Algoritma Genetik dan Aplikasinya dalam Desain Coating thin-film Optik

L. M. Rasdi Rere

STMIK Jakarta STI&K
rasdi@jak-stik.ac.id

Abstrak

Algoritma Genetik (AG) diperkenalkan sebagai salah satu metode sintesis untuk memecahkan optimasi parameter sistem. Tahapan desain coating optik diuraikan dengan memperhatikan parameter GA seperti ukuran populasi, maksimum generasi serta pemilihan tipe operator genetik: Seleksi, Rekombinasi dan Mutasi. Dua tipe *substrate* (TaFd30 dan FK5) serta material coating (MgF_2 dan OH5) dipergunakan sebagai model. Dua desain dikembangkan untuk coating antirefleksi 5 layer dan 8 layer dengan hasil sesuai target yang ditentukan.

Kata kunci: Algoritma Genetik, Desain Coating Optik, refinement

1. Pendahuluan

Coating thin-film optik telah menjadi bagian penting pada semua komponen optik dan sistem manufaktur. Aplikasinya dalam ilmu pengetahuan dan teknologi dapat dilihat pada alat instrumen, spektroskopi, kesehatan dan astronomi. Teknologi ini juga dipakai dalam arsitektur, industri otomotif, konversi energi, display komputer dan komunikasi. Fungsi utama Coating thin-film Optik adalah mengembangkan komposisi spektrum dan intensitas cahaya yang ditransmisikan pada sebuah sistem optik, sehingga dapat lebih meningkatkan kualitas citra serta menyediakan jalan yang mudah untuk manipulasi spekrum [1] [2].

Banyak pendekatan yang telah dilakukan untuk mendesain sebuah sistem optik, akan tetapi secara umum didasarkan pada metode analitik, grafik dan numerik. Metode analitik biasanya sangat cepat, akan tetapi tidak fleksibel seperti halnya pada metode numerik. Karena itu metode numerik yang paling banyak dipergunakan untuk desain optik. Formulasi metode numerik ini didasarkan pada fungsi merit. Dua pendekatan pada coating optik numerik adalah metode *refinement* dan *synthesis*. Metode *Refinement* umumnya memerlukan desain awal yang seringkali membutuhkan banyak waktu, dan sangat sulit untuk sistem yang kompleks. Penyelesaian yang dihasilkan diperoleh dari modifikasi bertahap terhadap desain awal, karena itu metode *Refinement* sangat sensitif terhadap desain awal. Berlawanan dengan *Refinement*, metode *Synthesis* membangkitkan desain awal, dan biasanya dikombinasikan dengan metode Refinemen karena penyelesaiannya terkadang tidak cukup baik. Oleh sebab itu penelitian metode *synthesis* adalah topik riset yang sangat penting untuk dikembangkan [2][3].

Salah satu metode *synthesis* yang dikenal untuk menyelesaikan optimasi sistem dalam desain coating thin-film optik adalah Algoritma *evolutionary*, yang didasarkan pada proses seleksi alam. Ada tiga pengembangan metode ini yang bergantung pada implementasinya yaitu *Genetic Algorithm*, *Strategy Evolutionary* dan *Program Evolutionary*. Ketiga metode yang merupakan standar algoritma *evolutionary* tidak efisien. Karena itu banyak modifikasi telah diajukan untuk meningkatkan kualitas penyelesaian[3].

Dari ketiga metode algortima *evolutionary*, penelitian ini menggunakan Algoritma Genetik untuk mencari optimasi parameter dari sistem desain thin-film coating.

Karena sifat *stochastic* dari algoritma genetik yang tidak akan menemukan penyelesaian optimal yang pasti untuk kasus kontinyu [4], maka metode Refinement dipergunakan ketika sistem sudah mendekati stabil. Hasil program diujicobakan untuk desain coating antirefleksi lensa gelas, untuk 5 dan 8 layer dalam daerah

panjang gelombang cahaya tampak sampai dengan near infrared.

2. Tinjauan Pustaka

Penelitian desain coating optik menggunakan algoritma *evolutionary* banyak dilakukan dengan berbagai modifikasi dan aplikasi dalam sistem optik. Beberapa diantaranya dilakukan oleh Yang dan Kao [2] yang merancang coating thin-film optik untuk lapisan *inhomogeneous*, dengan modifikasi dalam proses mutasinya menggunakan integrasi strategi lokal dan global yaitu *decreasing based mutations* dan *self-adaptive mutations*. Empat desain dihasilkan dari metode yang dikembangkannya: beam splitter, narrow band reflector filter, nonpolarized edge filters dan trimulus filter. Metode yang diusulkannya ini dikenal dengan *family competition evolutionary algorithm* (FCEA).

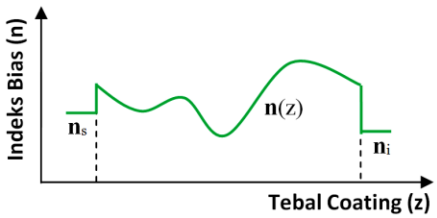
Hodgon [5] mengkombinasi algoritma genetik dengan *random local search* untuk mempercepat konvergensi pada coating antirefleksi dalam daerah infrared. Metode yang diusulkannya dinamakan *memetic algorithm*.

Li, Fang dan Gao [6] menggunakan Algoritma Genetik untuk mendesain dua bentuk *interference filter*, yaitu *broadband stop interference filter* dan *narrow-band interference filter* berdasarkan teori pita energi pada kristal *photonic*. Sedangkan Voti [7] memperkenalkan algoritma genetik untuk desain coating *transparent Metal*. Struktur yang dibuatnya terdiri dari 5 layer Titanium dioxide (TiO2) dan 4 layer silver (Ag). Studi mengenai transparan metal adalah hal yang mendasar untuk pengembangan filter optik dan peralatan yang berkaitan dengan nanoteknologi seperti *photovoltaic*, *thermovoltaic* dan *low emissivity filters*.

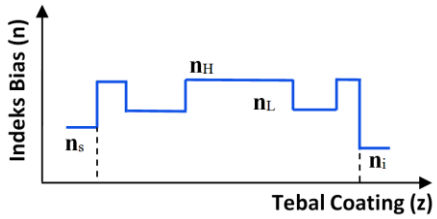
Penelitian ini menggunakan algoritma genetik, yang dikombinasikan dengan metode Refinement, untuk desain coating antirefleksi lensa gelas, dalam daerah spektrum cahaya tampak sampai dengan *near-infrared*. Untuk kemudahan dalam rancangan sistem, parameter indeks bias material coating serta jumlah layer yang diperlukan telah ditentukan terlebih dahulu dalam desain

2.1. Coating thin-film Optik

Suatu sistem coating optik dapat dibedakan berdasarkan nilai indeks biasnya. Coating *inhomogeneous* memiliki vektor pada indeks bias material coatingnya bernilai kontinyu, sedangkan coating *homogeneous* menggunakan material coating yang telah tersedia. Seperti diperlihatkan gambar 1a, layer *inhomogeneous* mempunyai nilai indeks bias **n**(z) yang bervariasi dalam arah normal daerah yang di coating. Dalam hal ini **z** adalah koordinat sepanjang normal, $\mathbf{n}_s$ merupakan indeks bias material substrate, sedangkan $\mathbf{n}_i$ menyatakan nilai indeks bias sinar yang datang (*incident medium*), biasanya udara dengan nilai $\mathbf{n}_i = 1$. Coating dengan layer *homogeneus* seperti ditunjukkan gambar 1b, biasa disebut dengan sistem coating multilayer. Sistem ini dapat dianggap kasus khusus dalam layer *inhomogeneous*, dimana indeks bias **n**(z) adalah fungsi bertahap yang bergantian antara indeks bias bernilai tinggi $\mathbf{n}_H$ dan indeks bias bernilai rendah $\mathbf{n}_L$ [2][8].



(a) Coating inhomogeneous



(b) Coating homogeneous

Gambar 1: Coating berdasarkan indeks bias

Untuk desainer optik, selain inteferensi dan polarisasi, kharakteristik yang penting adalah jumlah energi yang hilang atau cahaya yang diserap dalam coating. Secara umum untuk sembarang coating terdapat hubungan antara Transmisi **T**, Reflektansi **R** dan Absorbsi **A** dalam bentuk persamaan (1):

$$\mathbf{T} + \mathbf{R} + \mathbf{A} = 1$$

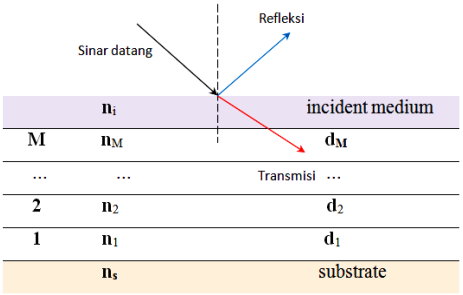
Koefisien **A** dalam material dielektrik sangat mendekati nol karena pada dasarnya tidak menyerap cahaya apapun, sehingga dalam perhitungan terkadang diabaikan. Sebaliknya

pada metal akan selalu ada nilai tertentu yang harus diperhitungkan [1].

2.1.1. Desain Coating Optik

Desain coating optik bertujuan menentukan parameter sistem yang dapat memenuhi spesifikasi desain yang direncanakan, dengan target transmisi pada sejumlah panjang gelombang dalam spektrum yang ditentukan.

Salah satu sasaran desain coating adalah menemukan jumlah layer **M**, indeks bias **n**, dan ketebalan coating **d** pada sejumlah *j*-layer, agar sesuai dengan target yang ditentukan. Gambar 2 menunjukkan system coating dengan **M**-layer, dimana indeks bias tiap layer adalah n_1 ... n_M dan ketebalannya d_1 ... n_M.



Gambar 2: Sistem coating Optik multilayer

Bangunan utama dalama desain coating optic adalah *Quarter-wave optical thickness* (QWOT) pada material yang berbeda. Notasi indeks bias dengan nilai *high*, *medium* dan *low* pada QWOT biasanya dinotasikan dengan H, M dan L. Besarnya QWOT didefinisikan dengan menggunakan persamaan (2):

$$\text{QWOT} = 4nd$$

dimana *n* adalah indeks bias material dan *d* adalah *physical thickness*.

Jika terdapat dua layer QWOT dengan material sama, maka terbentuk *half-wave optical thickness* (HWOT). Jika hanya pecahan pada HWOT yang tanpak dalam desain, katakanlah tiga per empat dari H, maka dapat dinyatakan dalam 0.75H [2].

2.1.2. Fungsi Merit

Fungsi merit adalah elemen utama desain coating optik dalam optimasi numerik. Salah satu desain dasar fungsi merit untuk coating optik multilayer diberikan dalam persamaan (3):

$$\boldsymbol{F}(n,d,\lambda) = \left\{ \frac{1}{W} \sum_{k=1}^{W} \frac{\left[R(n,d,\lambda_k) - R(\lambda_k)\right]^2}{\delta R_k} \right\}^{1/2}$$

dimana $R(n, d, \lambda_k)$ dan $R(\lambda_k)$ adalah reflektansi hasil perhitungan desain dan reflektansi target desain dalam daerah panjang gelombang yang ditentukan (λ_k). Indeks bias material adalah *n*, ketebalan coating setiap layer adalah *d*, sedangkan δR_k merupakan toleransi pada panjang gelombang λ_k. Umumnya perhitungan $R(n, d, \lambda_k)$ didasarkan pada perumusan matriks [2].

2.1.3. Coating antirefleksi

Aplikasi terbesar coating optik adalah coating antirefleksi, dengan tujuan menambah transmisi pada substate dan mengurangi refleksi permukaan pada daerah panjang gelombang tertentu. Selain itu mempertinggi sifat-sifat fisika dan kimia permukaan yang di coating [1].

Coating antirefleksi pada permukaan optik adalah teknologi yang sangat penting, merupakan satu dari masalah pertama yang diselesaikan dengan bantuan thin-film, dan juga menjadi buku pertama yang dipublikasikan pada tahun 1946, semuanya mengenai coating *multilayer* optik [8].

Coating antirefleksi *single* dan *multilayer* didesain untuk menambah transmisi pada substrate dan mengurangi refleksi pada daerah panjang gelombang tertentu. Jika perbaikan transmisi sistem yang diperlukan hanya untuk interval panjang gelombang yang tidak terlalu luas, coating single layer mungkin cukup. Akan tetapi, jika transmisi tertinggi secara keseluruhan diinginkan pada interval panjang gelombang yang lebar, atau energi refleksi adalah sangat penting dalam sistem yang akan dibuat, maka coating antirefleksi multilayer harus dipergunakan [9].

Gelas yang tidak di coating, umumnya memiliki reflektansi 4% sampai 8% dari permukaan. Hal ini dapat dikurangi reflektansinya sekitar 1% dalam cahaya tampak menggunakan single layer dengan QWOT *low-index* material. Untuk coating antirefleksi yang lebih lebar, meliputi daerah tampak dan *near-infrared*, dibutuhkan banyak layer dengan material *high* dan *low* indeks [1].

Coating antirefleksi ideal adalah layer *inhomogeneous* dengan transisi kontinyu pada indeks bias dari satu medium ke medium lainnya. Sebagai pendekatan praktis, dapat dipergunakan sekumpulan layer *homogeneous* yang sangat tipis

dengan indeks bias bertambah dalam langkah kecil. Dengan menganggap tidak ada absorbsi pada medium, matriks karakteristik untuk layer *homogeneous* dengan indeks bias n_j dan ketebalan d_j pada *normal incident* dapat dinyatakan dengan persamaan (4):

$$\boldsymbol{M}_j = \begin{pmatrix} \cos\delta_j & \dfrac{i\sin\delta_j}{n_j} \\ in_j\sin\delta_j & \cos\delta_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{M}_{11} & i\boldsymbol{M}_{12} \\ i\boldsymbol{M}_{21} & \boldsymbol{M}_{22} \end{pmatrix}$$

dimana

$$\delta_j = \frac{2\pi n_j d_j}{\lambda}$$

Dengan menganggap absorsi pada persamaan (1) sangat kecil sehingga nilainya diabaikan, perhitungan untuk coating optik antirefleksi dapat ditentukan menurut persamaan (5) berikut

$$T = 1 - R = \frac{4n_i n_s}{\left(n_i\boldsymbol{M}_{11} + n_s\boldsymbol{M}_{22}\right)^2 + \left(n_i n_s\boldsymbol{M}_{12} + \boldsymbol{M}_{21}\right)^2}$$

dimana n_i menyatakan indeks bias pada *incident medium*, n_s adalah indeks bias substrate, serta R dan T adalah refleksi dan transmisi total yang dihasilkan sistem [10].

2.2. Algoritma Genetik

Algoritma genetik dikembangkan pertama kali oleh Bremermann pada tahun 1958, tetapi dipopulerkan oleh Holland yang menggunakannya untuk mempelajari adaptasi dalam lingkungan secara formal, dengan maksud menerapkan mekanismenya dalam ilmu komputer. Usaha ini mengantarkannya mengembangkan *Schema* tahun 1968, yang diterangkan secara detail dalam bukunya *Adaptation in Natural and Artificial Systems* di tahun 1975 [11].

Pada dasarnya algoritma genetik adalah suatu algoritma pencarian yang meniru prinsip evolusi alam sebagai metode untuk memecahkan optimasi parameter. Terdapat berbagai jenis operator yang dipergunakan dalam algoritma genetik, tetapi yang sering dipergunakan adalah seleksi, rekombinasi dan mutasi [12].

2.2.1. Seleksi

Untuk sederhananya seleksi memberikan kelangsungan hidup yang besar pada individu yang terbaik. Hal ini adalah kelangsungan hidup yang sesuai dengan mekanisme yang kita tentukan penyelesaiannya.

Ada berbagai macam cara dalam proses seleksi, seperti piringan rolet (*roulette wheels*) yang dapat diputar, turnamen local (*local tournament*) dapat diadakan, bermacam susunan peringkat (*various rangking schemes*) dapat diminta. Akan tetapi apapun yang kita lakukan, gagasan utamanya adalah memilih penyelesaian terbaik dari yang ada [12].

2.2.2. Rekombinasi

Proses rekombinasi bertujuan menambah keanekaragaman individu dalam populasi dengan cara mengawinkan individu-individu pada populasi P(t), sehingga menghasilkan keturunan baru yang ditempatkan pada populasi berikutnya yaitu P(t+1). Individu baru akan mewarisi sifat dari kedua orang tuanya.

Dua operator rekombinasi sederhana yang diperkenalkan untuk mendapatkan keturunan baru yaitu modifikasi rekombinasi diskrit dan rekombinasi *intermediate*. Rekombinasi diskrit menghasilkan keturunan yang mewarisi gen dari kedua orang tuanya dengan probabilitas yang sama. Mengikuti pendekatan Yang dan Kao [2], yaitu anak mewarisi gen dari ayahnya dengan probabilitas lebih besar akan lebih baik, karena itu rekombinasi diskrit akan dimodifikasi sebagai berikut:

$$x_j^c = \begin{cases} x_j^a & probabilitas\ 0.8 \\ x_j^b & probabilitas\ 0.2 \end{cases}$$

Dalam hal ini setiap gen dari anak mempunyai probabilitas 80% yang berasal dari ayahnya dan 20% berasal dari orang tua lainnya. Untuk rekombinasi *intermediate*, didefinisikan menurut persamaan (6) berikut:

$$x_j^c = 0.5\left(x_j^a + x_j^b\right)$$

superscript *c* dalam hal ini berkaitan dengan anak, sedangkan superscript *a* dan *b* berkenaan dengan indeks kedua orangtuanya.

2.2.1. Mutasi

Mutasi diperkenalkan dengan tujuan mengembalikan materi gen yang hilang serta untuk menambah keanekaragaman individu. Hal ini dilakukan dengan cara memodifikasi terhadap satu atau lebih gen pada individu yang sama. Salah satu jenis mutasi adalah dengan menambahkan secara random distribusi normal pada individu **X**, seperti diperlihatkan persamaan (7) berikut:

$$x' = x + N(0, \sigma)$$

hasil perhitungan fungsi merit dari kedua individu *x* dan *x'* dibandingkan, kemudian dipilih yang terbaik untuk ditempatkan pada populasi berikutnya [11].

2.3. Refinement

Refinement adalah salah satu teknik dalam desain coating thin-film optik yang umum dipakai. Pendekatannya yang serbaguna dapat dipergunakan sendiri atau dikombinasikan dengan metode lain untuk berbagai jenis desain optik, mulai dari multilayer konvensional sampai *inhomogeneous* dan sistem *quasi-inhomogeneous* [13].

Transmisi pada sekumpulan thin-film yang diberikan *substrate* dan sinar datang dari beberapa medium adalah fungsi *optical thickness* **QWOT** dan indeks bias *n* pada sebuah lapisan. Secara matematis dinyatakan dengan persamaan (8) berikut:

$$T = T(QWOT_1, n_1; \ldots QWOT_i, n_i)$$

dengan diferensiasi parsial $QWOT_i$ maka akan didapatkan perubahan *optical thickness* terhadap perubahan transmisi, yang dapat dituliskan secara vektor dalam bentuk persamaan (9) berikut:

$$\Delta T = \left[\frac{\partial T}{\partial QWOT} \right] \Delta QWOT$$

Jika jumlah layer yang tersedia untuk berubah lebih bersar dari jumlah posisi panjang gelombang dimana transmisi yang berubah diinginkan, maka matriksnya akan lebih banyak baris dari pada kolom, maka disebut refining vertikal, sebaliknya disebut refining horizontal.

Karena langkah kecil dalam ΔT diperbolehkan, konsekuensinya dapat dipergunakan berulang-ulang untuk menghasilkan perubahan yang signifikan [10].

3. RANCANGAN DESAIN

3.1. Pencarian Ruang

Pencarian ruang E dipilih untuk dimensi 2**M**, dimana **M** menyatakan jumlah layer dari sistem optik. Individu **X** kemudian dituliskan dengan dimensi 2**M** dan vektornya dinyatakan sebagai X = { ($\mathbf{d}_1$,$\mathbf{n}_1$); ($\mathbf{d}_2$,$\mathbf{n}_2$); ... ($\mathbf{d}_M$,$\mathbf{n}_M$)}, dimana $\mathbf{d}_j$ dan $\mathbf{n}_j$ masing-masing menyatakan ketebalan dan indeks bias material pada layer ke-*j* dalam sistem. Untuk mendapatkan penyelesaian yang realistis, ketebalan dan indeks bias material pada setiap layer memenuhi batasan berikut ini:

1. $\mathbf{d}_{Min} \leq \mathbf{d}_j \leq \mathbf{d}_{Max}$, dimana $\mathbf{d}_{Min}$ dan $\mathbf{d}_{Max}$ berhubungan dengan tebal minimum dan maksimum pada setiap layer.
2. $\mathbf{n}_L \leq \mathbf{n}_j \leq \mathbf{n}_H$, dimana $\mathbf{n}_L$ dan $\mathbf{n}_H$ berhubungan dengan nilai indeks bias terendah dan tertinggi dari material coating pada layer.

Ruang **E** kemudian dapat dinyatakan sebagai $[\mathbf{I}, \mathbf{J}]^M$ dimana I = [$\mathbf{d}_{Min}$, $\mathbf{d}_{Max}$] dan J = [$\mathbf{n}_L$,$\mathbf{n}_H$]. **I** dan **J** adalah parameter yang dimasukkan dalam sistem pada saat program dijalankan. Karena keterbatasan material coating yang tersedia, khusus untuk indeks bias material akan dipergunakan ruang diskrit **J**, dimana nilai yang berbeda bersesuaian dengan material yang ada yaitu **J** = [$\mathbf{n}_1$, $\mathbf{n}_2$, ... $\mathbf{n}_j$].

3.2. Desain Algoritma Genetik

Dasar dari algoritma genetik adalah membuat individu awal yang dipilih secara random berkembang sehingga fungsi merit dalam individu minimum. Jumlah populasi akan dibuat tetap sepanjang evolusi. Perkembangan populasi dalam program digambarkan sebagai P(t) pada saat iterasi ke-*t*. Beberapa langkah kemudian akan membuat populasi berikutnya menjadi P(t+1).

Beberapa tahapan desain coating optik dengan yang melibatkan operator genetik secara lebih lengkap adalah sebagai berikut:

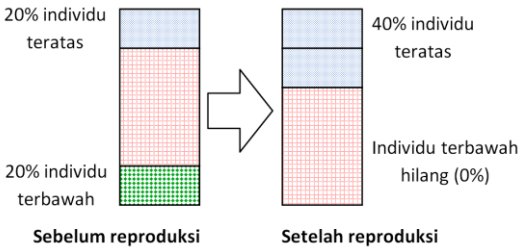
Langkah 1: Evaluasi unjuk kerja P(t)

Dari populasi awal yang telah terbentuk secara random, dilakukan evaluasi terhadap populasi P(t) dengan cara menghitung fungsi merit untuk setiap individu. Berdasarkan persamaan (3), individu terbaik adalah yang memiliki fungsi merit paling rendah.

Langkah 2: Seleksi

Individu pada populasi P(t) bereproduksi dan menghasilkan sejumlah keturunan baru yang sama dengan induknya. Penentuan jumlah keturunan dalam penelitian ini menggunakan sistem rangking, yaitu dengan mengurutkan setiap individu dalam satu generasi berdasarkan fungsi merit. Individu dengan fungsi merit terkecil menduduki peringkat teratas, sedangkan yang memiliki fungsi merit terbesar menempati peringkat bawah.

Dalam sistem rangking ini, 20% individu teratas menghasilkan dua keturunan, sedangkan 20% individu terbawah tidak memiliki keturunan. Sisanya memiliki satu keturunan. Ilustrasi sistem rangking yang dipergunakan, diperlihatkan seperti pada gambar 3. Seperti diperlihatkan gambar, pada generasi berikutnya, 20% individu teratas akan menjadi dua kali lipatnya (40%). Individu terbawah (20%) akan hilang, sedangkan 60% sisanya akan tetap jumlahnya.

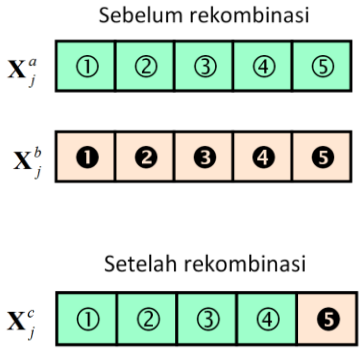


Gambar 3: Seleksi metode Rangking

Langkah 3: Rekombinasi

Proses rekombinasi dalam penelitian ini menggunakan modifikasi rekombinasi diskrit dan rekombinasi intermediate. Penentuan rekombinasi terhadap individu dilakukan secara random, dengan tujuan memperkaya spesies individu dalam populasi. Populasi yang mengalami individu dilakukan secara acak dengan probabilitas rekombinasi $\mathbf{P}_r$ tertentu. Misalkan terdapat 100 individu dalam populasi, dimana probabilitas rekombinasinya = 40%, maka individu yang mengalami rekombinasi dan terpilih secara acak adalah: 100 x 40% = 40 individu.

Anggap dua individu $\mathbf{X}_j^a$ dan $\mathbf{X}_j^b$, dengan superscript *a* dan *b* menyatakan individu yang dipilih secara random, serta subscript *j* menyatakan urutan layer ke-*j*. Anak pertama dari kedua individu akan didefinisikan menggunakan modifikasi rekombinasi diskrit sebagai berikut: layer anak pertama terdiri dari 80% dari layer $\mathbf{X}_j^a$ dan 20% dari layer $\mathbf{X}_j^b$. Proses rekombinasinya diilustrasikan seperti gambar 4.



Gambar 4: Modifikasi Rekombinasi Diskrit

Untuk anak kedua, akan didefinisikan menggunakan rekombinasi *intermediate*. Karena indeks bias sudah tertentu nilainya, maka individu pada **X** hanya menyatakan ketebalan coating pada layer. Misalkan individu ke-1 pada layer ke-3 dinyatakan dengan $\mathbf{X}_3^1$ memiliki ketebalan coating $\mathbf{d}_3^1$ = 200 nm. Individu ke-2 pada layer ke-3 dinyatakan dengan $\mathbf{X}_3^2$ mempunyai ketebalan coating $\mathbf{d}_3^2$ = 100 nm. Maka perhitungan anak kedua $\mathbf{X}_3^c$ adalah sebagai berikut:

$$X_3^c = 0.5(X_3^1 + X_3^2) = 0.5(d_3^1 + d_3^2)$$
$$= 0.5(200 + 100) = 150\,nm$$

Langkah 4: Mutasi

Mutasi mencegah algoritma untuk konvergen terlalu cepat menuju minimum lokal pada fungsi merit. Sebuah nilai random dengan distribusi normal akan ditambahkan untuk parameter setiap layer pada individu **X** yang dimutasi. Seperti halnya rekombinasi, individu yang mengalami

mutasi pada penelitian ini dilakukan secara acak dengan probabilitas mutas $\mathbf{P}_m$ tertentu. Misalkan 100 individu dalam populasi, memiliki $\mathbf{P}_m$=3%, maka banyaknya individu yang akan dimutasi secara acak adalah: 100 x 3% = 3 individu. Individu lainnya dibiarkan tidak berubah.

Dalam sebuah populasi, individu ke-10 dengan jumlah layer *j* mengalami mutasi. Perhitungan layer ke-4 pada individu dinyatakan dengan $\mathbf{X}_4^{10}$ adalah sebagai berikut:

$$[X_4^{10}] = X_4^{10} + N_4(0,\sigma)$$

kedua individu dibandingkan, dan hasilnya dipilih yang terbaik.

Proses selanjutnya adalah kembali ke langkah-1 sampai ke generasi maksimum yang telah ditentukan, atau sampai kepada individu terbaik yang diinginkan.

3.3. Proses Refinement

Di asumsikan bahwa penyelesaian yang di dapat dari perhitungan dengan operator genetik sudah cukup baik, tatapi belum memenuhi target fungsi merit yang ditentukan. Maka perhitungan dengan metode refinement diperlukan.

Untuk kemudahan program, daerah pengukuran panjang gelombang akan dibuat tetap antara 350 nm sampai 800 nm, dengan interval 10 nm. Hal ini berarti ada 46 posisi panjang gelombang dimana transmisi diinginkan. Jika dalam desain coating jumlah layer tidak akan dibuat lebih dari 46 layer, maka program dibuat dengan refining horizontal.

3.4. Algoritma Desain Program

Algoritma program desain coating optik yang dikombinasikan dengan metode Refinement diperlihatkan seperti gambar 5.

Ketika nilai fungsi merit hasil perhitungan genetik lebih kecil dari target yang ditentukan, maka program akan berhenti karena solusi telah ditemukan. Tetapi jika sampai akhir generasi, nilai fungsi merit masih lebih besar dari target, maka metode refinement dipergunakan.

Penjelasan untuk setiap tahapan dalam program desain adalah sebagai berikut:

1. **Input data**:
   a. parameter coating:
      - Jumlah layer
      - Ketebalan coating I = [d_{Min}, d_{Max}]
      - Indeks bias J = [n_1, n_2]
      - Reflektansi target
   b. Parameter Genetik
      - Ukuran populasi P(t)
      - Maksimum Generasi
      - Probabilitas rekombinasi $\mathbf{P}_r$
      - Probabiliras mutas $\mathbf{P}_m$
2. **Inisialisasi populasi**: Pembentukan populasi awal
3. **Evaluasi populasi**: Hitung fungsi merit setiap individu dalam populasi
4. **Seleksi**: metode Rangking
5. **Rekombinas**i:
   - Modifikasi rekombinasi diskrit
   - Rekombiansi *Intermediate*
6. **Mutasi**: distribusi normal ditambahkan pada individu yang dimutasi.
7. **Refinement**: refining horizontal

Pseudo-Code: *Desain Algoritma Genetik dan Refinement*

```
Input:
Inisialisasi populasi
Evaluasi popusi
for i = 1 to Generasi
    Seleksi
    Rekombinasi
    Mutasi
    if Fungsi Merit ≤ target then
      end program
    else
      next Generasi
end
Refinement
end
```

Gambar 5: Algoritma program desain

3.5. Desain coating optik 5 layer

Rancangan pertama yang dibuat adalah coating antireleksi 5 layer dalam daerah tampak. Target disain ditetapkan sebagai sebuah reflektansi yang sama dengan 0.5% ($\mathbf{R}_{rata\text{-}rata}$), dengan reflektansi maksimum $\mathbf{R}_{maksimum}$ = 1.0%, dihitung pada 24 titik yang sama jauhnya dalam daerah panjang gelombang $420 \le \lambda \le 650$ nm. Dua jenis material coating yang dipergunakan adalah OH-5 (n_H=2.05) dan MgF2 (n_L=1.38), serta diasumsikan *nondispersive* dan *nonabsorbing* dalam daerah panjang gelombang yang ditentukan. Material substrate adalah lensa gelas TaFd30 dengan indeks bias n_s= 1.883, dan indeks bias udara dianggap n_i = 1.

Dengan ketebalan coating pada setiap layer antara 10 nm sampai dengan 200 nm, maka pencarian ruang dalam desain dapat dinyatakan sebagai: I = [10, 200] dan J = [2.05, 1.38]. Semua perhitungan dilakukan dengan menganggap sudut sinar datang *normal incident*.

Dalam hal parameter genetik, fungsi merit yang dipergunakan dalam desain program memiliki toleransi 0.1 untuk setiap panjang gelombang. Probabilitas rekombinasi dan mutasi berturut-turut adalah 80% dan 20%. Karena sangat sulit untuk menetapkan kriteria konvergensi, maka diputuskan untuk menentukan jumlah maksimum generasi 2000, dengan jumlah individu dalam populasi adalah 100.

3.6. Desain coating optik 8 layer

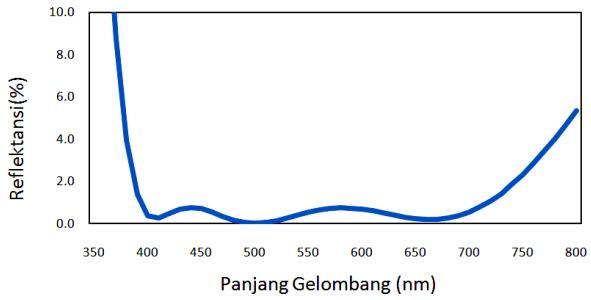
Rancangan desain kedua adalah coating antirefleksi 8 layer. Target desain ditetapkan sebagai sebuah reflektansi yang sama dengan 0.8% ($\mathbf{R}_{rata\text{-}rata}$), dengan reflektansi maksimum $\mathbf{R}_{maksimum}$ = 1.0%, dihitung pada 39 titik yang sama jauhnya dalam daerah panjang gelombang 470≤λ≤850 nm. *Incident medium* adalah udara dan dan substrate adalah lensa gelas FK5 dengan indeks bias ns = 1.47. Material coating yang dipergunakan sama dengan desain pertama yaitu OH-5 (n_H=2.05) dan MgF2 (n_L=1.38).

Dengan ketebalan coating pada setiap layer 10 nm sampai dengan 200 nm, maka pencarian ruang E dapat dinyatakan sebagai: I = [10, 200] dan J = 2.05, 1.38].

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Coating optik 5 layer

Hasil perhitungan desain dalam daerah panjang gelombang yang ditentukan, diperlihatkan seperti pada gambar 6.



Gambar 6: Hasil desain coating 5 layer

Reflektansi rata-rata pada 24 titik panjang gelombang yang sama jauhnya dalam daerah 420≤λ≤650 nm adalah 0.450%, dengan reflektansi maksimum 0.775% (pada 440 nm) dan minimum 0.012% (pada 500%). Hasil ini sangat memuaskan, karena dapat memenuhi target desain yang telah ditetapkan.

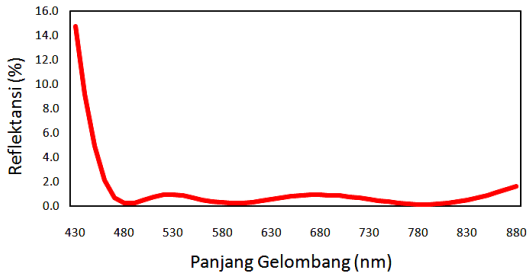
Tabel 1. Parameter konstruksi desain 5 layer

Layer	Material	n	d(nm)	nd(nm)
substrate	TaFd30	1.883	-	-
1	MgF_2	1.38	48.23	66.56
2	OH-5	2.05	22.77	46.68
3	MgF_2	1.38	52.26	72.12
4	OH-5	2.05	134.41	275.54
5	MgF_2	1.38	93.81	129.46
Air	-	1.00		
Σ nd(nm)		-		589.36
Fungsi Merit		0584	[setelah refinement]	
Rata-rata reflektansi		0.450%	[420 ≤ λ ≤ 650nm]	

Indeks bias dan ketebalan untuk setiap layer hasil perhitungan, total *optical thickness*, serta fungsi merit diperlihatkan dalam parameter konstruksi seperti pada table 1. Dengan memberkan panjang gelombang desain λ_0 = 520 nm, ekspresi desain dapat dinyatakan dengan: TaFd30|0.512**L** 0.359**H** 0.555**L** 2.120**H** 0.996**L** |udara.

4.2. Coating optik 8 layer

Spektrum hasil perhitungan desain dalam daerah panjang gelombang yang ditentukan, diperlihatkan seperti pada gambar 7.



Gambar 7: Hasil desain coating 8 layer

Reflektansi rata-rata pada 39 titik panjang gelombang yang sama jauhnya dalam daerah 470≤λ≤850 nm adalah 0.542%, dengan reflektansi maksimum 0.934% (pada 530 nm) dan minimum 0.144% (pada 790 nm). Hasil ini sangat memuaskan karena memenuhi target desain yang ditentukan.

Parameter konstruksi desain diberikan pada table 2. Sedangkan ekspresi desain dengan λ_0 adalah 520 nm dapat dinyatakan sebagai berikut: FK5|1.151**L** 2.771**H** 0.382**L** 0.654**H** 0.606**L** 0.408**H** 0.340**L** 0.201**H**|udara.

Tabel 2. Parameter Konstruksi desain 8 layer

Layer	Material	n	d(nm)	nd(nm)
substrate	FK5	1.48	-	-
1	OH-5	2.05	12.74	26.12
2	MgF_2	1.38	32.02	44.19
3	OH-5	2.05	25.85	52.99
4	MgF_2	1.38	57.05	78.73
5	OH-5	2.05	41.49	85.05
6	MgF_2	1.38	35.96	49.62
7	OH-5	2.05	175.74	360.27
8	MgF_2	1.38	108.42	149.62
Air	-	1.00		
Σ nd(nm)		-		846.59
Fungsi Merit		0.895	[setelah refinement]	
Rata-rata reflektansi		0.542%	[470 ≤ λ ≤ 850nm]	

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Algoritma Genetik yang dikombinasikan dengan metode *Refinement* dapat dipergunakan untuk desain coating thin-film optik dengan hasil yang sangat memuaskan. Walaupun hanya coating antirefleksi yang diujicobakan, metode ini dapat dipergunakan untuk sistem optik lainnya seperti *optical filter*, *beam splitter* dan *high reflector*.

REFERENSI

[1] R. E. Fischer, B. Tadic-Galeb, *Optical System Design*, McGraw-Hill, New York 2000.

[2] J-M Yang, C.-Y Kao, "Efficient evolutionary algorithm for the thin-film of inhomogeneous optical coating," *Appl. Opt.*, 2001, vol. 40, pp. 3256-3267.

[3] Li Li and J. A. Dobrowolski, "Computation speeds of different optical thin-film synthesis methods," *Appl. Opt.*, 1992, vol. 31, pp. 3790-3799.

[4] S. Martin, J. Rivory, M. Schoenauer, "Simulated Darwinian evolution of homogeneous multilayer systems: a new method for optical coating design,"Opt. Commun., 1994, vol. 110, pp. 503-506.

[5] R. J. W. Hodgson, "Memetic algorithm approach to thin-film optical coating design," a lecture, Department of Physics, University of Ottawa, Canada, 2002.

[6] Jinsong Li, Ying Fang dan Xiumin Gao,"Genetic Algorithm used in Interference filter's design", In Proc. Of SPIE, 2009, vol. 7506, 75062C-1.

[7] Roberto Li Voti,"Optimization of Transparent Metal Structures by Genetic Algorithms", Romanian Report in Physics, 2012, vol. 64, No.2, P. 446 – 466.

[8] A. V. Tikhonravov, J. A. Dobrowolski. "Quasi-optimal synthesis for antireflection coatings: a new method," *Appl. Opt.*, 1993, vol. 32, pp. 4265-4275.

[9] OCLI-Optical Coating Laboratory, Inc., "antireflection Coatings: for infrared application, 1998.

[10] A. Thelen, *Design of optical interference coatings*, McGraw-Hill, New York 1989.

[11] M. Dianati, I. Song, M. Treiber, "An introduction to genetic algorithms and evolution strategies," a lecture, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2003.

[12] D. E. Goldberg, "Genetic and evolutionary algorithms in real world," Department of Gen. Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, March 1999.

[13] P. G. Verly, a. V. Tikhonravov, M. K. Trubetskov, " Efficient refinement algorithm for synthesis of inhomogeneous optical coatings," *Appl. Opt.*, 1997, vol. 36, pp. 1487-1495.