

## ROUTING OTOMATIS BERBASIS ALGORITMA GENETIK UNTUK PENGELOLAAN TANGGAP DARURAT BENCANA

Moh. Tofa Nurzaki<sup>1</sup>, Wijanarto<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Dian Nuswantoro  
Jl. Nakula 1 No 5-11 Semarang 50131 (024) 3569196  
E-mail : tofa.zakie@gmail.com<sup>1</sup>, wijanarto.udinus@gmail.com<sup>2</sup>

---

### **Abstrak**

Penanganan situasi darurat yang cepat dan tepat sangat dibutuhkan untuk meminimalisir resiko yang terjadi. Keterlambatan penanganan situasi darurat yang terjadi menyebabkan banyak kerugian materi bahkan jiwa. Tindakan penanganan situasi darurat dapat dilakukan setelah adanya laporan. Kecepatan, ketepatan, dan keakuratan informasi laporan sangat dibutuhkan untuk menentukan tindak penanganan yang tepat. Petugas yang menangani situasi darurat yang terjadi seringkali disulitkan dalam menemukan lokasi tepat tempat kejadian dan menentukan rute tercepat menuju tempat kejadian. Dengan demikian, diperlukan sistem yang mampu digunakan untuk melaporkan dan merespon situasi darurat yang terjadi. Hal inilah yang menjadi dasar penelitian. Penelitian dilakukan dengan mengembangkan sistem berbasis teknologi GIS, GPS, GSM dan Android. Proses pencarian rute menggunakan Algoritma Genetika untuk mendapatkan rute yang optimal. Melalui sistem ini proses pelaporan dan penanganan situasi darurat dapat lebih mudah dan lebih cepat dilakukan. Algoritma Genetika dapat menghasilkan rute yang efektif menuju titik tujuan. Namun, rute yang dihasilkan tidak selalu rute yang terpendek. Dengan demikian, diperlukan peningkatan optimasi pada Algoritma Genetika ini agar dapat menghasilkan rute yang lebih optimal.

**Kata Kunci:** Otomatisasi, Algoritma Genetik, Tanggap Darurat, Bencana

### **Abstract**

Handling emergency situations quickly and accurately is necessary to minimize the risk that happening. Delays in handling emergency situations that occur causing much loss of life even matter. Action handling emergency situations can be done after the reports. Speed, precision, and accuracy of reporting information is needed to determine appropriate follow-handling. Officers who handle emergency situations that occur frequently made difficult in finding the exact location of the scene and determine the fastest route to the scene. Thus, it is necessary that the system can be used to report and respond to emergency situations that occur. This is the basic research. Research carried out by developing a system based on GIS technology, GPS, GSM and Android. The search process using genetic algorithm to obtain the optimal route. Through this system the process of reporting and handling of emergency situations can be more easily and more quickly done. Genetic algorithms can produce an effective route towards the destination point. However, the resulting route is not always the shortest route. Thus, the required improvement in Genetic Algorithm optimization is to produce a more optimal route.

**Keywords:** Automation, Genetic Algorithms, Emergency Response, Disaster

## 1. PENDAHULUAN

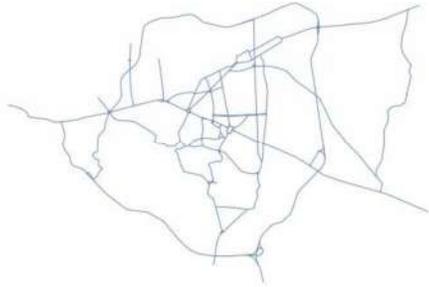
Semarang merupakan ibukota provinsi Jawa Tengah yang terletak pada koordinat  $6^{\circ}50'0''$  -  $7^{\circ}10'0''$  LS sampai  $109^{\circ}35'0''$  -  $110^{\circ}50'0''$  BT dengan luas wilayahnya 373.70 km<sup>2</sup> dan dengan jumlah penduduk mencapai 1.585.417 jiwa serta kepadatan penduduknya mencapai 4.243 jiwa/km<sup>2</sup> [1]. Dengan angka kepadatan penduduk yang tinggi, potensi terjadinya permasalahan semakin besar seperti masalah sosial, kriminalitas, kesehatan, kebakaran, kecelakaan, dan sebagainya [2]. Masalah ini muncul disebabkan berbagai macam faktor seperti kesalahan manusia (*human error*) ataupun kesalahan teknis. Dampak dari masalah yang terjadi seringkali menyebabkan banyak kerugian bagi masyarakat dalam hal materi bahkan jiwa. Untuk menekan kerugian yang ditimbulkan, dapat dilakukan dengan penanganan yang dilakukan secara cepat dan tepat. Dalam melaporkan suatu keadaan darurat yang terjadi, masyarakat sering disulitkan dalam menghubungi petugas. Hal ini dikarenakan banyak masyarakat yang tidak mengetahui nomor panggilan darurat/nomor petugas ERT. Tidak hanya itu, nomor panggilan darurat pun sering mengalami gangguan teknis. Selain itu petugas ERT (*Emergency Responder Team*) seperti polisi, tim medis, dan pemadam kebakaran yang ditugaskan untuk menangani suatu kejadian juga seringkali disulitkan dalam menemukan lokasi pasti tempat kejadian sehingga disulitkan dalam mencari rute terpendek menuju tempat kejadian.

Beberapa studi mengenai emergency response [3] berbasis algoritma genetic sudah dilakukan [4] juga yang berbasis android [5][6] dan aplikasi web server

[7], Sistem pelaporan situasi darurat yang ada saat ini hanya bisa dilakukan melalui panggilan darurat. Dalam kasus kriminalitas dimana korban dalam keadaan terpojok tentu tidak dapat melakukan panggilan darurat. Pelacakan posisi pelapor yang menggunakan telepon seluler memiliki tingkat akurasi 50m – 200m [8]. Tingkat akurasi yang kurang dapat mengakibatkan dampak yang fatal jika lokasi pelapor/korban tidak bisa ditemukan secara akurat/salah. Dalam upaya meminimalisir resiko yang terjadi diperlukan cara yang efektif dan aman dalam melaporkan situasi darurat yang terjadi serta pemetaan tempat kejadian dengan fasilitas layanan darurat terdekat seperti kantor polisi, layanan medis, dan pemadam kebakaran untuk pencarian rute terpendek petugas menuju lokasi kejadian dan fasilitas layanan darurat terdekat. Hal ini bisa dilakukan dengan menanamkan sebuah sistem ke dalam telepon seluler yang mampu mengirimkan laporan situasi darurat yang terjadi beserta lokasinya berdasarkan GPS yang ditanam pada telepon seluler tersebut dengan hanya menggunakan sebuah *trigger* sehingga tidak perlu melakukan panggilan. Melalui sistem ini pula petugas akan dipandu dalam penentuan rute terpendek menuju lokasi kejadian dan fasilitas layanan darurat terdekat.

### a. Peta Jaringan Jalan

Peta yang digunakan adalah peta jaringan jalan kota Semarang yang diperoleh dari Bakosurtanal. Dalam penelitian ini hanya digunakan beberapa sampel jalan saja.. Dibawah ini di tunjukan peta jaringan jalan kota Semarang pada gambar 1



Gambar 1. Peta Jaringan Kota Semarang

### b. Lokasi Fasilitas Layanan Darurat

Lokasi fasilitas layanan darurat seperti kantor polisi, rumah sakit, puskesmas dan pemadam kebakaran diperoleh dari dinas terkait yaitu kepolisian, Dinas Kesehatan, dan Dinas Kebakaran kota Semarang[1][9].

### c. Penentuan Petugas Terdekat

Berdasarkan laporan situasi darurat yang masuk, akan ditentukan petugas terdekat yang akan menerima notifikasi laporan tersebut. Penentuan petugas terdekat ditentukan dengan menghitung jarak petugas menggunakan Euclidian Distance :

$$d(p, q) = \sqrt{(p_1 - q_1)^2 + (p_2 - q_2)^2} \quad (1)$$

d = distance (degree)

p = point 1 (latitude, longitude)

q = point 2 (latitude, longitude)

### d. Algoritma Genetika

Algoritma Genetika [10] akan digunakan untuk menentukan rute terpendek dari pelapor/petugas menuju fasilitas layanan darurat yang dituju, dan petugas menuju lokasi kejadian. Algoritma genetika yang digunakan adalah sebagai berikut[11] :

```

1.Generate initial population
2.gen = 1
3.while (gen <= max_gen) do
4.p = 1
5.while (p <= pop_size) do
6.Obtain chromosome of the new
  population, select two
  chromosomes from the parent

```

```

  population according to cost,
  then apply crossover.
7.Compute the fitness of the new
  offspring F(P)
8.p = p+1
9.end
10.gen = gen + 1
11.end
12.Obtain best solution

```

Berdasarkan penelitian yang sudah pernah dilakukan, ukuran populasi yang digunakan adalah 20 [8] dan ukuran generasi yang digunakan adalah 10.

## 2. METODE

### a. Inisialisasi Populasi

Pembangkitan populasi awal dilakukan secara acak dengan pembangkitan solusi/kromosom/path dari *source* menuju *destination* [12]. *Source* merupakan *edge* terdekat dari koordinat awal. *Destination* merupakan *edge* terdekat dari koordinat tujuan. Contoh : Koordinat asal : POINT (110.40097 - 6.97903)

Koordinat tujuan : POINT (110.42356 - 6.97144)

Source Edge : 171, Destination Edge : 39.

Path yang dibangkitkan adalah :

**Path #1** : 39 - 9 - 11 - 236 - 41 - 43 - 44 - 47 - 52 - 66 - 60 - 61 - 62 - 171.

**Path #2** : 39 - 9 - 11 - 236 - 41 - 43 - 44 - 47 - 52 - 53 - 65 - 61 - 62 - 171.

**Path #3** : 39 - 9 - 11 - 236 - 41 - 43 - 44 - 47 - 52 - 53 - 54 - 55 - 56 - 57 - 63 - 171. **Path #4** : 39 - 9 - 11 - 236 - 40 - 66 - 59 - 49 - 84 - 85 - 226 - 51 - 46 - 47 - 52 - 53 - 54 - 55 - 56 - 57 - 63 - 171.

...

**Path #N** (N = max\_pop)

### b. Evaluasi Nilai Fitness

Evaluasi nilai *fitness* dilakukan dengan menghitung jarak dari titik asal ke titik tujuan. Path terbaik adalah path dengan

cost jarak minimum [13]. Dari contoh sebelumnya diperoleh hasil :

Path #1 : Cost = 3774,61.

Path #2 : Cost = 4352,11.

Path #3 : Cost = 4199,83.

Path #4 : Cost = 6148,11.

...

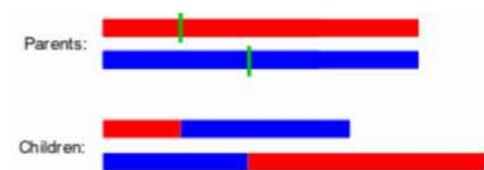
Path #N (N = max\_pop).

### c. Seleksi

Seleksi dilakukan dengan memilih dua path terbaik yang kemudian akan dijadikan sebagai anggota populasi dari generasi selanjutnya. Sedangkan sisanya akan diperoleh dari hasil *crossover* dari path generasi sebelumnya yang selanjutnya disebut *Parent Path (PP)*. Berdasarkan contoh diatas dua path terbaik adalah Path #1 dan Path #3 yang akan kemudian akan di-copy-kan sebagai anggota populasi generasi selanjutnya.

### d. Crossover

Crossover merupakan operator genetika untuk menyilangkan solusi yang ada sehingga diperoleh solusi yang lebih baik. Teknik *crossover* yang digunakan adalah *cut-and-splice* [12], seperti pada gambar 2 berikut



Gambar 2. Cut And Splice Crossover

Pemilihan path yang akan di *crossoceran* dilakukan secara acak. *Crossover* dapat dilakukan jika antara kedua path ditemukan titik potong (*intersection-path*) yang ditandai dengan kedua path memiliki edge yang sama dibagian tengah path. Hasil *crossover* disebut *offspring*. Pada contoh sebelumnya *crossover* dilakukan secara acak. Dalam contoh berikut akan dilakukan pada PP#1 >< PP#4 dan PP#2 >< PP#3.

Sehingga populasi baru yang terbentuk adalah :

**Path #1** : 39 – 9 – 11 – 236 – 41 – 43 – 44 – 47 – 52 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171.

(*copy of best parent path*)

**Path #2** : 39 – 9 – 11 – 236 – 41 – 43 – 44 – 47 – 52 – 53 – 54 – 55 – 56 – 57 – 63 – 171. (*copy of best parent path*)

**Path #3** : 39 – 9 – 11 – 236 – 41 – 43 – 44 – 47 – 52 – 66 – 59 – 49 – 84 – 85 – 226 – 51 – 46 – 47 – 52 – 53 – 54 – 55 – 56 – 57 – 63 – 171. (*offspring PP#1 >< PP#4*)

**Path #4** : 39 – 9 – 11 – 236 – 40 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171. (*offspring PP#1 >< PP#4*)

**Path #5** : 39 – 9 – 11 – 236 – 41 – 43 – 44 – 47 – 52 – 53 – 65 – 61 – 62 – 171. (*offspring PP#2 >< PP#3*)

**Path #6** : 39 – 9 – 11 – 236 – 41 – 43 – 44 – 47 – 52 – 53 – 54 – 55 – 56 – 57 – 63 – 171. (*offspring PP#2 >< PP#3*)

...

Path #N (N = max\_pop)

Dari populasi baru yang terbentuk selanjutnya akan dilakukan perhitungan nilai *fitness*-nya.

PP #1 : Cost = 3774,61.

PP #2 : Cost = 4199,83.

PP #3 : Cost = 3350,58.

PP #4 : Cost = 7813,66.

PP #5 : Cost = 4352,11.

PP #6 : Cost = 4199,83.

...

PP #N (N = max\_pop)

Dua kromosom terbaik akan dipilih dan dari populasi yang terbentuk akan di lakukan *crossover* untuk menghasilkan populasi pada generasi selanjutnya.

### e. Kondisi Terminasi

Kondisi terminasi yang digunakan adalah jika generasi sudah mencapai

jumlah maksimum generasi yang sudah ditentukan diawal. Pada saat generasi sudah mencapai nilai maksimum generasi, proses seleksi tidak memilih dua kromosom terbaik, tetapi satu kromosom terbaik berdasarkan nilai *fitness*-nya. Pada contoh diatas kromosom terbaik yang dihasilkan adalah :

Path : 39 – 9 – 11 – 236 – 40 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171 (*cost* = 3350,58).

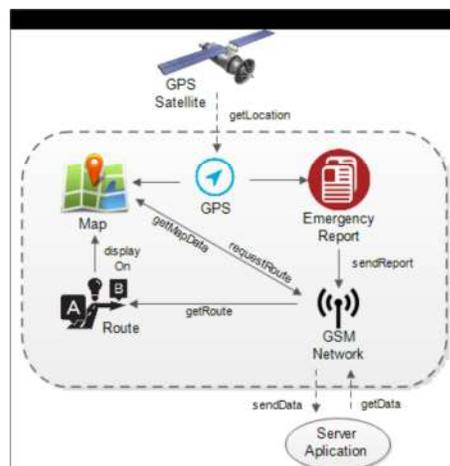
**f. Arsitektur Sistem**

Arsitektur Sistem yang di bangun dalam implementasi adalah sebagai berikut,



**Gambar 3.** Arsitektur Sistem

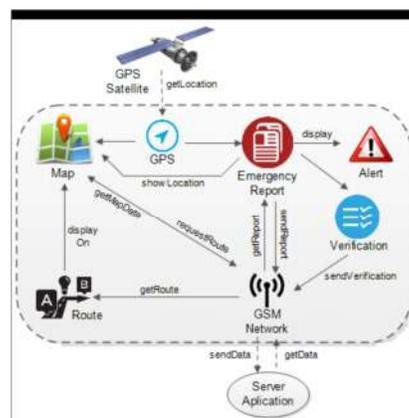
Arsitektur system terdiri dari 5 komponen utama yaitu ClientApp (aplikasi pelapor/masyarakat), ERTApp (aplikasi petugas), GPS, GSM, dan Web Server. Sementara arsitektur pada system client seperti di tunjukan pada gambar 4 berikut,



**Gambar 4.** Arsitektur Client

ClientApp digunakan oleh masyarakat untuk melaporkan situasi darurat yang terjadi. Melalui ClientApp juga dapat menunjukkan fasilitas layanan darurat sekitar lokasi pelapor sekaligus menunjukkan rute menuju fasilitas layanan darurat.

Sementara dari sisi arsitektur ERT (Emergency Responder Team) adalah seperti ditunjukan pada gambar 5 berikut,



**Gambar 5.** Arsitektur ERT

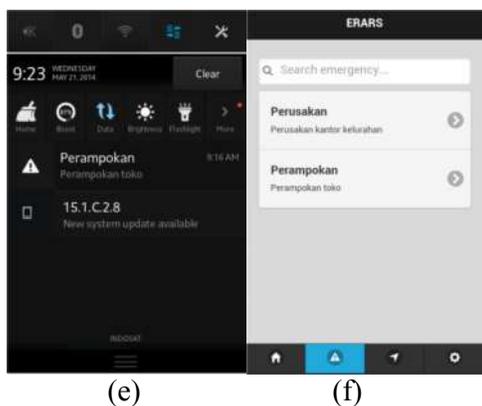
Fungsionalitas ERTApp pada dasarnya sama dengan ClientApp hanya saja memiliki fungsi dapat menampilkan Alert yang dapat memverifikasi laporan yang masuk. GPS dan GIS [14,15,16] merupakan komponen yang digunakan

dalam mendapatkan koordinat posisi. GSM [2] digunakan sebagai media komunikasi bagi ClientApp/ERTApp dan aplikasi web server. Berikut ini screen shoot aplikasi ERARS (Emergency Response And Routing Software).

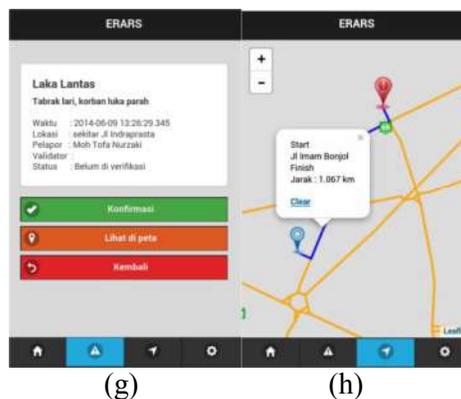


Gambar 6. Antarmuka Client

Pada gambar 6 terdapat (a) Home screen, (b) Emergency Screen, (c) Map Screen dan (d) routing map screen



(e) (f)



Gambar 7. Antarmuka ERT

Pada gambar 7 terdapat (e) Notifikasi screen, (f) List Emergency, (g) Detail Screen dan (h) map screen

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### a. Fungsionalitas sistem

Setelah dilakukan pengujian, sistem yang dikembangkan berfungsi dengan baik sebagaimana semestinya. Output sistem sudah sesuai dengan *requirement* yang telah ditentukan diawal.

#### b. Routing Software Algoritma Genetika

Routing software menggunakan Algoritma Genetika digunakan untuk menentukan rute terpendek dari titik asal pelapor/petugas menuju fasilitas layanan darurat/lokasi kejadian (bagi petugas). Dari beberapa kasus uji yang dilakukan diperoleh beberapa hasil yang tidak sesuai dengan output yang diharapkan. Kasus uji yang dilakukan adalah :

- Source : (110.40925, -6.98155078)
- Destination #1: (110.40749, -6.9933925)
- Destination #2: (110.42450, -6.9720941)
- Destination #3: (110.42876, -6.9685797)
- Destination#4:(110.42169,-6.98906912)
- Destination#5:(110.41890,-6.99654474)

Setiap kasus uji dilakukan pengujian 3 kali untuk memastikan keoptimalan output yang dihasilkan. Output yang diharapkan :

Kasus 1 : 52 – 48 – 49 – 50 – 95 – 97

Kasus 2 : 52 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171

Kasus 3 : 52 - 66 – 60 – 61 – 62 – 171 – 184 – 188 – 190 – 176 – 177

Kasus 4 : 52 – 48 - 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 91 – 92

Kasus 5 : 52 – 48 – 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 127 – 126 – 124 – 123 – 246 – 143

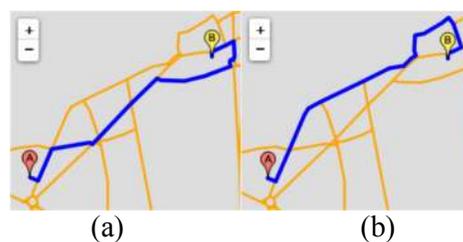
Seperti di tunjukan pada tabel 1 yang menampilkan keberhasilan routing algoritma genetic pada aplikasi.

**Tabel 1:** Hasil Uji Routing Algoritma Genetika

Kasus	Uji ke-	Output	Hasil
#1	1	52 – 48 – 49 – 50 – 95 – 97	Sesuai
	2	52 – 48 – 49 – 50 – 95 – 97	Sesuai
	3	52 – 48 – 49 – 50 – 95 – 97	Sesuai
#2	1	52 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171	Sesuai
	2	52 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171	Sesuai
	3	52 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171	Sesuai
#3	1	52 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171 – 184 – 188 – 190 – 176 – 177	Sesuai
	2	52 – 53 – 54 – 55 – 56 – 58 – 172 – 173 – 174 – 177	Tidak Sesuai
	3	52 – 66 – 60 – 61 – 62 – 171 – 184 – 188 – 190 – 176 – 177	Sesuai
#4	1	52 – 48 - 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 91 –	Sesuai

2	92	52 – 48 - 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 91 – 92	Sesuai
	3	52 – 48 - 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 91 – 92	Sesuai
		1	52 – 48 – 49 – 84 – 86 – 87 – 116 – 118 – 119 – 115 -144 - 143
2		52 – 48 – 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 127 – 126 – 124 – 123 – 246 – 143	Sesuai
	#3	52 – 48 – 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 127 – 126 – 124 – 123 – 246 – 143	Sesuai
		3	52 – 48 – 49 – 84 – 86 – 87 – 88 – 89 – 90 – 127 – 126 – 124 – 123 – 246 – 143

Dari hasil pengujian diatas diperoleh beberapa hasil yang tidak sesuai dengan output yang diharapkan. Pada kasus uji #3 pengujian ke-2 dan kasus uji #5 pengujian ke-1 diperoleh hasil yang berbeda dengan hasil yang diharapkan.



**Gambar 8.** Hasil Uji Kasus #3 (a) Uji 1 dan 3. (b) Uji 2

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa dari pegujian yang dilakukan diperoleh rute yang berbeda. Perbedaan hasil ini dikarenakan perbedaan populasi awal yang dibangkitkan. Semakin baik populasi yang dibangkitkan, semakin optimal pula rute yang dihasilkan.

Selain itu, operator genetika yaitu *crossover* juga berperan penting dalam memperoleh solusi akhir yang dihasilkan.

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Sistem yang dikembangkan dapat digunakan secara efektif dalam proses pelaporan dan merespon situasi darurat yang terjadi. Melalui sistem ini pelapor dapat melaporkan situasi darurat yang terjadi secara cepat dan akurat. Pelaporan lebih mudah dilakukan karena hanya dilakukan dengan menekan *trigger* pada aplikasi yang ditanamkan pada *smartphone* tanpa harus melakukan panggilan darurat. Laporan situasi darurat yang akurat sangat membantu petugas dalam menangani situasi darurat yang terjadi.

Algoritma genetik merupakan metode heuristik yang berdasarkan mekanisme seleksi alam dan evolusi alam yang dimodelkan secara abstrak dalam menyelesaikan suatu masalah. Dari hasil contoh yang dimodelkan di atas, dapat disimpulkan bahwa algoritma genetika mampu menghasilkan rute yang efektif dari titik asal menuju titik tujuan. Namun, rute yang dihasilkan tidak selalu merupakan rute yang terpendek. Hal tersebut dikarenakan perbedaan populasi awal yang dibangkitkan secara acak. Semakin baik populasi awal yang dibangkitkan, semakin optimal rute yang dihasilkan. Untuk meningkatkan fungsionalitas sistem, penambahan fitur kepadatan jalan dapat dilakukan agar solusi yang dihasilkan lebih sempurna. Penambahan fitur upload foto juga dapat dilakukan untuk menambah validitas laporan situasi darurat yang dilaporkan. Untuk meningkatkan kinerja algoritma genetika, diperlukan optimasi pada

pembangkitan populasi awal serta teknik *crossover* yang digunakan agar dapat menghasilkan solusi yang lebih optimal.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Pemerintah Kota Semarang. (2012, Juli) Kondisi Umum Kota Semarang. [Online]. <http://semarangkota.go.id/portal/index.php/article/details/kondisi-umum>. [Accessed 16 September 2013]
- [2] Dr. Henrik Stormer, "GSM Positioning Control," in *Mobile Business*, Switzerland, 2005.
- [3] Haddow, George D, Jane A, Bullock, and Damon P. Coppola, *Introduction to Emergency Management*, 4th ed. Burlington: Elsevier, 2011.
- [4] Naveen R. and G. Devi, "Accident Emergency Response and Routing Software (AERARS) using Genetic Algorithm," *International Journal on Computer Science and Engineering (IJCSE)*, vol. 3, pp. 2835-2845, July 2011.
- [5] Android. (2014) Android Developers. [Online]. <http://www.developer.android.com>. [Accessed 2 April 2014]
- [6] Jovilyn T. B. F and Carlos M. O, "A Mobile Disaster Management System Using the Android Technology," *International Journal on Communication (IJCC)*, vol. 3, pp. 77-86, 2009.
- [7] jQuery Mobile. (2014) A Touch-Optimized Web framework. [Online]. <http://www.jquerymobile.com>. [Accessed 2 April 2014]
- [8] Obitko. (1998) *Introduction to Genetic Algorithm*. [Online]. <http://www.obitko.com/tutorials/g>

- etic-algorithms. [Accessed 22 December 2013]
- [9] Dinas Kesehatan Kota Semarang. <http://www.dinkes-kotasemarang.go.id>. [Accessed 16 September 2013]
- [10] Fadlisyah, Arnawan, and Faisal, *Algoritma Genetik*, 1st ed. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2009.
- [11] Melanie Mitchel, *An Introduction To Genetic Algorithm*, 1st ed. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [12] Russel, J Stuart, and Peter Norvig, *Artificial Intelligent : A Modern Approach*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1995.
- [13] Melanie Mitchel, *An Introduction To Genetic Algorithm*, 1st ed. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [14] Ahmed El-Rabbany, *Introduction to GPS: the Global Positioning System*. Norwood: Artech House, 2002.
- [15] Yagvalkya Sharma et al, "Comparison of Dijkstra's Shortest Path Algorithm with Genetic Algorithm for Static and Dynamic Routing Network," *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 416-425, 2012.
- [16] O. Huisman and Rolf A. de By, *Principles of Geographic Information System*, 4th ed. Enschede: ITC, 2009.