

UNGGULAN UNIVERSITAS



**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN UNGGULAN UNIVERSITAS**

JUDUL PENELITIAN

**PEMODELAN MATEMATIKA UNTUK SISTEM EVAKUASI
TSUNAMI KOTA BENGKULU MENGGUNAKAN
ALGORITMA *FLYOD WARSHALL***
(Studi Kasus: Sebagian Wilayah Pesisir Kota Bengkulu)

Tim Peneliti:

**Zulfia Memi Mayasari, S.Si., M.Si. (002127301)
Ulfasari Rafflesia, S.Si., M.Si (0018118101)
Dr. Mulia Astuti, S.Si., M.Si (0022047801)**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS BENGKULU
2018**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Penelitian	: Pemodelan Matematika untuk Sistem Evakuasi Tsunami Kota Bengkulu Menggunakan Algoritma Floyd Warshall (Studi Kasus: Sebagian Wilayah Pesisir Kota Bengkulu)
Research Group	: Matematika Terapan
Unggulan/Tokoh Research Group	: Mitigasi Bencana
Ketua Peneliti	
a. Nama Lengkap	: Zulfia Memi Mayasari, S.Si., M.Si
b. NIP	: 197312021998022001
c. NIDN	: 0002127301
d. Pangkat/Golongan	: Pembina / IV a
e. Jabatan Fungsional	: Lektor Kepala
f. Fakultas/Jurusan	: MIPA/Matematika
g. Pusat Penelitian	: Universitas Bengkulu
h. Alamat Institusi	: Jl. WR. Supratman, Kandang Limun Bengkulu
i. Nomor HP/ email	: 081367379697/ zulfiammemimayasari@yahoo.com; zulfiamm@umj.ac.id
Peneliti Anggota	: 2 orang
Nama Anggota 1	: Ulfasari Rafflesia, S.Si., M.Si
NIDN	: 0018118101
Bidang Keahlian	: Matematika Terapan
Nama Anggota 2	: Dr. Mulia Astuti, S.Si. M.Si
NIDN	: 0022047801
Bidang Keahlian	: Aljabar
Biaya yang diajukan	: Rp. 28,000,000,-
Biaya total penelitian	: Rp. 28,000,000,-



Dr. Dwi Zul Bahru Camago, MS
NIP. 195711251987021001

Bengkulu, Desember 2018

Ketua,

Zulfia Memi Mayasari, S.Si., M.Si
NIP. 197312021998022001



Dr. Romiati, Tokoh Eka Sukarto, MS
NIP. 195905031986021001

RINGKASAN

Jalur evakuasi bencana tsunami yang efektif dan optimal dirancang dengan mempertimbangkan jarak, keamanan, dan waktu. Kajian tentang jalur evakuasi bencana tsunami yang efektif dan optimal di wilayah pesisir Kota Bengkulu sangat diperlukan, hal ini mengingat Kota Bengkulu merupakan salahsatu kota yang terkategori sangat rawan terhadap bencana tsunami. Karena itu sistem evakuasi memegang peranan yang sangat penting dalam upaya meminimalkan korban jiwa terhadap bencana tsunami.

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model jalur evakuasi yang efektif dan optimal di wilayah pesisir Kota Bengkulu melalui perancangan sistem evakuasi tsunami dengan pendekatan matematika sebagai upaya untuk meminimalisir dampak bencana tsunami. Langkah pertama yang dilakukan untuk mencapai tujuan ini adalah melakukan observasi dan pengumpulan data. Dari data yang diperoleh, wilayah penelitian dibagi menjadi beberapa *cluster*. Kemudian dibentuk suatu *graph* jaringan jalan. *Cluster-cluster* yang terbentuk dan titik berkumpul yang telah ditetapkan pemerintah dijadikan sebagai *vertex* pada *graph* jaringan jalan sedangkan infrastruktur jaringan jalan dijadikan sebagai *edge*. Selanjutnya *graph* jaringan jalan ini diboboti oleh jarak dan waktu. Penentuan jalur evakuasi berdasarkan jarak terpendek dan waktu evakuasi minimum dirancang melalui *software* sistem evakuasi tsunami yang diimplementasikan pada model *graph* jaringan jalan yang telah dibentuk dengan menggunakan Algoritma *Floyd Warshall* dan diselesaikan dengan bantuan bahasa pemrograman matlab.

Dalam penentuan jalur evakuasi, jarak terpendek dan waktu minimum adalah dua hal yang tidak dapat dipisahkan. Jarak tidak selalu berbanding lurus dengan waktu. Ada kalanya jarak yang lebih dekat tidak selalu membutuhkan waktu yang lebih sedikit untuk menempuhnya dikarenakan adanya faktor-faktor lain yang mempengaruhinya. Begitu pula dengan waktu. Dalam proses evakuasi tsunami, waktu bukanlah satu-satunya pertimbangan yang harus diperhatikan. Faktor keamanan saat evakuasi tentu merupakan hal penting yang tidak dapat diabaikan. Berdasarkan perhitungan menggunakan perangkat lunak yang telah dihasilkan, dalam penelitian ini terdapat dua *cluster* dimana jalur evakuasi berdasarkan jarak terpendek tidak sama dengan jalur evakuasi berdasarkan waktu minimum meskipun kedua *cluster* tersebut menuju ke titik berkumpul yang sama. Setelah dilakukan analisis

performansi program serta dengan melakukan *crosscheck* lapangan maka diperoleh jalur evakuasi yang efektif berdasarkan jarak terpendek dan waktu evakuasi minimum.

Indikator keberhasilan dari kegiatan penelitian adalah dihasilkannya model sistem evakuasi tsunami berupa jalur evakuasi tsunami berbasis jarak terpendek dan waktu evakuasi minimum di Kota Bengkulu. Output lain yang dihasilkan dalam penelitian ini berupa artikel ilmiah dengan judul “Mathematical modeling approach of an evacuation model for tsunami risk reduction in Bengkulu” yang akan diterbitkan dalam Journal of Physics: Conference Series (Indexed in Scopus) dengan SJR 0,241 kategori Q3 ISSN:1742-6596 serta dihasilkannya skripsi mahasiswa Program Studi Matematika atas nama Ayu Meilandika (NPM: F1A015032) dengan judul “ Kajian teori metode *Floyd Warshall* dan *Bellman Ford* dalam penentuan lintasan terpendek.

Dari hasil penelitian, berdasarkan jalur evakuasi yang dihasilkan terdapat 6 *cluster* yang melebihi ketentuan *InaTews* yaitu maksimal 15 menit waktu yang diperlukan untuk sampai lokasi aman, dalam hal ini titik berkumpul yang telah ditetapkan pemerintah Kota Bengkulu. Karena itu perlu dilakukan kajian lagi terhadap titik berkumpul/lokasi evakuasi yang telah ditetapkan pemerintah serta kemungkinan metode evakuasi yang lain yaitu evakuasi vertikal.

PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat_Nya peneliti dapat menyelesaikan laporan Akhir Penelitian Unggulan Universitas Tahun 2018 dengan judul : Pemodelan Matematika untuk Sistem Evakuasi Tsunami Kota Bengkulu Menggunakan Algoritma *Floyd Warshall* (Studi Kasus : Sebagian Wilayah Pesisir Kota Bengkulu). Penelitian ini dilaksanakan untuk mendapatkan suatu model jalur evakuasi bencana tsunami di Kota Bengkulu. Laporan akhir penelitian ini disusun sesuai dengan keterbatasan dan kemampuan yang peneliti miliki. Peneliti merasakan banyak sekali kekurangan khususnya yang berkaitan dengan penentuan *graph* jaringan jalan untuk menentukan jalur optimal. Untuk itu peneliti mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun guna penyempurnaan laporan penelitian ini kemudian.

Demikianlah laporan ini disusun agar dapat berguna dan kemajuan bagi kita semua di masa yang akan datang.

Bengkulu, Desember 2018
peneliti

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	ii
RINGKASAN	iii
PRAKATA	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	x
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1. Pesisir Kota Bengkulu	3
2.2. <i>Graph</i>	4
2.2.1. <i>Graph</i> tak berarah (<i>undirected graph</i>) dan <i>graph</i> berarah (<i>Directed graph</i>)	5
2.2.2. <i>Graph</i> berbobot	5
2.3. Lintasan Terpendek (<i>Shortest Path</i>)	5
2.4. Pemrograman Dinamis (<i>Dynamic Programming</i>)	6
2.4.1. Algoritma <i>Floyd Warshall</i>	6
2.5. Tsunami	8
2.6. Evakuasi Bencana Tsunami	8
2.6.1. Waktu evakuasi	9
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	12
3.1. Tujuan Penelitian	12
3.2. Manfaat Penelitian	12
BAB IV. METODE PENELITIAN	14
4.1. Pelaksanaan Kegiatan	14
.	.
BAB V. HASIL DAN LUARAN DICAPAI	16
5.1. Kondisi Umum Kota Bengkulu	16
5.1.1. Letak geografis dan luas wilayah	16
5.2. Kondisi Umum Kecamatan Teluk Segara	16
5.3. Perancangan <i>Graph</i> jaringan Jalan	17
5.4. Perancangan Perangkat Lunak Sistem Evakuasi Tsunami	24
5.5. Penentuan Jalur Evakuasi Tsunami Berdasarkan Jarak Terpendek	27
5.5.1. Penentuan jalur evakuasi tsunami berdasarkan barak Terpendek	27
5.5.2. Penentuan jalur evakuasi tsunami berdasarkan waktu Minimum	29

5.5.3. Penentuan jalur evakuasi tsunami optimal berdasarkan jarak terpendek dan waktu minimum	30
BAB VI. RENCANA TAHAPAN SELANJUTNYA	33
BAB VII. KESIMPULAN DAN SARAN	34
7.1. Kesimpulan	34
7.2. Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Lokasi Berkumpul dan Jalur Evakuasi di Kota Bengkulu	4
Tabel 2.2. Kecepatan Berjalan Pengungsi	10
Tabel 4.1. Tahapan Kegiatan Penelitian	14
Tabel5.1. Luas Tiap Kelurahan dan Jumlah Penduduk di Wilayah Penelitian Tahun 2016	17
Tabel 5.2. Jarak Antar <i>Vertex</i>	21
Tabel 5.3. Perhitungan Kecepatan Berjalan Pengungsi	23
Tabel 5.4. Waktu Antar <i>Vertex</i>	24
Tabel 5.5. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Tependek	27
Tabel 5.6. Jalur Evakuasi Berdasarkan Waktu Minimum	29
Tabel 5.7. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Terpendek dan Waktu Minimum	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Empat Komponen Waktu Evakuasi	9
Gambar 5.1. <i>Graph</i> Jaringan Jalan di Kecamatan Teluk Segara Kota Bengkulu	18
Gambar 5.2. <i>Flowchart</i> Program	25
Gambar 5.3. Tampilan Listing Program	27
Gambar 5.4. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Terpendek	28
Gambar 5.5. Jalur Evakuasi Berdasarkan Waktu Minimum	30
Gambar 5.6. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Terpendek dan Waktu Minimum	32

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Jaringan Jalan Kecamatan Teluk Segara
- Lampiran 2. Daftar Panjang dan Lebar Jalan di Wilayah Penelitian
- Lampiran 3. Running Program Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Tependek
- Lampiran 4. Running Program Jalur Evakuasi Berdasarkan Waktu Minimum
- Lampiran 5. Draft Artikel Ilmiah

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kota Bengkulu merupakan salahsatu kota yang sangat rawan terhadap bencana gempa bumi dan tsunami, hal ini disebabkan adanya pertemuan dua lempeng dunia yang sangat aktif yaitu lempeng Benua Eurasia dan lempeng Samudra Indo-Australia di sepanjang Pantai Barat Sumatera. Dalam kurun waktu tahun 2000 – 2010, Bengkulu telah mengalami dua kali kejadian gempa bumi dengan *magnitudo* besar. Gempa bumi dengan kategori kuat terjadi pada tanggal 12 September 2007 dengan magnitudo 7,9 Mw, pusat gempa 160 km lepas pantai arah barat daya dari Kota Bengkulu dengan kedalaman 30 km. Sebelumnya juga pernah terjadi gempa bumi tanggal 4 Juni 2000 dengan kekuatan 7,3 Mw yang berpusat di Samudera Hindia pada posisi sekitar 100 km Barat Daya Kota Bengkulu dengan kedalaman 0 – 60 km di bawah permukaan laut (BNPB, 2016). Dua kejadian gempa bumi tersebut merupakan gempa bumi yang berpotensi terjadinya tsunami. Kondisi seperti ini mengharuskan Pemerintah Kota Bengkulu agar lebih fokus untuk merencanakan sistem mitigasi bencana tsunami sebagai upaya untuk mengantisipasi dan meminimalisir dampak bencana tsunami bagi penduduk khususnya yang bermukim di wilayah pesisir Kota Bengkulu.

Dalam perencanaan mitigasi bencana tsunami, evakuasi memainkan peranan yang sangat penting untuk keselamatan penduduk dari bencana (Dewi, 2012). Masalah utama dalam sistem evakuasi bencana adalah minimasi waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi atau maksimasi jumlah orang yang dapat dievakuasi dalam rentang waktu tertentu (Mayasari, 2014). Terdapat dua metode dalam evakuasi terhadap bencana tsunami yaitu: (a). Evakuasi horizontal yaitu memindahkan penduduk ke tempat aman berdasarkan jaraknya atau daerah yang lebih tinggi seperti bukit; (b). Evakuasi vertikal, yaitu mengevakuasi penduduk ke gedung yang lebih tinggi terdekat yang aman dari tsunami (Dewi, 2012). Dalam persoalan evakuasi, untuk meminimalisir jumlah korban jiwa dapat dilakukan melalui perencanaan jalur evakuasi yang efektif sehingga penduduk dapat menemukan jalur jalan untuk menuju ke tempat yang aman, terdekat dan tercepat sehingga jumlah korban jiwa dapat diminimalisir.

Jalur evakuasi yang efektif dan optimal harus mempertimbangkan jarak, keamanan, dan yang terpenting adalah waktu. Salahsatu cara penentuan jalur evakuasi ini dapat digunakan aplikasi teori *graph* yang merupakan salah satu pokok bahasan

dalam matematika. *Graph* digunakan untuk merepresentasikan objek-objek diskrit dan hubungan antar objek-objek tersebut sehingga dalam penentuan jalur evakuasi yang pertama dilakukan adalah menggambarkan jaringan jalan dalam bentuk *graph* yang disebut *graph* jaringan jalan. Berdasarkan graph jaringan jalan yang terbentuk ini, dapat ditentukan jalur evakuasi yang efektif dan optimal dengan pendekatan riset operasi menggunakan Algoritma *Floyd Warshall*. Algoritma ini digunakan untuk mencari lintasan terpendek. Tingkat akurasi algoritma ini selalu menunjukkan nilai 100% (Fanani dkk, 2012).

Beberapa penelitian terkait tentang persoalan evakuasi ini antara lain: Sudarsana dkk (2013) yang membangun model sistem evakuasi tsunami Kota Palu berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum dimana penentuan jalur terpendek dilakukan dengan menggunakan algoritma Dijkstra, Yunarto dkk (2015) yang membuat suatu perencanaan evakuasi vertikal di Pulau Sarangan propinsi Bali sebagai alternatif pengurangan resiko bahaya tsunami, dan Mayasari dkk (2013) yang merancang model matematik untuk problem evakuasi bencana tsunami di Kota Bengkulu (studi kasus: Kelurahan Berkas) menggunakan pendekatan *Maximum Dynamic Flow Problem* (MDFP). Pada penelitian ini akan dibuat suatu model matematika untuk sistem evakuasi di Kota Bengkulu melalui perancangan perangkat lunak berbantuan program matlab dan dalam penentuan jalur terpendek menggunakan algoritma *Floyd Warshall* sehingga diperoleh jalur evakuasi horizontal yang efektif dan optimal dengan jarak terpendek, aman dan waktu evakuasi minimum di Kota Bengkulu (studi kasus : sebagian wilayah pesisir Kota Bengkulu). Berdasarkan uraian di atas, permasalahan yang akan dijawab dalam penelitian ini adalah:

1. Merancang perangkat lunak sistem evakuasi tsunami yang efektif dan optimal di Kota Bengkulu melalui pendekatan riset operasi menggunakan Algoritma *Floyd Warshall* dengan bantuan bahasa pemrograman Matlab.
2. Menganalisis dan menguji keefektifan lokasi-lokasi titik berkumpul dan jalur evakuasi yang sudah ditetapkan pemerintah Kota Bengkulu.
3. Menentukan model jalur evakuasi yang efektif dan optimal dengan jarak terpendek, aman dan waktu evakuasi minimum di Kota Bengkulu.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pesisir Kota Bengkulu

Kota Bengkulu merupakan salah satu daerah yang rawan terhadap bencana gempa bumi dan tsunami. Secara administratif, Kota Bengkulu mempunyai luas wilayah daratan sekitar 151,7 km², ditambah 1 pulau dengan luas 2 Ha dan lautan seluas 387,6 Km² yang terdiri dari 9 kecamatan dan 67 kelurahan. Wilayah pesisir Kota Bengkulu umumnya mempunyai ketinggian antara 0 – 50 m diatas permukaan laut (dpl). Wilayah yang yang terluas dengan ketinggian 0 – 10 m (dpl) yaitu sekitar 10,248 Ha atau sekitar 70,91 % dari seluruh luas wilayah yang ada di Kota Bengkulu. Berdasarkan kemiringan lahannya, terlihat bahwa sekitar 9,850 Ha luas wilayah pesisir Kota Bengkulu mempunyai kemiringan lahan antara 0 – 3 % atau 68,15 % dari total luas wilayah. Dalam kurun waktu tahun 2000 – 2010, Kota Bengkulu telah mengalami dua kali kejadian gempa bumi dengan *magnitudo* besar. Gempa bumi dengan kategori kuat terjadi pada tanggal 12 September 2007 dengan magnitudo 7,9 Mw, pusat gempa 160 km lepas pantai arah barat daya dari Kota Bengkulu dengan kedalaman 30 km. Sebelumnya juga pernah terjadi gempa bumi tanggal 4 Juni 2000 dengan kekuatan 7,3 Mw yang berpusat di Samudera Hindia pada posisi sekitar 100 km Barat Daya Kota Bengkulu dengan kedalaman 0 – 60 km di bawah permukaan laut (BNPB, 2016).

Sejak tahun 2006, pemerintah Kota Bengkulu mulai melakukan antisipasi terhadap ancaman bencana tsunami dengan cara membuat beberapa titik berkumpul yang dianggap sebagai tempat berkumpul yang aman saat terjadi bencana tsunami. Dalam Rencana Tata Ruang dan Wilayah (RTRW) Kota Bengkulu telah direkomendasikan tempat-tempat yang menjadi tempat berkumpul dan jalur evakuasinya, sebagaimana tertera dalam Tabel 2.1.

Namun, penanganan apabila terjadi bencana tsunami tidak cukup hanya dengan penentuan titik berkumpul saja, tetapi juga harus disertai dengan informasi mengenai jalur yang dapat ditempuh dan waktu yang dibutuhkan untuk menuju tempat berkumpul tersebut. Untuk itu perlu adanya jalur evakuasi yang efektif dan optimal yang dapat ditempuh dari setiap tempat untuk menuju titik-titik berkumpul yang telah ditentukan.

Tabel 2.1. Lokasi Berkumpul dan Jalur Evakuasi di Kota Bengkulu

No.	Lokasi Titik Berkumpul	Ketinggian	Cakupan Wilayah Evakuasi	Jalur Evakuasi
1	Kampus Universitas Bengkulu	15 – 20 m dpl	Kel. Rawa Makmur Permai Kel. Rawa Makmur Kel. Beringin Jaya	Jl. UNIB Raya Jl. Kandang Limun Jl. Bandar Raya
2	Kampung Kelawi	14 m dpl	Kel. Pasar Bengkulu Kel. Kampung Bali Kel. Kampung Kelawi Kel. Tanjung Agung Kel. Tanjung Jaya	Jl. Pasar Bengkulu-Jl. Kalimantan-Jl. Enggano
3	Lapangan Merdeka	15 m dpl	Kel. Pondok Besi Kel. Malabero Kel. Sumur Meleleh Kel. Berkas Kel. Kebon Keling Kel. Tengah Padang	Jl. Pendakian-Jl. Depan Benteng Jl. Depan Lapas-Jl. SMP Carolus Jl. Pasar Barau-Jl. Dalam Pasar Baru Koto II
4	Mesjid At-Taqwa	14 m dpl	Kel. Penurunan Kel. Anggut Bawah	Jl. Pasar Baru-Jl. Nala Jl. Putri Gading Cempaka
5	Simpang Empat Pantai	12,5 m dpl	Kel. Penurunan Kel. Kebun Beler	Jl. Sedap Malam Jl. Kebun Beler
6	STM Negeri	13 m dpl	Kel. Lempuing	Jl. Batanghari Jl. Kampar Jl. Pembangunan
7	Lapangan Sepakbola Kemuning	10,5 m dpl	Kel. Lempuing Kel. Lingkar Barat	Jl. Pariwisata Jl. Ciliwung Jl. Serayur
8	Balai Buntar	19 m dpl	Kel. Lempuing Kel. Padang Harapan	Jl. Cimanuk Jl. Kap. Tendean Jl. Natadirja
9	Lapangan Pagar Dewa	15 dpl	Kel. Muara Dua Kel. Kandang Mas Kel. Bumi Ayu Kel. Kandang	Jl. Ir. Rustandi Sugiarto
10	Lapangan Pesantren Pancasila	20 m dpl	Kel. Jembatan Kecil Kel. Sawah Lebar Kel. Kebun Tebeng	Jl. Jembatan Kecil Jl. Gunung Bungkuk Jl. Merapi Jl. Danau
11	Terminal Betungan	20 m dpl	Kel. Padang Serai Kel. Sumber Jaya Kel. Bumi Ayu Kel. Teluk Sepang	Jl. Raya Betungan Jl. Dua Jalur Simpang Kandis
12	Simpang Empat Nakau	21 m dpl	Kel. Tanjung Agung Kel. Tanjung Jaya Kel. Semarang Kel. Surabaya	Jl. Irian Jl. Halmahera Jl. Danau

Sumber : Dinas Tata Kota dan Pengawasan Bangunan Kota Bengkulu, dalam BPBD Propinsi Bengkulu (2010)

2.2. Graph

Teori *graph* merupakan salah satu pokok bahasan dalam matematika yang memiliki banyak terapan. *Graph* digunakan untuk merepresentasikan objek-objek diskrit dan hubungan antar objek-objek tersebut. Suatu *graph* $G(V, E)$ adalah pasangan

(V, E) dengan V adalah himpunan tidak kosong yang anggotanya disebut *vertex/node/titik/simpul* dan E adalah himpunan yang anggotanya adalah pasangan-pasangan tak berurut dari *vertex* yang disebut *edge/garis/busur*. Secara matematis, jika $G(V, E)$ adalah *graph* maka G terdiri dari himpunan *vertex* di G yang dinyatakan dengan $V(G) = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ dan himpunan *edge* di G yang dinyatakan dengan $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\}$. Banyaknya elemen $V(G)$ dinyatakan dengan $|V(G)| = n$ dan banyaknya elemen $E(G)$ dinyatakan dengan $|E(G)| = m$. Jika $e = (u, u) \in G$ maka *edge* tersebut disebut *loop*.

Definisi 2.1.

Lintasan/jalur (*path*) pada suatu *graph* G adalah suatu urutan yang terdiri atas *vertex* dan *edge* secara bergantian dimana setiap *edge incident* dengan *vertex* terdekat yang diawali dan diakhiri pada suatu *vertex* dimana semua *vertex* berbeda. Suatu lintasan/jalur (*path*) yang *vertex* awal dan *vertex* akhirnya sama disebut *cycle*.

2.2.1 *Graph* tak berarah (*undirected graph*) dan *graph* berarah (*directed graph*)

Suatu *graph* yang semua *edgenya* tak memiliki arah disebut *graph* tak berarah. Pada *graph* tak berarah, urutan pasangan *vertex* yang dihubungkan oleh *edge* tidak diperhatikan. Jadi $(v_i, v_j) = (v_j, v_i)$ adalah *edge* yang sama. Suatu *graph* yang semua *edgenya* memiliki arah disebut *graph* berarah. Pada *graph* berarah $(v_i, v_j) \neq (v_j, v_i)$ (Munir, 2005).

2.2.2 *Graph* berbobot

Graph berbobot adalah *graph* yang setiap *edgenya* mempunyai bobot atau harga. Bobot pada tiap *edge* dapat berbeda-beda bergantung dari masalah yang dimodelkan dalam *graph* (Munir, 2005).

2.3 Lintasan Terpendek (*Shortest Path*)

Lintasan terpendek adalah lintasan minimum yang diperlukan untuk mencapai suatu tempat dari tempat lain. Dalam suatu lintasan terdapat simpul sumber (*source vertex*) dan simpul tujuan (*sink vertex*). Simpul-simpul lain yang menghubungkan *source vertex* dan *sink vertex* disebut simpul perantara (*intermediate vertex*). Beberapa macam persoalan lintasan terpendek, antara lain:

- a. Lintasan terpendek antara dua buah simpul tertentu (*a pair shortest path*)

- b. Lintasan terpendek antara semua pasangan simpul (*all pair shortest path*)
- c. Lintasan terpendek dari simpul tertentu ke semua simpul yang lain (*single-source shortest path*)
- d. Lintasan terpendek antara dua buah simpul yang melalui beberapa simpul tertentu (*intermediate shortest path*)

Dalam penelitian ini persoalan lintasan terpendek yang digunakan adalah *single-source shortest path*.

2.4 Pemrograman Dinamis (*Dynamic Programming*)

Pemrograman dinamis merupakan metode pemecahan masalah dengan cara menguraikan solusi menjadi sekumpulan langkah (*step*) sedemikian sehingga solusi dari persoalan dapat dipandang dari rangkaian keputusan yang saling berkaitan. Penyelesaian masalah dengan metode ini dapat menghasilkan sejumlah berhingga kemungkinan pilihan dan solusi pada setiap tahap dibangun dari hasil solusi tahap sebelumnya. Pada pemrograman dinamis, rangkaian keputusan yang optimal dibuat dengan menggunakan prinsip optimalitas sehingga dijamin bahwa pengambilan keputusan pada suatu tahap adalah keputusan yang benar untuk tahap-tahap selanjutnya. Salah satu aplikasi dari pemrograman dinamis adalah dalam penentuan jalur terpendek dengan algoritma *Floyd Warshall*.

2.4.1 Algoritma *Floyd Warshall*

Algoritma *Floyd Warshall* ditemukan oleh Stephen Warshall dan Robert W Floyd. Algoritma ini merupakan salah satu varian pemrograman dinamis, yaitu suatu metode yang melakukan pemecahan masalah dengan memandang solusi yang akan diperoleh sebagai suatu keputusan yang saling terkait (Cormen, 2003). Algoritma ini digunakan untuk mencari lintasan terpendek. Tingkat akurasi algoritma ini selalu menunjukkan nilai 100% (Fanani dkk, 2012).

Algoritma *Floyd Warshall* dimulai dari titik awal dan kemudian memperpanjang lintasan dengan mengevaluasi titik demi titik hingga mencapai titik tujuan dengan bobot minimal. Algoritma *Floyd Warshall* memiliki input *graph* berarah dan berbobot $G(V, E)$. Bobot *edge* e dapat diberi symbol $w(e)$. Jumlah bobot sisi-sisi pada sebuah jalur adalah total bobot jalur tersebut. Algoritma ini menghitung bobot terkecil dari semua jalur yang menghubungkan suatu pasangan titik dan melakukannya sekaligus

untuk semua pasangan titik demi titik hingga mencapai titik tujuan dengan jumlah bobot yang paling minimum (Siang, 2002).

Mekanisme algoritma *Floyd Warshall* dilakukan dalam beberapa langkah. Langkah-langkah algoritma *Floyd Warshall* adalah:

1. Merepresentasikan suatu *graph* berbobot sebagai suatu matriks. Bobot untuk masing-masing *edge* adalah:

$$\begin{aligned} w_{ij} &= 0, & \text{jika } i = j \\ &= w(i,j), & \text{jika } i \neq j \text{ dan } (i,j) \in E \\ &= \infty & \text{jika } i \neq j \text{ dan } (i,j) \notin E \end{aligned}$$

Format output berupa matriks $n \times n$ berjarak $D = [d_{ij}]$ dengan d_{ij} adalah jarak dari *vertex* i ke *vertex* j .

2. Melakukan dekomposisi *Floyd Warshall* dengan urutan berikut:
 - i. $d_{ij}(k)$ merupakan panjang lintasan terpendek dari i ke j sehingga semua *intermediate vertex* yang terdapat pada lintasan (jika ada) terkumpul pada $\{1, 2, \dots, k\}$.
 - ii. $d_{ij}(0)$ dikumpulkan pada w_{ij} , dimana berarti kondisi tidak ada *intermediate vertex*
 - iii. $D(k)$ menjadi matriks $n \times n$ $[d_{ij}(k)]$
 - iv. Tentukan $d_{ij}(n)$ sebagai jarak dari i ke j . Jadi, yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung $D(n)$ dengan $D(n)$ beranggotakan elemen-elemen $d_{ij}(n)$
 - v. Hitung $D(k)$ untuk $k = 0, 1, \dots, n$.
3. Menentukan struktur lintasan terpendek.

Pada langkah ini, harus dilakukan dua pengamatan terlebih dahulu sebelum melangkah lebih jauh, yaitu:

- i. Sebuah lintasan terpendek tidak memuat *cycle*.
- ii. Untuk sebuah lintasan terpendek dari i ke j dengan beberapa *intermediate vertex* pada lintasan dipilih dari kumpulan $\{1, 2, \dots, k\}$, dengan 2 kemungkinan:
 - k bukan *vertex* pada lintasan, lintasan terpendek mempunyai panjang d_{ij}^{k-1}
 - k adalah *vertex* pada lintasan, lintasan terpendek mempunyai panjang $d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}$
4. Melakukan iterasi, dimulai dari iterasi ke-0 sampai dengan n

Perhitungan yang dilakukan adalah:

- Menentukan $D(0)$ (iterasi ke-0)= $[w_{ij}]$, merupakan matriks berbobot
 - Menentukan $D(k)$ dengan menggunakan

$$d_{ij}^{(k)} = \min \{ d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)} \text{ untuk } k = 1, \dots, n.$$
dengan n adalah jumlah *vertex*.
5. Hasil akhir adalah matriks untuk iterasi ke- n . Dari matriks ini dapat dilihat lintasan terpendek untuk setiap *vertex* pada suatu *graph*.

2.5. Tsunami

Tsunami merupakan gelombang laut berperiode panjang yang terbentuk akibat adanya energi yang merambat ke lautan akibat gempa bumi, letusan gunung berapi dan runtuhnya lapisan-lapisan kerak bumi yang diakibatkan bencana alam tersebut di samudra atau di dasar laut, peristiwa yang melibatkan pergerakan kerak bumi seperti pergeseran lempeng di dasar laut, atau dampak tumbukan meteor. Tsunami merupakan bencana alam yang ditimbulkan oleh gempa bumi dan bencana ini sangat sulit untuk diprediksi kapan akan terjadi, disamping itu efek bahaya yang ditimbulkan juga sangat dahsyat sehingga dibutuhkan upaya untuk mengurangi risiko dampak dari bencana tersebut (Fauzi dkk (b), 2014).

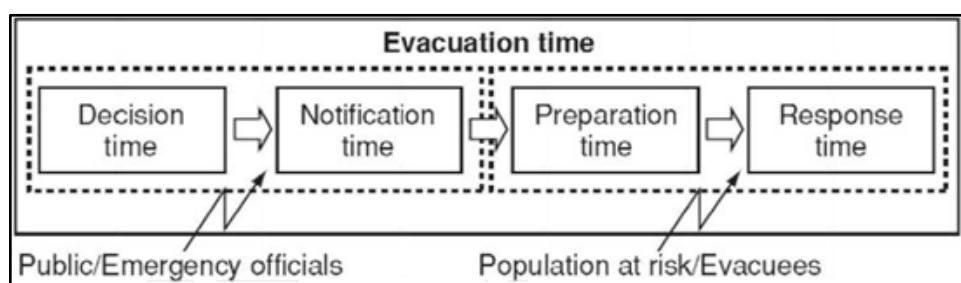
2.6. Evakuasi Bencana Tsunami

Evakuasi adalah pemindahan penduduk dari tempat yang berbahaya ke tempat yang aman. Penyelesaian masalah evakuasi bencana tsunami dengan pendekatan program dinamis telah dilakukan oleh Mayasari dkk (2013) dengan studi kasus Kelurahan Berkas Kota Bengkulu. Metode yang digunakan dalam penelitian tersebut menggunakan *maximum dynamic flow problem* (MDFP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode MDFP mampu mendapatkan model jaringan berupa jarak terdekat yang dapat ditempuh dari titik asal menuju titik berkumpul. Metode ini dapat diterapkan pada suatu wilayah dengan kapasitas jalan dan jumlah orang yang akan dievakuasi tidak diketahui secara pasti, sehingga metode ini belum mampu menghitung secara pasti jumlah maksimum orang yang dapat dievakuasi melalui jalur evakuasi yang dihasilkan. Penelitian ini telah mampu mengkaji studi literatur *maximum dynamic flow problem* agar dapat diterapkan dalam model evakuasi bencana tsunami. Penelitian yang dilakukan masih terbatas pada satu kelurahan yang jumlah variabel dan data masih sederhana. Tetapi untuk jumlah variabel dan data yang lebih kompleks perlu dikaji lagi secara mendalam tentang penggunaan teori ini.

Penelitian tentang penentuan jalur evakuasi bencana tsunami di Kota Bengkulu juga telah dilakukan oleh peneliti (sebagai anggota) melalui penelitian Hibah Bersiang Tahun 2014 (Fauzi dkk (a), 2014). Hasil penelitian menyimpulkan jalur evakuasi yang dibuat oleh BPBD Kota Bengkulu telah terpasang di lokasi yang tepat. Rambu-rambu arah evakuasi yang terpasang dititikberatkan kepada jalur evakuasi menuju ke tempat titik berkumpul seperti yang terdapat dalam Tabel 2.1. Semua rambu arah evakuasi diarahkan kepada titik berkumpul yang terdekat. Tetapi dari hasil pengamatan dan analisis terhadap rambu arah evakuasi dan peta jalur evakuasi yang dibuat oleh BPBD Kota Bengkulu terdapat perbedaan arah evakuasi. Dalam peta evakuasi terdapat beberapa jalur evakuasi yang mengarah ke lokasi-lokasi tertinggi dan menjauhi garis pantai, sedangkan rambu arah evakuasi semua mengarah kepada titik berkumpul. Untuk itu penentuan jalur evakuasi bencana tsunami yang akan dilakukan dalam penelitian ini juga akan mengkaji dan menganalisi arah evakuasi dan lokasi titik berkumpul yang telah ditetapkan oleh BPBD Kota Bengkulu.

2.6.1 Waktu evakuasi

Waktu evakuasi didefinisikan sebagai waktu tersisa yang dibutuhkan pengungsi untuk melakukan evakuasi sejak BMKG mengumumkan peringatan dini akan adanya tsunami secara resmi hingga gelombang tsunami tiba di garis pantai (Yunarto dkk, 2015). Menurut Post *et al.* (2009) ada empat komponen waktu evakuasi (ET) yaitu: 1. Waktu tanda-tanda peringatan teknis atau alaminya (ToNW) akan ditentukan oleh institusi/waktu keputusan resmi (IDT), 2. Waktu pemberitahuan (INT), 3. Waktu persiapan atau waktu reaksi (RT), 4. Waktu respon dari masyarakat (RsT) yang merupakan waktu yang diperlukan bagi masyarakat mengungsi ke tempat yang aman. Keempat komponen waktu evakuasi ini dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.1. Empat Komponen Waktu Evakuasi (sumber: Dewi, 2012)

Waktu evakuasi (ET) atau waktu respon dari masyarakat (RsT) dihitung menggunakan formula berikut: (Post *et al*, 2009)

$$RsT = ETA - ToNW - RT$$

dengan

$$ToNW = IDT + INT$$

Keterangan:

RsT = ET = Waktu yang tersedia untuk evakuasi

ETA = Perkiraan waktu tsunami tiba

ToNW = Waktu teknis peringatan alam

RT = Waktu reaksi masyarakat

IDT = Waktu pengambilan keputusan oleh

Perhitungan waktu evakuasi dari masing-masing *cluster* menuju titik berkumpul membutuhkan data kecepatan berjalan. Kecepatan berjalan dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: lebar jalan, kepadatan jalan, jumlah pejalan kaki dalam kelompok dan lain-lain (Dewi, 2010). Penentuan kecepatan berjalan pengungsi dapat dihitung menggunakan Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2.2. Kecepatan Berjalan Pengungsi

Kondisi berjalan	Kecepatan berjalan rata-rata (m/det)
Seseorang dengan kereta bayi	1,070
Seseorang dengan seorang anak	1,020
Orang tua berjalan sendiri	0,948
Orangtua berjalan berkelompok	0,751

Sumber: Institute of Fire Safety & Disaster Preparedness (1987) after Sugimoto *et al.*, (2003) dalam Dewi (2010).

Untuk menghitung kecepatan pengungsi berjalan pada sebuah jalan digunakan rumus berikut:

$C_0 = W/S$ (dibulatkan ke bawah)

$C_1 = W/S$ (dibulatkan ke atas)

Keterangan:

C_0 = Kapasitas dasar jalan (dibulatkan ke bawah)

C_1 = Kapasitas aktual jalan saat bencana (dibulatkan ke atas)

V = Kecepatan berjalan saat bencana (m/det)

Vs = Kecepatan berjalan orang tua secara berkelompok (0,751 m/det)

W = Lebar jalan (m)

S = Luas yang dibutuhkan tiap pengungsi ($0,625 \text{ m}^2$)

Pada penelitian ini kecepatan berjalan pengungsi akan diambil kecepatan terendah yaitu $0,751 \text{ m/det}$ dengan alasan bahwa jika pengungsi dengan kecepatan terendah dapat dievakuasi maka pengungsi yang lain tentu dapat dievakuasi pula.

Sistem peringatan dini tsunami Indonesia (*Indonesian Tsunami Early Warning System-InaTEWS*) telah dikembangkan oleh pemerintah Indonesia dengan bantuan negara donor (Sudarsana dkk, 2013). Sistem ini dikontrol langsung oleh Badan Metereologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) di Jakarta. Menggunakan *InaTEWS* ini, BMKG dapat mengirimkan peringatan tsunami jika terjadi gempa yang berpotensi tsunami. Sistem peringatan tsunami ini hanya memberikan waktu singkat untuk para penduduk mencari dan mencapai tempat evakuasi. Waktu yang tersedia setelah peringatan ini berbunyi adalah sekitar 15 menit (Yunarto dkk, 2015).

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1. Tujuan Penelitian

Tujuan umum penelitian ini adalah mendapatkan model jalur evakuasi yang efektif dan optimal di Kota Bengkulu melalui perancangan sistem evakuasi tsunami sebagai upaya untuk meminimalisir dampak bencana tsunami. Beberapa tujuan khusus yang hendak dicapai dalam penelitian ini meliputi:

1. Menghasilkan perangkat lunak sistem evakuasi tsunami yang efektif dan optimal di Kota Bengkulu.
2. Menentukan lokasi-lokasi titik berkumpul dalam jalur evakuasi bencana tsunami di Kota Bengkulu.
3. Menghasilkan model jalur evakuasi yang efektif dengan jarak terpendek, aman dan waktu evakuasi minimum di Kota Bengkulu.

Output akhir yang diharapkan dari penelitian ini adalah dihasilkannya model jalur evakuasi bencana tsunami di Kota Bengkulu. Luaran yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah dihasilkannya artikel yang dimuat di jurnal nasional terakreditasi.

Target lain yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah: a. Mampu berkontribusi pada pembangunan Kota Bengkulu melalui penetapan jalur dan lokasi evakuasi bencana tsunami sebagai arahan kebijakan bagi pengambil keputusan dalam mengantisipasi dan meminimalisir risiko bencana tsunami di Kota Bengkulu, b. Terlibatnya mahasiswa S1 (1 orang) dari Program Studi Matematika dalam penelitian awal khususnya pada pengkajian secara teoritis Algoritma *Floyd Warshall* dalam penentuan jalur optimal yang dalam aplikasinya diambil dari sebagian kasus dari penelitian ini sehingga mahasiswa tersebut dapat menyelesaikan skripsi lebih cepat dan tanpa dana.

3.2. Manfaat Penelitian

Berdasarkan zonasi tsunami yang diperuntukkan untuk wilayah Indonesia, Kota Bengkulu tergolong daerah yang patut diwaspadai terhadap bahaya gempa dan tsunami. Suwarsono (2003) mengungkapkan bahwa terdapat 4 kecamatan dari 9 kecamatan di Kota Bengkulu tergolong rawan terhadap bencana tsunami. Antispasi Pemerintah Kota Bengkulu terhadap ancaman bencana tsunami sudah dimulai tahun 2006, dimana pada saat itu telah dibuat beberapa titik aman dan titik berkumpul. Namun penanganan

apabila terjadi tsunami tidak cukup hanya dengan penentuan titik berkumpul (daerah yang aman terhadap tsunami) tetapi juga harus mengetahui jalur mana saja yang dapat dilalui agar waktu yang digunakan untuk sampai ke titik berkumpul tersebut minimum dan jalur yang dilalui aman. Untuk membantu memberikan gambaran yang jelas dan akurat mengenai jalur evakuasi yang aman dengan waktu minimal dapat digunakan pendekatan matematik dengan menggunakan Algoritma *Floyd Warshall*. Diharapkan dengan penelitian tentang penetapan jalur dan lokasi evakuasi bencana tsunami, serta *output* model yang dihasilkan dapat dijadikan sebagai arahan kebijakan bagi pengambil keputusan dalam mengantisipasi dan meminimalisir risiko bencana tsunami di Kota Bengkulu.

BAB IV

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diusulkan untuk didanai selama 1 (satu) tahun, dengan tahapan kegiatan seperti yang tersaji dalam tabel berikut:

Tabel 4.1. Tahapan Kegiatan Penelitian

Tahun	Fokus kegiatan penelitian	Lingkup pekerjaan	Output
2018	Pembuatan model sistem evakuasi tsunami berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum.	<ol style="list-style-type: none">a. Observasi dan pengumpulan datab. Mempartisi (<i>clustering</i>) daerah yang berada dalam wilayah penelitian.c. Merancang <i>graph</i> jaringan jalan yang berada dalam wilayah penelitian.d. Membuat perangkat lunak untuk sistem evakuasi tsunami berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum dengan bantuan pemrograman Matlab.e. Menganalisis permformansi program.f. Penentuan jalur evakuasi tsunami di Kota Bengkulu	Model sistem evakuasi tsunami berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum.

4.1. Pelaksanaan Kegiatan

Tahapan kegiatan yang dilaksanakan dalam penelitian akan diuraikan sebagai berikut:

Tahap 1. Observasi dan pengumpulan data penelitian

Pada tahap ini dilakukan kegiatan pengumpulan data baik data primer maupun data sekunder. Data primer didapat dari survey langsung ke lokasi penelitian untuk mendapatkan data tentang wilayah pemukiman, sedangkan pengumpulan data sekunder dilakukan melalui penelusuran berbagai pustaka yang ada. Data yang dikumpulkan berupa: (a) jaringan jalan yang didapat dari peta jaringan jalan Kota Bengkulu, (b) data titik berkumpul, (c) data lebar jalan dan (d) data panjang jalan di wilayah penelitian. Berdasarkan data primer dan data sekunder yang didapat, ditentukan lokasi penelitian di sebagian wilayah pesisir Kota Bengkulu.

Tahap 2. Mempartisi (*clustering*) daerah yang termasuk wilayah penelitian.

Pada tahap ini, wilayah penelitian dibagi menjadi beberapa *cluster*. *Cluster-cluster* ini digunakan sebagai acuan menuju titik berkumpul dan sebagai *vertex* dalam pembuatan *graph* jaringan jalan, sedangkan jaringan jalan yang terdapat dalam *cluster* dijadikan sebagai *edge* yang saling terhubung. Analisis dan kajian jaringan jalan dan titik berkumpul dimodelkan dengan menggunakan Teori *Graph*.

Tahap 3. Pembuatan *graph* jaringan jalan

Graph jaringan jalan dibuat berdasarkan *cluster* yang telah dibentuk pada tahap 2 dan titik berkumpul yang telah ditentukan sebagai *vertex* dan infrastruktur jaringan jalan sebagai *edge*. Antar *vertex* yang *adjacent* diberi bobot berupa jarak dan waktu tempuh. Jarak dan waktu antar *vertex* didapatkan dari data sekunder yang diambil dari Dinas PU Kota Bengkulu dan pengukuran langsung di lapangan.

Tahap 4. Pembuatan perangkat lunak sistem evakuasi tsunami

Pada tahap ini dibuat perangkat lunak sistem evakuasi tsunami untuk menentukan jalur terpendek dan waktu minimum untuk evakuasi dari setiap *cluster* menuju titik berkumpul yang diimplementasikan pada model *graph* dari sistem evakuasi tsunami dengan menggunakan Algoritma *Floyd Warshall* berbantuan bahasa pemrograman matlab. Pembuatan perangkat lunak didahului dengan perancangan algoritma dengan berpedoman pada data input, proses dan output.

Tahap 5. Analisis performansi program

Perangkat lunak yang dihasilkan dari tahap 4 perlu dilakukan analisis performansi yang bertujuan untuk memverifikasi dan memvalidasi model yang dihasilkan. Pada tahap ini dilakukan pengujian kinerja program. Pengujian dilakukan dengan menggunakan data yang ada dan divalidasi dengan kondisi real di lapangan.

Tahap 6. Penentuan jalur evakuasi tsunami

Dari tahap 1 – tahap 5 yang telah dilakukan akan dibuat suatu model sistem evakuasi tsunami berupa jalur evakuasi tsunami berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum.

Indikator keberhasilan dari kegiatan penelitian adalah dihasilkannya model sistem evakuasi tsunami berupa jalur evakuasi tsunami berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum di Kota Bengkulu dan dihasilkannya artikel ilmiah yang akan diterbitkan dalam Journal of Physics: Conference Series (Indexed in Scopus) dengan SJR 0,241 kategori Q3 ISSN:1742-6596 serta dihasilkannya skripsi mahasiswa Program Studi Matematika atas nama Ayu Meilandika (NPM: F1A015032) dengan judul “Kajian teori metode *Floyd Warshall* dan *Bellman Ford* dalam penentuan lintasan terpendek.

BAB V

HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

5.1. Kondisi Umum Kota Bengkulu

5.1.1 Letak geografis dan luas wilayah

Berdasarkan letak geografis, Kota Bengkulu berada pada rentang koordinat $30^{\circ} 45'$ – $30^{\circ} 59'$ Lintang Selatan dan $102^{\circ} 14'$ – $102^{\circ} 22'$ Bujur Timur. Kota Bengkulu memiliki pantai yang merupakan rangkaian dari pantai bagian Barat Pulau Sumatera yang berhadapan langsung dengan Samudera Hindia.

Secara administratif, Kota Bengkulu mempunyai luas wilayah daratan sekitar 151,7 km², ditambah 1 pulau dengan luas 2 Ha dan lautan seluas 387,6 Km² yang terdiri dari 9 kecamatan dan 67 kelurahan, dengan batas administratif sebagai berikut :

- Sebelah Utara berbatasan dengan Kabupaten Bengkulu Tengah;
- Sebelah Selatan berbatasan dengan Kabupaten Seluma;
- Sebelah Timur berbatasan Kabupaten Bengkulu Tengah;
- Sebelah Barat berbatasan Samudera Hindia.

Kecamatan yang ada di Kota Bengkulu antara lain: Gading Cempaka, Kampung Melayu, Muara Bangkahulu, Ratu Agung, Ratu Samban, Selebar, Sungai Serut, Teluk Segara dan Singaran Pati. Salah satu kecamatan yang cukup rawan terkena dampak bahaya tsunami adalah Kecamatan Teluk Segara.

5.2. Kondisi Umum Kecamatan Teluk Segara

Berdasarkan letak geografinya, Kecamatan Teluk Segara memiliki batas-batas sebagai berikut :

- Sebelah Utara berbatasan dengan Kecamatan Muara Bangkahulu;
- Sebelah Selatan berbatasan dengan Kecamatan Ratu Agung;
- Sebelah Timur berbatasan Kecamatan Sungai Serut;
- Sebelah Barat berbatasan dengan Samudera Hindia.

Dari segi topografinya, Kecamatan Teluk Segara adalah dataran dengan ketinggian 2 – 14 meter diatas permukaan laut. Secara administratif, Kecamatan Teluk Segara mempunyai luas wilayah sekitar 2558 m² atau sekitar 1,74% dari keseluruhan luas Kota Bengkulu. Kecamatan Teluk Segara memiliki 13 kelurahan yaitu : Kebun Keling, Malabero, Sumur Melele, Berkas, Pasar Baru, Pasar Melintang, Pasar Jitra,

Pondok Besi, Kebun Ros, Pintu Batu, Tengah Padang, Bajak dan Kampung Bali. Diantara kelurahan-kelurahan yang ada di Kecamatan Teluk Segara, 5 diantaranya terletak di tepi pantai yaitu Kelurahan Malabero, Sumur Melele, Pondok Besi, Bajak dan Kampung Bali. Luas wilayah masing-masing kelurahan di Kecamatan Teluk Segara dan jumlah penduduknya (Tahun 2016) dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 5.1. Luas Tiap Kelurahan dan Jumlah Penduduk di Wilayah Penelitian
Tahun 2016

No	Kelurahan	Luas (km^2)	Jumlah Penduduk (Jiwa)
1.	Kebun Keling	172,92	2524
2.	Malabero	198,75	2511
3.	Sumur Meleleh	128,67	1147
4.	Pasar Berkas	448,41	1650
5.	Pasar Baru	159,36	1500
6.	Jitra	147,34	991
7.	Pasar Melintang	189,03	1582
8.	Pondok Besi	97,20	2059
9.	Kebun Ros	192,36	1956
10.	Pintu Batu	120,22	1097
11.	Tengah Padang	347,38	3672
12.	Bajak	157,57	2524
13.	Kampung Bali	198,78	1763

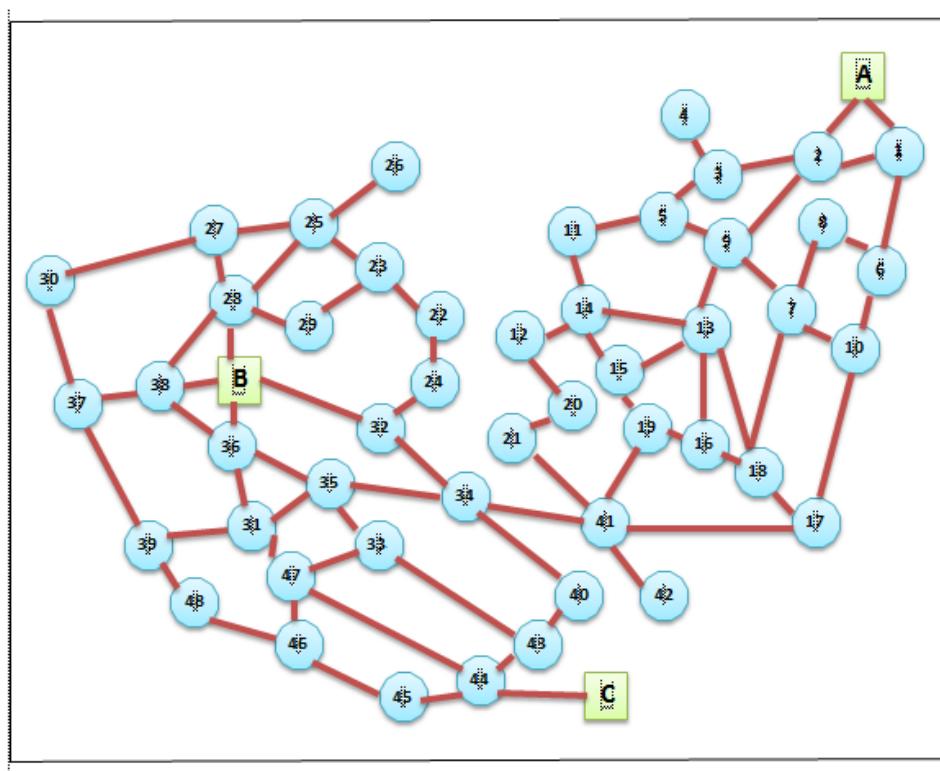
Sumber : Kecamatan Teluk Segara dalam Angka (Teluk Segara *Subdistrict in Figure*) 2017

5.3. Perancangan Graph Jaringan Jalan

Tahap awal dalam pembuatan model sistem evakuasi tsunami berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum adalah perancangan graph jaringan jalan. Berdasarkan data jaringan jalan yang didapat dari peta jaringan jalan (Lampiran 2) dan data titik berkumpul, dibuat suatu graph jaringan jalan. Lokasi titik berkumpul yang telah ditetapkan pemerintah merupakan titik tujuan evakuasi. Terdapat 17 titik berkumpul dalam wilayah Kota Bengkulu yang ditetapkan pemerintah (Tabel 2.1), namun dalam penelitian ini diambil 3 titik berkumpul yang terdekat dengan lokasi penelitian yang merupakan titik tujuan evakuasi yaitu : Kampung Kelawi, Lapangan Merdeka dan Mesjid At-Taqwa. Berdasarkan Tabel 2.1, titik berkumpul Kampung Kelawi mencakup wilayah evakuasi Kelurahan Pasar Bengkulu, Kelurahan Kampung Bali, Kelurahan Kampung Kelawi, Kelurahan Tanjung Agung dan Kelurahan Tanjung Jaya. Titik berkumpul Mesjid At-Taqwa mencakup wilayah evakuasi Kelurahan

Penurunan dan Kelurahan Anggut Bawah. Titik berkumpul Lapangan Merdeka mencakup wilayah evakuasi Kelurahan Pondok Besi, Kelurahan Malabero, Kelurahan Sumur Melele, Kelurahan Berkas, Kelurahan Kebon Keling dan Kelurahan Tengah Padang. Dari data ini menunjukkan bahwa dalam wilayah Kecamatan Teluk Segara, terdapat 6 kelurahan yang tidak termasuk dalam cakupan wilayah evakuasi yang ditetapkan pemerintah yaitu Kelurahan Bajak, Kelurahan Pintu Batu, Kelurahan Kebun Roos, Kelurahan Pasar Melintang, Kelurahan Pasar Jitra dan Kelurahan Pasar Baru. Melalui penelitian ini ditentukan jalur yang dapat dilalui oleh masyarakat masing-masing kelurahan yang ada di Kecamatan Teluk Segara untuk menuju titik berkumpul terdekat dengan jalur terpendek dan waktu minimal.

Pembuatan *graph* jaringan jalan Kecamatan Teluk Segara Kota Bengkulu diawali dengan mengedit peta jaringan jalan yang sudah ada. Penentuan *vertex-vertex* sebagai titik awal evakuasi dilakukan dengan mengcluster wilayah penelitian menjadi beberapa *cluster* dan jaringan jalan yang tersedia dijadikan sebagai *edge* dalam *graph* jaringan jalan tersebut. Titik berkumpul yang terdekat dengan wilayah penelitian yaitu Kampung Kelawi, Lapangan Merdeka dan Mesjid At-Taqwa dijadikan sebagai *vertex* tujuan. *Graph* jaringan jalan yang terbentuk dapat dilihat pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1. *Graph* Jaringan Jalan Kecamatan Teluk Segara Kota Bengkulu

Keterangan:

- A : Tempat berkumpul Kampung Kelawi
B : Tempat berkumpul Lapangan Merdeka
C : Tempat berkumpul Mesjid At-Taqwa
1 : Simpang Jl. Ibnu Hajar, Jl. Bali, Jl. Enggano
2 : Simpang 4 Jl. Ibnu Hajar
3 : Simpang 1 Jl. Ibnu Hajar, Jl. TP. Kasim Nasir
4 : Simpang Jl. Bencolen , Jl. Ibnu Hajar
5 : Simpang Jl TP. Kasim Nasir, Jl. Sentot Alibasyah
6 : Simpang Jl. Bali, Jl. Bali 1
7 : Simpang (1) Jl. Sentot Alibasyah
8 : Ujung dalam Jl. Bali 1
9 : Simpang Jl. Moh. Zahab, Jl. Sentot Alibasyah
10 : Simpang Jl. MT. Haryono, Jl. Sentot Alibasyah
11 : Simpang Jl. Letda Abu Hanifah, Jl. Letkol Iskandar, Jl. Tp Kasim Nasir
12 : Simpang 4 Jl. Iskandar 10
13 : Simpang 4 Jl. H. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Gg. Iskandar 11
14 : Simpang Jl. Letkol Iskandar, Gg. Iskandar 11
15 : Simpang 4 Jl. Mayor Salim Batubara, Jl. Letkol Iskandar
16 : Simpang Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A
17 : Simpang Jl. MT. Haryono, Jl. Letkol Iskandar
18 : Simpang (2) Jl. Letkol Iskandar
19 : Simpang (3) Jl.Letkol Iskandar
20 : Simpang (1) Jl. Mayor Salim Batubara
21 : Simpang Jl. Sudirman, Jl. Mayor Salim Batubara
22 : Simpang (1) Khadijah, Jl. KH. Ahmad Dahlan
23 : Simpang 3 Jl. Letda Abu Hanifah, Jl. Khadijah
24 : Simpang Jl. Khadijah, Jl. Burniat
25 : Simpang (1) Belakang Benteng Marlborough
26 : Ujung pantai Tapak Paderi
27 : Bundaran Benteng Marlborough
28 : Simpang JL. DI. Panjaitan, Jl. Ahmad Yani
29 : Simpang Jl. Benteng, Jl. Siti Khadijah
30 : Simpang Jl. Arrow, Jl. Bawal
31 : Simpang Jl. Belato, Jl. Rejamat
32 : Simpang Jl. Khadijah, Jl. A. Yani
33 : Simpang Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar
34 : Simpang RS. Bahayangkara, Jl. A. Yani
35 : Simpang Jl. Rejamat, Kuburan Inggris
36 : Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan
37 : Simpang Jl. Kol. Barlian, Jl. Arrow
38 : Ujung Jl. Kol. Barlian
39 : Simpang Jl. Belato, Jl. Arrow
40 : Simpang Jl. Letkol Santosa, Jl. Cendrawasih
41 : Simpang Jl. Jendral Sudirman, Samping Unihaz
42 : Ujung Simpang 4 Jl. Sudirman III
43 : Simpang Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar
44 : Simpang 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan
45 : Simpang 4 Jl. Kerapu Ujung
46 : Simpang Jl. Pari, Jl. Kerapu
47 : Simpang Jl. Moh. Hasan, Jl. M. Hasan 1
48 : Simpang Jl. Pari
(A,1) : Jl. Enggano
(A,2) : Simp. Jl. Ibnu Hajar (Kantor Polsek Teluk Segara) – Simp. (1) Jl. Enggano
(1,2) : Jl. Enggano

- (1,6) : Jl. Bali
 (2,3) : Jl. Ibnu Hajar
 (2,9) : Jl. Pratu Aidit
 (3,4) : Simp. Jl. TP. Kasim Nasir, Jl. Ibnu Hajar - Simpang Jl. Bencoolen
 (3,5) : Jl. TP. Kasim Nasir
 (5,9) : Jl. Sentot Alibasyah
 (5,11) : Jl. TP. Kasim Nasir
 (6,8) : Jl. Bali 1
 (6,10) : Jl. Bali
 (7,10) : Jl. Sentot Alibasyah
 (7,8) : Gg. (1) Jl. Sentot Alibasyah – Ujung Jl. Bali 1
 (7,9) : Jl. Sentot Alibasyah
 (7,18) : Jl. Lettu Zulkifli
 (8,9) : Ujung Jl. Bali 1- Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Sentot Alibasyah
 (9,13) : Jl. Moh. Zahab
 (10,17) : Jl. MT. Haryono
 (11,14) : Jl. Letkol Iskandar
 (12,14) : Jl. Iskandar 10
 (12,20) : Simp. Jl. Iskandar 10 – Simp. Jl. Mayor Salim Batubara
 (13,14) : Gg. Iskandar 11
 (13,15): Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Jl. Gg. Iskandar 11 – Simp. Jl. Mayor Salim Batubara
 (13,16): Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Jl. Gg. Iskandar 11 – Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A
 (13,18): Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Jl. Gg. Iskandar 11 – Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Lettu Zulkifli
 (14,15): Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 10 – Simp. Jl. May Salim, Jl. Iskandar 8
 (15,19): Simp. Jl. May Salim, Jl. Iskandar 8 – Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Bukit Barisan
 (16,18): Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A - Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Lettu Zulkifli
 (16,19): Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A - Simp. Jl. Bukit Barisan
 (17,18): Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. MT. Haryono - Simp. Jl. Iskanadar 5
 (17,41): Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. MT. Haryono – Jl. Jend. Sudirman
 (19,41): Jl. Bukit Barisan
 (20,21): Simp. (3) Jl. May Salim Batubara - Simp. Jl. May Salim Batubara, Jl. KH. Ahmad Dahlan
 (21,41): Simp. Jl. May Salim Batubara, Jl. KH. Ahmad Dahlan – Jl. Jend. Sudirman
 (22,23): Simp. Jl. Khadijah. Gg. Khadijah – Simp. Jl. Khadihah, Jl. Letda Abu Hanifah
 (22,24): Simp. Jl. Khadijah. Gg. Khadijah - Simp. Jl. Khadihah, Jl. Burniat
 (23,25): Simp. Jl. Khadihah, Jl. Letda Abu Hanifah – Simp. Tapak Paderi
 (23,29): Simpang 3 Jl. Letda Abu Hanifah, Jl. Khadijah - Simpang Jl. Benteng, Jl. Siti Khadijah
 (24,32): Simp. Jl. Khadihah, Jl. Burniat – Simp. Jl. A. Yani, Jl. Khadijah
 (25,26): Simp. Tapak Paderi – Ujung Pantai tapak paderi
 (25,27): Simp. Tapak Paderi – Bundaran Tugu Pers
 (25,28): Simp. Tapak Paderi – Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani
 (27,28) : Bundaran Tugu Pers – Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani
 (27,30): Bundaran Tugu Pers – Simp. Jl. Arrow, Jl. Panjaitan
 (28,29): Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani – Simp. Jl. Benteng, Jl. Siti Khadijah
 (28,B) : Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani – Lapangan Merdeka
 (28,38): Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani – Simp. Jl. Pasar Ikan, Jl. Kol Berlian, Jl. Prof. Dr. Hazairin
 (30,37): Simp. Jl. Arrow, Jl. Panjaitan – Simp. Jl. Arrow, Jl. Kol Berlian
 (31,35): Jl. Rejamat
 (31,36): Simp. Jl. Rejamat, Jl. Moh. Hasan – Simp. Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan
 (31,39): Simp. Jl. Belato, Jl. Rejamat – Simp. Jl. Belato, Jl. Arrow
 (31,47): Simp. Jl. Rejamat, Jl. Moh. Hasan - Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Moh. Hasan

- (32,34): Simp. Jl. A. Yani, Jl. Khadijah – RS. Bhayangkara
 (32,B) : Simp. Jl. A. Yani, Jl. Khadijah – Lapangan Merdeka
 (33,35): Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar – Simp. Jl. Rejamat, kuburan Inggris
 (33,43): Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar – Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar
 (33,47): Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar - Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Moh. Hasan
 (34,35): RS. Bhayangkara – Ujung Jl. Rejamat
 (34,40): RS. Bhayangkara - Simpang Jl. Letkol Santosa, Jl. Cendrawasih
 (34,41): RS. Bhayangkara - Simpang Jl. Jendral Sudirman, Samping Unihaz
 (35,36): Ujung Jl. Rejamat - Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan
 (36,38): Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan - Ujung Jl. Kol. Barlian
 (36,B) : Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan – Lapangan Merdeka
 (37,38): Jl. Kol. Barlian
 (37,39): Simp. Jl. Kol. Barlian, Jl. Arrow – Simp. Jl. Belato, Jl. Arrow
 (38,B) : Ujung Jl. Kol. Barlian – Lapangan Merdeka
 (39,48): Simp. Jl. Belato, Jl. Arrow - Simp. Jl. Pari, Jl. Arrow
 (40,43): Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Cendrawasih – Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar
 (41,42): Simp. Jl. Jendral Sudirman, Samping Unihaz - Ujung Simp. 4 Jl. Sudirman III
 (43,44): Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar – Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan
 (44,45): Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan – Simp. 4 Jl. Kerapu Ujung
 (44,47): Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan – Simpang Jl. Moh. Hasan, Jl. M. Hasan 1
 (44,C) : Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan – Mesjid At-Taqwa
 (45,46): Jl. Kerapu (Simp. 4 Jl. Kerapu Ujung – Simp. Jl. Pari, Jl. Kerapu)
 (46,47): Simp. Jl. Pari, Jl. Kerapu – Simp. Jl. Moh. Hasan, Jl. M. Hasan 1
 (46,48): Jl. Pari (Simp. Jl. Pari, Jl. Kerapu – Simp. Jl. Pari)

Berdasarkan *graph* jaringan jalan Gambar 5.2, dilakukan pengukuran jarak antar *vertex* terhubung dan waktu yang dibutuhkan antar *vertex* terhubung. Jarak antar *vertex* terhubung didapatkan dari data sekunder yang diambil dari Dinas PU Kota Bengkulu (Lampiran 3), melalui *google maps* dan pengukuran langsung di lapangan dan diperoleh hasil seperti pada tabel berikut.

Tabel 5.2. Jarak Antar *Vertex*

No	Edge	Jarak (m)	No	Edge	Jarak (m)
1	(A,1)	343,2	39	(24,32)	130,7
2	(A,2)	272,9	40	(25,26)	238,2
3	(1,2)	185,3	41	(25,27)	182,4
4	(1,6)	556,5	42	(25,28)	232,8
5	(2,3)	276,3	43	(27,28)	145,9
6	(2,9)	472,6	44	(27,30)	547
7	(3,4)	35,7	45	(28,29)	124,2
8	(3,5)	137,6	46	(28,B)	231,5
9	(5,9)	283,0	47	(28,38)	493,1
10	(5,11)	489,7	48	(30,37)	313,5

11	(6,8)	231,5	49	(31,35)	202,7
12	(6,10)	106,3	50	(31,36)	256,0
13	(7,10)	192,3	51	(31,39)	284,7
14	(7,9)	278,1	52	(31,47)	190,5
15	(7,18)	354,8	53	(32,34)	138,8
16	(7,8)	340,3	54	(33,35)	209,5
17	(9,13)	212,7	55	(32,B)	284,6
18	(10,17)	358,0	56	(33,43)	444
19	(11,14)	248,2	57	(33,47)	188,9
20	(12,14)	201,4	58	(34,35)	259
21	(12,20)	267,7	59	(34,40)	386
22	(13,14)	252,4	60	(34,41)	434,7
23	(13,15)	242,8	61	(35,36)	294,3
24	(13,16)	379,9	62	(36,38)	262,2
25	(13,18)	486,1	63	(36,B)	47,3
26	(14,15)	231,5	64	(37,38)	206,8
27	(15,19)	64	65	(37,39)	432,1
28	(16,18)	80,6	66	(38,B)	88
29	(16,19)	119,2	67	(39,48)	173,9
30	(17,18)	189,3	68	(40,43)	905,4
31	(17,41)	877,2	69	(41,42)	249,3
32	(19,41)	384,3	70	(43,44)	174,5
33	(20,21)	142,1	71	(44,45)	221
34	(21,41)	343,8	72	(44,47)	507,5
35	(22,23)	193,7	73	(44,C)	411,7
36	(22,24)	112,3	74	(45,46)	338,1
37	(23,25)	133,8	75	(46,47)	98,2
38	(23,29)	161,7	76	(46,48)	305,7

Berdasarkan jarak antar *vertex* pada Tabel 5.2 yang direpresentasikan pada *graph* jaringan jalan pada Gambar 5.1, dibentuk suatu matriks dengan bobot untuk masing-masing *edge* adalah:

$$\begin{aligned}
 w_{ij} &= 0, && \text{jika } i = j \\
 &= w(i,j), && \text{jika } i \neq j \text{ dan } (i,j) \in E \\
 &= \infty && \text{jika } i \neq j \text{ dan } (i,j) \notin E
 \end{aligned}$$

dengan $w(i,j)$ adalah jarak dari *vertex* i ke *vertex* j .

Selanjutnya, berdasarkan *graph* jaringan jalan Gambar 5.2, dilakukan pengukuran waktu antar *vertex* terhubung. Perhitungan kecepatan berjalan pengungsi diambil kecepatan terendah berdasarkan Tabel 2.2 yaitu $0,751\text{m}/\text{det}$ dengan alasan bahwa jika pengungsi dengan kecepatan berjalan terendah dapat dievakuasi maka seluruh pengungsi lain juga dapat dievakuasi. Beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan berjalan pengungsi antara lain : lebar jalan, kecepatan berjalan, kepadatan

jalan, jumlah pejalan kaki dalam suatu kelompok dan lain-lain. Perhitungan kecepatan berjalan pengungsi menggunakan rumus berikut (Dewi,2010):

$$C_0 = W/S \text{ (dibulatkan ke bawah)}$$

$$C_1 = W/S \text{ (dibulatkan ke atas)}$$

$$V = (C_0/C_1) \times V_s$$

Keterangan:

C_0 = Kapasitas dasar jalan (dibulatkan ke bawah)

C_1 = Kapasitas aktual jalan saat bencana (dibulatkan ke atas)

V = Kecepatan berjalan saat bencana (m/det)

V_s = Kecepatan berjalan orang tua secara berkelompok ($0,751 m/det$)

W = Lebar jalan (m)

S = Luas yang dibutuhkan tiap pengungsi ($0,625 m^2$)

Berdasarkan persamaan (1), kecepatan berjalan pengungsi untuk tiap-tiap ruas jalan dapat dihitung dan diperoleh hasil seperti pada tabel berikut.

Tabel 5.3. Perhitungan Kecepatan Berjalan Pengungsi

No.	Lebar Jalan (m)	Kapasitas Dasar (C0)	Kapasitas Aktual (C1)	Kecepatan (m/det)
1.	2	3	4	0,563
2.	2,5	4	4	0,751
3.	3	4	5	0,601
4.	3,5	5	6	0,626
5.	4	6	7	0,644
6.	4,5	7	7	0,657
7.	5	8	8	0,751
8.	5,5	8	9	0,667
9.	6	9	10	0,676
10.	7	11	12	0,688
11.	8	12	13	0,693
12.	9	14	15	0,701
13.	10	16	16	0,751
14.	12	19	20	0,713
15.	13	20	21	0,715
16.	13,5	21	22	0,717

Dari Tabel 5.2 dan dengan mempertimbangkan panjang dan lebar tiap-tiap ruas jalan yang ada, dihitung waktu tempuh dari tiap vertex terhubung dan diperoleh hasil seperti pada tabel berikut.

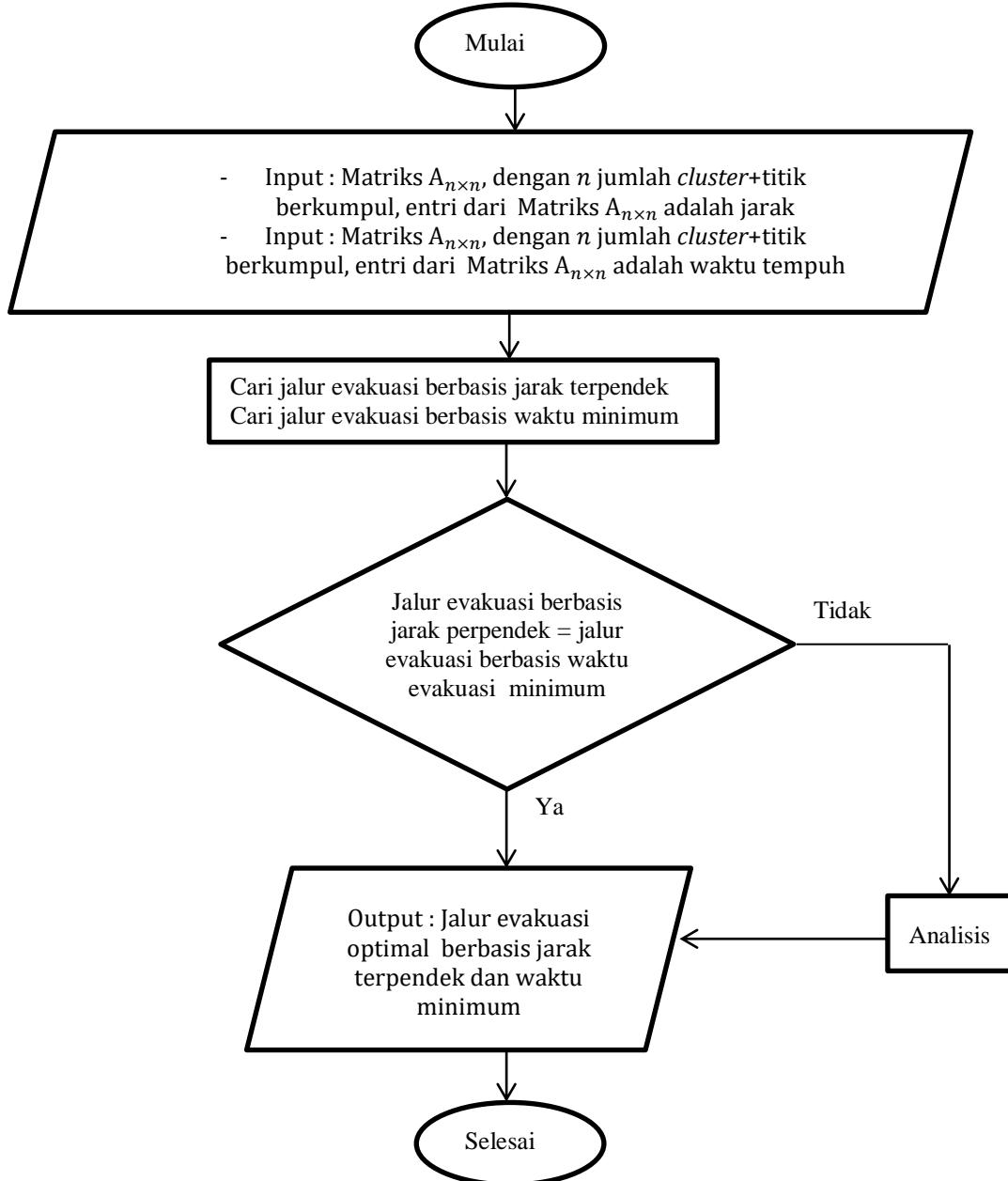
Tabel 5.4. Waktu Antar Vertex

No	Edge	Waktu (detik)	No	Edge	Waktu (detik)
1	(A,1)	206,3	39	(24,32)	85,9
2	(A,2)	164,0	40	(25,26)	153,4
3	(1,2)	119,3	41	(25,27)	121,7
4	(1,6)	399,0	42	(25,28)	139,9
5	(2,3)	177,9	43	(27,28)	94,0
6	(2,9)	304,4	44	(27,30)	352,3
7	(3,4)	21,5	45	(28,29)	80,0
8	(3,5)	88,6	46	(28,B)	173,9
9	(5,9)	182,3	47	(28,38)	370,3
10	(5,11)	315,4	48	(30,37)	201,9
11	(6,8)	152,1	49	(31,35)	152,2
12	(6,10)	76,2	50	(31,36)	173,1
13	(7,10)	123,8	51	(31,39)	183,3
14	(7,9)	179,1	52	(31,47)	143,1
15	(7,18)	233,1	53	(32,34)	104,2
16	(7,8)	219,2	54	(33,35)	134,9
17	(9,13)	137,0	55	(32,B)	213,7
18	(10,17)	256,7	56	(33,43)	285,9
19	(11,14)	159,8	57	(33,47)	113,3
20	(12,14)	121,0	58	(34,35)	166,8
21	(12,20)	172,4	59	(34,40)	255,6
22	(13,14)	151,7	60	(34,41)	326,5
23	(13,15)	145,9	61	(35,36)	198,9
24	(13,16)	228,3	62	(36,38)	177,2
25	(13,18)	292,1	63	(36,B)	32,0
26	(14,15)	149,1	64	(37,38)	155,3
27	(15,19)	41,2	65	(37,39)	278,3
28	(16,18)	51,9	66	(38,B)	59,5
29	(16,19)	76,8	67	(39,48)	112,0
30	(17,18)	121,9	68	(40,43)	583,1
31	(17,41)	564,9	69	(41,42)	187,2
32	(19,41)	247,5	70	(43,44)	112,4
33	(20,21)	91,5	71	(44,45)	144,3
34	(21,41)	206,6	72	(44,47)	381,1
35	(22,23)	127,3	73	(44,C)	285,3
36	(22,24)	73,8	74	(45,46)	217,7
37	(23,25)	86,2	75	(46,47)	63,2
38	(23,29)	103,9	76	(46,48)	196,9

5.4. Perancangan Perangkat Lunak Sistem Evakuasi Tsunami

Pada tahap ini dibuat perangkat lunak sistem evakuasi tsunami untuk menentukan jalur terpendek dan waktu minimum untuk evakuasi dari setiap *cluster* menuju titik berkumpul yang diimplementasikan pada model *graph* dari sistem evakuasi tsunami dengan menggunakan Algoritma *Floyd Warshall* berbantuan bahasa

pemrograman matlab. Pembuatan perangkat lunak didahului dengan pembuatan *flowchart* dan perancangan algoritma dengan berpedoman pada data input, proses dan output. Berikut diberikan *flowchart*, listing program dan algoritma untuk program sistem evakuasi tsunami.



Gambar 5.2. *Flowchart* Program

Algoritma program:

- Input matriks $A_{n \times n}$, dengan entri-entri matriks $A_{n \times n}$ adalah:

$$w_{ij} = 0, \quad \text{jika } i = j$$

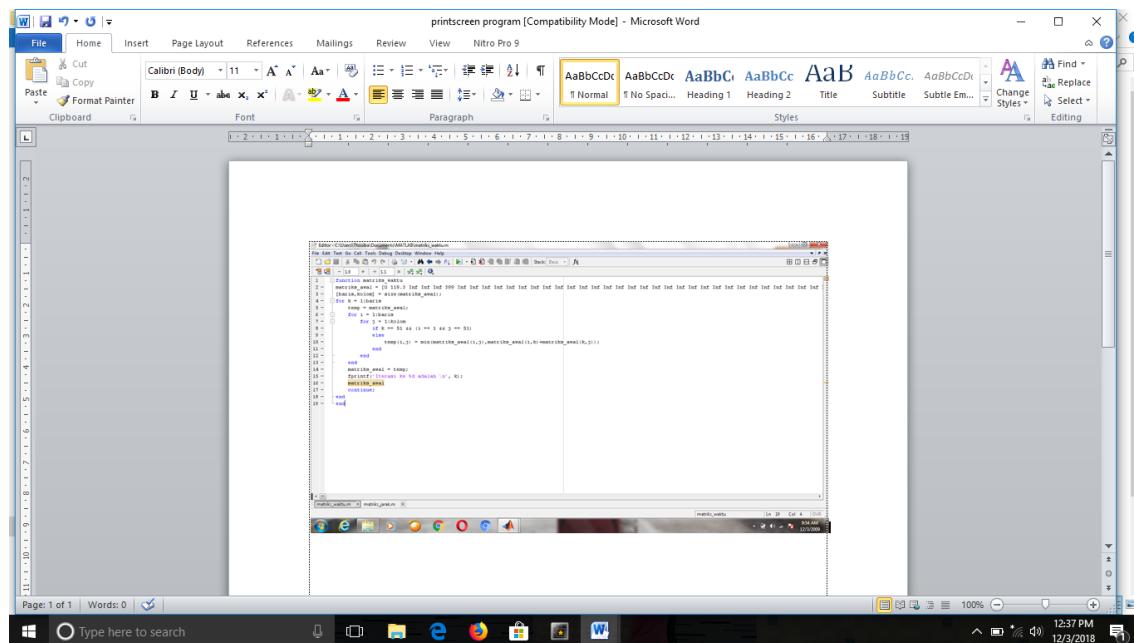
$$= w(i,j), \quad \text{jika } i \neq j \text{ dan } (i,j) \in E$$

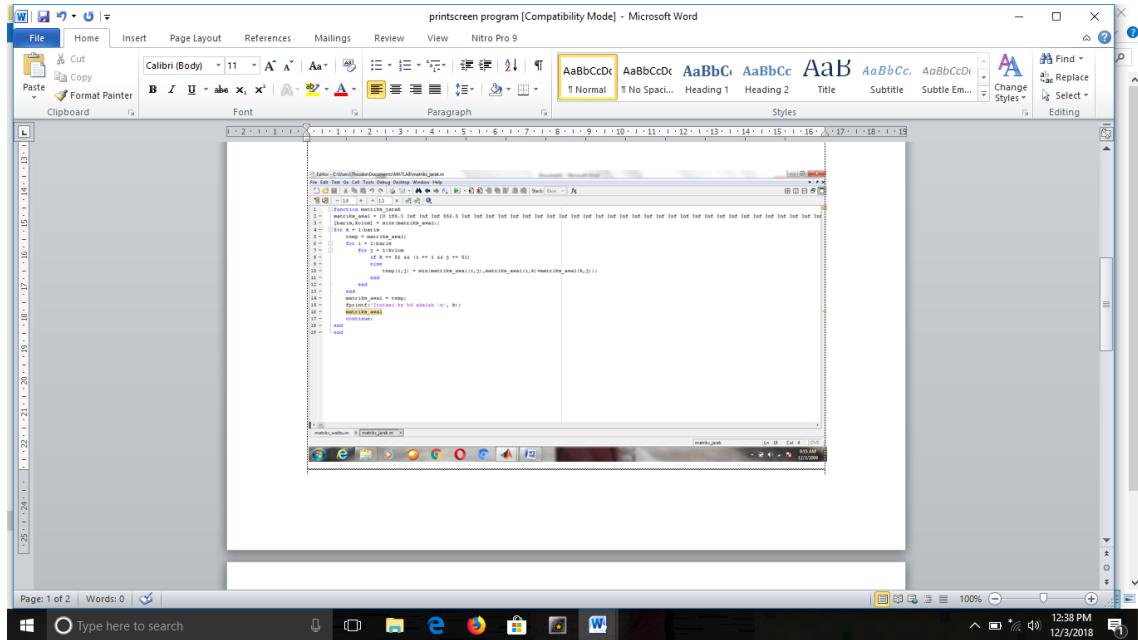
$$= \infty \quad \text{jika } i \neq j \text{ dan } (i,j) \notin E$$

Ada dua matriks yang diinput yaitu matriks jarak dan matriks waktu. Untuk matriks jarak, $w(i,j)$ adalah jarak dari vertex i ke vertex j . Untuk matriks waktu, $w(i,j)$ adalah waktu tempuh dari vertex i ke vertex j .

- Gunakan Algoritma *Floyd Warshall* untuk mencari:
 - a. Jarak terpendek dari setiap *cluster* menuju setiap titik berkumpul
 - b. Waktu minimum dari setiap *cluster* menuju setiap titik berkumpul
 - a. Diperoleh jarak terpendek dari setiap *cluster* menuju titik berkumpul terdekat beserta informasi jalur
 - b. Diperoleh waktu minimum dari setiap *cluster* menuju titik berkumpul terdekat beserta informasi jalur
 - Periksa apakah jalur dengan jarak terpendek dari setiap *cluster* menuju titik berkumpul terdekat sama dengan jalur dengan waktu minimum dari setiap *cluster* menuju titik berkumpul terdekat
 - a. Jika ya, tulis jalur yang diperoleh sebagai jalur optimal
 - b. Jika tidak, lakukan analisis terhadap jalur yang dihasilkan untuk mendapatkan jalur optimal
 - Diperoleh jalur optimal
 - Selesai

Listing Program





Gambar 5.3. Tampilan Listing Program

5.5. Penentuan Jalur Evakuasi Tsunami

Penentuan jalur evakuasi tsunami dilakukan memberi bobot pada *graph* jaringan jalan yang telah dibentuk, kemudian diaplikasikan pada perangkat lunak yang telah dirancang. Bobot pada *graph* jaringan jalan berupa jarak dan waktu sehingga dihasilkan jalur evakuasi tsunami berdasarkan jarak terpendek dan waktu minimum.

5.5.1. Penentuan jalur evakuasi tsunami berdasarkan jarak terpendek

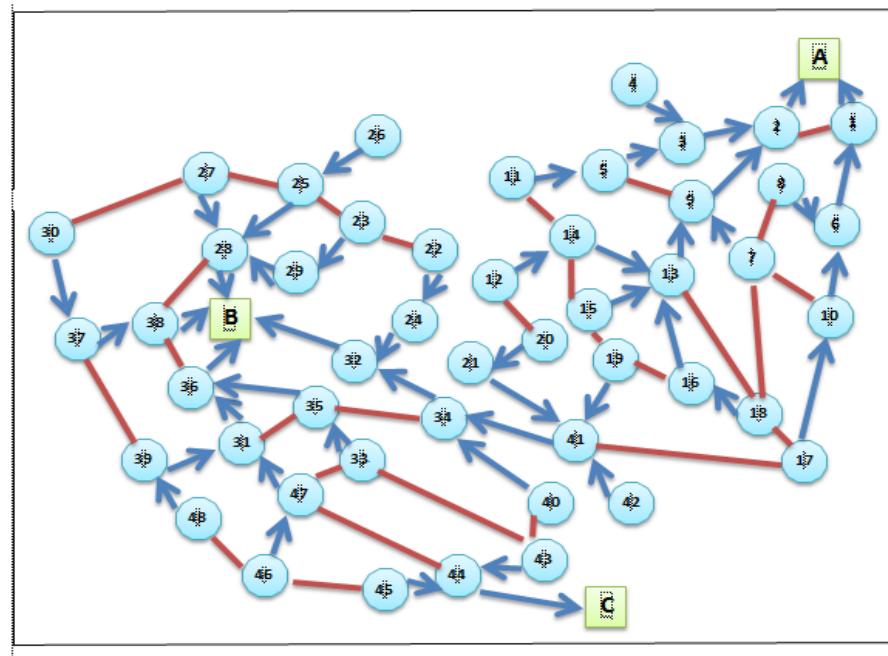
Berdasarkan *graph* jaringan jalan (Gambar 5.1) yang diboboti jarak antar *vertex* (Tabel 5.2) yang diaplikasikan dalam perangkat lunak yang telah dihasilkan (Lampiran 4), diperoleh jalur evakuasi seperti pada Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5.5. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Terpendek

C	Titik Berkumpul	Jalur Evakuasi	Jarak (m)	C	Titik Berkumpul	Jalur Evakuasi	Jarak (m)
1	A	1 → A	343,2	25	B	25 → 28 → B	464,3
2	A	2 → A	272,9	26	B	26 → 25 → 28 → B	702,5
3	A	3 → 2 → A	549,2	27	B	27 → 28 → B	377,4
4	A	4 → 3 → 2 → A	584,9	28	B	28 → B	231,5
5	A	5 → 3 → 2 → A	686,8	29	B	29 → 28 → B	355,7
6	A	6 → 1 → A	899,7	30	B	30 → 37 → 38 → B	608,3
7	A	7 → 9 → 2 → A	1023,6	31	B	31 → 36 → B	303,3
8	A	8 → 6 → 1 → A	1131,2	32	B	32 → B	284,6
9	A	9 → 2 → A	745,5	33	B	33 → 35 → 36 → B	551,1

10	A	$10 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \rightarrow A$	1006,0	34	B	$34 \rightarrow 32 \rightarrow B$	423,4
11	A	$11 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow A$	1176,5	35	B	$35 \rightarrow 36 \rightarrow B$	341,6
12	A	$12 \rightarrow 14 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow A$	1412,0	36	B	$36 \rightarrow B$	47,3
13	A	$13 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow A$	958,2	37	B	$37 \rightarrow 38 \rightarrow B$	294,8
14	A	$14 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow A$	1210,6	38	B	$38 \rightarrow B$	88,0
15	A	$15 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow A$	1201,0	39	B	$39 \rightarrow 31 \rightarrow 36 \rightarrow B$	588,0
16	A	$16 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow A$	1338,1	40	B	$40 \rightarrow 34 \rightarrow 32 \rightarrow B$	809,4
17	A	$17 \rightarrow 10 \rightarrow 6 \rightarrow 1 \rightarrow A$	1364,0	41	B	$41 \rightarrow 34 \rightarrow 32 \rightarrow B$	858,1
18	A	$18 \rightarrow 16 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 2 \rightarrow A$	1418,7	42	B	$42 \rightarrow 41 \rightarrow 34 \rightarrow 32 \rightarrow B$	1107,4
19	B	$19 \rightarrow 41 \rightarrow 34 \rightarrow 32 \rightarrow B$	1242,4	43	C	$43 \rightarrow 44 \rightarrow C$	586,2
20	B	$20 \rightarrow 21 \rightarrow 41 \rightarrow 34 \rightarrow 32 \rightarrow B$	1344,0	44	C	$44 \rightarrow C$	411,7
21	B	$21 \rightarrow 41 \rightarrow 34 \rightarrow 32 \rightarrow B$	1201,9	45	C	$45 \rightarrow 44 \rightarrow C$	632,7
22	B	$22 \rightarrow 24 \rightarrow 32 \rightarrow B$	527,6	46	B	$46 \rightarrow 47 \rightarrow 31 \rightarrow 36 \rightarrow B$	592,0
23	B	$23 \rightarrow 29 \rightarrow 28 \rightarrow B$	517,4	47	B	$47 \rightarrow 31 \rightarrow 36 \rightarrow B$	493,8
24	B	$24 \rightarrow 32 \rightarrow B$	415,3	48	B	$48 \rightarrow 39 \rightarrow 31 \rightarrow 36 \rightarrow B$	761,9

Berdasarkan Tabel 5.5 dibuat jalur evakuasi berdasarkan jarak terpendek seperti pada Gambar 5.4 berikut.



Gambar 5.4. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Terpendek

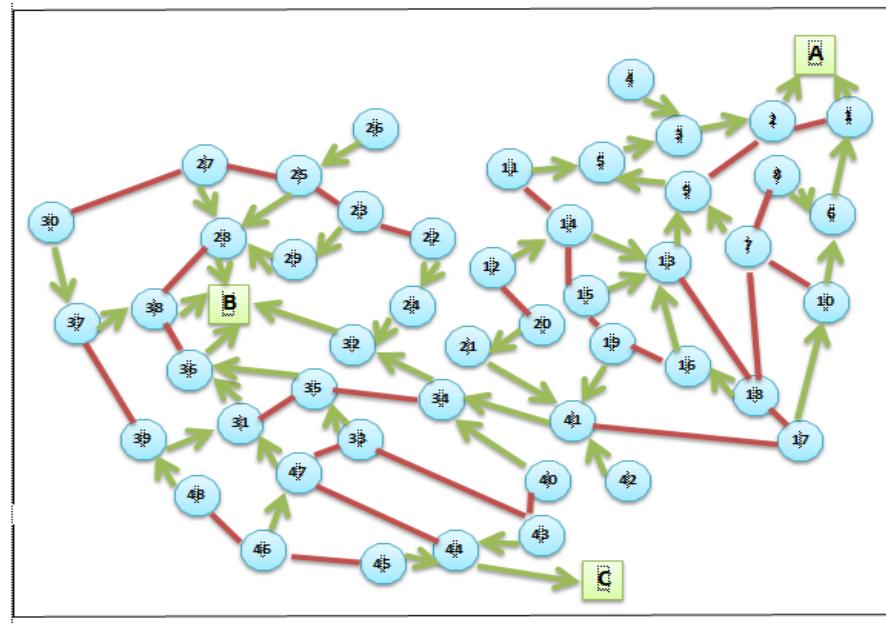
5.5.2. Penentuan jalur evakuasi tsunami berdasarkan waktu minimum

Berdasarkan graph jaringan jalan (Gambar 5.1) yang diboboti waktu antar *vertex* (Tabel 5.4) kemudian diaplikasikan dalam perangkat lunak yang telah dihasilkan (Lampiran 5), diperoleh jalur evakuasi seperti pada Tabel 5.6 berikut. Waktu tempuh yang diperoleh dari hasil running program (Lampiran 4) masih dalam satuan detik, pada tabel ini satuan waktu yang digunakan telah dikonversi ke dalam satuan menit.

Tabel 5.6. Jalur Evakuasi Berdasarkan Waktu Minimum

C	Titik Berkumpul	Rute Evakuasi	Waktu Tempuh (menit)	C	Titik Berkumpul	Rute Evakuasi	Waktu Tempuh (menit)
1	A	1 → A	3,44	25	B	25 → 28 → B	5,23
2	A	2 → A	2,73	26	B	26 → 25 → 28 → B	7,79
3	A	3 → 2 → A	5,69	27	B	27 → 28 → B	4,47
4	A	4 → 3 → 2 → A	6,06	28	B	28 → B	2,90
5	A	5 → 3 → 2 → A	7,18	29	B	29 → 28 → B	4,23
6	A	6 → 1 → A	10,09	30	B	30 → 37 → 38 → B	6,95
7	A	7 → 9 → 5 → 3 → 2 → A	13,19	31	B	31 → 36 → B	3,42
8	A	8 → 6 → 1 → A	12,62	32	B	32 → B	3,56
9	A	9 → 5 → 3 → 2 → A	10,21	33	B	33 → 35 → 36 → B	6,10
10	A	10 → 6 → 1 → A	11,36	34	B	34 → 32 → B	5,30
11	A	11 → 5 → 3 → 2 → A	12,43	35	B	35 → 36 → B	3,85
12	A	12 → 14 → 13 → 9 → 2 → A	17,04	36	B	36 → B	0,53
13	A	13 → 9 → 2 → A	12,50	37	B	37 → 38 → B	3,58
14	A	14 → 13 → 9 → 2 → A	15,03	38	B	38 → B	0,99
15	A	15 → 13 → 9 → 2 → A	14,93	39	B	39 → 31 → 36 → B	6,47
16	B	16 → 13 → 9 → 2 → A	16,15	40	B	40 → 34 → 32 → B	9,56
17	A	17 → 10 → 6 → 1 → A	15,64	41	B	41 → 34 → 32 → B	10,74
18	B	18 → 16 → 13 → 9 → 2 → A	17,01	42	B	42 → 41 → 34 → 32 → B	13,86
19	B	19 → 41 → 34 → 32 → B	14,87	43	C	43 → 44 → C	6,63
20	B	20 → 21 → 41 → 34 → 32 → B	15,71	44	C	44 → C	4,76
21	B	21 → 41 → 34 → 32 → B	14,18	45	C	45 → 44 → C	7,16
22	B	22 → 24 → 32 → B	6,22	46	B	46 → 47 → 31 → 36 → B	6,86
23	B	23 → 29 → 28 → B	5,96	47	B	47 → 31 → 36 → B	5,80
24	B	24 → 32 → B	4,99	48	B	48 → 39 → 31 → 36 → B	8,34

Berdasarkan Tabel 5.6 dibuat jalur evakuasi berdasarkan waktu minimum seperti pada Gambar 5.5 berikut.



Gambar 5.5. Jalur Evakuasi Berdasarkan Waktu Minimum

5.5.3. Penentuan jalur evakuasi tsunami optimal berdasarkan jarak terpendek dan waktu minimum

Jalur evakuasi yang optimal adalah jalur evakuasi yang paling efektif dengan mempertimbangkan semua faktor yang mempengaruhinya, yaitu jarak dan waktu. Jarak tidak selalu berbanding lurus dengan waktu. Ada kalanya jarak yang lebih dekat tidak selalu membutuhkan waktu yang lebih sedikit untuk menempuhnya dikarenakan adanya faktor-faktor lain yang mempengaruhinya. Begitu pula dengan waktu. Dalam proses evakuasi tsunami, waktu bukanlah satu-satunya pertimbangan yang harus diperhatikan. Faktor keamanan saat evakuasi tentu merupakan hal penting yang tidak dapat diabaikan. Karena itu jarak terpendek dan waktu minimum adalah dua hal yang tidak dapat dipisahkan dalam proses evakuasi tsunami.

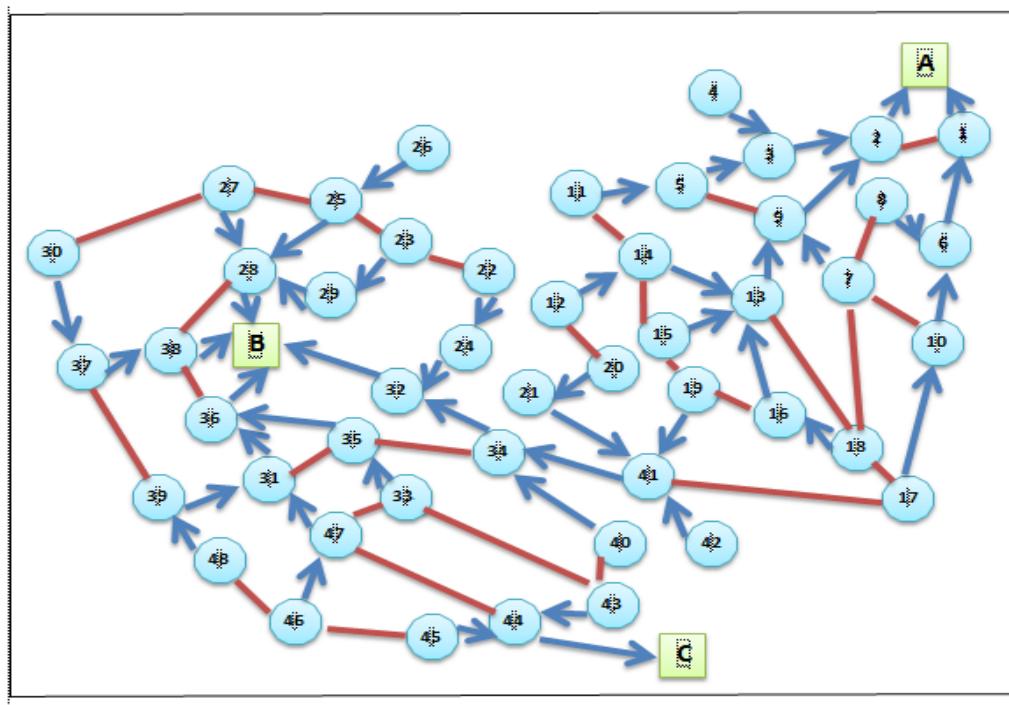
Berdasarkan perhitungan menggunakan perangkat lunak yang telah dihasilkan yaitu jalur evakuasi yang dihasilkan pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5, sebagian besar *cluster* melalui jalur yang sama untuk menuju titik berkumpul terdekatnya, namun ada 2 *cluster* yang mempunyai jalur yang berbeda yaitu *cluster* 7 dan *cluster* 9 meskipun menuju titik berkumpul yang sama.

Setelah dilakukan analisis performansi program serta dengan melakukan *crosscheck* lapangan maka diperoleh hasil bahwa jalur evakuasi yang efektif berdasarkan jarak terpendek dan waktu evakuasi minimum adalah seperti pada Tabel 5.7 berikut

Tabel 5.7. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Terpendek dan Waktu Minimum

C	Titik Berkumpul	Jalur Evakuasi	Jarak (m)	Waktu Tempuh (menit)	C	Titik Berkumpul	Jalur Evakuasi	Jarak (m)	Waktu Tempuh (menit)
1	A	1 → A	343,2	3,44	25	B	25 → 28 → B	464,3	5,23
2	A	2 → A	272,9	2,73	26	B	26 → 25 → 28 → B	702,5	7,79
3	A	3 → 2 → A	549,2	5,69	27	B	27 → 28 → B	377,4	4,47
4	A	4 → 3 → 2 → A	584,9	6,06	28	B	28 → B	231,5	2,90
5	A	5 → 3 → 2 → A	686,8	7,18	29	B	29 → 28 → B	355,7	4,23
6	A	6 → 1 → A	899,7	10,09	30	B	30 → 37 → 38 → B	608,3	6,95
7	A	7 → 9 → 2 → A	1023,6	10,79	31	B	31 → 36 → B	303,3	3,42
8	A	8 → 6 → 1 → A	1131,2	12,62	32	B	32 → B	284,6	3,56
9	A	9 → 2 → A	745,5	7,81	33	B	33 → 35 → 36 → B	551,1	6,10
10	A	10 → 6 → 1 → A	1006,0	11,36	34	B	34 → 32 → B	423,4	5,30
11	A	11 → 5 → 3 → 2 → A	1176,5	12,43	35	B	35 → 36 → B	341,6	3,85
12	A	12 → 14 → 13 → 9 → 2 → A	1412,0	17,04	36	B	36 → B	47,3	0,53
13	A	13 → 9 → 2 → A	958,2	12,50	37	B	37 → 38 → B	294,8	3,58
14	A	14 → 13 → 9 → 2 → A	1210,6	15,03	38	B	38 → B	88,0	0,99
15	A	15 → 13 → 9 → 2 → A	1201,0	14,93	39	B	39 → 31 → 36 → B	588,0	6,47
16	A	16 → 13 → 9 → 2 → A	1338,1	16,15	40	B	40 → 34 → 32 → B	809,4	9,56
17	A	17 → 10 → 6 → 1 → A	1364,0	15,64	41	B	41 → 34 → 32 → B	858,1	10,74
18	A	18 → 16 → 13 → 9 → 2 → A	1418,7	17,01	42	B	42 → 41 → 34 → 32 → B	1107,4	13,86
19	B	19 → 41 → 34 → 32 → B	1242,4	14,87	43	C	43 → 44 → C	586,2	6,63
20	B	20 → 21 → 41 → 34 → 32 → B	1344,0	15,71	44	C	44 → C	411,7	4,76
21	B	21 → 41 → 34 → 32 → B	1201,9	14,18	45	C	45 → 44 → C	632,7	7,16
22	B	22 → 24 → 32 → B	527,6	6,22	46	B	46 → 47 → 31 → 36 → B	592,0	6,86
23	B	23 → 29 → 28 → B	517,4	5,96	47	B	47 → 31 → 36 → B	493,8	5,80
24	B	24 → 32 → B	415,3	4,99	48	B	48 → 39 → 31 → 36 → B	761,9	8,34

Jalur evakuasi pada Tabel 5.7 ini dapat digambarkan seperti pada Gambar 5.6 berikut.



Gambar 5.6. Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Terpendek dan Waktu Minimum

BAB VI

RENCANA TAHAPAN SELANJUTNYA

Berdasarkan pada kajian dan analisis terhadap penelitian sebelumnya, rencana tahapan selanjutnya dari penelitian ini berfokus pada pengembangan model evakuasi tsunami melalui penentuan lokasi evakuasi vertikal dan horizontal serta berdasarkan waktu kejadian, yang bertujuan untuk memperbaiki dan mengembangkan pemodelan evakuasi tsunami yang telah ada. Fokus utama yang akan dilakukan adalah penentuan lokasi untuk evakuasi vertikal serta penentuan karakteristik bangunan yang sudah tersedia maupun yang belum tersedia di lokasi yang akan ditentukan yang dapat dijadikan tempat untuk evakuasi vertikal.

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, peneliti dapat menarik kesimpulan yaitu:

1. Aplikasi ilmu Matematika khususnya teori *Graph* dan dengan pendekatan riset operasi yang dirancang dalam penelitian ini telah berhasil merancang suatu perangkat lunak yang dapat digunakan dalam penyusunan model jalur evakuasi yang efektif berdasarkan jarak terpendek dan waktu minimum. Penentuan jarak terpendek dan waktu minimum dari setiap *cluster* menuju titik berkumpul terdekat dalam sistem evakuasi tsunami yang telah dihasilkan ini menggunakan algoritma *Floyd Warshall* dengan berbantuan perangkat lunak matlab.
2. Penyusunan model jalur evakuasi yang efektif berdasarkan jarak terpendek dan waktu minimum harus didukung data-data dasar seperti peta jaringan jalan, panjang dan lebar jalan, dan titik berkumpul. Dengan memanfaatkan fasilitas *Google Maps* yang bisa diakses secara *online* sangat membantu dalam proses pembuatan pembuatan model jalur evakuasi yang diinginkan.
3. Dari jalur evakuasi yang dihasilkan terdapat 6 *cluster* yaitu *cluster* 12, 14, 16, 17, 18 dan 20 yang melebihi ketentuan *InaTews* yaitu maksimal 15 menit waktu yang diperlukan untuk sampai lokasi aman, dalam hal ini titik berkumpul yang telah ditetapkan pemerintah Kota Bengkulu.

7.2. Saran

Penentuan titik berkumpul yang telah ditetapkan pemerintah seharusnya dapat mencakup semua lapisan masyarakat. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dicapai, perlu dilakukan kajian lagi terhadap titik berkumpul/lokasi evakuasi yang telah ditetapkan pemerintah. Hal ini bertujuan untuk mengantisipasi wilayah yang membutuhkan waktu yang melebihi ketentuan *InaTews* yaitu maksimal 15 menit untuk sampai lokasi evakuasi (titik berkumpul) sehingga perlu direkomendasikan kemungkinan metode evakuasi yang lain yaitu evakuasi vertikal.

DAFTAR PUSTAKA

- BNPB. Risiko Bencana Indonesia (RBI), *Jakarta, 2016*.
- BPBD Propinsi Bengkulu. Atlas Peta Resiko Bencana Propinsi Bengkulu, *Bengkulu, 2010*.
- BPS. Kecamatan Teluk Segara dalam Angka 2017. *Bengkulu, 2017*.
- Cormen TH. Introduction to Algorithms, 2nd Edition. *The MIT Press, Cambridge, London, 2003*.
- Dewi R.S. A-GIS Based Approach to the Selection of Evacuation Shelter Buildings and Routes Tsunami Risk Reduction: a Case study of Cilacap Coastal Area, Indonesia, Thesis, *Gadjah Mada University, University of Twente, 2010*.
- Dewi R.S. A-Gis Based Approach of an Evacuation Model for Tsunami Risk Reduction. *Journal of Integrated Disaster Risk Management, 2012*, 2, 2, 108-139.
- Fanani L, Adams JEM, Wicaksono SA. Rancang Bangun Aplikasi Web Pencarian Rute Terpendek Antar Gedung di Kampus Menggunakan Algoritma Flyod-Warshall. *Journal Basic Science and Technology, 2012*, 1, 2, 30-34.
- Fauzi Y, Suwarsono, Mayasari Z.M (a). Perancangan Sistem Informasi Kebencanaan Tsunami Melalui Penyusunan Peta Kerawanan Dan Jalur Evakuasi Bencana Di Pesisir Kota Bengkulu, Laporan Penelitian Hibah Bersaing, LPPM Universitas Bengkulu, **2014**, Tidak dipublikasikan.
- Fauzi Y, Suwarsono, Mayasari Z.M (b). The Run Up Modelling in Bengkulu Using the Spatial Interpolation of Kriging Technique. *Forum Geografi, 2014*, 28, 2, 103-112.
- Mayasari Z.M. *Pemodelan Matematika untuk Optimasi Proses Evakuasi dengan Model Makroskopik*, Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN-Barat, **2014**, 591-596.
- Mayasari Z.M. Swita. B., Rafflesia. U., Pemodelan Problem Evakuasi Bencana Tsunami Melalui Pendekatan Maximum Dynamic Flow Problem (MDFP) (Studi kasus : Kelurahan Berkas Kota Bengkulu). Laporan Penelitian Dosen Pemula Dana BOPTN FMIPA, LPPM Universitas Bengkulu, **2013**, Tidak dipublikasikan.
- Munir R. Matematika Diskrit. *Informatika, Bandung, 2005*.
- Post J, Wegscheider S, Muck M, Zosseder K, Kiefl R, Steinmetz T, Struns G. Assesment of human immediate response capability related to tsunami threats in Indonesia at a sub-national scale, *Natural Hazard Earth System Science, 2009*, 9, 1075-1086.

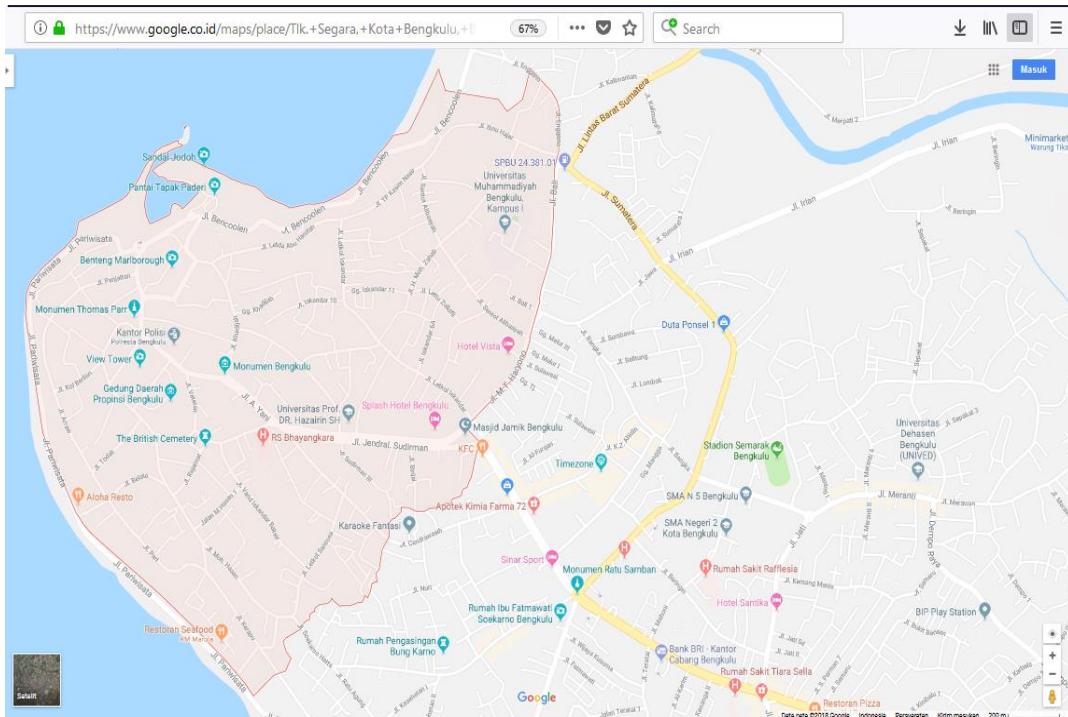
Siang J.J. Matematika Diskrit dan Aplikasinya pada Ilmu Komputer, *Amikom*, Yogyakarya, 2002.

Sudarsana I.W, Mendi S, Abdullah, Hendra A, Sahari A. Model Matematika untuk Sistem Evakuasi Kota Palu (SET_KP) Berbasis Jalur Terpendek dan Waktu Evakuasi Minimum. *Online Jurnal of Natural Science*, 2013, 2, 3, 39-53.

Suwarsono, 2003, Tingkat Pengetahuan Mitigasi Gempa Bumi dan Tsunami Ibu Rumah Tangga di Kota Bengkulu, Jurnal Akselarasi Universitas Muhammadiyah Bengkulu, Vol. IX No. 5.

Yunarto, Anwar H.Z, Wibowo Y.S. Perencanaan Evakuasi Vertikal di Pulau Sarangan Propinsi Bali Sebagai Alternatif Pengurangan Risiko Bahaya Tsunami. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 2015, 6, 2, 107-118.

Lampiran 1. Jaringan Jalan Kecamatan Teluk Segara



Lampiran 2. Daftar Panjang dan Lebar Jalan di Wilayah Penelitian

No	Nama Jalan	Jenis Jalan	Panjang Jalan (m)	Lebar Jalan (m)
1.	A. Yani	Arteri	800	10
2.	Bali	Arteri	450	13,5
3.	Irian	Arteri	5610	7,8
4.	MT. Haryono	Arteri	400	13,5
5.	Abu Hanifah	Lokal 2	700	6
6.	Arrow	Lokal 2	418	4
7.	Belato	Lokal 2	250	4
8.	Enggano	Lokal 2	1310	3
9.	Kerapu	Lokal 2	610	4
10.	Letkol Santoso	Lokal 2	725	4
11.	Pari	Lokal 2	580	4
12.	Pratu Aidit	Lokal 2	466	4
13.	Siti Khadijah	Lokal 2	386	4,5
14.	Teluk Segara	Lokal 2	800	7
15.	Todak	Lokal 2	258	5
16.	Tongkol	Lokal 2	232	7
17.	TP. Kasim Nasir	Lokal 2	400	4
18.	Veteran	Lokal 2	615	6
19.	KH. Dahlan	Lokal 2	558	3
20.	Indra Cahya	K3	155	12
21.	Kolonel Burlian	K3	400	5
22.	Prof. Dr. Hazairin	K3	600	6
23.	Jawa	K3	410	13
24.	RH. Hadi	K3	185	9
25.	Rejamat	K3	225	5
26.	Tenggiri	K3	150	10
27.	Belitung	Lokal 4	280	3,5
28.	BRI	Lokal 4	110	4
29.	Burniat	Lokal 4	363	3
30.	Kebun Dahri	Lokal 4	1800	4
31.	Lombok	Lokal 4	553	3,5
32.	Merpati	Lokal 4	200	3
33.	Pasar Ikan	Lokal 4	232	4
34.	Salim Batu Bara	Lokal 4	1500	4
35.	Sulawesi	Lokal 4	495	3
36.	Sumbawa	Lokal 4	317	4

No	Nama Jalan	Jenis Jalan	Panjang Jalan (m)	Lebar Jalan (m)
37.	Van Iskandar Bahsir	Lokal 4	548	4
38.	Ahmad Yani 1-2	Lokal 4	340	3
38.	Bali 1	Lokal 4	400	4,5
40.	Bali 2	Lokal 4	160	2,5
41.	Bali 3	Lokal 4	90	3
42.	Bangka 1	Lokal 4	400	3
43.	Bangka 2	Lokal 4	300	3
44.	Bawal 1	Lokal 4	171	6
45.	Berlian 1	Lokal 4	150	3
46.	Cendrawasih 1	Lokal 4	513	3
47.	Cendrawasih 2	Lokal 4	165	3
48.	Cendrawasih 3	Lokal 4	430	3
49.	DR. Muchtar	Lokal 4	150	4
50.	Enggano 1	Lokal 4	602	3
51.	Enggano 1 ^a	Lokal 4	696	3
52.	Bangka	Lokal 1	700	3
53.	Kapten Syahrial	Lokal 1	311	4
54.	Letkol Iskandar	Lokal 1	920	4
55.	M. Hasan	Lokal 1	700	5
56.	Nusirwan ZAinul	Lokal 1	1150	5
57.	Pendakian	Lokal 1	250	4
58.	Sentot Alibasyah	Lokal 1	1000	4

Sumber : Dinas Tata Kota Pemerintah Kota Bengkulu

Lampiran 3. Running Program Jalur Evakuasi Berdasarkan Jarak Tependek

Lampiran 4. Running Program Jalur Evakuasi Berdasarkan Waktu Minimum

Lampiran 5. Draft Artikel Ilmiah

Mathematical modeling approach of an evacuation model for tsunami risk reduction in bengkulu

Zulfia Memi Mayasari¹, Ulfasari Rafflesia¹, Mulia Astuti¹ and Yulian Fauzi^{1,2}

¹Universitas Bengkulu, Jl. WR Supratman, Bengkulu 38125, Indonesia

²Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara, Yogyakarta 55281, Indonesia

E-mail: zulfiamemimaysari@yahoo.com

Abstract. In tsunami mitigation plan, evacuation plays a crucial measure for saving human lives, especially for communities who are living in coastal areas. The main problem of evacuation system is to minimize the time to evacuate the vulnerable population. This can be done by determining the effective evacuation route. The effective evacuation route from a cluster (center of population) to an assembly point (safety area) should consider the minimum travel time. In calculating travel time between cluster and assembly point we have to consider the speed of walking of evacuees. The speed of walking of evacuees is influenced by several factor i.e width of the road, road density, number of evacuees in a group, etc. This research develop a mathematical modeling to choose the most effective evacuation route in coastal areas of Bengkulu city, Indonesia. The used method in determined minimun travel time is Flyod Warshall algorithm and the tsunami evacuation system software is made using matlab programming. Indonesian Tsunami Early Warning System (InaTEWS), takes about 15 minutes after an early warning tsunami to evacuate. The result of the evacuation modeling shows there are 5 clusters of 48 clusters need more than 15 minutes to reach safety area.

Introduction

Tsunami is a wave or series of ocean waves created by sudden, large disturbances of the deep ocean- water mass [1]. There are many factors which cause tsunami such as: earthquakes, volcanic eruption, landslides, slumps, and meteor impact. The destruction due to tsunami impact is various depending on the source the distance from the epicentre and also the intensity of the trigger factors which cause tsunami. Mostly, the coastal areas which are densely populated will have severely damages because high concentration of population, buildings, infrastructure, and sosio-economic facilities. Furthermore, tsunami can cause death. The most recent tsunami which hit Palu, Indonesia on September 28th, 2018. More than 1500 people died, and caused hundreds of houses were completely damage.

Bengkulu is a city in Sumatera Island, Indonesia. Some parts of its city are directly facing the Indian Ocean. Bengkulu city located in a tsunami prone area. In the period 2000 – 2010, Bengkulu had experienced two earthquakes with a large magnitude, on June 4th, 2000 with a magnitude of 7,3 Mw, the epicenter was 100 Km offshore southwest of the city of Bengkulu in a depth of 0 – 60 Km under sea level, and on September 12th, 2007 with a magnitude of 7,9

Mw, the epicenter was 160 Km offshore southwest of the city of Bengkulu in a depth of 30 Km. Both of these earthquakes have the potential to cause a tsunami [2].

In a tsunami mitigation plan, evacuation plays a very important role in before, during, and after disaster strikes for saving human lives. It is very important to prepare the city and its community with a disaster mitigation in order to reduce the damage and losses. There are two methods to evacuate people in case of tsunami, horizontal evacuation and vertical evacuation. In horizontal evacuation, people move to safer areas in a distant location or higher ground such as a hill. In vertical evacuation people are evacuated to the higher floors of a tsunami-resistant building nearby [3].

The evacuation route planning will find out routes to minimize the time to evacuate the vulnerable population [4]. The effective evacuation route from a given point should consider the minimum travel time. Travel time is influenced by the speed of walking of evacuees. The speed of walking of evacuees is influenced by several factor i.e width of the road, road density, number of evacuees in a group, etc.

Some researchers have conducted a study of tsunami mitigation plan. A study about a tsunami evacuation system model bases shortest path and minimum evacuation time which calculating shortest path using Dijkstra algorithm in Palu City [5]. A study about a vertical evacuation planning which effective evacuation route are obtained by Find Closest Facility on Network Analyst in Bali Province [6]. A study about a mathematical model to tsunami evacuation problem using macroscopic model approach in Bengkulu [7]. A study about an evacuation model for vertical evacuation using GIS tools in a tsunami-prone area [3].

The main issue of this research is tsunami evacuation planning with the focus to choose the most effective evacuation routes by consider the minimum travel time using Flyod Warshall Algorithm and the tsunami evacuation system software is made using matlab programming.

Basic theory

Bengkulu city

Bengkulu is a city in Sumatera Island, Indonesia. Some areas in Bengkulu are coastal and tsunami-prone area because directly facing the Indian Ocean. In the period 2000 – 2010, Bengkulu had experienced two earthquakes with a large magnitude and both of these earthquakes have the potential to cause a tsunami. Since 2006, the government have anticipated to tsunami by determining many safety area as an assembly point for community as can be seen in the Table 1.

Table 1. Assemby point in bengkulu city

Assembly point	Height (m)	Coverage of evacuation areas (subdistrict)	Evacuation route
Kampus Universitas Bengkulu	15 – 20	Rawa Makmur Permai Rawa Makmur Beringin Jaya Pasar Bengkulu Kampung Bali	Jl. UNIB Raya Jl. Kandang Limun Jl. Bandar Raya
Kampung Kelawi	14	Kampung Kelawi Tanjung Agung Tanjung Jaya Pondok Besi Malabero	Jl. Pasar Bengkulu-Jl. Kalimantan-Jl. Enggano
Lapangan Merdeka	15	Sumur Meleleh Berkas Kebon Keling Tengah Padang	Jl. Pendakian-Jl. Depan Benteng Jl. Depan Lapas-Jl. SMP Carolus
Mesjid At-Taqwa	14	Penurunan	Jl. Pasar Barau-Jl. Dalam Pasar Baru Koto II Jl. Pasar Baru-Jl. Nala

Simpang Empat Pantai	12,5	Anggut Bawah Penurunan Kebun Beler	Jl. Putri Gading Cempaka Jl. Sedap Malam Jl. Kebun Beler Jl. Batanghari Jl. Kampar Jl. Pembangunan Jl. Pariwisata Jl. Ciliwung Jl. Serayur Jl. Cimanuk Jl. Kap. Tendean Jl. Natadirja
STM Negeri	13	Lempuing	
Lapangan Sepakbola Kemuning	10,5	Lempuing Lingkar Barat	
Balai Buntar	19	Lempuing Padang Harapan	
Lapangan Pagar Dewa	15	Muara Dua Kandang Mas Bumi Ayu Kandang	Jl. Ir. Rustandi Sugiarto
Lapangan Pesantren Pancasila	20	Jembatan Kecil Sawah Lebar Kebun Tebeng	Jl. Jembatan Kecil Jl. Gunung Bungkuk Jl. Merapi Jl. Danau
Terminal Betungan	20	Padang Serai Sumber Jaya Bumi Ayu Teluk Sepang Tanjung Agung	Jl. Raya Betungan Jl. Dua Jalur Simpang Kandis
Simpang Empat Nakau	21	Tanjung Jaya Semarang Surabaya	Jl. Irian Jl. Halmahera Jl. Danau

Source : City Planning and City Building Supervision in [8]

2.2. Graph

A graph is an ordered pair $G = (V, E)$ consisting of a nonempty set V (called the vertices/nodes) and a set E (called edges) of two element subsets of V . The symbols $|V(G)|$ dan $|E(G)|$ denote the numbers of vertices and edges in a graph G . If $V(G) = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$ and $E(G) = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_m\}$ then $|V(G)| = n$ and $|E(G)| = m$.

2.3. Directed graph, undirected graph and weighted graph

A directed graph is a set of object (called vertices or nodes) that are connected together, where all the edges are directed from one node to another. A graph where the edges are bidirectional is called an undirected graph. In directed graph $(v_i, v_j) \neq (v_j, v_i)$. A weighted graph is a graph in which each branch is given a numeric weight.

2.4. The shortest path

The shortest path is minimum path needed to reach a place (node) from another place (node). In a path, there are source node and sink node. Other nodes that connect the source node and sink node are called intermediate nodes. Some of the shortest path problem are:

- a. A pair shortest path
- b. All pair shortest path
- c. Single-pair shortest path
- d. Intermediate pair shortest path

In this research the problem shortest path is single-pair shortest path.

2.5. Flyod Warshall

Flyod Warshall algorithm is an algorithm for finding shortest path in a weighted graph with positive or negative edgeweights (but no negative cycle) [9]. This algorithm compares all possible paths through the graph between each pair of vertices. The accuracy of this algorithm always shows a value 100% [10]. The Flyod Warshall algorithm mechanism is done in several steps. Steps of Flyod Warshall algorithm are:

1. Represent a weighted graph as a matrix. The weight for each is:

$$\begin{aligned} w_{ij} &= 0, && \text{if } i = j \\ &= w(i,j), && \text{if } i \neq j \text{ and } (i,j) \in E \\ &= \infty && \text{if } i \neq j \text{ and } (i,j) \notin E \end{aligned}$$

The output format is a matrix $n \times n$ with distance/travel time $D = [d_{ij}]$, d_{ij} is a distance/travel time from vertex i to vertex j .

2. Decompose the Flyod Warshall.

- i. $d_{ij}(k)$ is the shortest path length from i to j so that all intermediate vertices on the path (if any) are collected at $\{1, 2, \dots, k\}$.
- ii. $d_{ij}(0)$ is collected at w_{ij} , there is no intermediate vertex
- iii. $D(k)$ becomes matrix $n \times n$ $[d_{ij}(k)]$
- iv. Determine $d_{ij}(n)$ as distance/travel time from i to j then calculate $D(n)$.
- v. Calculate $D(k)$ for $k = 0, 1, \dots, n$.

3. Determine the shortest path structure

At this step, make the observations.

- i. A shortest path does not contain a cycle.
- ii. For a shortest path from vertex i to j with several intermediate vertices on the path, select from $\{1, 2, \dots, k\}$, with 2 possibilities:

- k is not a vertex on the path, the shortest path has a length d_{ij}^{k-1}
- k is a vertex on the path, the shortest path has a length $d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}$
- iii. Determine the shortest path from vertex i to j that contains vertex k
- iv. The shortest path contains a subpath from vertex i to k and a subpath from vertex k to j
- v. Every sub path only contains intermediate vertex at $\{1, 2, \dots, k-1\}$ and as much as possible has a minimum value, named d_{ik}^{k-1} and d_{kj}^{k-1} so that the path has a length $d_{ik}^{k-1} + d_{kj}^{k-1}$

4. Iterate, starting from 0-iteration to n^{th} iteration

- Determine $D(0)$ (0-iteration) = $[w_{ij}]$, is a weighted matrix
- Determine $D(k)$, $d_{ij}^{(k)} = \min \{ d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)} \}$ for $k = 1, \dots, n$, n is number of vertex.

5. The final result is a matrix for the n^{th} iteration. This matrix shows the shortest path for each vertex in the graph.

2.6. Evacuation time

Evacuation time is the available time for evacuate. It is defined by knowing the remaining time after the issuance of tsunami warning to the arrival of tsunami waves [11]. Indonesian Tsunami Early Warning System – InaTEWS, takes about 15 minutes after an early warning tsunami to evacuate [5]. In 15 minutes evacuees must have reached safe area (an assembly point). The length time to reach the assembly points is affected by speed of walking. Many research related to the speed of walking was conducted in disaster approach gave different results. One of them gave an overview of the speed of walking in disaster evacuation as can be seen in the Table 2.

Table 2. Evacuee walking speed

Walking condition	Average walking speed (<i>m/sec</i>)
A person pushing a perambulator	1,070
A person with a child	1,020
An independent walking elderly person	0,948
A group of walking elderly people	0,751

Source: Institute of Fire Safety & Disaster Preparedness (1987) after Sugimoto *et al*, (2003) in [11].

Based on this data, in this research assumed the speed of walking is 0,751(*m/sec*) because if the evacuees with the slowest speed can reach an assembly point, other evacuees that move faster can reach an assembly point consequently.

Results and discussion

Data availability and research location

Data used for this research are primary data obtained through direct measurements and secondary data obtained from relevant agencies or previous studies. Research location in the coastal area Bengkulu City, Teluk Segara District. Teluk Segara district is prone to tsunami disaster [12].

Research procedure

Steps of this research procedure are:

1. Observation and data collection. The data used are network map Bengkulu City, assembly point, width of the road, length of the road, road density and number of evacuees in a group.
2. Cluster research area. In this step, research area are divided into 48 clusters and there are 3 the nearest assembly point.
3. Make a road network graph. The road network graph is created based on the clusters and assembly points.
4. Make a tsunami evacuation system software. Tsunami evacuation system software to choose the most effective evacuation route is made using mathlab programming. The method used in determined minimum travel time is Flyod Warshall algorithm.
5. Analyze program performance. Software in step 4 was tested to verify the validating of the resulting model. Tested are carried out using available data and validated with real conditions in the research area.
6. Determination an effective evacuation routes. Based on step 1 – step 5, an effective evacuation routes are determined.

Road network graph

For this research, the road network graph contains 48 clusters and 3 the assembly point determined by government (Figure 1).

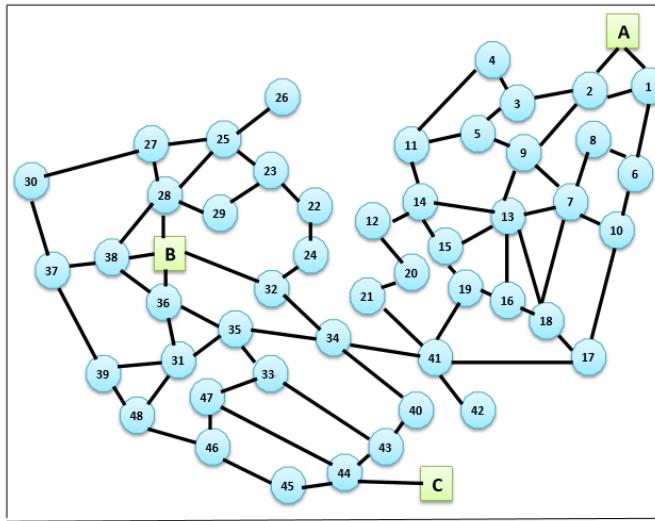


Figure 1. Road network graph teluk segara district bengkulu city

Information:

- A : Assembly point Kampung Kelawi
- B : Assembly point Lapangan Merdeka
- C : Assembly point Mesjid At-Taqwa
- 1 : Simpang Jl. Ibnu Hajar, Jl. Bali, Jl. Enggano
- 2 : Simpang 4 Jl. Ibnu Hajar
- 3 : Simpang 1 Jl. Ibnu Hajar, Jl. TP. Kasim Nasir
- 4 : Simpang Jl. Bencolen , Jl. Ibnu Hajar
- 5 : Simpang Jl TP. Kasim Nasir, Jl. Sentot Alibasyah
- 6 : Simpang Jl. Bali, Jl. Bali 1
- 7 : Simpang (1) Jl. Sentot Alibasyah
- 8 : Ujung dalam Jl. Bali 1
- 9 : Simpang Jl. Moh. Zahab, Jl. Sentot Alibasyah
- 10 : Simpang Jl. MT. Haryono, Jl. Sentot Alibasyah
- 11 : Simpang Jl. Letda Abu Hanifah, Jl. Letkol Iskandar, Jl. Tp Kasim Nasir
- 12 : Simpang 4 Jl. Iskandar 10
- 13 : Simpang 4 Jl. H. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Gg. Iskandar 11
- 14 : Simpang Jl. Letkol Iskandar, Gg. Iskandar 11
- 15 : Simpang 4 Jl. Mayor Salim Batubara, Jl. Letkol Iskandar
- 16 : Simpang Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A
- 17 : Simpang Jl. MT. Haryono, Jl. Letkol Iskandar
- 18 : Simpang (2) Jl. Letkol Iskandar
- 19 : Simpang (3) Jl.Letkol Iskandar
- 20 : Simpang (1) Jl. Mayor Salim Batubara
- 21 : Simpang Jl. Sudirman, Jl. Mayor Salim Batubara
- 22 : Simpang (1) Khadijah, Jl. KH. Ahmad Dahlan
- 23 : Simpang 3 Jl. Letda Abu Hanifah, Jl. Khadijah
- 24 : Simpang Jl. Khadijah, Jl. Burniat
- 25 : Simpang (1) Belakang Benteng Marlborough
- 26 : Ujung pantai Tapak Paderi
- 27 : Bundaran Benteng Marlborough
- 28 : Simpang JL. DI. Panjaitan, Jl. Ahmad Yani
- 29 : Simpang Jl. Benteng, Jl. Siti Khadijah
- 30 : Simpang Jl. Arrow, Jl. Bawal
- 31 : Simpang Jl. Belato, Jl. Rejamat
- 32 : Simpang Jl. Khadijah, Jl. A. Yani

- 33 : Simpang Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar
 34 : Simpang RS. Bahayangkara, Jl. A. Yani
 35 : Simpang Jl. Rejamat, Kuburan Inggris
 36 : Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan
 37 : Simpang Jl. Kol. Barlian, Jl. Arrow
 38 : Ujung Jl. Kol. Barlian
 39 : Simpang Jl. Belato, Jl. Arrow
 40 : Simpang Jl. Letkol Santosa, Jl. Cendrawasih
 41 : Simpang Jl. Jendral Sudirman, Samping Unihaz
 42 : Ujung Simpang 4 Jl. Sudirman III
 43 : Simpang Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar
 44 : Simpang 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan
 45 : Simpang 4 Jl. Kerapu Ujung
 46 : Simpang Jl. Pari, Jl. Kerapu
 47 : Simpang Jl. Moh. Hasan, Jl. M. Hasan 1
 48 : Simpang Jl. Pari
 (A,1) : Jl. Enggano
 (A,2) : Simp. Jl. Ibnu Hajar (Kantor Polsek Teluk Segara) – Simp. (1) Jl. Enggano
 (1,2) : Jl. Enggano
 (1,6) : Jl. Bali
 (2,3) : Jl. Ibnu Hajar
 (2,9) : Jl. Pratu Aidit
 (3,4) : Simp. Jl. TP. Kasim Nasir, Jl. Ibnu Hajar - Simpang Jl. Bengkoelen
 (3,5) : Jl. TP. Kasim Nasir
 (5,9) : Jl. Sentot Alibasyah
 (5,11) : Jl. TP. Kasim Nasir
 (6,8) : Jl. Bali 1
 (6,10) : Jl. Bali
 (7,10) : Jl. Sentot Alibasyah
 (7,8) : Gg. (1) Jl. Sentot Alibasyah – Ujung Jl. Bali 1
 (7,9) : Jl. Sentot Alibasyah
 (7,18) : Jl. Lettu Zulkifli
 (8,9) : Ujung Jl. Bali 1- Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Sentot Alibasyah
 (9,13) : Jl. Moh. Zahab
 (10,17) : Jl. MT. Haryono
 (11,14) : Jl. Letkol Iskandar
 (12,14) : Jl. Iskandar 10
 (12,20) : Simp. Jl. Iskandar 10 – Simp. Jl. Mayor Salim Batubara
 (13,14) : Gg. Iskandar 11
 (13,15) : Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Jl. Gg. Iskandar 11 – Simp. Jl. Mayor Salim Batubara
 (13,16) : Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Jl. Gg. Iskandar 11 – Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A
 (13,18) : Simp. Jl. Moh. Zahab, Jl. Lettu Zulkifli, Jl. Gg. Iskandar 11 – Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Lettu Zulkifli
 (14,15) : Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 10 – Simp. Jl. May Salim, Jl. Iskandar 8
 (15,19) : Simp. Jl. May Salim, Jl. Iskandar 8 – Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Bukit Barisan
 (16,18) : Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A - Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Lettu Zulkifli
 (16,19) : Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. Iskandar 6A - Simp. Jl. Bukit Barisan
 (17,18) : Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. MT. Haryono - Simp. Jl. Iskanadar 5
 (17,41) : Simp. Jl. Letkol Iskandar, Jl. MT. Haryono – Jl. Jend. Sudirman
 (19,41) : Jl. Bukit Barisan
 (20,21) : Simp. (3) Jl. May Salim Batubara - Simp. Jl. May Salim Batubara, Jl. KH. Ahmad Dahlan

- (21,41) : Simp. Jl. May Salim Batubara, Jl. KH. Ahmad Dahlan – Jl. Jend. Sudirman
 (22,23) : Simp. Jl. Khadijah. Gg. Khadijah – Simp. Jl. Khadiyah, Jl. Letda Abu Hanifah
 (22,24) : Simp. Jl. Khadijah. Gg. Khadijah - Simp. Jl. Khadiyah, Jl. Burniat
 (23,25) : Simp. Jl. Khadiyah, Jl. Letda Abu Hanifah – Simp. Tapak Paderi
 (23,29) : Simpang 3 Jl. Letda Abu Hanifah, Jl. Khadijah - Simpang Jl. Benteng, Jl. Siti Khadijah
 (24,32) : Simp. Jl. Khadiyah, Jl. Burniat – Simp. Jl. A. Yani, Jl. Khadijah
 (25,26) : Simp. Tapak Paderi – Ujung Pantai tapak paderi
 (25,27) : Simp. Tapak Paderi – Bundaran Tugu Pers
 (25,28) : Simp. Tapak Paderi – Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani
 (27,28) : Bundaran Tugu Pers – Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani
 (27,30) : Bundaran Tugu Pers – Simp. Jl. Arrow, Jl. Panjaitan
 (28,29) : Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani – Simp. Jl. Benteng, Jl. Siti Khadijah
 (28,B) : Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani – Lapangan Merdeka
 (28,38) : Simp. Jl. Benteng, Jl. A. Yani – Simp. Jl. Pasar Ikan, Jl. Kol Berlian, Jl. Prof. Dr. Hazairin
 (30,37) : Simp. Jl. Arrow, Jl. Panjaitan – Simp. Jl. Arrow, Jl. Kol Berlian
 (31,35) : Jl. Rejamat
 (31,36) : Simp. Jl. Rejamat, Jl. Moh. Hasan – Simp. Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan
 (31,39) : Simp. Jl. Belato, Jl. Rejamat – Simp. Jl. Belato, Jl. Arrow
 (31,47) : Simp. Jl. Rejamat, Jl. Moh. Hasan - Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Moh. Hasan
 (32,34) : Simp. Jl. A. Yani, Jl. Khadijah – RS. Bhayangkara
 (32,B) : Simp. Jl. A. Yani, Jl. Khadijah – Lapangan Merdeka
 (33,35) : Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar – Simp. Jl. Rejamat, kuburan Inggris
 (33,43) : Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar – Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar
 (33,47) : Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Van Iskandar Bakar - Simp. Jl. M. Hasan 1, Jl. Moh. Hasan
 (34,35) : RS. Bhayangkara – Ujung Jl. Rejamat
 (34,40) : RS. Bhayangkara - Simpang Jl. Letkol Santosa, Jl. Cendrawasih
 (34,41) : RS. Bhayangkara - Simpang Jl. Jendral Sudirman, Samping Unihaz
 (35,36) : Ujung Jl. Rejamat - Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan
 (36,38) : Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan - Ujung Jl. Kol. Barlian
 (36,B) : Simpang Jl. Todak, Jl. Moh. Hasan – Lapangan Merdeka
 (37,38) : Jl. Kol. Barlian
 (37,39) : Simp. Jl. Kol. Barlian, Jl. Arrow – Simp. Jl. Belato, Jl. Arrow
 (38,B) : Ujung Jl. Kol. Barlian – Lapangan Merdeka
 (39,48) : Simp. Jl. Belato, Jl. Arrow - Simp. Jl. Pari, Jl. Arrow
 (40,43) : Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Cendrawasih – Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar
 (41,42) : Simp. Jl. Jendral Sudirman, Samping Unihaz - Ujung Simp. 4 Jl. Sudirman III
 (43,44) : Simp. Jl. Letkol Santoso, Jl. Van Iskandar Bakar – Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan
 (44,45) : Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan – Simp. 4 Jl. Kerapu Ujung
 (44,47) : Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan – Simpang Jl. Moh. Hasan, Jl. M. Hasan 1
 (44,C) : Simp. 3 Jl. Soekarno Hatta, Jl. Letkol Santoso, Jl. Moh. Hasan – Mesjid At-Taqwa
 (45,46) : Jl. Kerapu (Simp. 4 Jl. Kerapu Ujung – Simp. Jl. Pari, Jl. Kerapu)
 (46,47) : Simp. Jl. Pari, Jl. Kerapu – Simp. Jl. Moh. Hasan, Jl. M. Hasan 1
 (46,48) : Jl. Pari (Simp. Jl. Pari, Jl. Kerapu – Simp. Jl. Pari)

Speed of walking of evacuees

The speed of walking of evacuees is calculated based on equation (1).

$$V = (\mathbf{C}_0/\mathbf{C}_1) \times Vs \quad (1)$$

$$C_0 = W/S \text{ (round-in value)} \quad (2)$$

$$C_1 = W/S \text{ (round-up value)} \quad (3)$$

Information:

C_0 = Base capacity of the road

C_1 = Actual capacity of the road during disaster

V = Actual speed of walking during disaster (**m/sec**)

Vs = Speed of walking during disaster by a group of elderly person (0,751 **m/sec**)

W = Width of the road (**m**)

S = Space requirement of person (0,625 **m²**)

The speed of walking of evacuees can be seen in the Table 3.

Table 3. Speed of walking of evacuees

Width of the road (m)	Base capacity (C_0)	Actual capacity (C_1)	Speed (m/sec)
2	3	4	0,563
2,5	4	4	0,751
3	4	5	0,601
3,5	5	6	0,626
4	6	7	0,644
4,5	7	7	0,657
5	8	8	0,751
5,5	8	9	0,667
6	9	10	0,676
7	11	12	0,688
8	12	13	0,693
9	14	15	0,701
10	16	16	0,751
12	19	20	0,713
13	20	21	0,715
13,5	21	22	0,717

Travel time

Travel time is a time needed to travel from a cluster to a cluster or from a cluster to an assembly point. In this research, travel time can be seen in the Table 4.

Tabel 4. Travel time

C (AP)	Edges	Travel time (sec)	C (AP)	Edges	Travel time (sec)	C (AP)	Edges	Travel time (sec)
1	(A,1)	206,3	27	(15,19)	41,2	52	(31,47)	143,1
2	(A,2)	164,0	28	(16,18)	51,9	53	(32,34)	104,2
3	(1,2)	119,3	29	(16,19)	76,8	54	(33,35)	134,9

4	(1,6)	399,0	30	(17,18)	121,9	55	(32,B)	213,7
5	(2,3)	177,9	31	(17,41)	564,9	56	(33,43)	285,9
6	(2,9)	304,4	32	(19,41)	247,5	57	(33,47)	113,3
7	(3,4)	21,5	33	(20,21)	91,5	58	(34,35)	166,8
8	(3,5)	88,6	34	(21,41)	206,6	59	(34,40)	255,6
9	(5,9)	182,3	35	(22,23)	127,3	60	(34,41)	326,5
10	(5,11)	315,4	36	(22,24)	73,8	61	(35,36)	198,9
11	(6,8)	152,1	37	(23,25)	86,2	62	(36,38)	177,2
12	(6,10)	76,2	38	(23,29)	103,9	63	(36,B)	32,0
13	(7,10)	123,8	39	(24,32)	85,9	64	(37,38)	155,3
14	(7,9)	179,1	40	(25,26)	153,4	65	(37,39)	278,3
15	(7,18)	233,1	41	(25,27)	121,7	66	(38,B)	59,5
16	(7,8)	219,2	42	(25,28)	139,9	67	(39,48)	112,0
17	(9,13)	137,0	43	(27,28)	94,0	68	(40,43)	583,1
18	(10,17)	256,7	44	(27,30)	352,3	69	(41,42)	187,2
19	(11,14)	159,8	45	(28,29)	80,0	70	(43,44)	112,4
20	(12,14)	121,0	46	(28,B)	173,9	71	(44,45)	144,3
21	(12,20)	172,4	47	(28,38)	370,3	72	(44,47)	381,1
22	(13,14)	151,7	48	(30,37)	201,9	73	(44,C)	285,3
23	(13,15)	145,9	49	(31,35)	152,2	74	(45,46)	217,7
24	(13,16)	228,3	50	(31,36)	173,1	75	46,47)	63,2
25	(13,18)	292,1	51	(31,39)	183,3	76	(46,48)	196,9
26	(14,15)	149,1						

Design tsunami evacuation system software

Tsunami evacuation system is a software to determine an effective evacuation route based on minimum travel time from every cluster to every assembly point. In determining minimum travel time using Flyod Warshall algorithm and the tsunami evacuation system software is made using matlab programming.

Program algorithm

1. Input a matrix $A_{51 \times 51}$. The matrix $A_{51 \times 51}$ which the entries are travel time, i.e :

$$w_{ij} = 0, \quad \text{if } i = j$$

$$= w(i,j), \quad \text{if } i \neq j \text{ and } (i,j) \in E$$

$$= \infty \quad \text{if } i \neq j \text{ dan } (i,j) \notin E$$
2. Do Flyod Warshall algorithm. Find the minimum travel time from every clusters to all assembly points.
3. Based on step 2 and matrix at every iteration, find the nearest assembly point from every clusters and the effective evacuation route.
4. Finish

In this research, a tsunami evacuation system software have been produced which can be used to determine the evacuation route with minimum travel time from each cluster to all assembly point in Bengkulu City.

Table 5. Evacuation route with minimum travel time

C	Assembly Point	Evacuation route	Travel time (minute)	C	Assembly point	Evacuation route	Travel time (minute)
1	A	1 → A	3,44	25	B	25 → 28 → B	5,23
2	A	2 → A	2,73	26	B	26 → 25 → 28 → B	7,79
3	A	3 → 2 → A	5,69	27	B	27 → 28 → B	4,47
4	A	4 → 3 → 2 → A	6,01	28	B	28 → B	2,90
5	A	5 → 3 → 2 → A	7,18	29	B	29 → 28 → B	4,23
6	A	6 → 1 → A	12,15	30	B	30 → 37 → 38 → B	6,95
7	A	7 → 10 → 6 → 1 → A	12,62	31	B	31 → 36 → B	3,42
8	A	8 → 6 → 1 → A	12,6	32	B	32 → B	3,56
9	A	9 → 2 → A	7,80	33	B	33 → 35 → 36 → B	6,10
10	A	10 → 6 → 1 → A	11,36	34	B	34 → 32 → B	5,30
11	A	11 → 5 → 3 → 2 → A	12,43	35	B	35 → 36 → B	3,85
12		12 → 14 → 13 → 9 →					
	A	2 → A	17,04	36	B	36 → B	0,53
13	A	13 → 9 → 2 → A	10,10	37	B	37 → 38 → B	3,58
14	A	14 → 13 → 9 → 2 → A	12,63	38	B	38 → B	0,99
15		15 → 14 → 13 → 9 →					
	A	2 → A	14,93	39	B	39 → 31 → 36 → B	6,47
16		16 → 19 → 41 →					
	B	34 → 32 → B	16,15	40	B	40 → 34 → 32 → B	9,56
17		17 → 10 → 6 → 1 →					
	A	A	15,64	41	B	41 → 34 → 32 → B	10,74
18		18 → 16 → 19 → 41 →				42 → 41 → 34 → 32	
	B	34 → 32 → B	17,01	42	B	→ B	13,86
19	B	19 → 41 → 34 → 32 → B	14,87	43	C	43 → 44 → C	6,63
20		20 → 21 → 41 → 34 → 32					
	B	→ B	15,71	44	C	44 → C	4,76
21		21 → 41 → 34 → 32					
	B	→ B	14,17	45	C	45 → 44 → C	7,16
22						46 → 47 → 33 → 35	
	B	22 → 24 → 32 → B	6,22	46	B	→ 36	
23						→ B	6,86
	B	23 → 29 → 28 → B	5,96	47	B	47 → 33 → 35 → 36	
24						→ B	5,80
	B	24 → 32 → B	4,99	48	B	48 → 39 → 31 → 36	
						→ B	8,34

According to Table 5, an effective evacuation route can be seen in Figure 2.

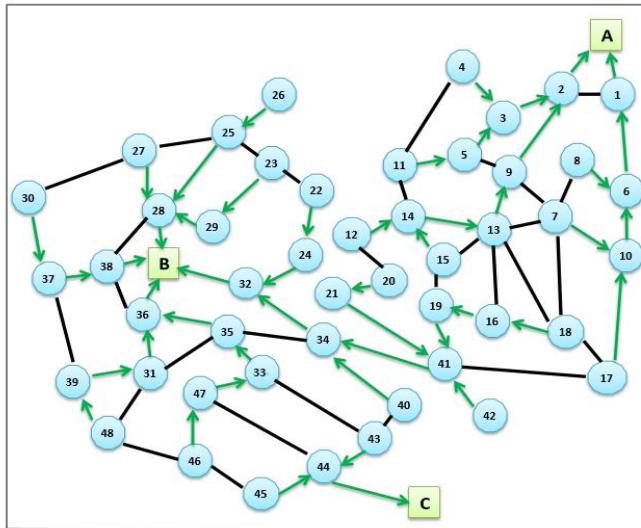


Figure 2. An effective evacuation route

Conclusion

A tsunami evacuation system software has been produced which can be used in determining an effective evacuation route from each cluster to the nearest assembly point. Determination of the minimum evacuation time using Flyod Warshall algorithm. The results show that for this research area, there were 5 clusters that took more than 15 minutes (InaTEWS, takes about 15 minutes after an early warning tsunami to evacuate) to get the nearest assembly points.

Acknowledgements

This research supported by Universitas Bengkulu under grant Penelitian Unggulan Universitas Bengkulu 2018 with No. SP DIPA-042.01.2.400977/2018.

References

- [1] Abbot PL 2004 *Natural Disaster* (Boston: McGraw-Hill)
- [2] BNPB 2016 *Risiko Bencana Indonesia (RBI)* (Jakarta: BNPB)
- [3] Dewi RS 2012 A-Gis based approach of an evacuation model for tsunami risk reduction *Journal of integrated disaster risk Management* **2** 108
- [4] Kim S, George B and Shekhar S 2007 Evacuation route planning: Scalable heuristic *Proceedings of 15th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems, GIS* p 146
- [5] Sudarsana IW, Mendi S, Abdullah, Hendra A and Sahari A 2013 Model matematika untuk Sistem Evakuasi Tsunami Kota Palu (SET_KP) berbasis jalur terpendek dan waktu evakuasi minimum *Online Jurnal of Natural Science* **2** 39
- [6] Yunarto, Anwar HZ and Wibowo YS 2015 Perencanaan evakuasi vertikal di Pulau Sarangan Propinsi Bali sebagai alternatif pengurangan risiko bahaya tsunami *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi* **6** 107
- [7] Mayasari ZM 2014 Pemodelan matematika untuk optimasi proses evakuasi dengan model makroskopik *Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN-Barat* 591
- [8] BPBD Propinsi Bengkulu 2010 *Atlas Peta Resiko Bencana Propinsi Bengkulu* (Bengkulu: BPBD)

- [9] Cormen TH 2003 *Introduction to Algorithms* (London: The MIT Press Cambridge)
- [10] Fanani L, Adams JEM and Wicaksono SA 2012 Rancang bangun aplikasi web pencarian rute terpendek antar gedung di kampus menggunakan algoritma Flyod-Warshall. *Journal Basic Science and Technology* **1** 30
- [11] Dewi RS 2010 A-Gis based approach to the selection of evacuation shelter buildings and routes tsunami risk reduction: a case study of cilacap coastal area Indonesia *Thesis* Gadjah Mada University University of Twente
- [12] Fauzi Y, Suwarsono and Mayasari ZM 2014 The run up modelling in Bengkulu using the spatial interpolation of kriging technique *Forum Geografi* **28** 103