidak jaranganya *stuck* di lokal optimum atau lokal optima.

Setelah itu, dapat dianalisis juga, nilai *objective function*, waktu, dan total *stuck* di lokal optima. Berdasarkan hasil akhir, nilai *objective function* masih sangat bervariasi paling sering berkisaran di 500-1000. Tetapi untuk waktu yang diperlukan algoritma dalam melakukan pencarian tidak terlalu lama walau dengan iterasi yang sangat banyak, yaitu berkisaran antara 8-10 detik. Pada visualisasi yang kedua, yaitu probabilitas menerima solusi yang lebih buruk untuk setiap iterasi dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin banyak iterasinya atau semakin suhu awal mendekati sama dengan 0, maka algoritma akan lebih jarang untuk mencoba kemungkinan nilai *objective function* baru yang lebih besar (menjauhi 0) dari pada nilai *objective function* lama yang lebih bagus. Hal ini bisa disebabkan karena salah satunya adalah karena fungsi perhitungan nilai *objective function* tidak memberikan cukup variasi nilai, hal ini bisa menyebabkan hasil perhitungan $e^{\frac{\Delta E}{T}}$ sering bernilai 0, sehingga ini juga bisa menyebabkan penerimaan hasil solusi yang lebih buruk tetap tinggi.

3.3 Algoritma Genetic

Sesuai dengan spesifikasi yang diminta sebelumnya, saya membuat percobaan dengan 2 parameter yang dapat diubah yaitu jumlah populasi dan banyak iterasi. Berikut ini adalah variasinya:

- Banyak iterasi: 3, 15, dan 125.
- Jumlah populasi: 50, 500, 2000

Dari variasi ini, dihasilkan sebanyak 6 konfigurasi dengan total sebanyak 18 percobaan yang terdiri atas:

1. Jumlah populasi kontrol, banyak iterasi 3 (3 kali)
2. Jumlah populasi kontrol, banyak iterasi 15 (3 kali)
3. Jumlah populasi kontrol, banyak iterasi 125 (3 kali)
4. Banyak iterasi kontrol, jumlah populasi 50 (3 kali)
5. Banyak iterasi kontrol, jumlah populasi 500 (3 kali)
6. Banyak iterasi kontrol, jumlah populasi 2000 (3 kali)

Untuk informasi tambahan, jumlah populasi kontrol yang saya gunakan adalah 1000 populasi, dan banyak iterasi kontrol yang saya gunakan adalah 50 kali.

1. Jumlah populasi kontrol (1000), banyak iterasi 3 (3 kali)

1.1. Percobaan pertama

1.1.1. State awal

```
State kubus awal:
[[[ 19 95 44 30 109]
  [ 88 46 90 45 55]
  [ 97 83 49 114 25]
  [108 113 37 111 78]
  [ 70 6 35 102 59]]]

[[ 8 85 79 118 82]
 [ 18 52 33 96 101]
 [123 117 32 69 120]
 [110 93 105 47 16]
 [ 94 60 84 72 40]]]

[[ 10 38 48 67 107]
 [ 5 41 124 71 51]
 [ 1 63 66 12 22]
 [ 76 20 50 23 77]
 [ 7 62 31 3 122]]]

[[ 65 98 21 73 106]
 [ 2 29 36 91 99]
 [ 75 74 81 64 58]
 [ 43 61 68 42 28]
 [ 24 34 87 27 112]]]

[[104 119 9 125 26]
 [ 80 53 11 15 54]
 [121 17 115 89 56]
 [ 86 57 103 4 14]
 [ 13 92 39 100 116]]]
```

1.1.2. State akhir

```
State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 8 49 65 56 80]
  [ 26 89 13 50 67]
  [101 19 59 100 27]
  [ 68 84 81 20 52]
  [120 87 73 25 51]]]

[[ 99 123 31 28 36]
 [108 58 9 64 98]
 [ 30 4 109 97 94]
 [ 71 79 43 3 7]
 [ 21 60 124 91 16]]]

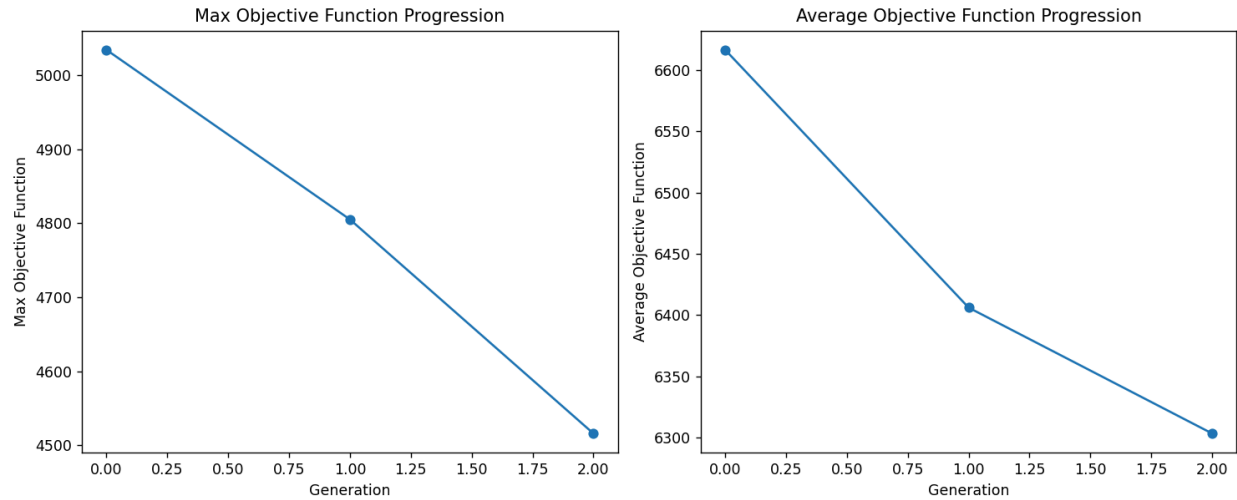
[[ 57 75 46 122 61]
 [106 55 62 39 37]
 [ 86 17 121 76 70]
 [ 29 114 116 66 6]
 [104 12 44 95 107]]]

[[ 33 125 14 111 93]
 [ 10 77 92 24 35]
 [115 23 45 5 117]
 [ 74 48 11 72 96]
 [118 85 103 38 82]]]

[[ 41 54 69 119 18]
 [ 34 105 90 2 63]
 [102 40 1 110 83]
 [113 42 47 88 22]
 [ 15 112 78 32 53]]]
```

1.1.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 4516.0

1.1.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



1.1.5. Durasi proses pencarian = 5.85 detik

1.2. Percobaan kedua

1.2.1. State awal

```
State kubus awal:
[[[ 21  38 125  86  41]
  [113  68  74  56 123]
  [  7  82  90  24  69]
  [ 85 121  43  60  49]
  [ 12  9 119  46  95]]

 [[ 64  20 103  13  48]
  [ 87  57  42  70  59]
  [ 73  83  79  75  36]
  [ 71  84 118  32  14]
  [ 93  31 106  62  25]]

 [[ 37 124  66 111  77]
  [120  78  44  33  53]
  [ 10  8 104  19  92]
  [ 52  3  11  45  6]
  [  4  58  15 117 107]]

 [[ 39  34  96 110  28]
  [ 40  47 112  1  89]
  [ 18  99 100 102 115]
  [105  76  65  61  91]
  [109  27  72  50  80]]

 [[ 97  35  26  30  67]
  [108 122  2  5  22]
  [ 81  98  29 116  51]
  [ 55  23  54  88  63]
  [101 114  16  17  94]]]
```

1.2.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[105 72 76 98 97]
  [119 108 38 8 66]
  [ 16 42 104 24 107]
  [ 22 85 49 15 47]
  [ 48 110 50 125 10]]

 [[ 37 55 63 26 112]
  [ 62 64 91 23 11]
  [101 111 18 41 56]
  [ 33 9 57 40 89]
  [ 13 124 54 94 86]]

 [[ 73 12 87 80 58]
  [ 7 21 79 20 123]
  [ 96 95 71 60 6]
  [ 90 113 5 75 65]
  [ 46 81 109 92 45]]

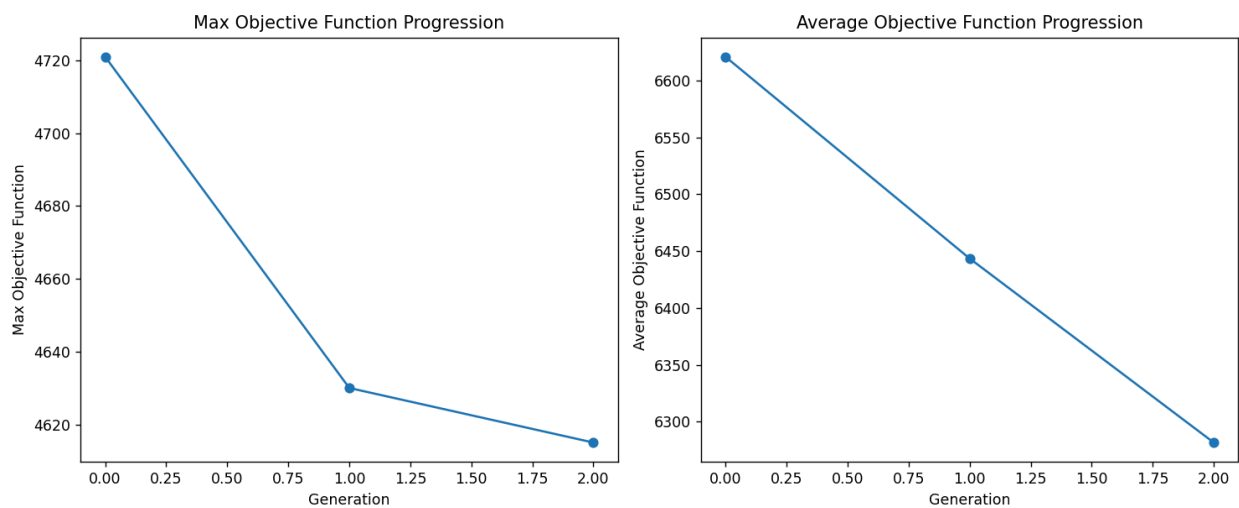
 [[ 32 88 106 30 67]
  [ 74 43 25 82 116]
  [ 84 70 115 28 52]
  [ 53 51 19 99 120]
  [ 3 2 102 93 31]]

 [[114 39 103 69 100]
  [ 59 34 117 27 29]
  [ 35 121 4 122 17]
  [ 68 77 78 14 118]
  [ 36 61 1 44 83]]]

```

1.2.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 4615.0

1.2.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



1.2.5. Durasi proses pencarian = 5.96 detik

1.3. Percobaan ketiga

1.3.1. State awal

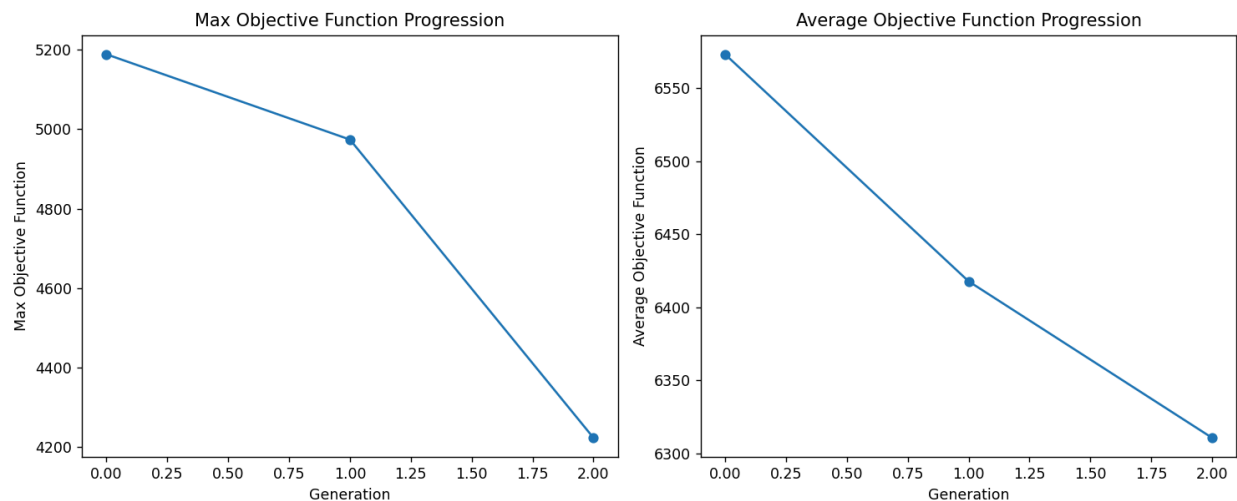
```
State kubus awal:  
[[ [ 61 122 108 34 29]  
  [123 109 19 51 35]  
  [ 65 86 110 56 20]  
  [ 62 102 87 95 21]  
  [ 89 72 52 71 63]]  
  
[[ [ 70 67 92 53 7]  
  [ 76 66 85 28 94]  
  [ 3 1 74 113 9]  
  [ 79 104 54 90 50]  
  [120 68 8 119 125]]  
  
[[ [ 23 39 32 124 2]  
  [ 11 42 107 22 33]  
  [ 15 78 101 105 96]  
  [118 45 46 16 27]  
  [ 81 114 93 5 73]]  
  
[[ [ 38 43 36 75 97]  
  [ 69 106 57 82 31]  
  [ 59 115 10 83 49]  
  [ 6 4 48 58 37]  
  [ 88 111 121 30 91]]  
  
[[ [ 80 117 47 64 84]  
  [100 116 55 40 14]  
  [ 18 12 103 41 60]  
  [ 77 25 44 26 24]  
  [ 13 98 99 112 17]]]
```

1.3.2. State akhir

```
State Kubus akhir (terbaik):  
[[[ 28  90 118  23 121]  
  [ 71  53  47  20 110]  
  [ 97   4  51  78  40]  
  [ 38  83   9 102  33]  
  [ 55   3  63  88  41]]  
  
  [[107  54  70  17  46]  
   [ 35  16  84  65  37]  
   [ 58  73  31 109   2]  
   [ 22  57 113  25  80]  
   [111  36   6  43 124]]  
  
  [[ 75 123  39  42 105]  
   [ 30 119  64 112  12]  
   [ 98  67  19  79  66]  
   [ 50   8 117  99  89]  
   [100  68  44 108  24]]  
  
  [[ 26 125  92 104  52]  
   [ 93 115  27  49   1]  
   [ 86  10  96  13  60]  
   [101  48  62  32  69]  
   [ 77   5  74  76 114]]  
  
  [[ 14  61  72 103  45]  
   [ 21 120 116  56  29]  
   [ 85  59  82   7  95]  
   [ 87  34  11  91  81]  
   [106  18  15 122  94]]]
```

1.3.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 4222.0

1.3.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



1.3.5. Durasi proses pencarian = 5.89 detik

2. Jumlah populasi kontrol, banyak iterasi 15 (3 kali)

2.1. Percobaan pertama

2.1.1. State awal

```
State kubus awal:
[[[ 71 119 118 14 27]
  [ 73 111 98 10 102]
  [ 23 96 77 91 64]
  [ 79 123 94 19 44]
  [108 35 69 113 7]]]

[[ 76 30 3 107 50]
 [ 72 70 85 13 74]
 [112 86 75 12 24]
 [110 99 104 36 68]
 [ 25 83 16 121 22]]]

[[115 11 61 15 95]
 [ 56 45 29 97 82]
 [ 90 49 105 62 114]
 [ 6 42 65 120 84]
 [ 39 37 89 9 117]]]

[[ 8 33 31 81 54]
 [103 93 116 5 38]
 [ 34 88 48 60 20]
 [ 51 87 67 59 32]
 [ 92 2 53 26 63]]]

[[125 122 55 41 28]
 [109 18 66 58 4]
 [ 40 57 52 80 124]
 [101 106 100 17 47]
 [ 43 46 21 1 78]]]
```

2.1.2. State akhir


```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 42  33  23  37 102]
  [109  68  91  25  14]
  [ 61  97  18  81 124]
  [  7  98  85  72  32]
  [ 66   5  80 121  35]]

  [[123  31 114  71  15]
  [ 49  78  44  57   1]
  [ 20  62  99  12 106]
  [ 51  54  70 100  55]
  [ 96  79  46   8 113]]

  [[ 63  11  30  84 107]
  [ 39  40 116  22  94]
  [122  13  65  34  16]
  [ 90  92  77 110 125]
  [ 26 117   3  87  24]]

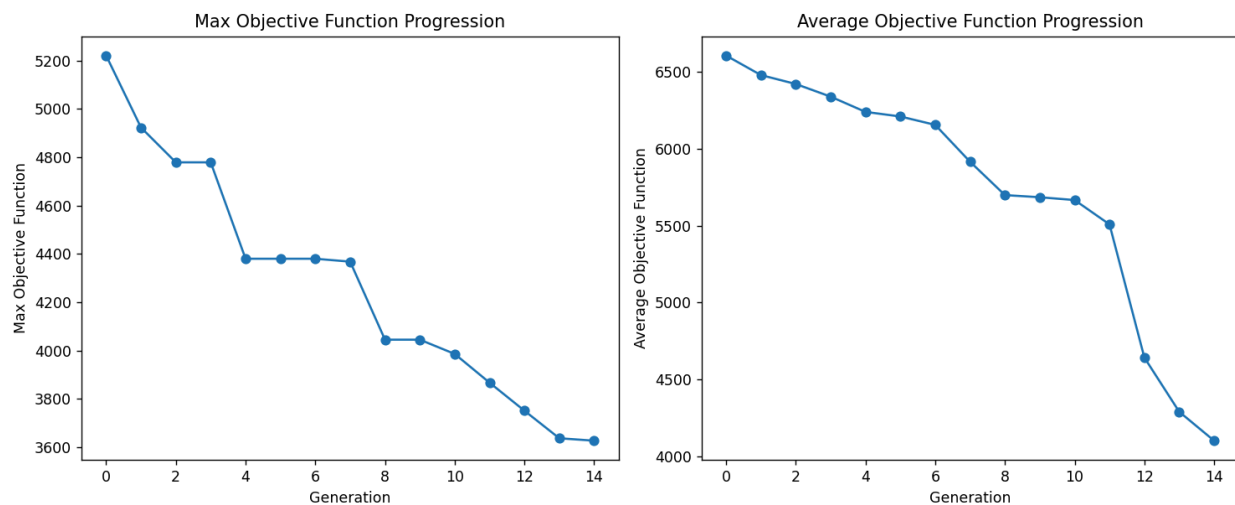
  [[ 50  56  73  93  74]
  [ 29  43  53  19 104]
  [108  41 120  58  21]
  [ 10  64  59 111 119]
  [ 89 118   2  95  36]]

  [[ 83 105   6   4 101]
  [ 75  17 115  28  82]
  [ 67  27  48 103  47]
  [ 76 112  45  69  38]
  [  9  52  86  88  60]]]

```

2.1.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 3627.0

2.1.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



2.1.5. Durasi proses pencarian = 17.85 detik

2.2. Percobaan kedua

2.2.1. State awal

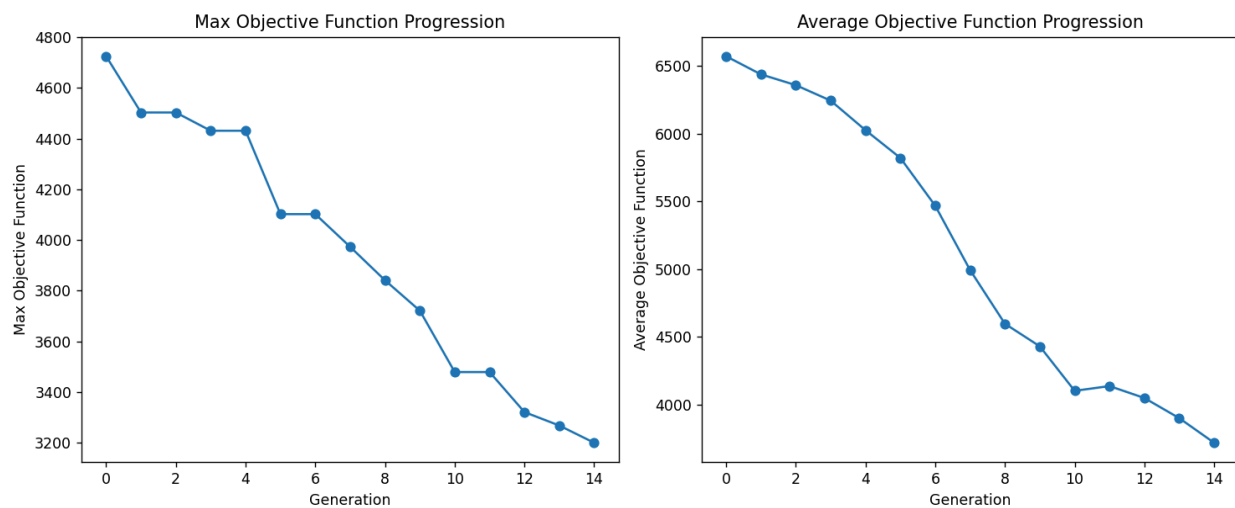
```
State kubus awal:  
[[[ 15  18   6 106  26]  
  [ 36  42  14 117   8]  
  [ 75  19  11  10  22]  
  [ 20 124  90 125  37]  
  [ 84 118  62  44  91]]  
  
[[ 87  25  29  81 113]  
 [ 78  80  74  96  12]  
[107 120 119  70 121]  
 [ 65  82  64  46  32]  
 [ 51  43 123  99 115]]  
  
[[ 57  39  67 112  95]  
 [ 53   1   5  88  61]  
 [ 71 103  76  72  93]  
 [ 92 114  41  24  77]  
[110  30 101  60  50]]  
  
[[109  31  79  59  54]  
 [104  47 116  48 105]  
[100  83  35  21   9]  
 [ 86  94  23  49  98]  
 [ 33  17   3  34  40]]  
  
[[102  38  45   4  52]  
 [ 27  66  89 111  73]  
 [ 56  16  68 108   7]  
 [ 13  58  28  69  97]  
 [ 55  63   2  85 122]]]
```

2.2.2. State akhir

```
State Kubus akhir (terbaik):  
[[[ 84  58  55  79  53]  
  [ 27  63  91 106  38]  
  [ 94  44  13  36  65]  
  [  5  64 121  34 100]  
  [105  75  18  69 109]]  
  
[[[ 62 102  31  52  43]  
  [ 15  76  66 104 118]  
  [ 56  9  72 114  30]  
  [ 60  51  99  2  78]  
  [ 95 117  49  32  37]]  
  
[[[ 89  7  28 113  82]  
  [108  48  39  67  33]  
  [ 17  46  93  90  24]  
  [ 71  80  29  1 101]  
  [ 22  81 122  41  83]]  
  
[[[ 20  96  11  74  85]  
  [ 98  23 124  40  3]  
  [ 86 103  97  25  12]  
  [116  87  16  59 125]  
  [  8  70  73 123  61]]  
  
[[[ 88  42  4 112  21]  
  [115  92  10  54 120]  
  [ 26  57  77  14  45]  
  [ 47 110  50  19 119]  
  [ 68  35 111 107  6]]]
```

2.2.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 3200.0

2.2.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



2.2.5. Durasi proses pencarian = 17.70 detik

2.3. Percobaan ketiga

2.3.1. State awal

```
State kubus awal:
[[[ 99  45  52  70  65]
  [ 33  38  48  68  42]
  [110  81  23 107  79]
  [ 71  80  26  78  73]
  [ 64   1   8  11  41]]

 [[ 32 112 108 113 125]
  [100  88  47  55  29]
  [ 59   2  92  94  98]
  [ 57  95  83   6  14]
  [  5 123  89  12 120]]

 [[ 91  58 104 115  25]
  [ 44  76  69  17  86]
  [ 27  46  85  97  77]
  [119  90  28   7  19]
  [ 54 106  20  22 102]]

 [[ 74  82  36  30  53]
  [ 49 111 124  67  16]
  [109  62  61 122  93]
  [116  34 101   4   3]
  [ 51  39  96 117  50]]

 [[ 15   9 114  56  13]
  [ 72  84  66  21  75]
  [ 24  37  87 121  18]
  [ 35 103 105  31  43]
  [ 40  60  10  63 118]]]
```

2.3.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 51 109 37 94 7]
  [117 55 125 1 33]
  [ 4 76 79 92 74]
  [ 38 68 65 35 96]
  [111 44 28 84 98]]

 [[ 24 42 119 100 22]
  [118 85 27 62 18]
  [ 66 108 83 25 3]
  [ 6 31 103 71 124]
  [ 73 11 39 43 120]]

 [[ 30 64 115 14 105]
  [ 29 90 40 116 20]
  [ 70 41 88 59 72]
  [ 32 15 123 80 57]
  [113 82 9 8 46]]

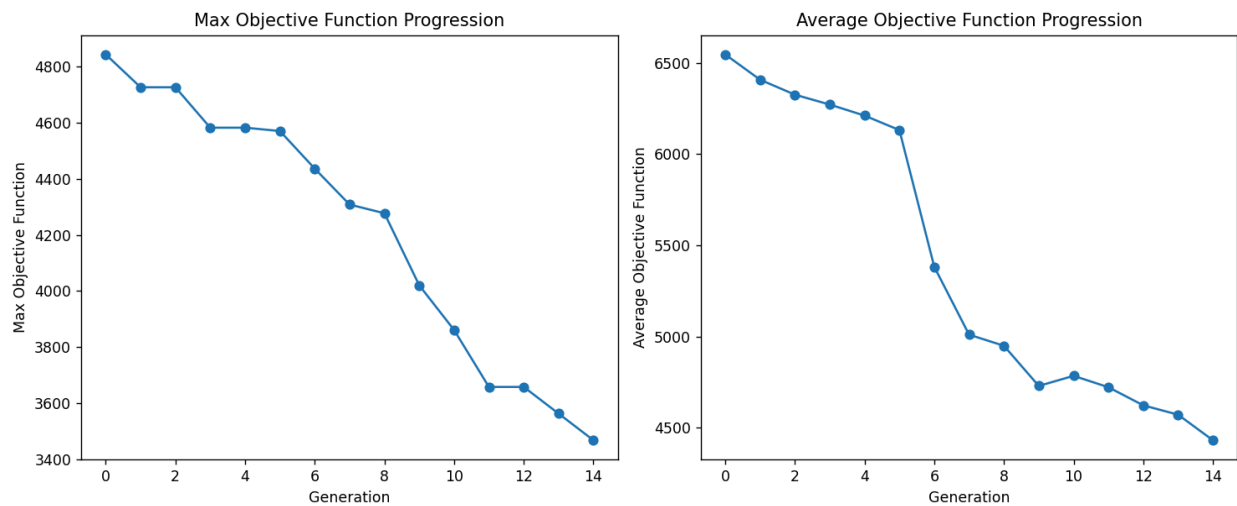
 [[ 81 63 23 78 121]
  [102 93 19 17 56]
  [ 95 112 114 75 77]
  [ 48 50 60 69 110]
  [ 2 16 106 58 5]]

 [[ 34 107 26 87 12]
  [ 36 99 52 97 61]
  [ 13 49 89 47 104]
  [122 67 101 10 53]
  [ 91 54 45 21 86]]]

```

2.3.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 3468.0

2.3.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



2.3.5. Durasi proses pencarian = 41.05 detik

3. Jumlah populasi kontrol, banyak iterasi 125 (3 kali)

3.1. Percobaan pertama

3.1.1. State awal

```
State kubus awal:  
[[[ 24 20 39 61 54]  
[ 5 51 50 71 103]  
[ 60 22 116 85 87]  
[ 64 117 83 97 19]  
[ 88 32 99 114 43]]  
  
[[102 66 59 119 90]  
[ 68 11 17 107 13]  
[ 30 55 9 42 48]  
[ 58 36 81 84 25]  
[109 101 113 72 69]]  
  
[[ 98 7 76 104 118]  
[108 124 120 23 15]  
[ 3 62 75 86 79]  
[ 1 110 123 44 38]  
[ 34 27 70 92 35]]  
  
[[ 2 63 29 115 121]  
[ 93 40 73 45 28]  
[111 53 6 96 12]  
[ 77 14 16 125 95]  
[ 82 46 57 18 21]]  
  
[[ 10 65 49 94 41]  
[ 26 89 122 56 31]  
[ 37 100 80 105 106]  
[ 47 8 112 67 74]  
[ 33 78 4 91 52]]]
```

3.1.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 4 115 98 10 89]
  [ 28 47 104 18 83]
  [ 96 30 67 99 16]
  [ 85 34 42 118 45]
  [103 86 7 61 81]]

[[ 43 119 6 26 111]
 [108 65 48 35 20]
 [ 58 49 41 125 59]
 [ 22 73 123 76 37]
 [ 82 9 97 53 84]]

[[ 17 116 24 102 68]
 [ 87 79 93 60 1]
 [ 80 72 52 64 50]
 [ 23 27 122 51 78]
 [105 21 25 39 117]]

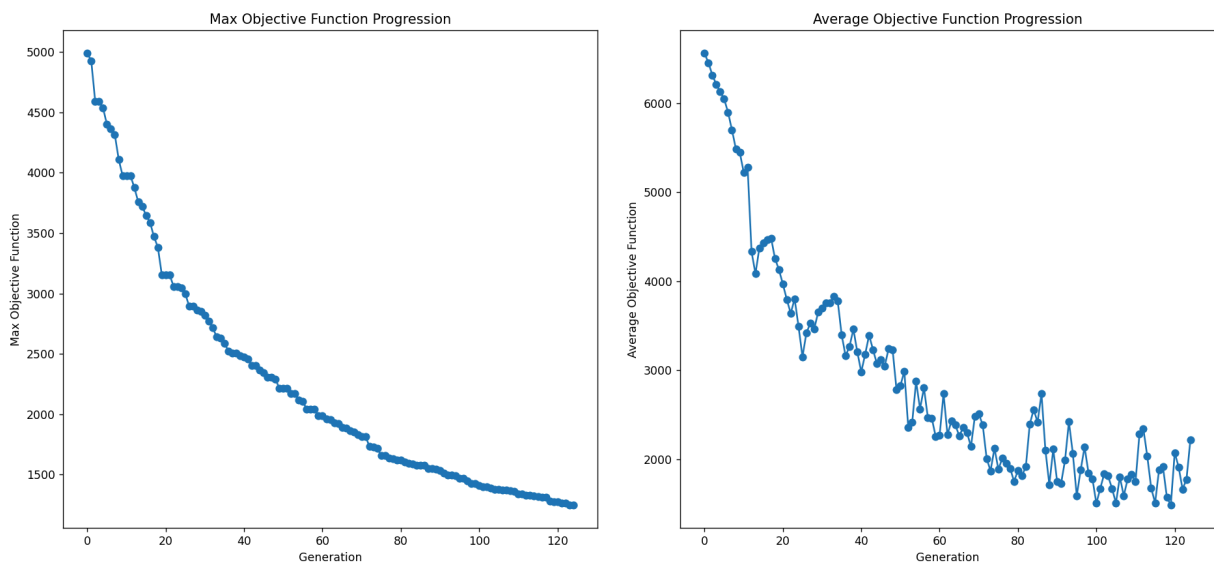
[[ 40 101 19 95 54]
 [ 90 8 113 38 66]
 [ 56 77 62 92 33]
 [ 5 36 106 91 55]
 [121 94 15 2 107]]

[[ 69 71 12 75 46]
 [ 70 14 44 74 110]
 [ 63 112 100 29 11]
 [ 31 120 109 13 32]
 [ 88 3 57 124 114]]]

```

3.1.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 1246.0

3.1.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



3.1.5. Durasi proses pencarian = 311.33 detik

3.2. Percobaan kedua

3.2.1. State awal

```
State kubus awal:  
[[[ 54 121 51 91 84]  
  [ 66 6 74 37 104]  
  [110 11 64 98 20]  
  [ 97 85 44 31 119]  
  [ 10 34 92 113 88]]  
  
[[ 35 86 27 7 79]  
 [ 58 46 118 108 61]  
 [ 55 125 73 75 59]  
 [ 2 9 3 52 120]  
 [ 95 87 1 71 23]]  
  
[[ 29 13 57 24 89]  
 [ 60 62 72 81 18]  
 [ 41 8 33 14 22]  
 [123 83 30 12 99]  
 [ 4 15 78 48 93]]  
  
[[ 63 32 116 49 90]  
 [ 45 50 47 106 36]  
 [ 26 96 105 107 43]  
 [ 42 100 16 112 103]  
 [ 65 117 69 76 115]]  
  
[[ 40 21 94 82 102]  
 [ 77 56 111 124 19]  
 [ 39 80 53 70 68]  
 [ 67 101 28 109 5]  
 [ 38 114 122 17 25]]]
```

3.2.2. State akhir


```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 78  68  84  45  71]
  [  1  72 121  7 124]
  [112  15  6  91  28]
  [ 14  61  97 109  38]
  [106 102  5  64  52]]

[[ 58 101  34  25 110]
 [122  18  98  39  42]
 [  3  35 107 100  26]
 [ 94  59  66  36  43]
 [ 37  95  10 117  96]]

[[ 65  2  56 118  75]
 [ 53  87 108  12  79]
 [ 27  62  88  32 105]
 [ 83 123  51  33  19]
 [ 86  46  11 120  40]]

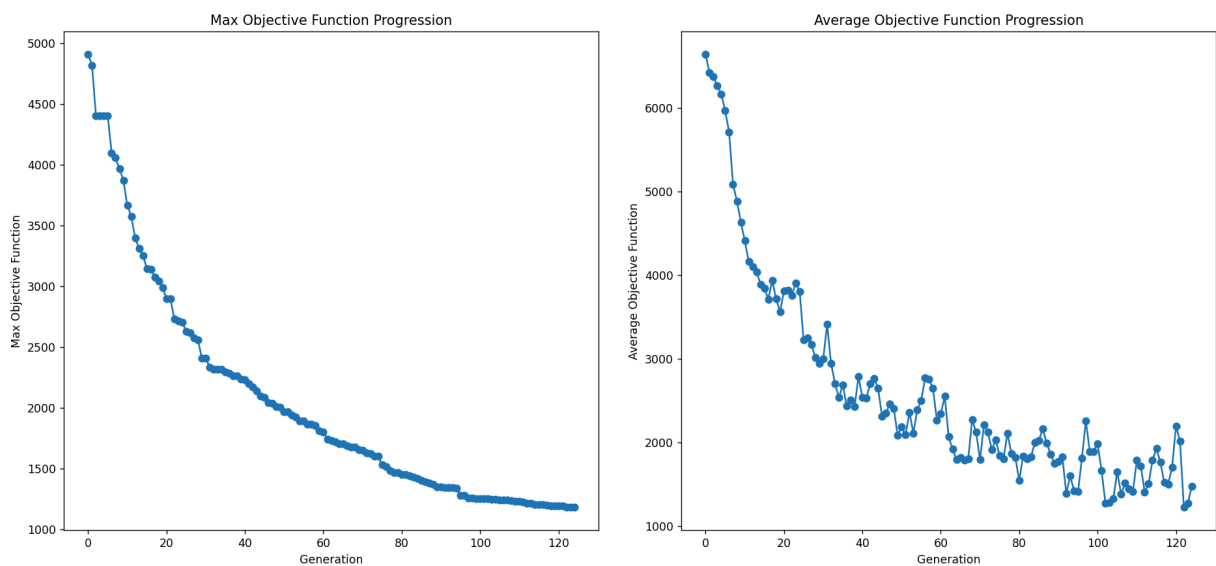
[[125  47  82  77  31]
 [ 13  23  89  80 111]
 [ 29  85  30  70  99]
 [ 81  92  4  74  22]
 [ 69  76 104  16  49]]

[[116  21  63 103  8]
 [ 48  17  60  55 114]
 [ 54 113 115  44  9]
 [ 57  93  24  20 119]
 [ 41  73  50  90  67]]]

```

3.2.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 1183.0

3.2.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



3.2.5. Durasi proses pencarian = 315.92 detik

3.3. Percobaan ketiga

3.3.1. State awal

```
State kubus awal:
[[ [ 35  23 123  70 105]
   [ 14  86 107 124  44]
   [103  21  60  10  66]
   [  3 119  34  68  55]
   [ 62 113  73   5 102]]

[[ [ 19  30  92  49  58]
   [ 94  98 100 122 104]
   [ 95   1  97  69  20]
   [ 59  72   8   2  54]
   [ 84  91  43  52  39]]

[[ [ 75  76  36 106  96]
   [ 31 121  61  64  89]
   [ 87  40  85  38 110]
   [ 50 114  82  67 109]
   [ 80   6  37  77  12]]

[[ [ 45  79  28 111  65]
   [ 57  32 108  17  88]
   [ 27  33 118 112  51]
   [ 71  29 120  47  63]
   [101  24  48  15  16]]

[[ [115  93  41 116  99]
   [ 74  42  78 125   4]
   [ 11  81  46   9  83]
   [ 26  90  18  56 117]
   [ 22  13   7  53  25]]]
```

3.3.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 59  97  78   1  42]
  [ 96  70  53  54  43]
  [ 46   8  77  99 111]
  [ 32 105  63  47  68]
  [ 82  40  30 113  52]]

 [[ 80  90  26  15  95]
  [ 75   6 110  23 101]
  [ 91  10  81  56  76]
  [ 14  84  86 118  12]
  [ 55 124   4 104  31]]

 [[ 17  65  64 107  58]
  [ 72  57  98   5  87]
 [108   3 103  33  69]
  [ 92 117  21  48  37]
  [ 28  74  25 125  67]]

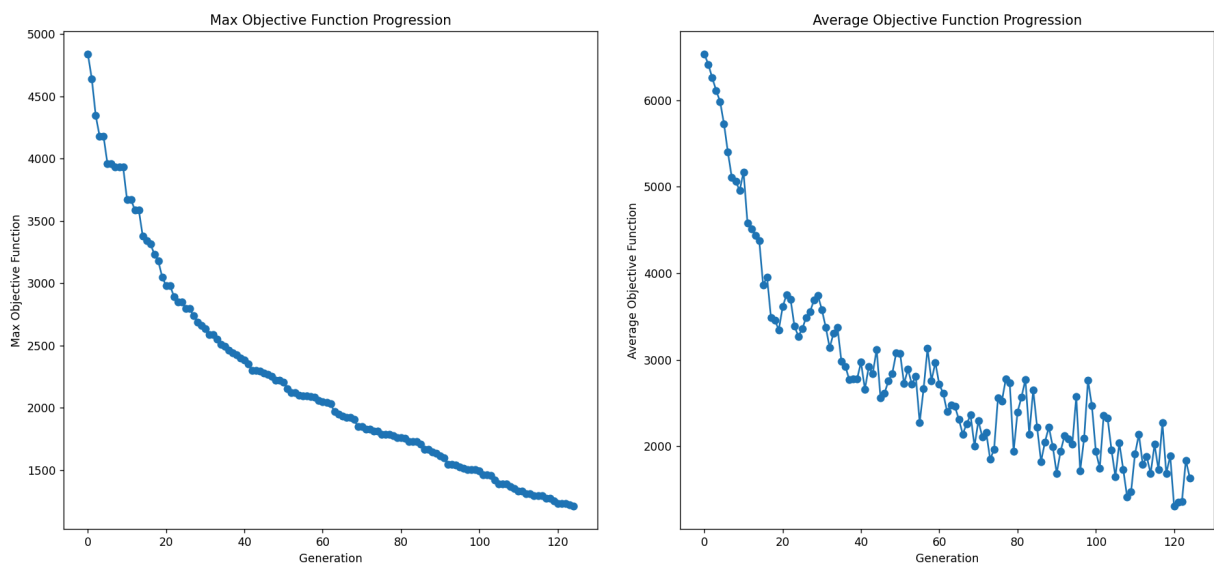
 [[119 109  11  49  44]
  [ 60   2  85  24 123]
  [ 34  88  50 106   7]
  [ 19  89  45 102  83]
  [ 79  27 120  38  62]]

 [[ 73 100  66  29  51]
 [115  61   9  22 121]
  [ 36  18 114 112  35]
  [ 16  41 116  39  93]
  [ 71  94  13 122  20]]]

```

3.3.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 1209.0

3.3.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



3.3.5. Durasi proses pencarian = 190.61 detik

4. Banyak iterasi kontrol (50), jumlah populasi 50 (3 kali)

4.1. Percobaan pertama

4.1.1. State awal

```
State kubus awal:  
[[[ 50  57  43  31  79]  
  [  8  16  85  25  6]  
  [ 55 119  58 106  35]  
  [ 80 118  65  10 110]  
  [112  95  56  83  41]]  
  
[[104  53 123  59  48]  
 [ 73 103  61  96  26]  
 [ 21  7  74  11  71]  
 [  3 120  5  70  27]  
 [ 12  75  1 122  34]]  
  
[[115  28  23  67  18]  
 [107  32  14 114  24]  
 [ 77  29  94  66  19]  
 [113  40 117  37  2]  
 [ 38 109  82  86  49]]  
  
[[ 17 105  42  47 111]  
 [ 13 108  91  22  78]  
 [ 97  68 101  84  92]  
 [ 54  36  60  45  64]  
 [ 72  15  51 116  9]]  
  
[[ 63  89  30  44 102]  
 [ 33 125  20  99  87]  
 [ 39 100  81  98  93]  
 [  4  76 124 121  88]  
 [ 62  90  69  52  46]]]
```

4.1.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 15  27  55 125  87]
  [ 52  90  51   4  23]
  [   5  24  94  95  63]
  [119 117  67  45  32]
  [109  56  20  35 113]]

 [[ 83  84 118  99 107]
  [104  89  14   8  75]
  [ 86  22  64  97  71]
  [   6  44  33  78  12]
  [ 39  47  92  36  81]]

 [[ 19  38  40  60 101]
  [   2 106 100  18  73]
  [ 93  65  91  88  58]
  [102  46 124 111  25]
  [ 69  68  10  16 122]]

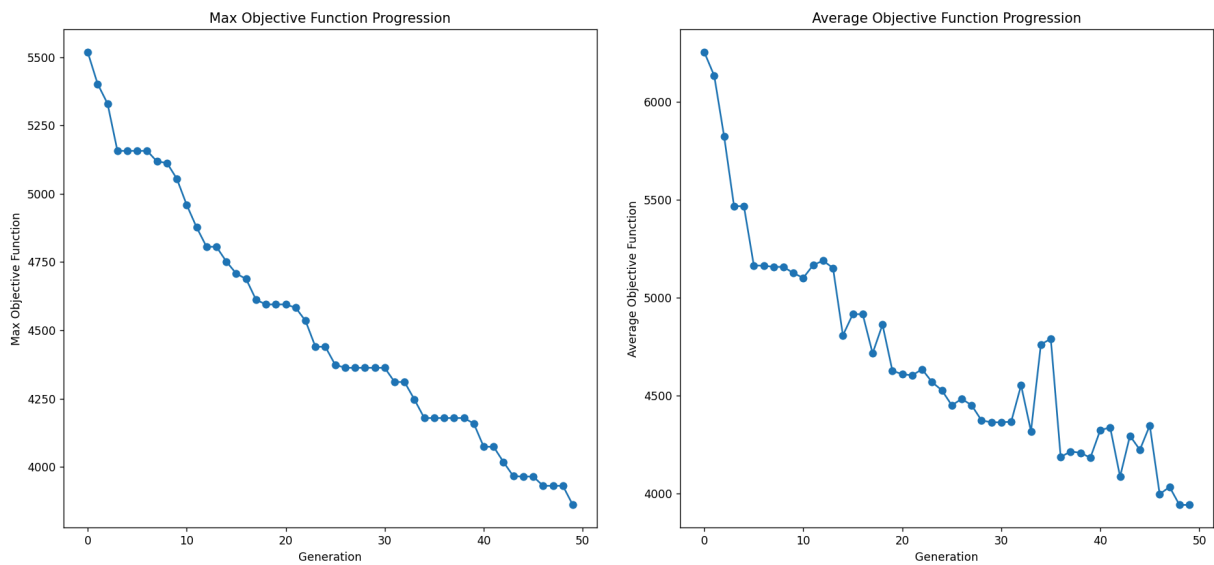
 [[120  98  77  31  49]
  [ 96  42  70  50  72]
  [ 30  76  11 108 110]
  [114  41 112  61  13]
  [   7  54  37 103  66]]

 [[ 29 121  26  59  74]
  [115  82   1  34  28]
  [ 21  17 123 116  80]
  [ 62  57  43  48   9]
  [ 85   3  79  53 105]]]

```

4.1.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 3861.0

4.1.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



4.1.5. Durasi proses pencarian = 5.23 detik

4.2. Percobaan kedua

4.2.1. State awal

```
State kubus awal:  
[[[ 65  45   4  68  63]  
  [ 89 100  80  75  90]  
  [125  48 122  46  55]  
  [ 98  34  78  56  67]  
  [ 77  51   1 119  23]]  
  
[[103  84  81   2 121]  
 [110  32  97  94 117]  
 [ 44 102  64  70  13]  
 [ 52  92 124  27   9]  
 [ 35  87  88  86  43]]  
  
[[ 49  39  83 111  59]  
 [120  69 104  30  24]  
 [ 37  50  61  36  76]  
 [ 25  66  11 116  19]  
 [ 54 109 112  82  15]]  
  
[[ 62   8  79  85  58]  
 [101  47  71  74  72]  
 [115 108  20 105 107]  
 [ 31 123  14  41  12]  
 [  3  22   6  96  10]]  
  
[[ 53 113  28  60  42]  
 [106  91 118  16  73]  
 [  5  57  33  29  95]  
 [ 18  26  99  38  17]  
 [114   7  21  93  40]]]
```

4.2.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 69 122  50 105  3]
  [ 19 114  38  72  39]
  [124  14  40  4 110]
  [ 55  8  76 103  83]
  [ 84  96 106  16  73]]

  [[ 95  1 113  93  7]
   [ 21 100  90  78  56]
   [ 51  27  86  37 108]
   [ 52  46  12  59  79]
   [ 61  97  31  58  42]]

  [[116  47 118  98  11]
   [107  36  17  75  18]
   [ 13  92  57  6 120]
   [ 33  74  91  5  49]
   [ 29  43  28 109 111]]

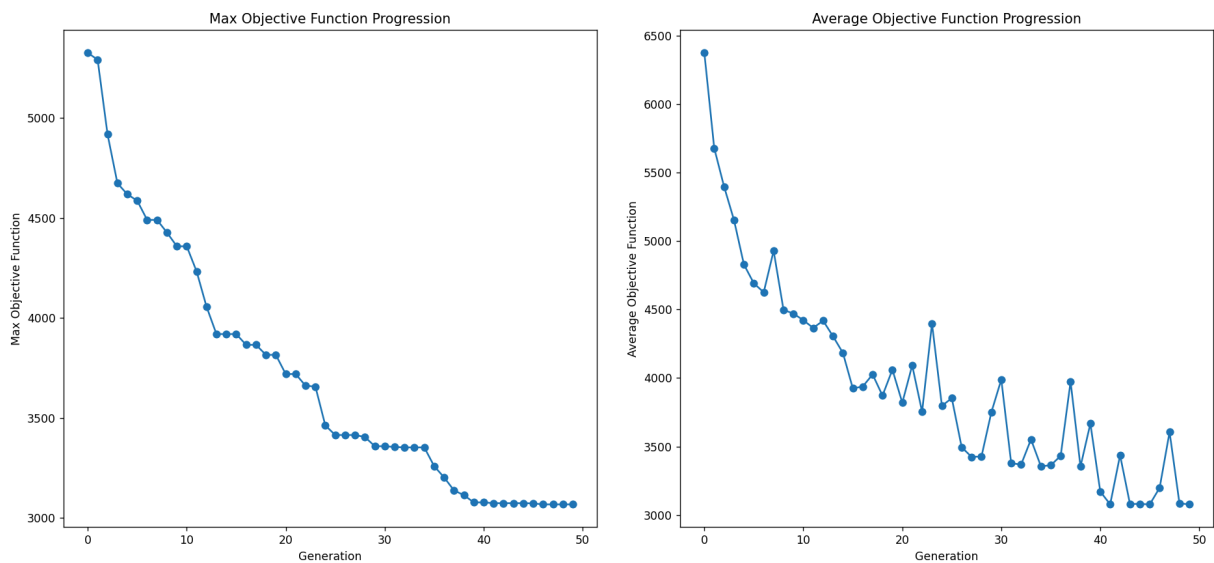
  [[ 9  81 101  66  67]
   [115  45  71  89  10]
   [ 99  60  54  26  64]
   [112 102  94  15  48]
   [ 25  24  2 119 123]]

  [[ 53  63  80  70  35]
   [121  65  23  68  82]
   [ 20  77 104  44  88]
   [ 34  22  62 125  87]
   [ 85  41  32 117  30]]]

```

4.2.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 3068.0

4.2.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



4.2.5. Durasi proses pencarian = 5.36 detik

4.3. Percobaan ketiga

4.3.1. State awal

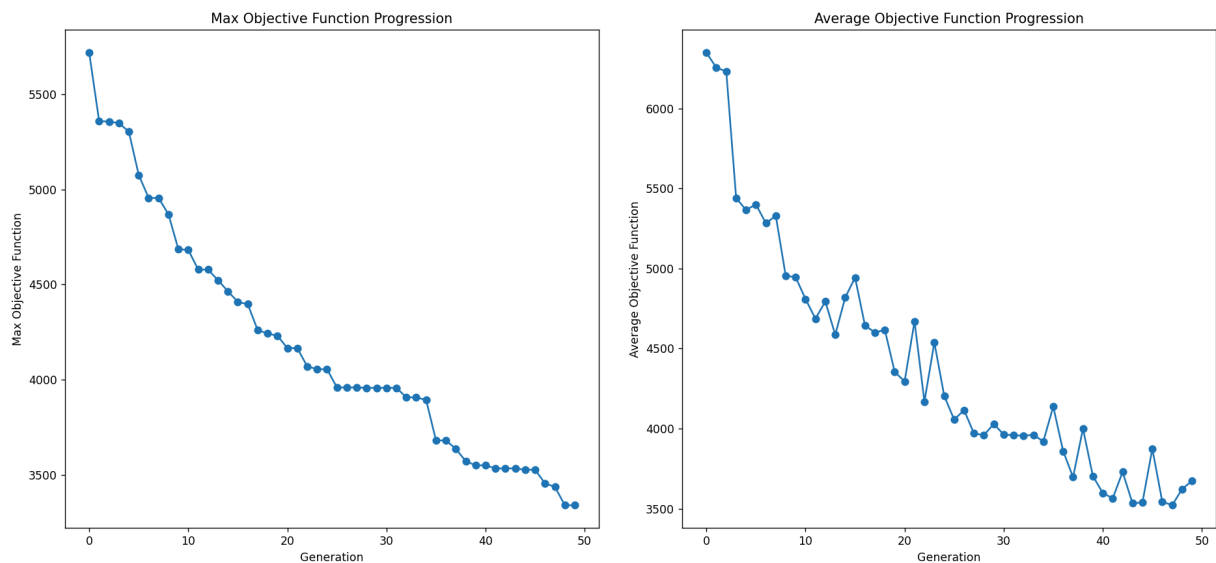
```
State kubus awal:  
[[[ 34  8 92 29 78]  
  [106 109 18 108 112]  
  [ 98 21 28 102 36]  
  [ 99 13 94 119 43]  
  [ 39 41 82  2 15]]  
  
[[ 91 51 47 45 70]  
 [120 76 74 85 59]  
 [  4  7 38 68 107]  
 [115  9 65 101 69]  
 [122 83 54 84 22]]  
  
[[123 104 114 96 89]  
 [ 86  1 46 10 67]  
 [ 55 118 105 63 77]  
 [100 17 81 50 117]  
 [  3 121 72 95 103]]  
  
[[ 31 57 73 71 30]  
 [ 24 111 23 116 66]  
 [ 52 80 42 40 87]  
 [110 33 12 11 58]  
 [113 93 32 37 26]]  
  
[[ 88 60 97 125 14]  
 [  5 19 25 56 61]  
 [ 20 64 35 48 44]  
 [ 53 16 27 90 124]  
 [  6 75 62 79 49]]]
```


4.3.2. State akhir

```
State Kubus akhir (terbaik):  
[[[ 95  44  10 105  84]  
  [ 34  67  22  45 106]  
  [ 11 120  99 101  77]  
  [122  54   2  25  33]  
  [ 75  24 112  37  12]]  
  
[[ 74  13 115  41  55]  
 [109  52  85  29 107]  
 [ 58 117  48   6  43]  
 [ 46  86  27 104  61]  
 [ 36  91  40 111  42]]  
  
[[ 87  72   5  96  82]  
 [121  62  79   1  47]  
 [ 20  94 113  35  81]  
 [ 38  68  17 118  31]  
 [ 53  59 100  93  18]]  
  
[[ 16  90  71 125  26]  
 [ 50  15 123 110  65]  
 [ 70  98  76  32  28]  
 [ 92  49  69  51  64]  
 [108  57   3  89 102]]  
  
[[ 88  80  56   9  97]  
 [114  19   7 103  14]  
 [ 30  83 124  21  66]  
 [ 63  60   8  73 116]  
 [ 39  23 119  78   4]]]
```

4.3.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 3339.0

4.3.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



4.3.5. Durasi proses pencarian = 6.11 detik

5. Banyak iterasi kontrol (50), jumlah populasi 500 (3 kali)

5.1. Percobaan pertama

5.1.1. State awal

State kubus awal:

```
[[[105 123 58 20 61]
  [ 84 16 96 71 79]
  [ 2 9 37 95 81]
  [ 24 111 35 120 64]
  [ 54 78 118 41 1]]]
```

```
[[ 27 4 70 26 115]
 [ 47 51 48 11 100]
 [ 77 36 34 15 108]
 [ 39 82 75 63 66]
 [ 12 80 53 102 28]]]
```

```
[[101 94 19 14 49]
 [ 22 121 89 67 124]
 [ 87 30 68 72 69]
 [ 76 110 62 29 13]
 [ 99 40 107 104 109]]]
```

```
[[ 93 88 83 38 52]
 [ 92 119 25 10 8]
 [125 3 91 106 43]
 [ 42 45 50 122 59]
 [ 33 98 46 17 57]]]
```

```
[[ 60 56 97 65 85]
 [ 32 117 6 113 73]
 [ 18 116 103 7 44]
 [ 90 112 74 23 31]
 [ 86 5 21 55 114]]]
```

5.1.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 27  43 123 110   9]
  [100  54  14  39 120]
  [ 46  61 119  17  73]
  [ 94  86  23  69  18]
  [ 47  76  11  91 104]]

  [[ 81  49  28  40  85]
  [ 34  64  63  77  31]
  [ 67 109  10  96  57]
  [ 99  66 117   7  20]
  [ 51  32  82  89 115]]

  [[ 80  84 102  35  26]
  [ 50  52  22 121  78]
  [ 88  15  70 124  24]
  [ 95  90  45  19  98]
  [ 13  93  83   3  68]]

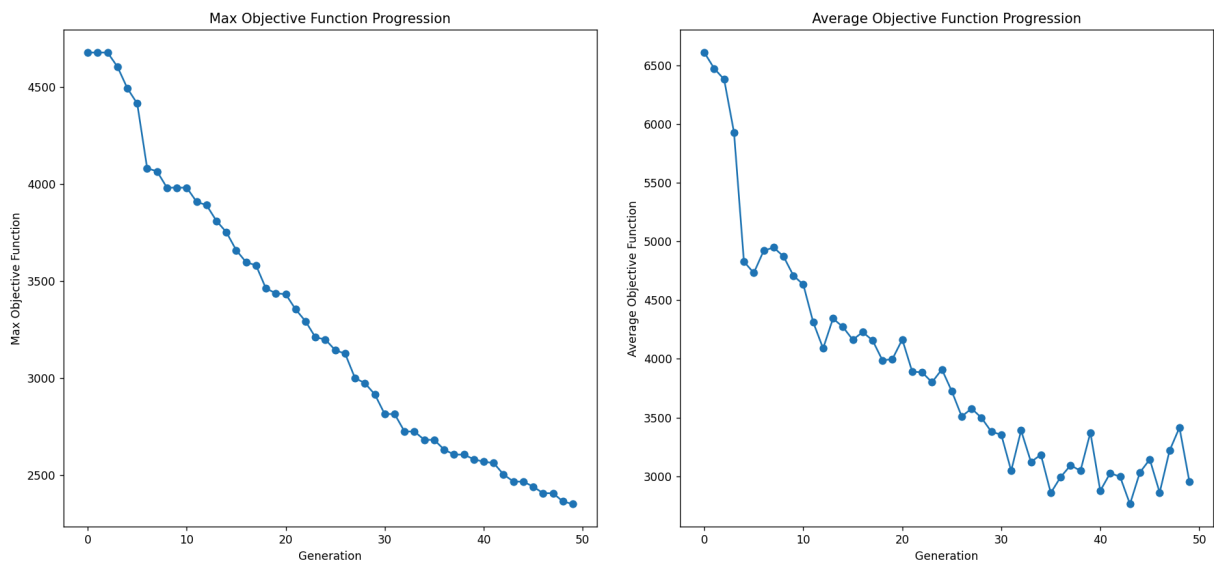
  [[ 74 125  12  62  55]
  [ 30  21 114  48  36]
  [101  65  79 105  58]
  [  1 113  38  53 107]
  [122   4  71  41  60]]

  [[ 37 111  72  42  56]
  [ 92  33 108  59 112]
  [ 25  29 103  97   5]
  [116  75   6 106   8]
  [ 44  87  16   2 118]]]

```

5.1.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 2351.0

5.1.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



5.1.5. Durasi proses pencarian = 26.91 detik

5.2. Percobaan kedua

5.2.1. State awal

```
State kubus awal:
[[[ 56  62 102  84  18]
  [ 80  82  40  57  51]
  [ 85  48  31 108  87]
  [115  54  71  88  99]
  [ 23  47   9  95  97]]

 [[120  69  35  36  68]
  [ 79  83  12  29   6]
  [ 32  59  64  98  25]
  [111  93  94  89   1]
  [  4  50  27  53 117]]

 [[ 73  77  66  58 107]
  [ 10   2 112 122  86]
  [ 45  37 113  28  52]
  [106  14  33 116  26]
  [109   8  55  41  96]]

 [[ 24  92  91  39   5]
  [ 60 110 114   3 104]
  [ 78  49  13  21  61]
  [ 17  19 123  34 103]
  [ 76 121 124 101  30]]

 [[ 44  46  70  20  90]
  [100  42 125 119  22]
  [ 15  74  65  63  72]
  [ 75  43   7  38 118]
  [ 81 105  16  67  11]]]
```

5.2.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[ 62  67 120  23  49]
 [ 42 114  13 122  55]
 [108  53  41  37  83]
 [ 26  24 105  28  97]
 [ 78  60  16 107  44]]

```

```

[[ 18 113  59  89  40]
 [102  72  2  99  17]
 [117  1  27  98  61]
 [ 33 100 124  4  84]
 [ 46  48 116  77 123]]

```

```

[[ 70  86  15 112  20]
 [ 10  45  68 121  91]
 [ 66  63  51  35  38]
 [ 36  65 118  32  80]
 [125  54  52  25  96]]

```

```

[[ 57  82  11 110  58]
 [ 88 115  9  79  71]
 [ 81  21  75  64  69]
 [ 39  34 111  29 106]
 [ 47  50 119  30  12]]

```

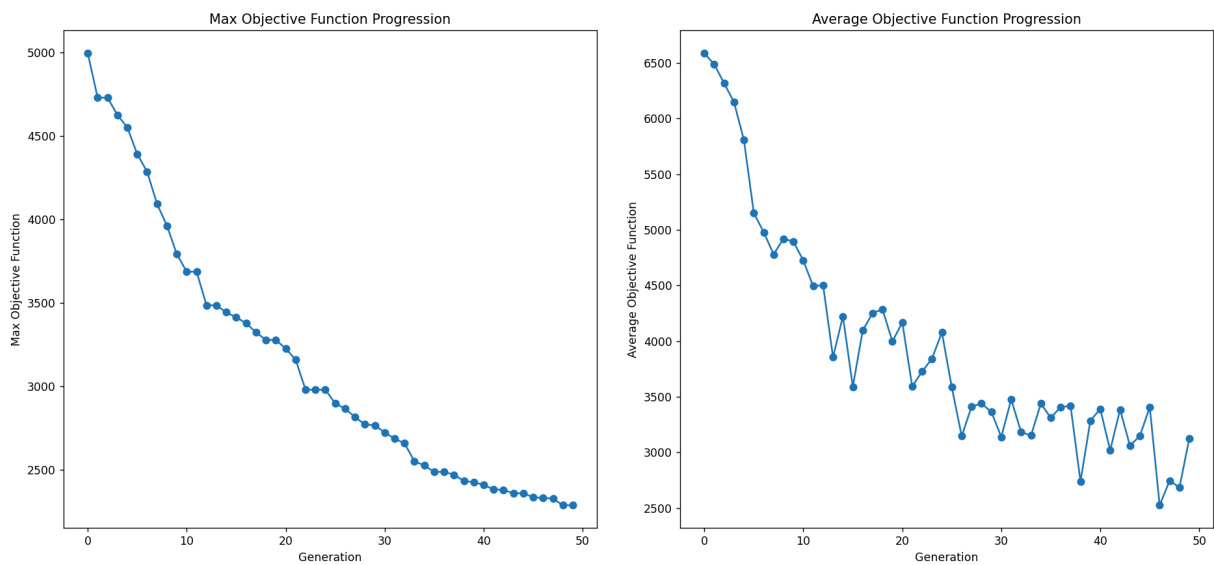
```

[[ 56  6 104  93  3]
 [ 22  85  31 103  43]
 [ 94  14  90  8  87]
 [ 19 109  5 101  73]
 [ 74  92  76  7  95]]

```

5.2.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 2288.0

5.2.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



5.2.5. Durasi proses pencarian = 27.22 detik

5.3. Percobaan ketiga

5.3.1. State awal

```
State kubus awal:
[[[ 51  52  39  47  55]
  [ 95 114  90 102  44]
  [124  25  26  68   7]
  [105  96  98  34  57]
  [ 29 104  16   1 116]]

 [[ 87 113  83  28  20]
  [ 40  70  76  11  72]
  [119  31  64  30  46]
  [ 61  74  62  56 106]
  [ 93   6 123 117  59]]

 [[100  23   8  97  41]
  [ 53  65  35  45  73]
  [  5  67  14  75  54]
  [ 13  38  27  43  60]
  [ 79  66  12 125  33]]

 [[ 88  15 115   9  71]
  [107  81  18  69  21]
  [ 10 110 120  80 112]
  [  3  32  99  77  92]
  [122 111 121   4 109]]

 [[ 36  58  50  37 101]
  [ 78  91  63  42 103]
  [ 24  48  19  22  89]
  [ 85  82   2  86  49]
  [ 84  17  94 108 118]]]
```

5.3.2. State akhir

State Kubus akhir (terbaik):

```
[[[ 18  11 122  49 106]
  [ 20 112   4  96  60]
  [109  84   2  30  41]
  [ 79   6 102 110  43]
  [ 90 115  73  27  99]]

 [[100  12  19  68 120]
  [ 17  85  59  83  51]
  [ 54  65 124  48  38]
  [105  33   9 104  61]
  [ 34 114  98  29  40]]

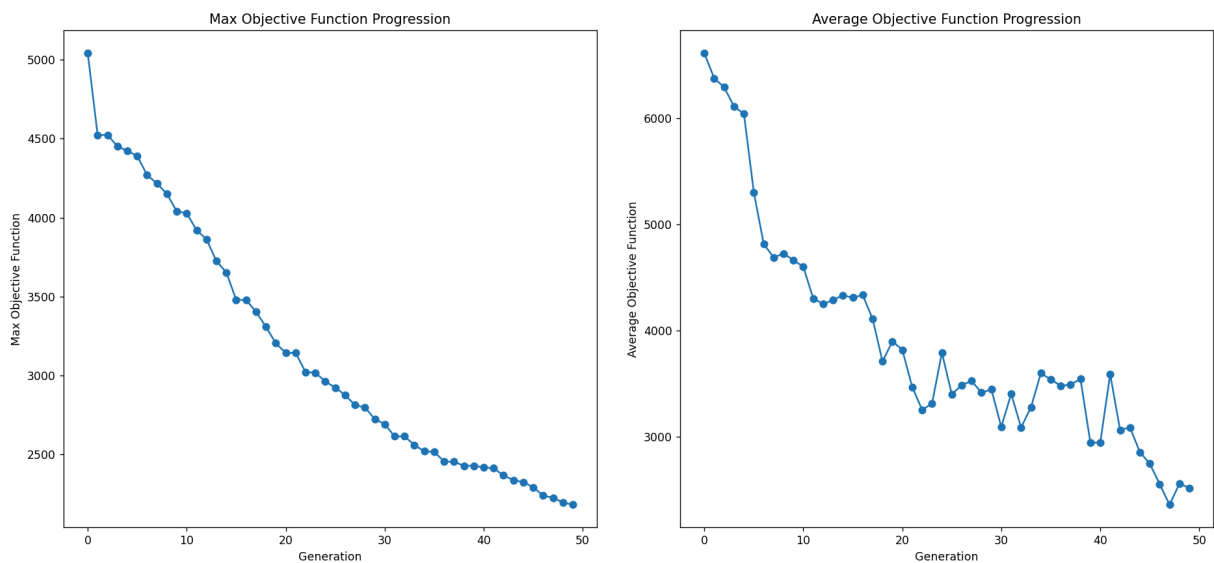
 [[ 56   7 101  88  74]
  [ 80  31 116  58  28]
  [ 64 108  25  63  44]
  [ 92 125  16  26  45]
  [ 24  42  53  71 117]]

 [[  3  35 111  69  91]
  [ 76  72 113  21   8]
  [ 95  89  32  50  66]
  [ 97  23  22 119  82]
  [ 52  93  36  55  67]]

 [[ 14  70  81 107  78]
  [  1 121  47   5  62]
  [118  37  39  15 123]
  [ 86  10  94 103  46]
  [ 77  87  57  75  13]]]
```

5.3.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 2182.0

5.3.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



5.3.5. Durasi proses pencarian = 27.12 detik

6. Banyak iterasi kontrol (50), jumlah populasi 2000 (3 kali)

6.1. Percobaan pertama

6.1.1. State awal

State kubus awal:

```
[[[ 68 12 85 6 125]
 [111 120 89 97 112]
 [ 9 115 102 19 70]
 [ 25 40 124 86 84]
 [106 58 77 122 43]]]
```

```
[[ 98 114 27 46 95]
 [ 2 30 105 59 109]
 [ 78 63 61 119 93]
 [ 10 29 108 103 104]
 [ 71 26 35 60 54]]]
```

```
[[ 14 62 28 18 57]
 [ 15 47 90 31 49]
 [ 94 32 4 96 121]
 [113 55 13 66 36]
 [ 56 101 100 42 22]]]
```

```
[[ 44 24 41 1 3]
 [ 45 53 87 69 39]
 [ 23 20 99 64 21]
 [110 73 107 82 75]
 [ 67 11 7 50 72]]]
```

```
[[ 38 33 76 16 51]
 [ 80 116 74 88 65]
 [118 117 123 52 48]
 [ 91 5 17 8 83]
 [ 81 34 79 92 37]]]
```

6.1.2. State akhir


```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[104  18  72  67  53]
  [ 46 124  26 102  17]
  [ 65   1  33  90 120]
  [ 93 101  89  41  49]
  [ 29  70  98  15  60]]

 [[111  11  95  42  94]
  [  6  55  97  88  35]
  [ 66  87  75  19  68]
  [ 83  24  21  64 114]
  [ 40 125  28 109   3]]

 [[122  34  54  61  69]
  [  7  32  37  80 103]
  [113  73  74  48  27]
  [ 44 105 115  78   2]
  [ 30  76  36  45 107]]

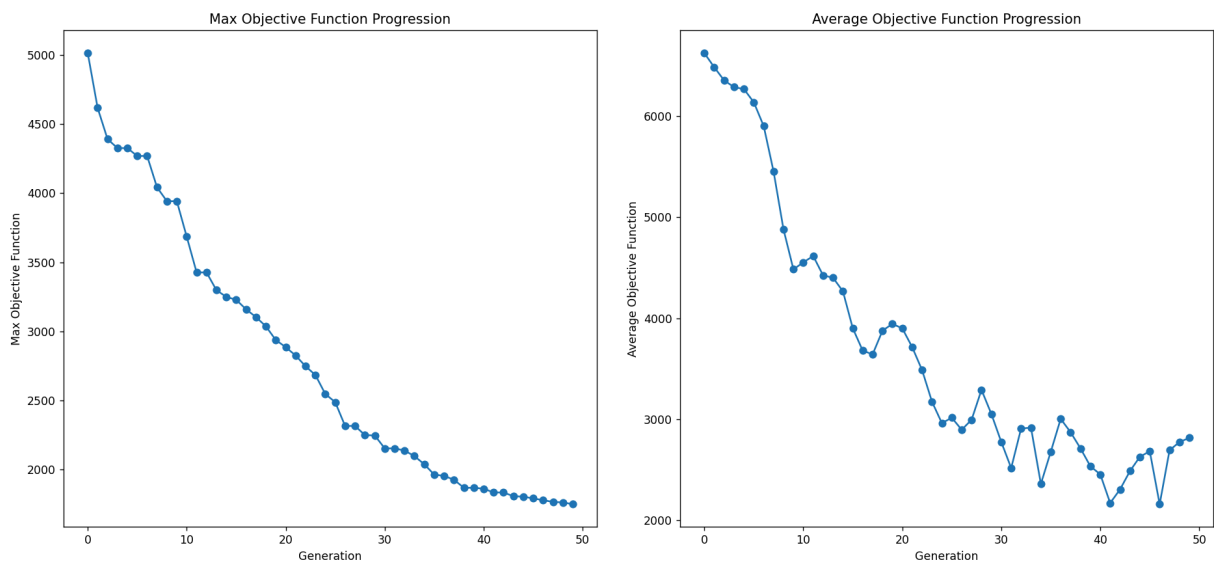
 [[119  14   4  63 108]
  [ 86 121  20  77  22]
  [ 96  43  59  82  50]
  [ 12  56 118   9 117]
  [  5  85 116 100   8]]

 [[ 25  47  62 110  81]
  [ 84  23  92  16  71]
  [ 58  57 106  91  10]
  [112  79  39  38  51]
  [ 31 123  13  52  99]]]

```

6.1.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 1751.0

6.1.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



6.1.5. Durasi proses pencarian = 100.78 detik

6.2. Percobaan kedua

6.2.1. State awal

```
State kubus awal:  
[[[116 25 99 12 42]  
  [ 90 30 24  5 59]  
  [ 18 33 28 79 34]  
  [ 17 11  4 72 85]  
  [ 23 56 93 45 70]]  
  
[[ 78  8 10 82 21]  
 [ 20  2 76 120 101]  
 [ 29 73 104 14 124]  
 [108 95 19 118 103]  
 [ 68 27 37 57 121]]  
  
[[102 123 94 77 62]  
 [ 64 106 119 107 122]  
 [  7 43 89 15 61]  
 [ 50  1 60 40 65]  
 [110 113  9 114 31]]  
  
[[ 52 81 87 38 71]  
 [ 88 91 35 74 86]  
 [125 111 44 58 47]  
 [ 49 100 112 16  6]  
 [ 46 80 84 41 63]]  
  
[[ 75 98 97 32 67]  
 [ 55 26 109 117 51]  
 [ 69 105 96 13  3]  
 [ 92 53 115 22 66]  
 [ 48 83 36 54 39]]]
```

6.2.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 10  32  67 117  86]
  [ 96 121   1   7 116]
  [ 38  51 123  57  36]
  [103  17 118  35  39]
  [ 80  90   9 109  34]]

 [[ 11  98  46 111  27]
  [ 79  93  87  48   2]
  [ 88  26  44 100  61]
  [ 65  85  29  60 122]
  [ 77   8 119   4 105]]

 [[ 97 101  23  91   3]
  [114  20  16 115  70]
  [ 62  81  49  52  66]
  [ 18  73 112  56  55]
  [ 19  37 113  13 110]]

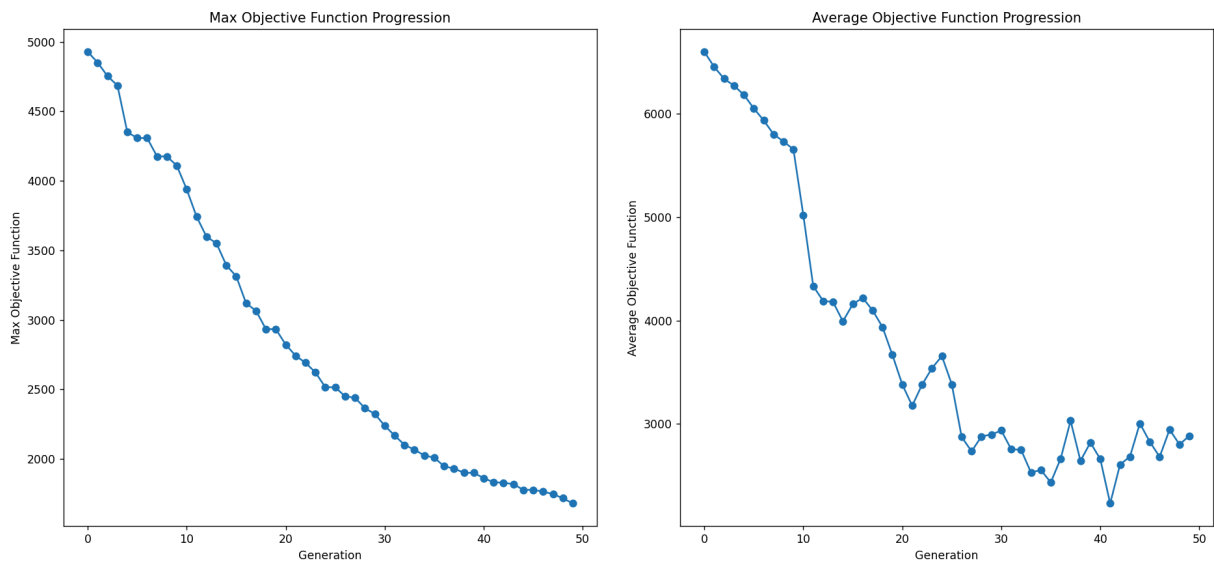
 [[120  24  54 106  31]
  [ 25  22 102  43 124]
  [ 63 108  64  89  33]
  [ 15  78  75  42  94]
  [ 92  83  30  45  28]]

 [[ 84  58 107   5  69]
  [ 21  72 104  74  68]
  [ 40  12  41 125  95]
  [ 53  99  14  59   6]
  [ 82  76  50  47  71]]]

```

6.2.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 1679.0

6.2.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



6.2.5. Durasi proses pencarian = 100.29 detik

6.3. Percobaan ketiga

6.3.1. State awal

```
State kubus awal:  
[[[125 90 64 21 81]  
 [ 95 98 93 109 119]  
 [ 87 96 10 23 92]  
 [ 34 12 78 63 65]  
 [ 69 99 71 101 29]]  
  
 [[123 11 73 44 89]  
 [ 37 94 26 39 122]  
 [ 80 22 7 41 40]  
 [100 77 35 68 62]  
 [ 46 124 38 54 24]]  
  
 [[105 47 104 74 58]  
 [ 57 66 108 72 60]  
 [ 8 14 79 121 51]  
 [ 48 49 84 120 25]  
 [ 88 115 97 106 6]]  
  
 [[ 59 5 16 28 113]  
 [ 32 52 67 45 30]  
 [ 82 53 117 83 2]  
 [ 36 33 102 86 55]  
 [ 3 91 110 76 70]]  
  
 [[112 31 15 116 103]  
 [107 111 9 114 43]  
 [ 19 20 50 1 17]  
 [ 75 42 4 118 61]  
 [ 56 85 27 13 18]]]
```

6.3.2. State akhir

```

State Kubus akhir (terbaik):
[[[ 46  85  42  62  89]
   [  4  81 122  53  12]
   [ 78 102  25  14  77]
   [ 47  36  60 123  79]
   [118  13  86  69  44]]

  [[ 26 117  65  76 111]
   [ 31 120  93  17  15]
   [ 97  40  23 103  52]
   [ 55  32  98  66  41]
   [106  11  45  58 100]]

  [[ 54  22  61 101  73]
   [ 83  88 110  10  19]
   [ 18  84  82  5 121]
   [ 27  74  38 105  92]
   [119  35  21  96  2]]

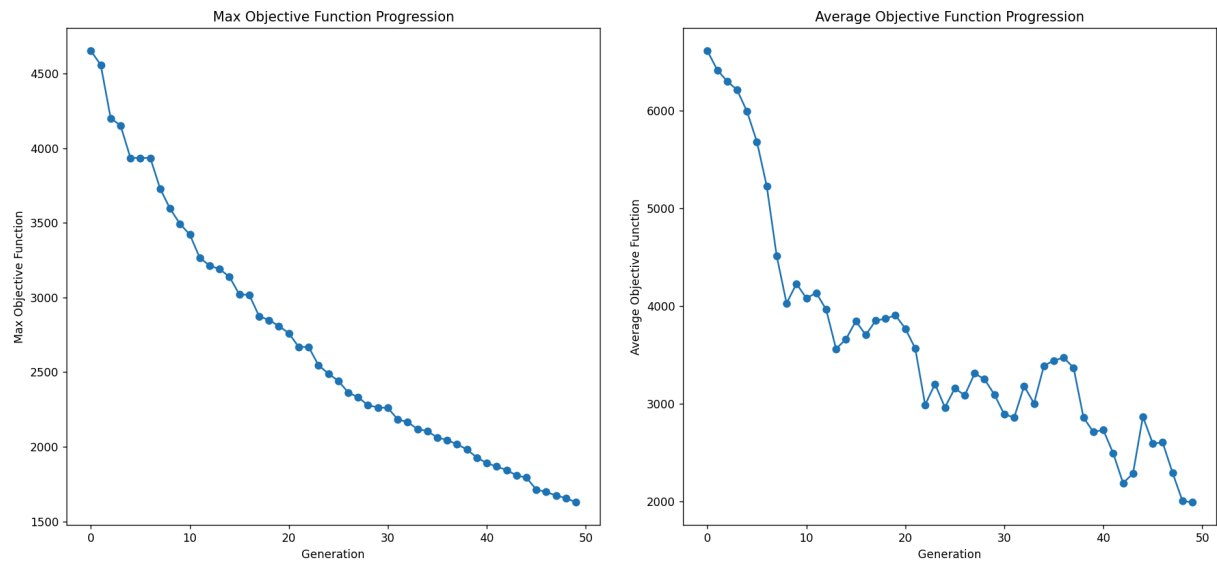
  [[  1  43  99  63 108]
   [ 94  80  68  9  49]
   [ 72  7  75  56 115]
   [112  64  30  95  34]
   [ 51 124  33 107  6]]

  [[ 37 116  3 109  50]
   [104  91  39  8  90]
   [ 70  20 125  59  16]
   [ 29  71  87  24 114]
   [ 57  28  67 113  48]]]

```

6.3.3. Nilai objective function akhir yang dicapai = 1627.0

6.3.4. Plot nilai *objective function* terhadap banyak iterasi yang telah dilewati



6.3.5. Durasi proses pencarian = 101.56 detik

Berdasarkan hasil pengamatan saya dari eksperimen diatas, saya bisa langsung mendapatkan dua wawasan penting. Pertama, dari jumlah iterasi dan populasi untuk setiap eksperimen, bisa dilihat bahwa nilai *objective function* akhir yang dicapai semakin mendekati *global optimum* ketika 2 variabel tersebut jumlahnya ditingkatkan. Kedua, peningkatan jumlah iterasi dan populasi ini juga menyebabkan durasi proses pencarian semakin bertambah. Hal ini disebabkan karena beban komputasi yang harus diemban oleh komputer semakin banyak ketika 2 variabel tersebut meningkat.

Lalu, dari setiap 3 percobaan untuk semua variasi, hasil yang didapatkan tidak memiliki selisih yang terlalu signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma memiliki tingkat konsistensi yang baik. Baiknya konsistensi ini menandakan bahwa algoritma bekerja dengan stabil dalam lingkungan eksperimen. Namun, konsistensi ini tidaklah selalu terjadi di setiap proses. Dalam eksperimen dengan jumlah populasi kontrol (1000) dan banyak iterasi 125, durasi proses pencarian menunjukkan variasi yang mencolok. Pada percobaan pertama dan kedua, durasi yang dihasilkan adalah 311.33 detik dan 315.92 detik. Namun, pada percobaan ketiga, durasi berubah drastis menjadi 190.61 detik. Dari kejadian ini, dapat disimpulkan bahwa konsistensi eksperimen dapat terganggu oleh faktor eksternal, terutama performa komputer dalam menjalankan komputasi.

Pada eksperimen di algoritma ini, nilai *objective function* akhir yang paling mendekati *state* sempurna terletak pada eksperimen dengan jumlah populasi kontrol (1000) dan banyak iterasi 125 di percobaan kedua, dengan nilai sebesar 1183. Hasil ini tercapai berkat jumlah iterasi yang tinggi, yang memberi algoritma lebih banyak waktu dan kesempatan untuk mencari solusi yang lebih mendalam dan terus menyempurnakannya. Dengan 125 iterasi, algoritma dapat menemukan solusi yang lebih optimal, menghasilkan nilai fungsi objektif akhir yang lebih rendah dan mendekati *state* sempurna. Hal yang sama tidak terjadi pada percobaan dengan iterasi rendah, dimana nilai *objective function* akhir yang paling jauh dicapai pada eksperimen dengan jumlah populasi kontrol (1000) dan banyak iterasi 3, yaitu sebesar 4615.0 pada percobaan kedua.

Pengaruh populasi juga terlihat jelas melalui data eksperimen ini. Dengan iterasi tetap di 50, populasi sebesar 50, nilai fungsi objektif dihasilkan sekitar 3068 pada percobaan kedua, sementara populasi yang lebih besar, seperti 2000, mampuurunkannya hingga 1627. Hal ini menunjukkan bahwa populasi yang lebih besar membantu algoritma mengeksplorasi ruang pencarian lebih luas dan menghindari jebakan di optima lokal. Namun, penambahan populasi atau iterasi berlebihan tidak selalu memberikan peningkatan yang signifikan pada hasil akhir dan justru meningkatkan waktu komputasi. Oleh karena itu, perlu ada keseimbangan dalam jumlah iterasi dan populasi untuk mendapatkan hasil optimal tanpa membebani komputasi secara berlebihan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Setiap algoritma memiliki hasil nilai *objective function* yang berbeda-beda antara Steepest Ascent Hill Climbing, Simulated Annealing, dan juga algoritma Genetic. Berdasarkan hasil skor dari percobaan yang kami lakukan, algoritma Steepest Ascent Hill Climbing memiliki hasil pencarian yang terbaik, diikuti dengan Simulated Annealing, lalu algoritma Genetic di posisi akhir dengan hasil terburuk dari ketiganya. Perbedaan hasil ini pasti dikarenakan dasar teori pencarian yang berbeda. Kemungkinan lainnya karena fungsi *magic cube* yang digunakan pada algoritma Steepest Ascent Hill Climbing dan Simulated Annealing sama, yang berbeda hanyalah algoritma Genetic. Fungsi *magic cube* ini menentukan fungsi pencarian nilai *objective function* sehingga nantinya juga akan mempengaruhi hasil *random initial state cube*.

Setiap algoritma *local search* memiliki sifat yang berbeda-beda dan unik. Untuk algoritma Steepest Ascent Hill Climbing, disetiap iterasinya hanya mencari nilai terbaik dari *initial statenya*. Sedikit berbeda dengan algoritma Simulated Annealing, algoritma ini memungkinkan untuk mencari nilai *state* yang lebih buruk dari *initial state* nya sehingga memungkinkan ruang pencarian yang lebih luas. Untuk algoritma Genetic, ruang pencarian diperluas dalam bentuk populasi yang terus meningkat kualitasnya setiap generasi, namun sangat tergantung dari jumlah populasi dan generasi yang ada.

Perbandingan waktu memang bervariasi tapi tidak terlalu signifikan perbedaannya. Untuk algoritma Genetic memiliki durasi proses pencarian tercepat, yaitu selama 5-6 detik, disusul oleh algoritma Simulated Annealing dengan durasi selama 8-9 detik, lalu algoritma Steepest Ascent Hill Climbing dengan durasi proses pencarian yang paling lama yaitu antara 20-27 detik.

Setiap algoritma memiliki nilai rentan konsistennya masing-masing. Untuk algoritma Steepest Ascent Hill Climbing memiliki nilai hasil yang konsisten dengan perbedaan sekitar 300-600an. Untuk algoritma Simulated Annealing memiliki nilai hasil yang konsisten dengan perbedaan sekitar 500-1000an. Untuk algoritma Genetic memiliki nilai hasil yang konsisten dengan sekitar 100-400.

PEMBAGIAN TUGAS SETIAP KELOMPOK

Nama anggota	NIM	Tugas
Samuel Franciscus Togar Hasurungan	18222131	<ul style="list-style-type: none">- Implementasi algoritma<ul style="list-style-type: none">- genetic.py- gencube.py (Magic Cube untuk genetic)- Laporan:<ul style="list-style-type: none">- Pemilihan Objective Function- Penjelasan implementasi algoritma Genetic- Hasil eksperimen dan analisis algoritma genetic
Salsabilla Azzahra	18222139	<ul style="list-style-type: none">- Implementasi proses algoritma simulated annealing- Laporan :<ul style="list-style-type: none">- Penjelasan implementasi algoritma simulated annealing
Muhammad Reffy Haykal	18222103	<ul style="list-style-type: none">- Implementasi Algoritma<ul style="list-style-type: none">- Magiccube.py (Digunakan di Steepest Ascent Hill-Climbing dan Simulated Annealing)- SteepestHillClimb.py- visual.py- Laporan:<ul style="list-style-type: none">- Penjelasan implementasi algoritma Magic Cube- Penjelasan implementasi algoritma Steepest Ascent Hill-Climbing
Hanan Fitra Salam	18222133	<ul style="list-style-type: none">- Implementasi algoritma simulated annealing bagian plotting- Laporan :<ul style="list-style-type: none">- Hasil eksperimen simulated annealing- Kesimpulan dan saran

REFERENSI

1. [Features of the magic cube - vierkant](#)
2. [Perfect Magic Cubes \(trump.de\)](#)
3. [Magic cube - Wikipedia](#)
4. Slide kuliah IF3070 Dasar Intelegensi Artifisial
5. [Gambar 2](#)