

BAB 3

METODE PENELITIAN

Bab ini membahas metode yang digunakan untuk menentukan penjadwalan penerbangan Bandara Halim Perdana Kusuma Kota Jakarta dengan mengaplikasikan penyelesaian menggunakan Algoritma Genetika. Langkah penyelesaian dimulai dengan mengidentifikasi dan mendeskripsikan masalah, lalu mengonstruksi model optimisasi dengan mendefinisikan himpunan, parameter, variabel, dan diakhiri dengan menyelesaikan model optimisasi tersebut menggunakan Algoritma Genetika.

3.1 Deskripsi Masalah

Dari penelitian ini membahas masalah penyusunan jadwal penerbangan di Bandara Halim Perdana Kusuma. Terdapat sekumpulan jadwal yang diberikan oleh maskapai ke suatu bandara. Jadwal tersebut terdiri dari maskapai, kode pesawat tiap maskapai, jam keberangkatan, jam kedatangan, dan tujuan penerbangan. Jadwal yang berada di Bandara Halim Perdana Kusuma terdiri dari penerbangan domestik dan internasional. Dalam satu hari kurang lebih terjadi sebanyak 94 penerbangan kedatangan dan 99 penerbangan keberangkatan, sehingga di Bandara Halim Perdana Kusuma ini selalu ramai konsumen. Dalam kedatangan dan keberangkatan tentu perlu adanya landasan pacu (*runaway*), jumlah yang dimiliki oleh Bandara Halim Perdana Kusuma sebanyak satu, sehingga perlu diperhatikan dengan baik agar penjadwalan bisa dilakukan dengan maksimal. Dari banyaknya peminat konsumen melakukan penerbangan dalam negeri maupun luar negeri, penjadwalan di bandara harus dilakukan sebaik mungkin. Namun, penjadwalan di seluruh bandara tidak heran jika mengalami banyak permasalahan, salah satunya terjadi di Bandara Halim Perdana Kusuma. Penjadwalan sering mengalami waktu tunggu penerbangan hingga pembatalan langsung dari pihak maskapai, sehingga merugikan banyak pihak mulai dari konsumen, maskapai, dan pihak bandara sehingga tidak memaksimalkan slot waktu keberangkatan penerbangan. Dari permasalahan

tersebut perlu dilakukan penjadwalan ulang sehingga diharapkan memiliki penjadwalan yang efektif dan efisien.

Pada bab ini akan diturunkan model optimisasi masalah penjadwalan penerbangan di Bandara Halim Perdana Kusuma. Model tersebut dibangun untuk mengoptimalkan banyaknya kendala yang dipenuhi oleh jadwal yang dibentuk. Masalah penjadwalan penerbangan akan dimodelkan dalam bentuk model optimisasi penjadwalan. Selanjutnya, model tersebut akan diselesaikan dengan logika dari Algoritma Genetika.

3.2 Model Matematika untuk Algoritma Genetika Jadwal Penerbangan

Pada bagian ini dilakukan tahapan mengonstruksi model optimisasi untuk mengoptimalkan slot yang ada pada bandara berdasarkan permasalahan dan data yang diperoleh. Model optimisasi dibangun berdasarkan referensi konsep dasar optimisasi kombinatorial dan penjadwalan yang telah ada dengan memperhatikan beberapa asumsi, yakni:

1. Slot waktu keberangkatan bandara yang disertakan dalam penelitian ini sebanyak 68.
2. Waktu yang dibutuhkan pesawat untuk proses kedatangan dan berangkat adalah tetap.
3. Kapasitas slot waktu di bandara adalah tetap. Kapasitas ini mencakup ketersediaan landasan pacu, terminal, dan sumber daya lainnya.
4. Tingkat kontribusi pesawat adalah tetap pada setiap slot waktu. Dikarenakan keterbatasan data yang dimiliki, sehingga pada permasalahan ini biaya tidak diikutsertakan tetapi data waktu pada fungsi *fitness*. Biaya kontribusi yang dimaksud adalah seberapa menguntungkannya penjadwalan pesawat tersebut dengan pertimbangan biaya operasional pesawat (bahan bakar dan awak pesawat) dari fungsi *fitness* dan slot waktu yang banyak diinginkan memiliki keuntungan yang sangat besar.
5. Pesawat dapat dijadwalkan untuk penerbangan kembali pada hari yang sama.

6. Tidak ada ketidakpastian atau gangguan diluar jangkauan, seperti keterlambatan karena cuaca buruk sampai pembatalan penerbangan dari pihak maskapai.

Dalam mengonstruksi model, perlu didefinisikan himpunan, parameter serta variabel yang terlibat. Pada penyelesaian mengoptimalkan slot bandara ini himpunan yang digunakan adalah sebagai berikut:

- I : himpunan pesawat, dengan n adalah jumlah pesawat yang akan dijadwalkan.
- T : himpunan slot waktu, dengan m adalah jumlah slot waktu yang tersedia.

Adapun parameter yang digunakan adalah sebagai berikut:

- d_i : waktu yang dibutuhkan pesawat i pada slot waktu t .
- A : kapasitas maksimum bandara
- M : bilangan bulat yang besar, yang digunakan dalam penanganan kendala bentok

Variabel keputusan dari model optimasi didefinisikan sebagai berikut:

$$x_{it} = \begin{cases} 1, & \text{jika pesawat } i \text{ dijadwalkan pada slot waktu } t \\ 0, & \text{yang lainnya.} \end{cases}$$

Fungsi tujuan dari model optimisasi adalah sebagai berikut:

Meminimumkan:

$$Z_1 = \sum_i \sum_t \max \{0, t - 1\} X_{it} + \sum_i \sum_j \sum_t |X_{it} - X_{jt}|$$

di mana:

- $\sum_i \sum_t \max \{0, t - 1\} X_{it}$ adalah keterlambatan total dari alokasi slot waktu. Fungsi $\max \{0, t - 1\}$ menentukan keterlambatan relatif antara waktu kedatangan pesawat i dan slot waktu t .
- $\sum_i \sum_j \sum_t |X_{it} - X_{jt}|$ adalah dispersi total dari alokasi slot waktu yang mengukur seberapa seragam penyebaran pesawat di seluruh slot waktu.

Kendala-kendala dari model optimisasi penjadwalan penerbangan adalah sebagai berikut.

1. Setiap pesawat harus dijadwalkan minimal satu pada slot waktu

$$\sum_t X_{it} \geq 1, \quad \forall i \in I$$

2. Keterbatasan kapasitas bandara pada setiap slot waktu

$$\sum_i d_i X_{it} \leq A, \quad \forall t \in T$$

3. Tidak boleh slot waktu yang digunakan oleh lebih dari satu pesawat.

$$\sum_i \sum_j d_i X_{it} + d_j X_{jt} \leq M(1 - X_{it} - X_{jt}), \quad \forall t, i \neq j$$

Batasan variabel model adalah bahwa variabel bernilai biner. Batasan ini dituliskan sebagai berikut:

$$x_{it} \in \{0,1\}.$$

Berdasarkan uraian di atas diperoleh model optimasi masalah penjadwalan di bandara adalah sebagai berikut:

Memaksimumkan:

$$Z_1 = \sum_i \sum_t \max \{0, t - 1\} X_{it} + \sum_i \sum_j \sum_t |X_{it} - X_{jt}|$$

Terhadap:

$$\sum_t X_{it} = 1, \quad \forall i \in I$$

$$\sum_i d_i X_{it} \leq A, \quad \forall t \in T$$

$$\sum_i \sum_j d_i X_{it} + d_j X_{jt} \leq M(1 - X_{it} - X_{jt}), \quad \forall t, i \neq j$$

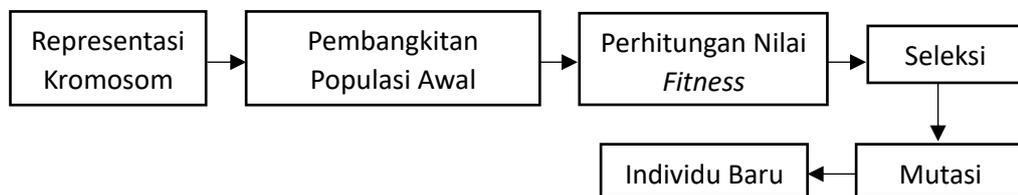
$$x_{it} \in \{0,1\}.$$

Pada bagian selanjutnya dari bab ini akan dibahas penyelesaian model optimisasi dengan menggunakan Algoritma Genetika.

3.3 Penyelesaian Jadwal Penerbangan dengan Algoritma Genetika

Penjadwalan penerbangan termasuk dalam golongan jenis *timetabling*. Permasalahan *timetabling* dapat digolongkan sebagai *NP-Hard Problem* (*Nondeterministic Polynomial Time*). Jika seluruh alternatif solusi dari *NP-Hard*

Problem dicobakan untuk diuji, maka waktu yang dibutuhkan untuk mencari solusi yang *feasible* dari permasalahan akan meningkat tajam. Oleh karena itu, penyelesaian permasalahan optimasi akan sulit dilakukan dengan menggunakan metode optimasi konvensional sehingga diperlukan metode-metode alternatif untuk menyelesaikan *NP-Hard Problem*. Pada penelitian ini, masalah penjadwalan penerbangan akan diselesaikan dengan menggunakan Algoritma Genetika. Secara ringkas, langkah kerja Algoritma Genetika dalam pembangunan penjadwalan penerbangan digambarkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Langkah Kerja GA dalam Satu Generasi

3.3.1 Representasi Kromosom pada Penjadwalan Penerbangan

Pada penelitian ini, penulis mengasumsikan bahwa banyaknya slot waktu setiap hari pada bandara adalah sama. Solusi masalah penjadwalan penerbangan adalah jadwal penerbangan bagi setiap kode penerbangan yang ada. Solusi ini akan direpresentasikan sebagai kromosom. Dalam penelitian ini, kromosom direpresentasikan dalam bentuk pengkodean *value encoding* bernilai *integer* dengan angka tidak boleh berulang dalam satu kromosom. Panjang kromosom menyatakan banyaknya kode penerbangan pada bandara dalam 1 hari. Setiap gen dalam kromosom diberi sebuah nilai berupa bilangan yang mewakili jadwal penerbangan. Sebagai contoh, akan dicari pemasangan jadwal keberangkatan pesawat pada satu hari dengan banyaknya jadwal keberangkatan 8, 10 slot waktu keberangkatan dan 10 jadwal kedatangan. Data jadwal kedatangan pada hari yang sama diperlukan dalam menjalankan Algoritma Genetika ini untuk memastikan kendala-kendala yang ada, seperti jadwal yang tidak sesuai dengan ketentuan penerbangan, adanya jadwal penerbangan *delay*, dan sebagainya yang akan dijelaskan lebih lanjut pada perhitungan nilai *fitness*.

Tabel 3.1. Contoh Data Keberangkatan Penerbangan

No.	Kode Penerbangan	Keberangkatan
1.	PO901	Pontianak
2.	SH801	Soekarno-Hatta Jakarta
3.	S701	Semarang
4.	KL601	Kuala Lumpur Sultan Abdul Azziz Shah
5.	SH802	Soekarno-Hatta Jakarta
6.	N501	Natuna Ranai
7.	SH803	Soekarno-Hatta Jakarta
8.	P401	Padang
9.	PO907	Pontianak
10.	SH809	Soekarno-Hatta Jakarta

Jadwal keberangkatan diperlukan untuk membangkitkan populasi awal yang membentuk kromosom-kromosom yang berisi berbagai gen. Sehingga pada contoh kasus ini banyaknya jadwal keberangkatan akan merepresentasikan banyaknya bilangan acak yang tidak boleh berulang sebanyak 1 sampai 10. Berikut Tabel 3.2 yang mendukung penempatan gen jadwal keberangkatan.

Tabel 3.2. Contoh Slot Waktu Keberangkatan Penerbangan

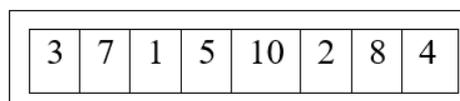
Slot	Waktu
1	06.55
2	08.05
3	08.45
4	09.15
5	10.10
6	10.55
7	11.35
8	12.50

Banyaknya slot waktu diperlukan untuk menempatkan gen yang sudah direpresentasikan oleh banyaknya jadwal penerbangan keberangkatan yang akan disimpan di panjang kromosom. Pada contoh kasus ini panjang kromosom yaitu sebanyak banyaknya slot waktu keberangkatan penerbangan yaitu 8. Berikut Tabel 3.3 untuk mendukung perhitungan nilai fitness sehingga Algoritma Genetika bisa berjalan dengan baik.

Tabel 3.3. Contoh Data Kedatangan Penerbangan

No.	Kode Penerbangan	Kedatangan	Waktu
1.	PO901	Pontianak	10.00
2.	SH801	Soekarno-Hatta Jakarta	09.15
3.	S701	Semarang	10.45
4.	KL601	Kuala Lumpur Sultan Abdul Azziz Shah	11.15
5.	SH802	Soekarno-Hatta Jakarta	15.10
6.	N501	Natuna Ranai	14.55
7.	SH803	Soekarno-Hatta Jakarta	18.35
8.	P401	Padang	14.50
9.	SH804	Soekarno-Hatta Jakarta	15.30
10.	KN301	Kuala Namu Medan	16.10

Sebagai contoh representasi kromosom dengan banyaknya slot waktu keberangkatan sebanyak 10 pada suatu bandara dalam 1 hari. Contoh representasi kromosom dari data penerbangan di atas dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Contoh Representasi Kromosom

Representasi urutan gen untuk kromosom pada Gambar 3.2 menyatakan bahwa slot waktu pertama dijadwalkan pada kode penerbangan ke-3, kode penerbangan kedua pada slot waktu ke-7, dan seterusnya, lebih detailnya akan direpresentasikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Contoh Representasi Kromosom Pada Slot Waktu

Slot	Kode Penerbangan	Tujuan	Waktu
1	S701	Semarang	06.55
2	SH803	Soekarno-Hatta Jakarta	08.05
3	PO901	Pontianak	08.45
4	SH802	Soekarno-Hatta Jakarta	09.15
5	SH809	Soekarno-Hatta Jakarta	10.10
6	SH801	Soekarno-Hatta Jakarta	10.55
7	P401	Padang	11.35
8	KL601	Kuala Lumpur Sultan Abdul Azziz Shah	12.50

3.3.2 Penentuan Parameter Algoritma Genetika

Algoritma Genetika bekerja bergantung dari beberapa nilai parameter yang harus ditetapkan diawal proses. Parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

1. Banyaknya generasi (*iterasi*)

Banyaknya jumlah iterasi satu siklus reproduksi Algoritma Genetika berupa seleksi, *crossover*, dan mutasi yang tiap generasinya menghasilkan solusi permasalahan.

2. Ukuran populasi awal

Banyaknya jumlah individu solusi yang akan diproses bersama dalam satu satuan siklus evolusi.

3. Peluang *crossover*

Parameter penentu jumlah gen dalam populasi yang mengalami *crossover* atau tidak. Peluang *crossover* diambil pada rentang $[0,1]$.

4. Peluang mutasi

Parameter penentu jumlah gen dalam populasi yang mengalami mutasi atau tidak. Peluang mutasi diambil pada rentang $[0,1]$.

3.3.3 Pembangkitan Populasi Awal pada Penjadwalan Penerbangan

Pada generasi awal atau generasi ke-0, dilakukan pembangkitan kromosom secara acak sebanyak ukuran populasi. Dengan jumlah atau banyaknya populasi awal dapat ditentukan terlebih dahulu melalui berbagai cara. Pada setiap pembentukan kromosom, urutan kode penerbangan dipilih secara acak untuk ditempatkan pada gen yang tersedia dengan angka yang tidak berulang pada satu individu.

3.3.4 Menghitung Nilai *Fitness* pada Penjadwalan Penerbangan

Kromosom yang dibangkitkan dari tahapan sebelumnya hanya untuk menjadwalkan jam keberangkatan penerbangan saja. Oleh karena itu, kromosom tersebut masih memungkinkan menghasilkan jadwal yang bentrok dengan jam jadwal penerbangan lain, waktu tunggu pesawat untuk terbang pada jadwal berikutnya, waktu tunda (*delay*) disebabkan harus menunggu jadwal kedatangan terlebih dahulu namun jam keberangkatan sudah tercantum pada jadwal, ketidaksesuaian jadwal keberangkatan dengan kedatangan, dan durasi antara jam keberangkatan dengan kedatangan. Sebagai contoh akan dijelaskan sebagai berikut:

1. Ketidaksesuaian jam keberangkatan dan kedatangan

Untuk setiap penerbangan yang menggunakan maskapai dan pesawat yang sama, maka berangkat dan kedatangan tidak diperbolehkan bentrok. Sebagai contoh adalah jadwal pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5. Contoh Kesalahan Jadwal Penerbangan

Kode Penerbangan	Tujuan	Keberangkatan	Kedatangan
S701	Semarang	10.00	06.55
N501	Natuna Ranai	08.00	08.05

Kode penerbangan S701 memiliki kesalahan waktu keberangkatan dan kedatangan tidak sesuai, karena penjadwalan pada permasalahan ini dilakukan hanya satu hari. Demikian juga dengan kode penerbangan N501 memiliki kesalahan karena tidak mungkin keberangkatan ke suatu tujuan hingga kembali ke bandara yang sama membutuhkan waktu 5 menit.

Penambahan untuk kasus ini jika pesawat yang digunakan sama akan memiliki nilai *fitness* negatif -100, namun jika pesawat yang sama melakukan penerbangan di hari yang sama, maka akan dihitung selisih negatif dari waktu pesawat itu melakukan keberangkatan pertama dalam satuan menit.

2. Bentrok antara keberangkatan dan kedatangan

Waktu jeda ini harus dilakukan setiap pesawat yang sama untuk menjalani pemeriksaan teknis, perawatan rutin, dan persiapan lainnya sebelum kembali beroperasi. Waktu yang dilakukan bersikar beberapa jam hingga lebih dari setengah hari. Jika pada penjadwalan dilakukan pelanggaran ini maka akan diberikan penalti sebesar 1. Misal pada contoh Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Contoh Jeda Waktu Jam Keberangkatan dan Kedatangan

Kode Penerbangan	Tujuan	Pesawat	Keberangkatan	Kedatangan
S701	Semarang	1	10.00	12.55
N501	Natuna Ranai	1	12.55	14.10

Kode penerbangan S701 dengan N501 melakukan penerbangan dengan pesawat dan hari yang sama, namun pada contoh di atas dilakukan pelanggaran karena jam kedatangan dengan keberangkatan berikutnya pesawat tidak melakukan istirahat terlebih dahulu. Istirahat yang diperlukan pesawat untuk melakukan penerbanga berikutnya minimal 4-5 jam hingga berhari-hari.

3. Durasi kedatangan dengan keberangkatan

Durasi ini dihitung mulai dari pesawat melakukan kedatangan atau keberangkatan terlebih dahulu dengan menghitung jam dan menit yang akan disatukan satuannya menjadi menit. Maka bobot di nilai *fitness* yang dipakai adalah bilangan bulat positif dimana selisih antara kedatangan dengan keberangkatan pesawat itu.

Hal penting selanjutnya yang perlu dilakukan dalam Algoritma Genetika adalah pemilihan kromosom untuk menghasilkan keturunan berikutnya. Pemilihan ini berdasarkan nilai kesesuaian atau yang biasa dikenal dengan nilai *fitness*. Selain untuk menyatakan baik atau buruknya suatu individu solusi, nilai *fitness* ini juga dijadikan acuan dalam mencapai nilai optimal. Nilai *fitness* pada masalah penjadwalan penerbangan adalah meminimumkan pelanggaran kendala dan dapat dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7. Komponen Nilai *Fitness*

Pelanggaran <i>constraint</i>	Simbol	<i>Fitness</i>
Ketidaksesuaian jadwal keberangkatan dan kedatangan	$h1$	-100 sampai 0
Bentrok antara keberangkatan dan kedatangan	$h2$	-200
Durasi Kedatangan dengan Keberangkatan	$h3$	Bilangan Bulat Positif

Dengan demikian, fungsi *fitness* dari suatu kromosom adalah sebagai berikut:

$$f = \sum h1 + h2 + h3$$

Dengan demikian, semakin tinggi nilai *fitness* maka semakin baik kromosom untuk dijadikan solusi.

3.3.5 Seleksi Parent pada Penjadwalan Penerbangan

Proses seleksi bertujuan untuk mendapatkan calon induk yang baik untuk dilanjutkan pada proses selanjutnya yakni proses *Crossover* atau perkawinan silang. Pada penelitian ini, penulis akan menggunakan metode seleksi *Roulette Wheel*. Berdasarkan langkah-langkah yang telah dicantumkan di Bab II, proses seleksi untuk kasus di atas dilakukan dalam tahapan berikut:

1. Hitung nilai *fitness* masing-masing individu dari individu 1 hingga individu ke- n ;

2. Hitung total nilai *fitness* semua individu;

$$fitness\ total = \sum_{i=1}^n f_i, i = 1, 2, 3, \dots, n$$

3. Hitung probabilitas masing-masing individu;

$$y_i = \frac{f_i}{fitness\ total}, i = 1, 2, 3, \dots, n$$

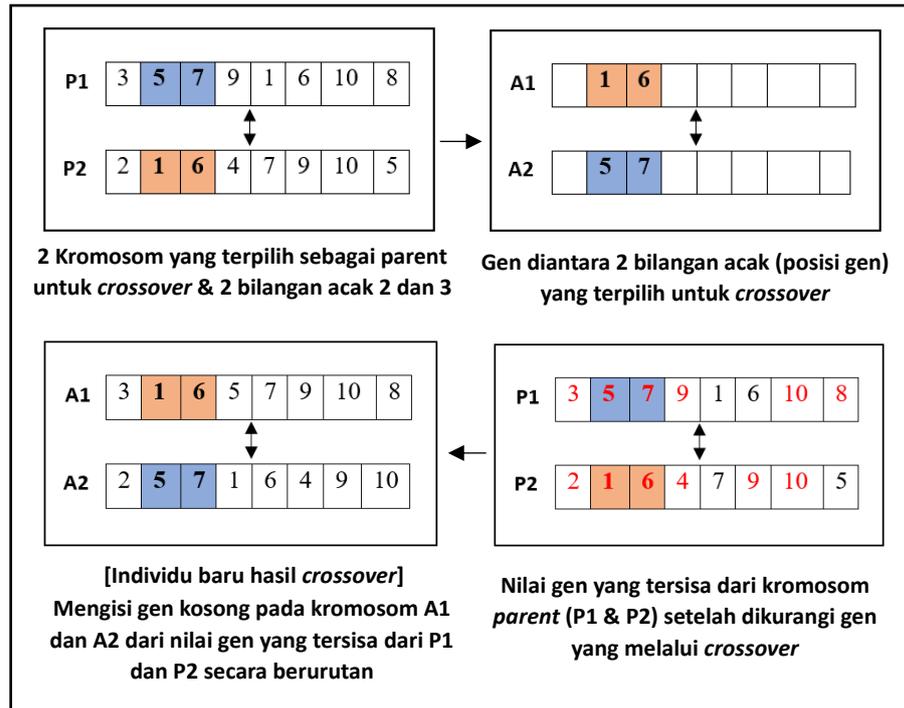
4. Dari probabilitas tersebut, tentukan peluang kumulatif masing-masing individu pada angka 0 sampai 1;
5. Bangkitkan bilangan random antara 0-1;
6. Dari bilangan random yang dibangkitkan, tentukan individu mana yang terpilih dalam proses seleksi.

3.3.6 *Crossover* pada Penjadwalan Penerbangan

Metode dan tipe *crossover* yang dilakukan tergantung pada *encoding* dan permasalahannya. Karena penelitian ini menggunakan *value encoding* integer yang setiap kromosomnya tidak boleh ada angka yang sama, maka metode *crossover* yang akan digunakan adalah *order crossover (OX)*. Proses perkawinan silang untuk kasus di atas adalah sebagai berikut:

- 1) Tentukan dua individu induk yang akan melalui *crossover*;
- 2) Bangkitkan bilangan acak antara 0 dan 1;
- 3) Apabila bilangan acak tersebut kurang dari nilai probabilitas *crossover* (*crossover rate/cr*) maka proses *crossover* dapat dilanjutkan. Jika nilainya lebih besar atau sama dengan *cr*, maka ulangi langkah 1;
- 4) Selanjutnya bangkitkan 2 bilangan acak pada rentang 1 sampai banyaknya gen;
- 5) Buat kromosom kosong sebagai anak 1 dan anak 2;
- 6) Tempatkan gen yang berada diantara 2 bilangan acak pada induk 1 ke anak 2 dan induk 2 ke anak 1;
- 7) Sempurnakan kromosom dengan mengisi bagian kosong dengan gen yang belum termuat secara urut pada kromosom induk ke kromosom anak.

Langkah-langkah *crossover* lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.3.

Gambar 3.3 Contoh Ilustrasi *Crossover*

Jika pada anak ada dua angka yang sama dalam satu kromosom, maka langkah 4 diulangi sampai mendapatkan anak yang setiap gen memiliki angka yang berbeda-beda. Setelah melakukan ketujuh langkah tersebut, nilai *fitness* setiap kromosom anak dihitung secara langsung untuk menentukan nilai *mr* kromosom.

3.3.7 Mutasi pada Penjadwalan Penerbangan

Setelah melalui *crossover*, seluruh individu baru yang dihasilkan akan melalui tahap mutasi. Tahap ini juga berguna untuk menggantikan gen yang hilang dari populasi akibat proses seleksi. Terdapat beberapa cara yang dapat digunakan untuk melakukan mutasi berdasarkan metode *encoding*-nya. Metode mutasi yang akan digunakan adalah *swap mutation*. Berdasarkan langkah-langkah yang telah dicantumkan di Bab II, proses *swap mutation* adalah sebagai berikut:

1. Tentukan kromosom yang akan melalui proses mutasi;
2. Tentukan nilai *mr* kromosom dengan aturan persamaan berikut:

$$mr_{kromosom} = \text{nilai awal } mr$$

3. Bangkitkan bilangan acak antara 0 dan 1;
4. Apabila bilangan acak tersebut kurang dari nilai probabilitas mutasi (*mutation rate/mr*) maka proses mutasi dapat dilanjutkan. Jika nilainya lebih besar atau sama dengan *mr*, maka ulangi langkah 1;
5. Selanjutnya bangkitkan 2 bilangan acak pada rentang 1 sampai banyaknya gen; Dua bilangan tersebut merepresentasikan posisi gen yang akan ditukar;
6. Tukar nilai gen dengan urutan terpilih pada langkah kelima.

3.3.8 Evaluasi Algoritma Genetika pada Penjadwalan Penerbangan

Evaluasi pada individu dilakukan untuk menentukan individu terbaik yang akan digunakan dalam menghasilkan keturunan generasi berikutnya. Generasi berikutnya diambil dari urutan nilai *fitness* terbaik sebanyak populasi yang diambil pada generasi ke-0. Iterasi generasi pada Algoritma Genetika akan terus berlangsung hingga terpenuhi kondisi berhenti (*termination condition*). Kondisi berhenti yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah iterasi berhenti sampai generasi maksimum yang telah ditentukan.