



**LAPORAN AKHIR  
PENELITIAN UNGGULAN UNIB 2021**

**JUDUL PENELITIAN**

**ANALISIS POTENSI SEBARAN GENANGAN TSUNAMI  
DI KAWASAN WISATA PANTAI PANJANG KOTA  
BENGKULU MELALUI PEMODELAN SPASIAL**

**Tim Peneliti:**

**Dr. Yulian Fauzi, M.Si. (0027077205)**

**Dr. Hardiansyah, ST., MT. (0013088301)**

**Zulfia Memi Mayasari, S.Si, M.Si. (0002127301)**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS BENGKULU  
2021**

## HALAMAN PENGESAHAN

**Judul Penelitian** : Analisis Potensi Sebaran Genangan Tsunami di Kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu Melalui Pemodelan Spasial

**Research Group** : Matematika Terapan  
**Unggulan/Fokus Research Group** : Mitigasi Bencana

### Ketua Peneliti

a. Nama Lengkap : Dr. Yulian Fauzi, M.Si  
b. NIP : 197312021998022001  
c. NIDN : 0002127301  
d. Pangkat/Golongan : Pembina Tk I / IV b  
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 : 081373190203 / [yulianfauzi@unib.ac.id](mailto:yulianfauzi@unib.ac.id)

**Peneliti Anggota** : 2 orang

Nama Anggota 1 : Dr. Hardiansyah, ST., MT  
NIDN : 0013088301  
Bidang Keahlian : Modeling dan Transportasi

Nama Anggota 2 : Zulfia Memi Mayasari, S.Si. M.Si  
NIDN : 0002127301  
Bidang Keahlian : Aljabar

Biaya yang diusulkan : **Rp. 40.000.000,-**  
Biaya total penelitian : **Rp. 40.000.000,-**

Bengkulu, Desember 2021  
Ketua,



Dr. Jarulis, S.Si., M.Si.  
NIP. 197511252005011013

Dr. Yulian Fauzi, M.Si.  
NIP. 197312021998021001

Menyetujui  
Ketua LPPM Universitas Bengkulu

Dr. Ir. Hery Suhartoyo, M.Sc.  
NIP. 196306251987031002

## RINGKASAN

Model genangan tsunami merupakan model spasial yang digunakan untuk mensimulasikan karakteristik genangan tsunami melalui perhitungan penurunan ketinggian genangan tsunami setiap satu meter di daratan. Pemodelan genangan tsunami digunakan untuk mengestimasi jangkauan dan luas genangan tsunami mulai dari garis pantai sampai ke daratan dan umumnya model ini dikembangkan melalui metode empiris. Tujuan penelitian ini adalah mendapatkan gambaran secara spasial potensi sebaran genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Secara khusus tujuan penelitian ini adalah 1). Memodelkan secara spasial potensi sebaran genangan tsunami untuk menghasilkan jangkauan dan luas genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. 2). Menginventarisir tingkat kerawanan bencana tsunami sebagai upaya menciptakan tingkat kewaspadaan dan antisipasi dalam kebencanaan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Tahapan untuk mencapai tujuan penelitian ini dilakukan dengan cara: pengumpulan data dan bahan penelitian, pengembangan dan analisis model spasial genangan tsunami melalui pendekatan matematis, menentukan dan menetapkan variabel penelitian berupa nilai indeks kekasaran permukaan dan elevasi lokasi penelitian, menyusun dan membangun model spasial menggunakan ArcGIS serta validasi dan analisis model potensi genangan tsunami. Hasil penelitian menghasilkan simulasi genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Simulasi ketinggian tsunami digaris pantai menggunakan skenario 10 meter, 15 meter dan 20 meter. Simulasi tsunami menyebabkan daratan di wilayah Pantai Panjang akan tergenang seluas 1,4 – 3,5 Km<sup>2</sup> dengan jangkauan sejauh 415 - 765 meter dari garis pantai. Model genangan tsunami divalidasi dengan cara membandingkan genangan tsunami hasil model Berryman dengan genangan tsunami dari BNPB yang diunduh <http://inarisk.bnpb.go.id>. Peta potensi genangan tsunami hasil pemodelan Berryman memberikan pola genangan yang sama dengan peta genangan tsunami Inariks yang dikeluarkan oleh BNPB. Jangkauan genangan tsunami dari kedua model memberikan hasil yang cukup berbeda dengan nilai RMSD sebesar 166,9 dengan NRMSD sebesar 44,8 %. Luas dan jangkauan genangan tsunami berbanding lurus dengan ketinggian tsunami di garis pantai, semakin tinggi tsunami di garis pantai maka semakin luas genangan tsunami dan semakin jauh jangkauan tsunami di daratan.

Kata kunci: Model Spasial, Genangan Tsunami, Zonasi Kerawanan Tsunami, Peta Bahaya Tsunami, dan Pantai Panjang.

## PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat\_Nya peneliti dapat menyelesaikan laporan kemajuan Penelitian Unggulan Universitas Bengkulu Tahun 2021 dengan judul : **Analisis Potensi Sebaran Genangan Tsunami di Kawasan Pantai Panjang Kota Bengkulu Melalui Pemodelan Spasial**. Penelitian ini dilaksanakan untuk mendapatkan gambaran secara spasial tentang potensi sebaran tsunami di Kota Bengkulu khususnya di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Potensi sebaran tsunami dimodekan dengan menggunakan model spasial Berryman dan Smart dengan mengacu pada ketinggian tsunami yang dikeluarkan oleh BNPB. Laporan kemajuan penelitian ini disusun sesuai dengan keterbatasan dan kemampuan yang peneliti miliki. Peneliti merasakan banyak sekali kekurangan khususnya yang berkaitan dengan pengumpulan data dalam skala detail dan pemodelan penjalaran dan genanga tsunami secara numerik. 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 2021  
peneliti

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN .....	ii
RINGKASAN .....	iii
PRAKATA .....	iv
DAFTAR ISI .....	v
DAFTAR TABEL .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR LAMPIRAN .....	ix
BAB I. PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA .....	3
2.1. Tsunami .....	3
2.2. Model Genangan Tsunami .....	4
2.3. Model Builder .....	7
2.4. Peta Jalan Penelitian .....	8
BAB III. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN .....	9
3.1. Tujuan Penelitian .....	9
3.2. Manfaat Penelitian .....	10
BAB IV. METODE PENELITIAN .....	11
4.1. Data Penelitian .....	11
4.2. Langkah Penelitian .....	11
4.2.1. Perumusan Model .....	11
4.2.2. Penentuan Elevasi dan Indeks Kekasaran Permukaan .....	12
4.2.3. Membangun Model Genangan Tsunami .....	13
4.2.4. Validasi dan Analisis Model .....	13
BAB V. HASIL DAN LUARAN DICAPAI .....	15
5.1. Deskripsi Daerah Penelitian .....	15
5.1.1. Geografis .....	15
5.1.2. Topografi .....	15
5.2. Hasil Penelitian yang Telah Dicapai .....	17
5.2.1. Perumusan Model Spasial Tsunami .....	17
5.2.2. Wilayah Penelitian .....	19
5.2.3. Penentuan Elevasi dan Indeks Kekasaran Permukaan .....	19
5.2.4. Perancangan Model Builder .....	24
5.3. Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami .....	26
5.4. Validasi Model .....	32
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN .....	35
6.1. Kesimpulan .....	35
6.2. Saran .....	35
DAFTAR PUSTAKA .....	36

LAMPIRAN .....	38
----------------	----

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Bahan Penelitian .....	11
Tabel 5.1. Persentase Luas Masing Masing Kecamatan .....	15
Tabel 5.2. Luas Wilayah (Ha) Berdasarkan Kemiringan di Wilayah Kota Bengkulu .....	16
Tabel 5.3. Luas Wilayah (Ha) Berdasarkan Ketinggian di Wilayah Kota Bengkulu .....	17
Tabel 5.4. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan .....	22
Tabel 5.5. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan Model Smart ....	31

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Hubungan Kecepatan Gelombang Tsunami dengan Tinggi Genangan	4
Gambar 2.2.	Diagram Gelombang Tsunami di Daratan. Tinggi <i>run-up</i> digaris pantai $Y_s$ jarak genangan $L$ , tinggi <i>run up</i> $R$ , Kemiringan lereng $S_0$ , total gradient gesekan $S_f$ , kedalaman genangan $y$ dan profil ketinggian gelombang-puncak	6
Gambar 2.3.	Peta Jalan Penelitian	8
Gambar 4.1.	Bagan Alir Penelitian	12
Gambar 5.1.	Diagram Gelombang Tsunami	18
Gambar 5.2.	Peta Citra Wilayah Penelitian	20
Gambar 5.3.	Peta DEM Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung	21
Gambar 5.4.	Peta Penggunaan Lahan Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung	23
Gambar 5.5.	Desain Model Builder untuk Pemodelan HLoss	24
Gambar 5.6.	Desain Model Builder untuk Pemodelan Genangan Tsunami	26
Gambar 5.7.	Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 10 Meter	28
Gambar 5.8.	Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 15 Meter	29
Gambar 5.9.	Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 20 Meter	30
Gambar 5.10.	Jangkauan Genangan Tsunami Model Berryman dan Smart	32
Gambar 5.11.	Segmen Pengukuran Jangkauan Genangan Tsunami	33
Gambar 5.12.	Jangkauan Genangan Tsunami Hasil Model Berryman dan Inarisk BNPB	33



## **DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1. Draft Artikel Ilmiah pada Jurnal Internasional

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Pesisir Kota Bengkulu merupakan kawasan yang memiliki dinamika pertumbuhan yang cukup pesat. Hal ini ditandai dengan berkembangnya pusat-pusat permukiman dan pertokoan serta industri pariwisata di kawasan pesisir Kota Bengkulu. Kawasan wisata Pantai Panjang merupakan salah satu pantai terbaik yang berada di Kota Bengkulu dan semakin ramai dikunjungi oleh wisatawan dari tahun ke tahun. Penataan kawasan pantai baik yang dilakukan oleh pemerintah maupun swasta menjadikan kawasan ini menjadi primadona untuk dikunjungi oleh wisatawan. Ramainya kunjungan wisatawan membuat ekonomi masyarakat di Kota Bengkulu tetap mengeliat, khususnya usaha makanan, minuman dan usaha lainnya yang berada di dalam kawasan wisata Pantai Panjang. Hanya saja faktor kebutuhan ekonomis kurang menghiraukan ancaman yang senantiasa mengintai dikawasan ini, yaitu bencana tsunami. Berdasarkan UU No. 24 Tahun 2007 tentang Penanggulangan Bencana menyebutkan bahwa setiap orang berkewajiban dalam melakukan kegiatan penanggulangan bencana, dan memberikan informasi yang benar kepada publik tentang penanggulangan bencana. Pasal ini memberikan ruang bagi para akademisi untuk dapat berperan serta dalam penanggulangan bencana, kaitannya dengan perencanaan dan pemberian informasi yang baik dan benar melalui pemodelan spasial potensi genangan tsunami dan pembuatan peta bahaya tsunami.

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 dari bencana tersebut (Fauzi dkk., 2020). Melihat efek bahaya yang ditimbulkan bencana tsunami tidaklah kecil, maka perlu adanya sistem manajemen mitigasi bencana tsunami khususnya pada pra bencana. Manajemen mitigasi bencana tsunami di tingkat daerah harus didukung oleh peta bahaya tsunami, peta genangan tsunami, peta zonasi kerawanan, peta evakuasi, dan peta risiko tsunami serta kebijakan yang jelas tentang prosedur-prosedur peringatan dini. Berdasarkan kajian dan pengamatan di kawasan wisata Pantai Panjang tidak ditemukan panduan atau rambu evakuasi bencana tsunami. Saat ini panduan yang ada hanya berupa petunjuk jalur evakuasi bencana tsunami. Sementara peta bahaya dan zona kerawanan jika terjadi bencana tsunami belum terlihat dan tersedia di kawasan wisata Pantai Panjang.

Pemodelan potensi genangan tsunami membutuhkan parameter dan variabel yang akurat dan mempunyai kesamaan dengan real di lapangan, karena pemodelan genangan merupakan representasi dari kondisi nyata yang ada di lokasi penelitian. Parameter pemodelan potensi genangan tsunami adalah topografi dan tutupan lahan wilayah pesisir yang diwujudkan dalam bentuk data DEM dan penggunaan lahan. Jangkauan dan luasan genangan tsunami di wilayah pesisir sangat dipengaruhi oleh kedua parameter tersebut. Sebagai konsekuensinya, topografi dan tutupan lahan wilayah pesisir yang berbeda juga akan menghasilkan karakteristik genangan tsunami yang berbeda.

Pembuatan peta genangan atau peta bahaya tsunami dapat dilakukan melalui penelusuran data sejarah tsunami atau dengan pemodelan tsunami. Salah satu metode untuk mengestimasi bencana tsunami dan tingkat bahaya dan kerawanan tsunami dapat dilakukan melalui pemodelan spasial. Model genangan tsunami merupakan model spasial yang digunakan untuk mensimulasikan karakteristik genangan tsunami melalui perhitungan penurunan ketinggian genangan tsunami di daratan. Variabel yang digunakan dalam model ini terdiri dari kemiringan lereng, kekasaran permukaan (tutupan lahan/penggunaan lahan), dan tinggi *run up* di garis pantai (Berryman, 2006; dan Smart *et al.*, 2016). Pemodelan tsunami pada kawasan wisata pantai sangat penting dilakukan sebagai upaya meminimalisir potensi risiko bencana tsunami di kawasan tersebut. Banyaknya aktifitas penduduk dan wisatawan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu perlu diantisipasi dan direncanakan tingkat keselamatannya jika terjadi bencana tsunami.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

Pemodelan potensi genangan tsunami digunakan untuk mensimulasikan karakteristik genangan tsunami dari garis pantai sampai ke daratan. Berryman (2006), dalam penelitiannya mengembangkan model genangan tsunami Hill dan Mader (1997) dengan menambahkan kemiringan lahan. Pengembangan model ini berhasil mendapatkan rata-rata genangan tsunami dari suatu daerah dengan mencari genangan maksimum dan genangan minimum. Model yang dikembangkan oleh Berryman (2006) berhasil menarik perhatian para peneliti di Indonesia untuk menerapkannya di Indonesia. Beberapa penelitian yang menggunakan model ini diantaranya penelitian yang dilakukan oleh Putra (2008), Purbani (2012), Fauzi dkk (2014), Zahro (2017), dan Wahyuni (2020). Penelitian yang dilakukan oleh Putra (2008) menggunakan model Berryman untuk memodelkan genangan tsunami di Kota Banda Aceh. Penelitian ini berhasil mengembangkan koefisien nilai kekasaran permukaan yang diturunkan dari beberapa penggunaan lahan. Purbani (2012) menggunakan model Berryman untuk memodelkan tsunami di Pulau We Banda Aceh dengan bantuan model *Builder*. Penggunaan model Berryman untuk memodelkan genangan tsunami di wilayah pesisir dilakukan oleh Fauzi dkk (2014) di pesisir Kota Bengkulu, Zahro (2017) di pesisir Kabupaten Serang Banten, dan Wahyuni (2020) di pesisir Kulonprogo DIY. Ketiga penelitian ini menggunakan skenario ketinggian tsunami di garis pantai melalui asumsi dan pendekatan sejarah dan karakteristik tsunami yang dapat terjadi di wilayah pesisir. Metode mendapatkan sebaran genangan tsunami yang digunakan oleh Fauzi dkk (2014) menggunakan geostatistik sedangkan Zahro (2017) dan Wahyuni (2020) menggunakan ArcGis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa data tinggi tsunami di garis pantai berhubungan dengan luas genangan tsunami. Semakin tinggi tsunami di garis pantai maka semakin luas genangan tsunami yang dihasilkan.

#### **2.1. Tsunami**

Gelombang tsunami terbentuk akibat tubuh air laut mengalami gangguan dalam skala besar dan dalam jangka waktu yang relatif singkat. Besar kecilnya gelombang tsunami sangat ditentukan oleh karakteristik gempa bumi (parameter sesar, magnitudo, lokasi dan kedalaman) yang memicunya dan material penyusun dasar laut (Jaffe dan Gelfenbuam, 2007; Dao *et al.*, 2007; Bryant, 2008; Latief, 2013; dan Flouri *et al.*,

2013). Tsunami akan membentuk seri gelombang dengan kecepatan tertentu, dengan menggunakan prinsip hukum kekekalan energi. Kecepatannya gelombang tsunami tergantung pada kedalaman air, sehingga gelombang tersebut mengalami percepatan atau perlambatan ketika melintasi kedalaman yang berbeda-beda. Kecepatan tsunami di daratan dapat dihitung berdasarkan ketinggian genangan tsunami di daratan, menggunakan persamaan Annunziato dan Best, (2005):

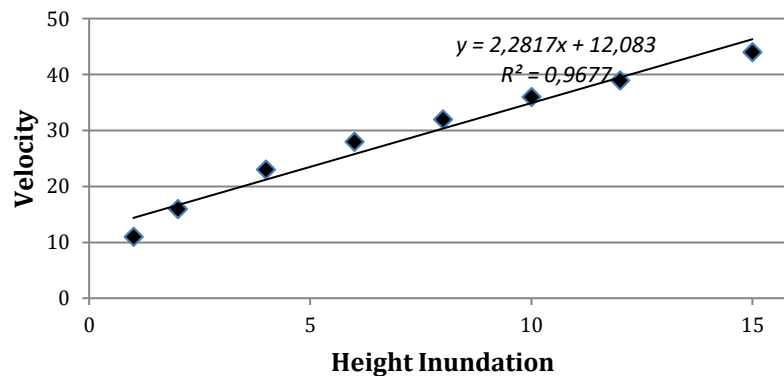
$$V = \sqrt{g \cdot h} \quad (1)$$

dimana:  $V$  = cepat rambat gelombang

$g$  = percepatan gravitasi bumi (9,8 m/s)

$h$  = kedalaman laut

Hubungan antara cepat rambat gelombang tsunami dengan tinggi genangan (*run up*) dapat dilihat dalam gambar berikut (Fauzi, 2015):



Gambar 2.1. Hubungan Kecepatan Gelombang Tsunami dengan Tinggi Genangan

Pada beberapa kasus tsunami dapat berupa gelombang pasang naik yang terjadi sangat cepat yang langsung membanjiri daerah pesisir rendah. Pada kasus lainnya tsunami dapat datang sebagai bentuk dinding air vertikal yang bersifat turbulen dengan daya rusak tinggi. Morfologi pantai berbentuk teluk dengan batimetri yang dangkal akan menyebabkan tinggi gelombang tsunami menjadi semakin besar, yang merupakan fungsi dari perubahan batimetri dan lebar alur yang dilewati (Santius, 2015).

## 2.2. Model Genangan Tsunami

Pemodelan genangan tsunami digunakan untuk mengestimasi genangan tsunami mulai dari garis pantai sampai ke daratan dan umumnya model ini dikembangkan melalui metode empiris. Beberapa model genangan yang telah dikembangkan untuk mengestimasi genangan tsunami menggunakan variabel ketinggian *run up* di garis pantai, kemiringan lereng dan kekasaran permukaan. Persamaan yang digunakan untuk

mengetahui jarak genangan ke arah darat yang dituangkan dalam persamaan (2) (Hills dan Mader, 1997)

$$X_{\max} = \frac{0.06 (H_0)^{\frac{4}{3}}}{n^2} \quad (2)$$

dimana:

$X_{\max}$  = Jarak genangan dari garis pantai ke arah darat

$H_0$  = Ketinggian gelombang tsunami di garis pantai

$n$  = Koefisien kekasaran permukaan

$k$  = Konstanta

Persamaan ini digunakan untuk mencari ketinggian *run up* maksimum untuk pantai yang landai-datar. Nilai konstanta tergantung pada unit pengukuran antara 0.015 – 0.07 (lahan yang sangat halus seperti lumpur – lahan yang kasar seperti formasi lava) (Hills & Mader, 1997). Perkembangan persamaan ini dimodifikasi oleh Berryman (2006) dengan menambahkan variabel ketinggian permukaan yang direpresentasikan oleh kemiringan lereng. Persamaan ini dikembangkan melalui perhitungan matematis berdasarkan kalkulasi kehilangan ketinggian tsunami persatu meter jarak genangan.

Metode *Hloss* merupakan metode pemodelan genangan berdasarkan ketinggian gelombang dari garis pantai, kemiringan lereng, dan koefisien kekasaran permukaan. Persamaan ini diimplementasikan menggunakan fungsi *cost-distance* yang menghitung jarak ke sumber terdekat untuk setiap piksel, dengan cara meminimalkan jarak yang ditentukan dalam suatu permukaan biaya. Sumber untuk fungsi adalah nilai piksel yang mewakili gelombang laut/tsunami, dan permukaan biaya adalah piksel yang mewakili hilangnya ketinggian gelombang tsunami (*Hloss*), dengan  $n$  adalah piksel kekasaran permukaan dan  $S$  merupakan piksel kemiringan lereng. Persamaan modifikasi disajikan dalam persamaan (3).

$$H_{loss} = \left( \frac{167n^2}{H_0^{\frac{1}{3}}} \right) + 5 \sin S \quad (3)$$

dimana:

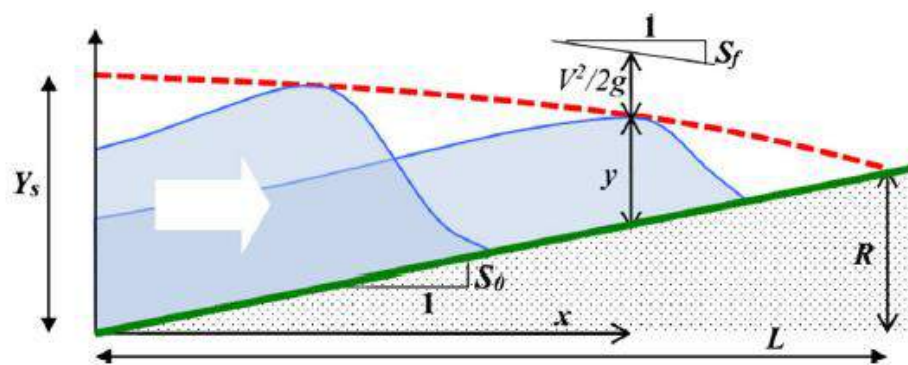
$H_{loss}$  = Penurunan ketinggian air permeter dari jarak genangan

$n$  = Koefisien kekasaran permukaan

$H_0$  = Ketinggian gelombang tsunami di garis pantai

$S$  = Lereng

Kedua model diatas relatif sederhana dalam implementasinya dan biasanya didasarkan pada data empiris. Kedua model belum didukung oleh kajian teoritis sehingga dapat memberikan hasil yang kurang baik ketika diterapkan pada wilayah pesisir yang berbeda. Pengembangan model genangan tsunami dengan mempertimbangkan prinsip hidrolika sederhana dilakukan oleh Smart *et al.*, (2016). Genangan tsunami dikaji dari perspektif satu dimensi dengan kemiringan garis pantai adalah diukur sejajar dengan arah datangnya tsunami dan perbedaan topografi daratan tidak diperhitungkan. Parameter yang digunakan dan analisis genangan tsunami di daratan ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Diagram Gelombang Tsunami di Daratan. Tinggi *run-up* digaris pantai  $Y_s$  jarak genangan  $L$ , tinggi *run up*  $R$ , Kemiringan lereng  $S_0$ , total gradient gesekan  $S_f$ , kedalaman genangan  $y$  dan profil ketinggian gelombang-puncak (garis merah)  
(Sumber; Smart *et al.*, 2016)

Persamaan jarak genangan tsunami di daratan berdasarkan formula yang dikembangkan oleh Smart et al, (2016) di berikan pada persamaan berikut

$$L = \frac{3a}{2} \ln \left( \frac{Y_s}{aS_0} + 1 \right) \quad (4)$$

dimana:

- $L$  = jarak genangan tsunami
- $Y_s$  = tinggi run up digaris pantai
- $S_0$  = kemiringan lereng
- $a$  = kekasaran permukaan

Nilai kekasaran permukaan ( $a$ ) yang digunakan dalam Smart *et al.*, (2016) mulai dari 10 sampai 200 m. Penentuan nilai  $a$  didapatkan dengan mengkalibrasi persamaan (4) dengan data empiris *run up* dan jarak genangan hasil pengukuran dari sejarah kejadian tsunami Samoan (2009) dan Pangandaran (2006).

### 2.3. Model Builder

*Model Builder* adalah suatu alat atau *tool* yang bersifat grafis untuk perancangan model, simulasi dan analisis matematika yang terdiri dari sistem persamaan diferensial biasa. Dengan menggunakan *Model Builder* persamaan direpresentasikan dengan bentuk aliran atau *flow chart* yang memudahkan dalam memahami proses dari sebuah model. *Model Builder* secara umum melekat pada perangkat lunak *ArcGis*. Model ini merupakan aplikasi tambahan yang dapat memfasilitasi cara untuk mengotomasikan (*batch*) sejumlah urutan proses rutin mengenai pembuatan data spasial. Hal ini dimaksudkan agar model ini dapat diulangi secara presisi kapan saja dan oleh siapa saja tanpa kesalahan yang berarti.

### 2.4. Peta Jalan Penelitian

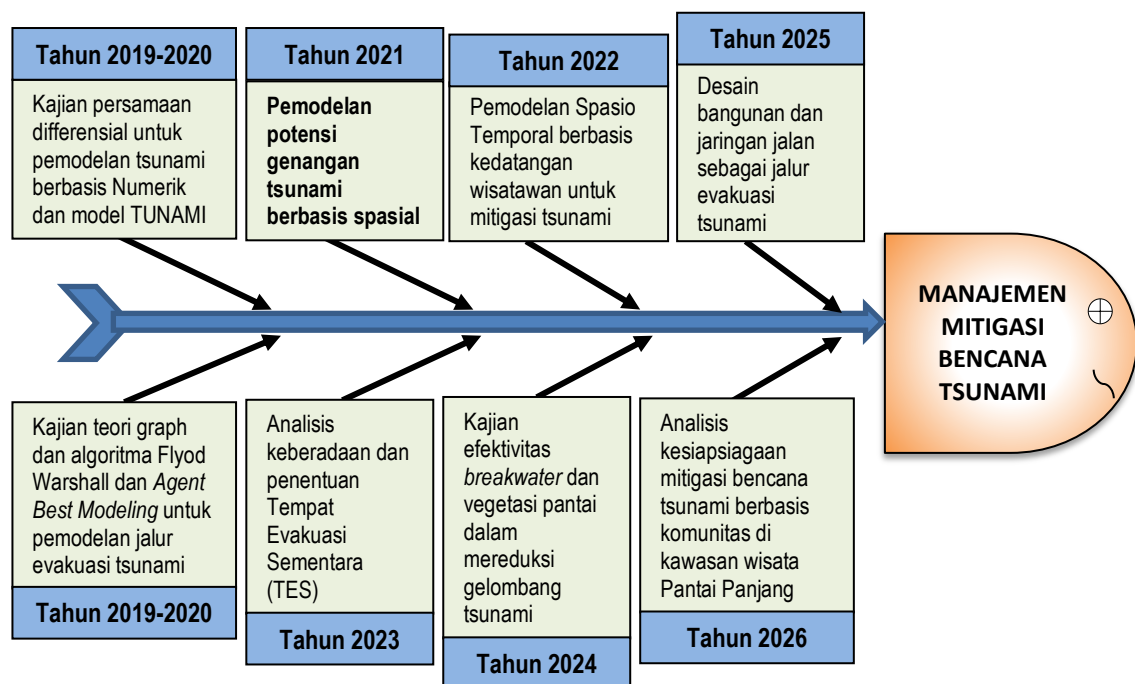
Kota Bengkulu merupakan wilayah yang sangat rawan terhadap bencana tsunami (BNPB, 2012). BNPB menempatkan Kota Bengkulu sejajar dengan Kota Banda Aceh sebagai daerah rawan bencana tsunami di Pantai Barat Sumatera. Berdasarkan hal tersebut perlu dilakukan kajian-kajian yang mendalam tentang manajemen mitigasi bencana tsunami sebagai upaya meminimalisir dampak bencana tsunami khususnya di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Penelitian yang dilakukan ini terfokus pada penelitian bidang matematika terapan khususnya pada keahlian matematika kebencanaan. Beberapa penelitian yang sudah tim pengusul lakukan untuk mendukung usulan penelitian ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Kajian genangan tsunami di Kota Bengkulu melalui pemodelan *run up* tsunami menggunakan metode Statistik Krigging (Hibah Bersaing DRPM-Dikti 2013-2014). Dalam penelitian ini dikembangkan model genangan menggunakan parameter kekasaran permukaan, lereng dan skenario *run up* tsunami (studi kasus tingkat kelurahan dan Kota Bengkulu).
2. Kajian tentang pemodelan jalur evakuasi bencana tsunami melalui pendekatan Riset Operasi dan *agent best modeling* telah dilaksanakan tim pengusul (anggota) melalui penelitian Unggulan Unib (2018) dan penelitian skripsi mahasiswa. Dalam penelitian ini dihasilkan sistem manajemen evakuasi bencana tsunami di wilayah pesisir.
3. Kajian teoritis terhadap persamaan-persamaan differensial gelombang sebagai persamaan dasar model gelombang tsunami untuk model penjalaran dan model genangan tsunami melalui pendekatan numerik dilakukan dalam penelitian yang didanai oleh RBA FMIPA Tahun 2019.



4. Kajian pemodelan potensi genangan tsunami juga dilakukan oleh tim pengusul (ketua) melalui penelitian disertasi Progam Doktor UGM dengan judul “Pemodelan Potensi Genangan Tsunami Berbasis pada Ancaman Gempa Bumi di Zona Subduksi Selatan Jawa” Tahun 2021. Pemodelan potensi genangan tsunami yang digunakan dalam penelitian ini difokuskan pada pemodelan berbasis numerik dengan menggunakan model TUNAMI-N3.

Secara ringkas kegiatan penelitian yang telah dilakukan dan rencana penelitian untuk 5 tahun ke depan disajikan dalam peta jalan penelitian yang digambarkan dalam diagram berikut:



Gambar 2.3. Peta Jalan Penelitian

Hasil penelitian yang telah dan akan dilaksanakan tim pengusul dalam bidang kajian sistem mitigasi dan jalur evakuasi bencana tsunami sangat mendukung sekali terhadap **Usulan Penelitian Unggulan Unib Tahun 2021** yang diajukan ini. Hal ini menjadi salahsatu indikator bahwa tim pengusul mampu dan *eligible* untuk mendapatkan pendanaan pada skema penelitian ini.

## **BAB III**

### **TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN**

#### **3.1. Tujuan Penelitian**

Secara umum tujuan penelitian ini adalah mendapatkan gambaran secara spasial potensi sebaran genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Potensi sebaran genangan tsunami dapat digunakan untuk perencanaan tata ruang di wilayah pesisir berbasis pada mitigasi bencana tsunami. Beberapa tujuan khusus yang hendak dicapai adalah:

1. Memodelkan secara spasial potensi sebaran genangan tsunami untuk menghasilkan jangkauan dan luas genangan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu.
2. Menginventarisir tingkat kerawanan bencana tsunami sebagai upaya menciptakan tingkat kewaspadaan dan antisipasi dalam kebencanaan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu.

Output akhir yang diharapkan dari penelitian ini adalah dihasilkannya peta bahaya tsunami dan zonasi kerawanan tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu sebagai panduan dalam mitigasi bencana tsunami. Luaran yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah dihasilkannya artikel ilmiah yang akan dipublikasikan pada jurnal internasional terindeks scopus *Science of Tsunami Hazards* dengan *SCImago Journal Rank* (SJR) Q3. <http://www.tsunamisociety.org/OnlineJournals.html>, atau *International Journal of Geomate* dengan SJR Q3, atau *Journal Disaster Advances* dengan SJR Q4,

Target lain yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah: a). Mengintegrasikan hasil penelitian ini pada materi perkuliahan Matematika Kebencanaan di Prodi Matematika FMIPA UNIB melalui penulisan dan penyusunan bahan ajar. Hasil penelitian ini juga akan dijadikan bahan sosialisasi kepada masyarakat sekitar untuk menunjang pemberdayaan mitigasi berbasis komunitas. b). Terlibatnya satu orang mahasiswa S1 Prodi Matematika dalam penelitian awal yang berkaitan dengan pemodelan spasial dan pengolahan data spasial, khususnya pada perancangan parameter dan variabel model spasial potensi sebaran genangan tsunami.

### **3.2. Manfaat Penelitian**

Penelitian dalam bidang mitigasi bencana khususnya pemodelan spasial sangat dibutuhkan oleh Kota Bengkulu sebagai upaya mitigasi bencana tsunami. Penelitian ini akan berkontribusi untuk pembangunan pariwisata di Kota Bengkulu dalam menyusun dan merancang dokumen pengembangan potensi sumberdaya alam wilayah pesisir, sehingga pemanfaatan wilayah pesisir dapat dikembangkan sesuai dengan potensi dan tingkat risiko bencana yang bisa terjadi. Inovasi yang dikembangkan adalah memodelkan potensi sebaran genangan tsunami di kawasan wisata pantai, sebagai upaya mengembangkan tingkat kewaspadaan dan antisipasi kebencanaan di kawasan pesisir Kota Bengkulu seperti tercantum dalam salah satu Rencana Induk Penelitian (RIP) Universitas Bengkulu Tahun 2021-2025.

Sedangkan manfaat praktis dari hasil penelitian ini adalah:

1. Model potensi sebaran genangan tsunami yang dihasilkan dalam penelitian ini berupa peta dan simulasi spasial, dapat digunakan sebagai alat bantu (*tools*) untuk memahami dan menjelaskan faktor-faktor dan mekanisme yang menyebabkan terjadinya potensi genangan tsunami.
2. Hasil pemodelan potensi sebaran genangan tsunami berupa peta bahaya tsunami dapat memberikan gambaran secara keruangan eksplisit (*spatially explicit*) tentang sistem peringatan dini di daerah penelitian pada saat terjadi bencana tsunami. Pemerintah melalui instansi yang kompeten dengan perencanaan pembangunan dapat memanfaatkan peta bahaya tsunami sebagai masukan dalam proses perencanaan dan pengembangan pembangunan wisata pantai di Kota Bengkulu.

## BAB IV

### METODE PENELITIAN

#### 4.1. Data Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dalam bidang ilmu Sains dan Teknologi (Sainstek) dengan topik penelitian kewaspadaan dan antisipasi dalam kebencanaan. Tahapan penelitian didahului dengan mengkaji persamaan matematis model, parameter, dan variabel model. Variabel model terdiri dari elevasi, tinggi tsunami di garis pantai dan kekasaran permukaan. Simulasi model genangan tsunami menggunakan *ArcGis 10.2*. Penelitian ini membutuhkan bahan penelitian berupa ketersediaan data topografi, dan data penggunaan lahan di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu. Bahan penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat dalam tabel berikut.

Tabel 4.1. Bahan Penelitian

Jenis Data	Data	Spesifikasi	Sumber Data
Peta Dasar	RBI	Skala 1:50.000	Diunduh dari data RBI BIG <a href="https://tanahair.indonesia.go.id">https://tanahair.indonesia.go.id</a>
Topografi	DEMNAS	Resolusi Spasial 8,5 m (0,27 Arc Second)	Diunduh dari Demnas BIG <a href="https://tides.big.go.id">https://tides.big.go.id</a>
Kakasaran Permukaan	Penggunaan Lahan	Skala 1:50.000	Interpretasi <i>Google Earth</i> dan survey lapangan

Secara umum metode penelitian berupa tahapan penelitian dapat dilihat dalam Gambar 4.1, sedangkan penjelasan secara detail tentang metode penelitian dari setiap tahapan diuraikan sebagai berikut.

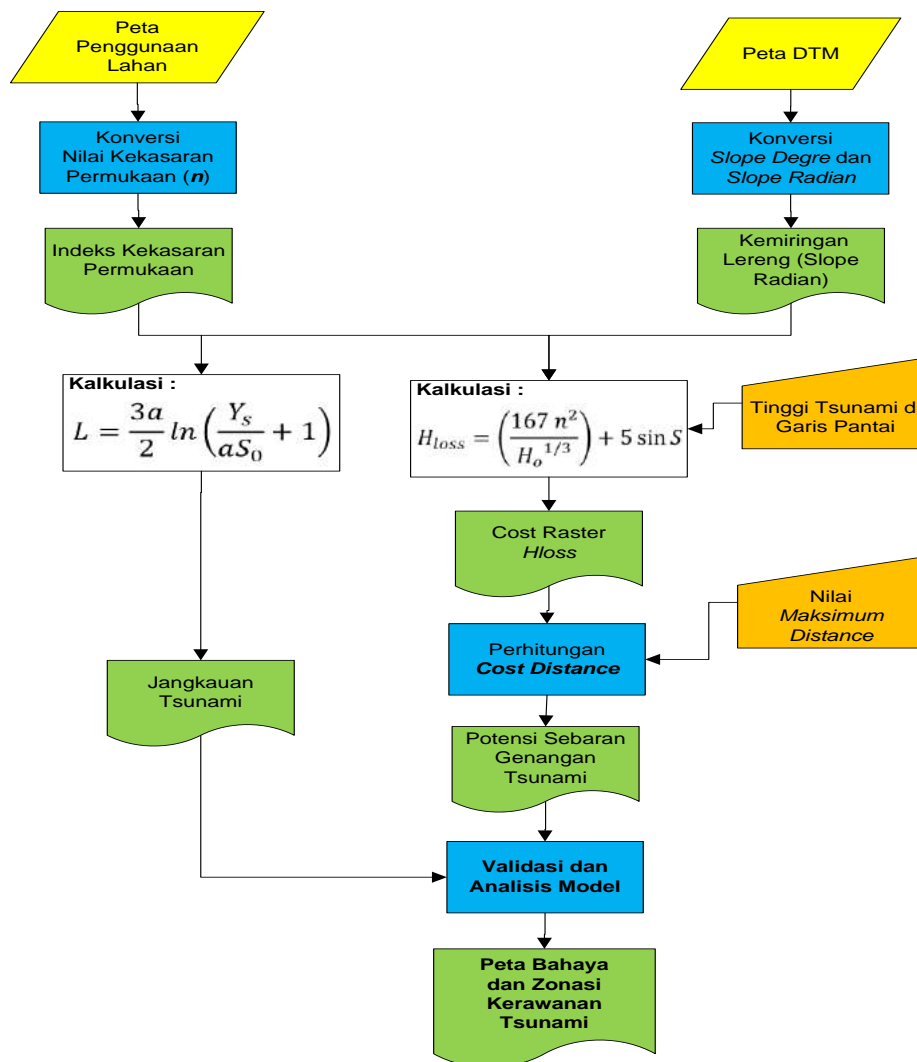
#### 4.2. Langkah Penelitian

##### 4.2.1. Perumusan Model

Pemodelan potensi genangan tsunami dibuat dengan mengembangkan konsep kehilangan ketinggian air (*Hloss*) yang dikembangkan oleh Berryman (2006) dan prinsip hidrolika sederhana yang dikembangkan oleh Smart *et al.*, (2016). Kedua model genangan tsunami ini bekerja dalam domain spasial sehingga pemodelan yang dikembangkan merupakan pemodelan spasial. Kegiatan yang dilakukan dalam tahapan ini adalah mengkaji model genangan tsunami melalui pendekatan matematis, sehingga variabel dan parameter model dapat didefinisikan dengan baik.

#### 4.2.2. Penentuan Elevasi dan Indeks Kekasaran Permukaan

Pemodelan spasial potensi genangan tsunami menggunakan persamaan Berryman dan Smart menggunakan variabel kemiringan lereng/elavasi dan kekasaran permukaan. Data elevasi diturunkan dari data DTM yang diunduh dari data DEMNAS BIG. Variabel elevasi dari DTM di konversi menjadi data radian dengan memanfaatkan fasilitas *tool* yang terdapat dalam *ArcGis*. Data penggunaan lahan di lokasi penelitian diinterpretasi dan diklasifikasi berdasarkan tutupan lahan untuk selanjutnya dikonversi menjadi nilai indeks kekasaran permukaan. Nilai indeks kekasaran permukaan diturunkan dan dikonversi dari data penggunaan lahan detail dan tipe penutup lahan yang mengacu pada penelitian Berryman (2006) dan Putra (2008).



Gambar 4.1. Bagan Alir Penelitian

### 4.2.3. Membangun Model Genangan Tsunami

Tahapan selanjutnya membangun model potensi genangan tsunami berdasarkan Model Berryman (Persamaan 3) melalui pembuatan algoritma model *Builder*. Pemodelan genangan tsunami mengikuti persamaan penurunan ketinggian genangan tsunami dan jarak genangan tsunami di daratan dengan input tinggi tsunami di garis pantai, nilai indeks kekasaran permukaan dan kemiringan lereng/elevasi. Algoritma *model builder* yang dikembangkan dalam penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

**Input:** Nilai kekasaran permukaan ( $n^2$ )

Tinggi tsunami di garis pantai ( $H_0$ )

Elevasi ( $S$ )

**Proses:** Hitung  $H_{loss} = \left( \frac{167 n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S$

Hitung  $L = \frac{3a}{2} \ln \left( \frac{Y_s}{aS_0} + 1 \right)$

**Output:** *Cost Raster*  $H_{loss}$  (tinggi tsunami)

$L$  (jarak genangan tsunami)

Hasil model *Builder* dalam software *ArcGis* dihitung dan dianalisis jarak genangan tsunami secara horizontal dari garis pantai ke daratan dengan menggunakan metode *Cost Distance*. Hasil perhitungan *cost distance* akan didapatkan potensi jangkauan tsunami di kawasan pesisir.

Perhitungan jangkauan tsunami dengan menggunakan Model Smart (Persamaan 4) dilakukan dengan menggunakan bantuan *ArcGis* dan *Excel*. Data kekasaran permukaan dikembangkan dari hasil penelitian Smart *et al.*, (2016).

### 4.2.4. Validasi dan Analisis Model

Uji validasi model dilakukan melalui perhitungan nilai *Root Mean Square Deviation* (RMSD) dan *Normalized Root Mean Square Deviation* (NRMSD). Tujuan perhitungan ini untuk mengetahui akurasi jarak genangan tsunami hasil Model Berryman terhadap hasil Model Inarisk BNPB secara statistik. Semakin kecil nilai RMSD dan NRMSD yang diperoleh, maka semakin kecil perbedaan antara hasil Model Berryman dengan hasil Model Inarisk. Perhitungan nilai RMSD dan NRMSD data dilakukan menggunakan persamaan:

$$RMSD(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_n - y_n)^2}{n}} \quad (5)$$

$$NRMSD (\%) = \frac{RMSD}{y_{max} - y_{min}} \quad (6)$$

dimana:  $x_n$  adalah data pemodelan 1 ke  $n$ ,  $y_n$  data pemodelan 2 ke  $n$ ,  $n$  adalah jumlah data,  $y_{max}$  data pengamatan maksimum dan,  $y_{min}$  data pengamatan minimum.

Indikator keberhasilan dari kegiatan penelitian adalah dihasilkannya Peta Bahaya Tsunami dan Zonasi Kerawanan Tsunami di kawasan wisata Pantai Panjang Kota Bengkulu, artikel ilmiah yang diterbitkan dalam jurnal internasional terindeks Scopus, HaKI dan bahan ajar untuk mata kuliah Matematika Kebencanaan.

## BAB V

### HASIL DAN LUARAN YANG DICAPAI

#### 5.1. Deskripsi Daerah Penelitian

##### 5.1.1. Geografis

Penelitian ini dilaksanakan di Kota Bengkulu. Secara Geografis, Kota Bengkulu terletak antara Kota Bengkulu terletak  $10^{\circ} 20' 14'' - 10^{\circ} 20' 22''$  Bujur Timur dan  $3^{\circ} 45' - 3^{\circ} 59'$  Lintang Selatan. Kota Bengkulu memiliki luas wilayah 151,7 km<sup>2</sup>. Topografi tanah terdiri dari atas daerah dataran tinggi dan dataran rendah, dataran tinggi mempunyai ukuran ketinggian 300 meter dari permukaan laut menurut hasil survei terakhir kali.

Secara administratif, Kota Bengkulu langsung berbatasan dengan Kabupaten Bengkulu Tengah, Kabupaten Seluma, dan Sebelah Barat dengan Samudera Indonesia. Kota Bengkulu merupakan sebuah kota administratif yang berada di Provinsi Bengkulu yang terbagi menjadi 9 kecamatan yang meliputi: Muara Bangkahulu, Sungai Serut, Teluk Segara, Ratu Samban, Ratu Agung, Gading Cempaka, Singaran Pati, selebar dan Kampung Melayu. Berikut disajikan luasan masing-masing kecamatan berdasarkan data statistik dari BPS Kota Bengkulu tahun 2020.

Tabel 5.1 Persentase Luas Masing Masing Kecamatan

No	Kecamatan	Luas	
		Km <sup>2</sup>	%
1	Selebar	46,36	30,56
2	Kampung Melayu	23,14	15,25
3	Gading Cempaka	14,42	9,51
4	Ratu Agung	11,02	7,26
5	Ratu Samban	2,84	1,87
6	Singaran Pati	14,44	9,52
7	Teluk Segara	2,76	1,82
8	Sungai Serut	13,53	8,92
9	Muara Bangkahulu	23,18	15,28
Kota Bengkulu		151,70	100

Sumber: BPS Kota Bengkulu, 2021

##### 5.1.2. Topografi

###### ➤ Kemiringan

Berdasarkan data yang diperoleh mengenai kemiringan lahan, di Wilayah Kota Bengkulu Secara umum wilayah Kota Bengkulu didominasi oleh kelas lereng datar, yang mencapai 88,09% luas wilayah, yang terdiri dari 2 (dua) kelas kemiringan lereng yaitu kemiringan lerengnya 0 – 3% dengan luas 8.145,38 Ha dan sekitar



4.585,32 Ha kemiringan lereng 3 – 8% yang sesuai untuk pengembangan pembangunan kota. Kemiringan 0 – 3% ini terletak di daerah bagian Barat, Selatan dan Timur Laut Kota Bengkulu, sedangkan kemiringan lereng 3 – 8% sebagian di Utara, pusat kota yang memanjang ke arah Tenggara Kota Bengkulu. Untuk kemiringan dengan kelas kelerengan 15 – 40% yang merupakan wilayah agak curam mempunyai luasan terkecil (16,11 Ha) yang terletak di sebelah Utara Danau Dendam Tak Sudah. Apabila dirinci Perkecamatan, untuk kemiringan 0 – 3 % Wilayah kecamatan dengan dominasi datar adalah Kecamatan Kampung Melayu, sebagian di Kecamatan Muara Bangkahulu, Kecamatan Sungai Serut dan Kecamatan Gading Cempaka, Sebagian kecil di Kecamatan Selebar dan Kecamatan Ratu Agung dengan luas 8.145,38 Ha. Wilayah dengan kemiringan 3 – 8% (agak landai), termasuk dalam klasifikasi fisik layak bagi pengembangan kegiatan budidaya. Wilayah yang memiliki kemiringan 3 – 8 % ini meliputi Kecamatan Teluk Segara, Kecamatan Ratu Samban, Kecamatan Ratu Agung, Kecamatan Selebar, Kecamatan Gading Cempaka, dan Kecamatan Muara Bangkahulu dengan luas 4.585,32 Ha. Untuk kemiringan dengan kelas kelerengan 15 – 40% ini meliputi sebagian besar Kecamatan Selebar, sebagian Kecamatan Gading Cempaka, Kecamatan Kampung Melayu, dan sebagian kecil Kecamatan Muara Bangkahulu, Kecamatan Teluk Segara, Kecamatan Ratu Samban dan Kecamatan Ratu Agung dengan luas 16,11 Ha. Untuk lebih jelasnya mengenai luas wilayah berdasarkan kemiringan dapat dilihat pada Tabel 5.2.

Tabel 5.2. Luas Wilayah (Ha) Berdasarkan Kemiringan di Wilayah Kota Bengkulu

No	Kecamatan	Kemiringan Lahan			
		0 - 3% (Ha)	3 - 8% (Ha)	8 - 15% (Ha)	15 - 40% (Ha)
1	Selebar	891.16	2,238.69	745.56	0.00
2	Kampung Melayu	3,890.02	271.20	178.49	0.00
3	Gading Cempaka	929.41	746.09	326.71	16,10
4	Ratu Agung	458.45	411.96	6.37	0.00
5	Ratu Samban	0.01	179.53	127.04	0.00
6	Teluk Segara	0.00	297.29	0.00	0.00
7	Sungai Serut	843.74	126.31	0.00	0.00
8	Muara Bangkahulu	1,650.00	761.32	119.94	0.00
<b>Total</b>		<b>8.662,79</b>	<b>5,032,39</b>	<b>1.504,11</b>	<b>16,10</b>

Sumber : RTRW Kota Bengkulu Tahun 2012-2032.

## ➤ Ketinggian

Secara umum Kota Bengkulu terletak pada ketinggian antara 0 – 100 m/dpl, dengan persebaran sporadis pada setiap wilayah kota, sehingga menyebabkan morfologi kota yang bergelombang. Lokasi dengan titik tertinggi (hingga 100 m/dpl) berada di bagian tenggara (Kec. Selebar). Sementara titik terendah (antara 0 m/dpl – 10 m/dpl) di bagian Selatan, Utara dan Timur, sedangkan Pusat Kota Bengkulu sendiri berada pada ketinggian antara 10 – 25 m/dpl. Untuk lebih jelasnya mengenai luas wilayah berdasarkan ketinggian dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3. Luas Wilayah (Ha) Berdasarkan Ketinggian di Wilayah Kota Bengkulu

No	Kecamatan	Luas Wilayah (Ha)	Ketinggian (mdpl)			
			0 - 10 (Ha)	10 - 25 (Ha)	25 - 50 (Ha)	50 - 100 (Ha)
1	Selebar	4.080,874	911,75	2,495.35	563.40	43.10
2	Kampung Melayu	4.334,962	4.174,76	160.20	0.00	0.00
3	Gading Cempaka	2.018,421	5.086,51	598.85	60.40	0.00
4	Ratu Agung	898,269	495,09	403.17	0.00	0.00
5	Ratu Samban	284,844	43,17	241.68	0.00	0.00
6	Teluk Segara	297,647	0.00	297.65	0.00	0.00
7	Sungai Serut	970,053	927,24	42.81	0.00	0.00
8	Muara Bangkahulu	2.536,244	1.538,53	0.00	997.70	0.00
<b>Jumlah</b>		<b>15.421,314</b>	<b>3.004.03</b>	<b>4.239,71</b>	<b>1.621,50</b>	<b>43,10</b>

Sumber : RTRW Kota Bengkulu Tahun 2011-2031.

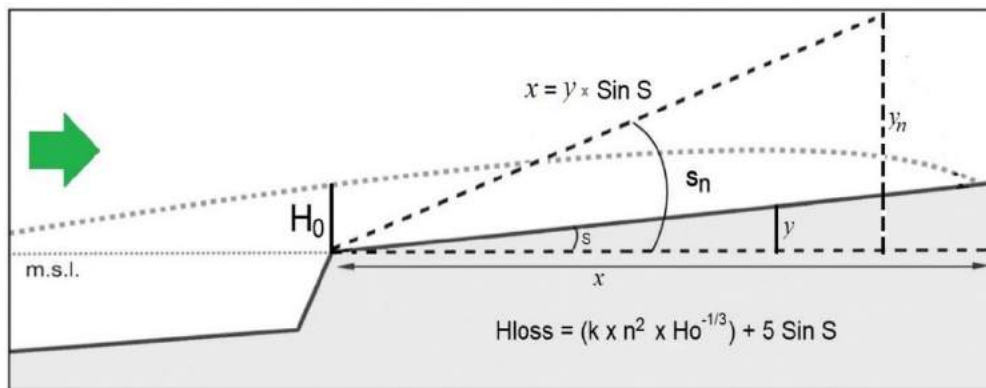
## 5.2. Hasil Penelitian yang Telah Dicapai

### 5.2.1. Perumusan Model Spasial Tsunami

Pemodelan genangan tsunami menggunakan persamaan Berryman menggunakan data ketinggian berupa dat DEM. Data DEM di konversi menjadi data radian dengan memanfaatkan fasilitas *tool* yang terdapat dalam *ArcGis*.

Pemodelan genangan tsunami digunakan untuk mengestimasi genangan tsunami mulai dari garis pantai sampai ke daratan dan umumnya model ini dikembangkan melalui metode empiris. Model ini dikembangkan melalui perhitungan matematis berdasarkan kalkulasi kehilangan ketinggian tsunami persatu meter jarak genangan. Kemiringan lereng ( $\sin S$ ) mewakili garis lurus sisi miring dari sebuah segitiga, sesuai dengan kemiringan rata-rata yang diambil dari profil tanah miring (topografi) dari garis pantai. Dengan cara ini,  $\sin S$  mengkompensasi topografi datar dari persamaan Hills and Mader (Pignatelli *et al.*, 2009). Diagram genangan tsunami di daratan hasil model

Berryman dimodifikasi dari diagram gelombang tsunami yang dikembangkan oleh Pignatelli *et al.*, (2009) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 5.1.



Gambar 5.1. Diagram Gelombang Tsunami.  
(Sumber: dimodifikasi dari Pignatelli *et al.*, 2009)

Kemiringan lereng juga memengaruhi genangan tsunami di daratan. Tsunami dapat bergerak menanjak ketika air yang bergerak cepat memiliki momentum yang cukup. Metode *Hloss* merupakan metode pemodelan genangan berdasarkan ketinggian gelombang dari garis pantai, keiringan lereng, dan koefisien kekasaran permukaan. Persamaan ini diimplementasikan menggunakan fungsi *cost-distance* yang menghitung jarak ke sumber terdekat untuk setiap piksel, dengan cara meminimalkan jarak yang ditentukan dalam suatu permukaan biaya. Sumber untuk fungsi adalah nilai piksel yang mewakili gelombang laut/tsunami, dan permukaan biaya adalah piksel yang mewakili hilangnya ketinggian gelombang tsunami (*Hloss*), dengan *n* adalah piksel kekasaran permukaan dan *S* merupakan piksel kemiringan lereng. Persamaan modifikasi disajikan dalam persamaan (5.1).

$$H_{loss} = \left( \frac{167n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S \quad (5.1)$$

dimana:

- $H_{loss}$  = Penurunan ketinggian air permeter dari jarak genangan
- $n$  = Koefisien kekasaran permukaan
- $H_0$  = Ketinggian gelombang tsunami di garis pantai
- $S$  = Lereng

Implementasi persamaan (5.1) dalam pemodelan genangan tsunami di Indonesia menggunakan parameter ketinggian tsunami di garis pantai dengan mengacu pada hasil kajian BNPB yang merupakan lampiran dari Perka No. 2 BNPB Tahun 2012 yaitu Panduan Nasional Pengkajian Risiko Bencana Tsunami. Model ini sudah banyak

diterapkan untuk memodelkan genangan tsunami di Indonesia seperti yang dilakukan Mardiatno, (2008); Purbani (2012); BNPB, (2016); Fauzi dkk, (2014); dan Putri dkk, (2017).

### **5.2.2. Wilayah Penelitian**

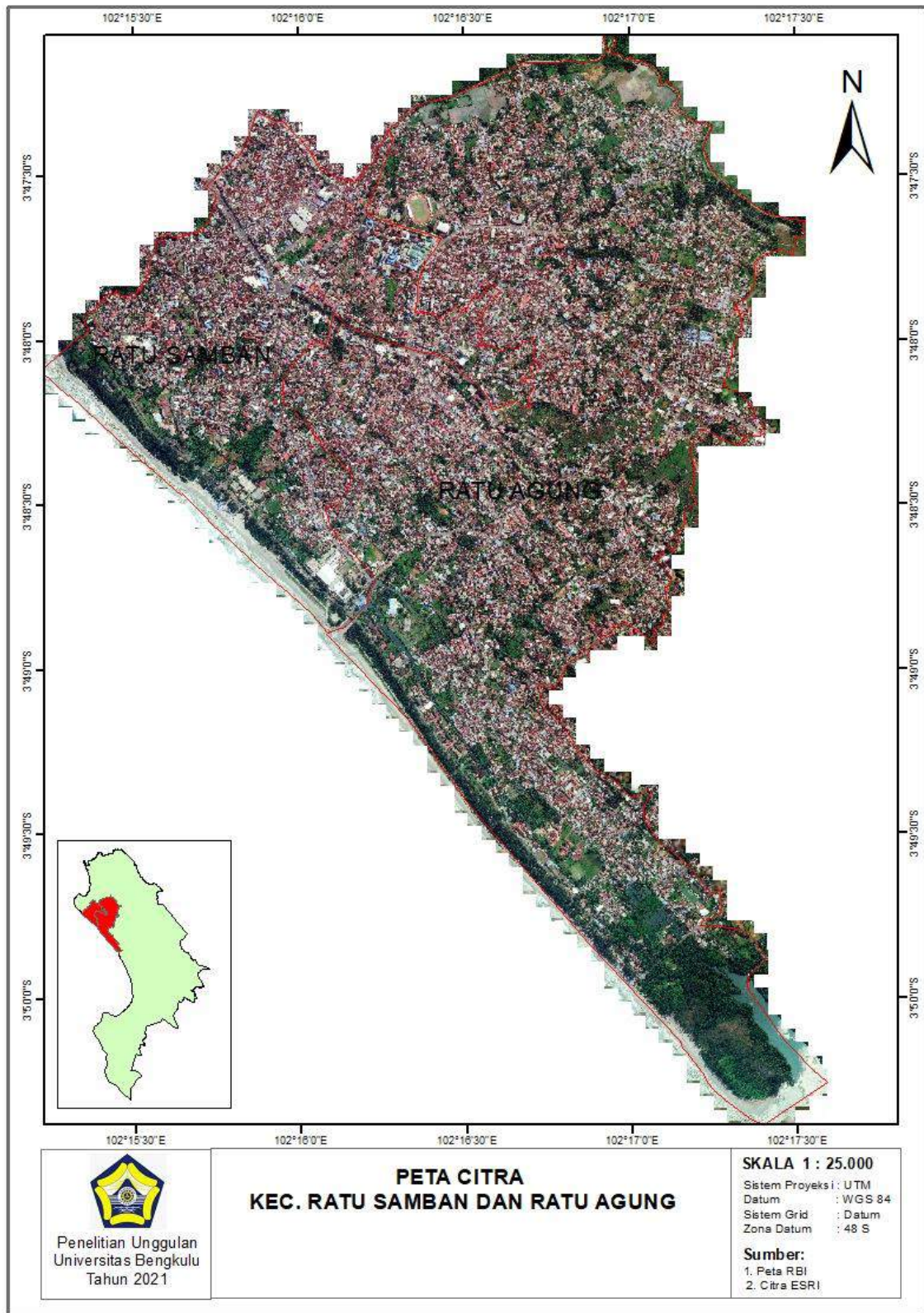
Penelitian pemodelan genangan tsunami diawali dengan pemetaan ketinggian lokasi/elevasi dan penggunaan lahan. Ketinggian wilayah penelitian diwujudkan dalam data DEM yang diambil dari data DEMNAS Badan Informasi Geospasial (BIG). Data DEM dalam format TIFF memiliki resolusi spasial 0.27 arc-second (~8 m) yang lebih tinggi dibandingkan dengan SRTM maupun ASTER GDEM. Selain data DEM data utama dalam pemodelan genangan tsunami adalah data Penggunaan lahan yang bersumber dari data *open street map* (OSM). Open Street Map atau OSM adalah sebuah proyek berbasis web untuk membuat peta seluruh dunia yang gratis dan terbuka. OSM dibangun sepenuhnya oleh sukarelawan dengan melakukan survey menggunakan GPS, mendigitasi citra satelit, dan mengumpulkan serta membebaskan data geografis yang tersedia di publik.

Wilayah penelitian pemodelan genangan tsunami dalam penelitian dibatasi pada dua kecamatan saja yaitu Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung. Pengambilan dua kecamatan ini dijadikan sebagai lokasi penelitian didasarkan bahwa wilayah pesisir dari kedua kecamatan ini merupakan lokasi wisata pavorit di Kota Bengkulu. Jumlah wisatawan yang berkunjung di lokasi penelitian sangat ramai khususnya pada hari libur akhir pekan. Peta citra wilayah penelitian disajikan dalam gambar 5.2.

### **5.2.3. Penentuan Elevasi dan Indeks Kekasaran Permukaan**

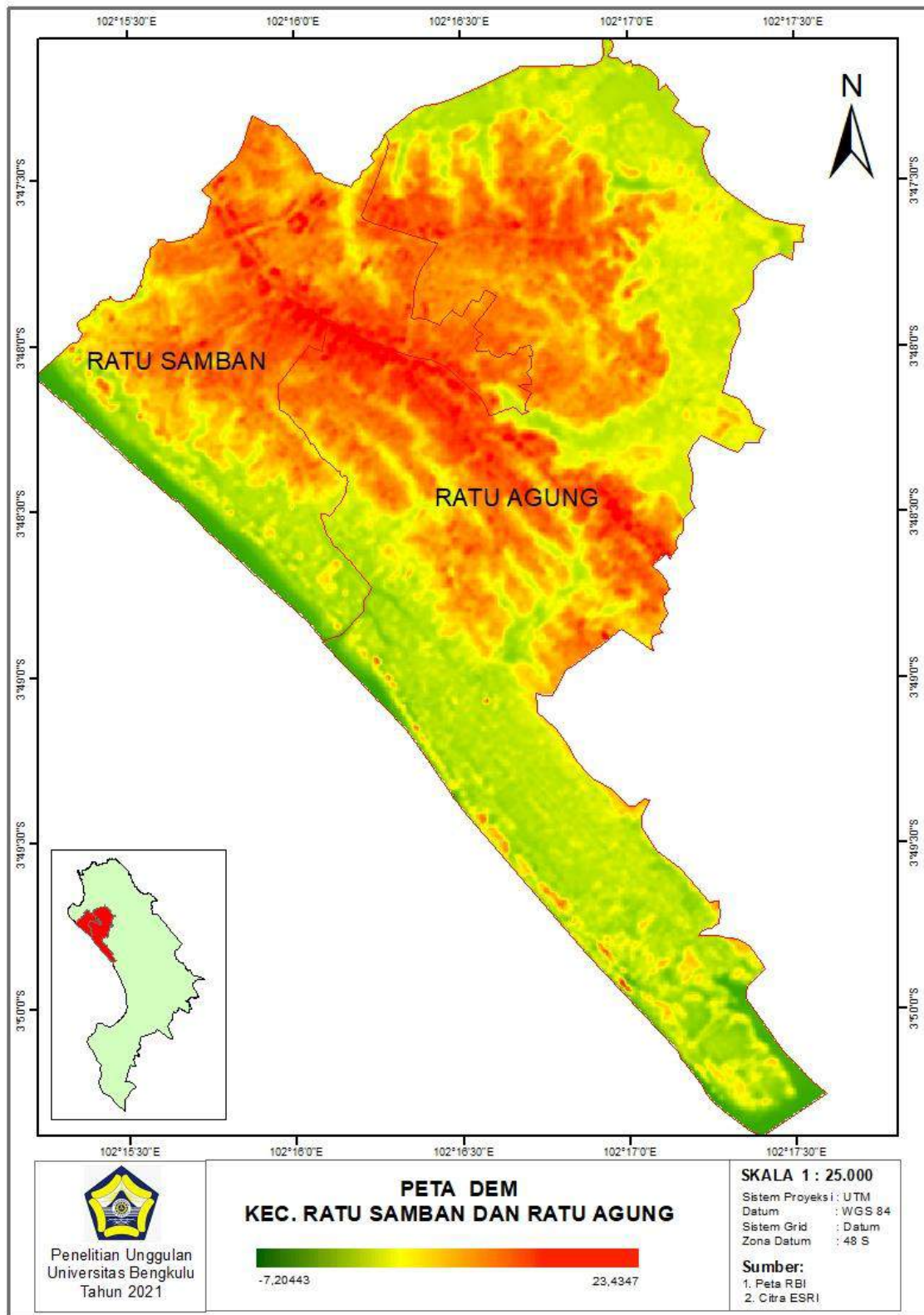
Data ketinggian yang digunakan dalam penelitian ini adalah data DEM yakni data ketinggian yang diambil dari permukaan tanah yang mencerminkan ketinggian permukaan tanah. Data DEM yang bersumber dari dari DEMNAS selanjutnya diolah menjadi data ketinggian dalam bentuk format *slope radian* agar dapat di masukkan dalam model genangan tsunami.

Dari data ketinggian DEM di daerah penelitian dapat disimpulkan bahwa elevasi permukaan pesisir Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung merupakan elevasi yang cukup landai Kondisi ini mengakibatkan daerah penelitian merupakan wilayah yang rawan terhadap bencana tsunami. Beberapa fasilitas publik yang berada di wilayah ini seperti Bencolen Mall, Sport Center, Hotel dan Cafe/rumah makan. Peta DEM daerah penelitian dapat dilihat dalam Gambar 5.3.



Gambar. 5.2. Peta Citra Wilayah Penelitian  
(Sumber: Hasil olahan data Arcgis 2021)





Gambar. 5.3. Peta DEM Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung  
(Sumber: Hasil olahan data Arcgis 2021)

Penggunaan lahan merupakan pemanfaatan lahan yang dilakukan secara optimal dengan mendayagunakan segala sumber daya yang tersedia dalam upaya pengembangan pemanfaatan lahan yang ada di suatu wilayah. Komposisi antara lahan terbangun dan

tidak terbangun di Kota Bengkulu hampir sama. Lahan terbangun seluas 4.900,111 Ha (31,77%) dan sisanya merupakan lahan non terbangun, umumnya berupa kebun campuran dan semak belukar.

Lahan terbangun, dimanfaatkan sebagai lahan perumahan, perdagangan dan perkantoran. Perumahan (4.350,886 Ha.) umumnya tersebar merata di seluruh kecamatan, sedangkan perdagangan dan perkantoran tersebar sporadis pada beberapa kecamatan yang lebih berorientasi pada pusat kota, yaitu Kecamatan Muara Bangkahulu, Kecamatan Teluk Segara, Kecamatan Ratu Agung, Kecamatan Ratu Samban dan Kecamatan Gading Cempaka, dengan luas keseluruhan sekitar 342.568 Ha.

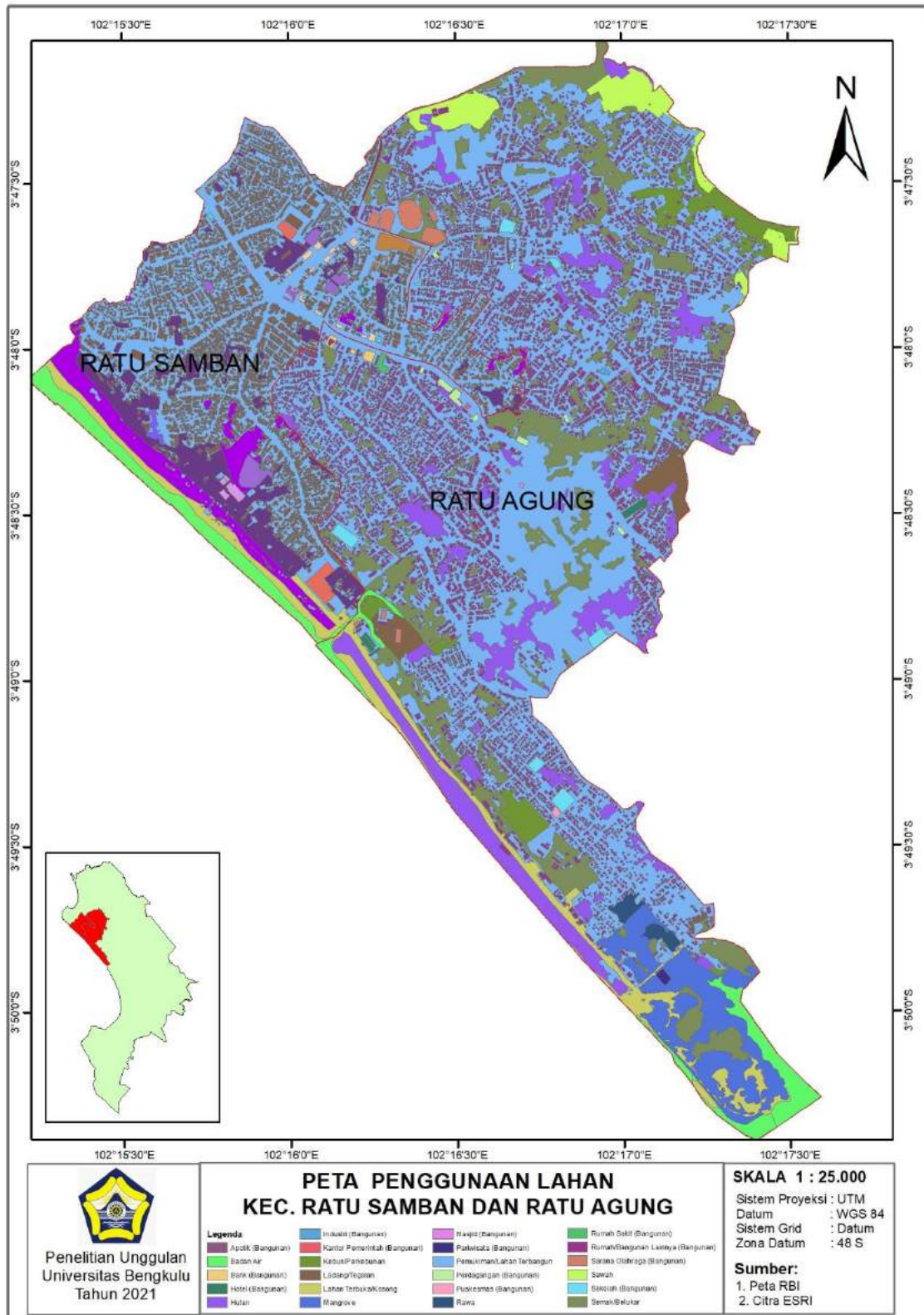
Lahan non-terbangun masih cukup luas dan merupakan kawasan potensial untuk dikembangkan pada masa mendatang. Jenis penggunaan lahan non- terbangun yang cukup mendominasi di Kota Bengkulu adalah kebun campuran seluas 2.041,470 Ha dan semak belukar seluas 3.109,762 Ha. Kebun campuran dan semak belukar menyebar merata di seluruh kecamatan, kecuali di Kecamatan Teluk Segara dan Kecamatan Ratu Samban.

Hasil interpretasi penggunaan lahan dikonversi menjadi nilai indeks kekasaran permukaan. Koefisien kekasaran permukaan dibedakan berdasarkan jenis penggunaan lahan detail menurut Putra (2008) dan tipe penutup lahan yang dibuat Berryman (2006). Nilai kekasaran permukaan berdasarkan penggunaan lahan ditunjukkan dalam Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan

No	Jenis Penggunaan Lahan	Koefisien Kekasaran Permukaan
1	Kolam/Empang	0,010
2	Sungai	0,007
3	Tambak	0,010
4	Pasir	0,018
5	Lahan Terbuka	0,015
6	Padang Rumput	0,020
7	Sawah	0,020
8	Lahan Kosong	0,015
9	Tegalan	0,025
10	Ladang	0,025
11	Perkebunan/Hutan Pantai	0,035
12	Semak Belukar	0,040
13	Permukiman/Lahan Terbangun	0,045
14	Hutan Mangrove	0,025

Sumber: Berryman (2006); Putra (2008); BNPB (2012); Hasil Analisis (2021).



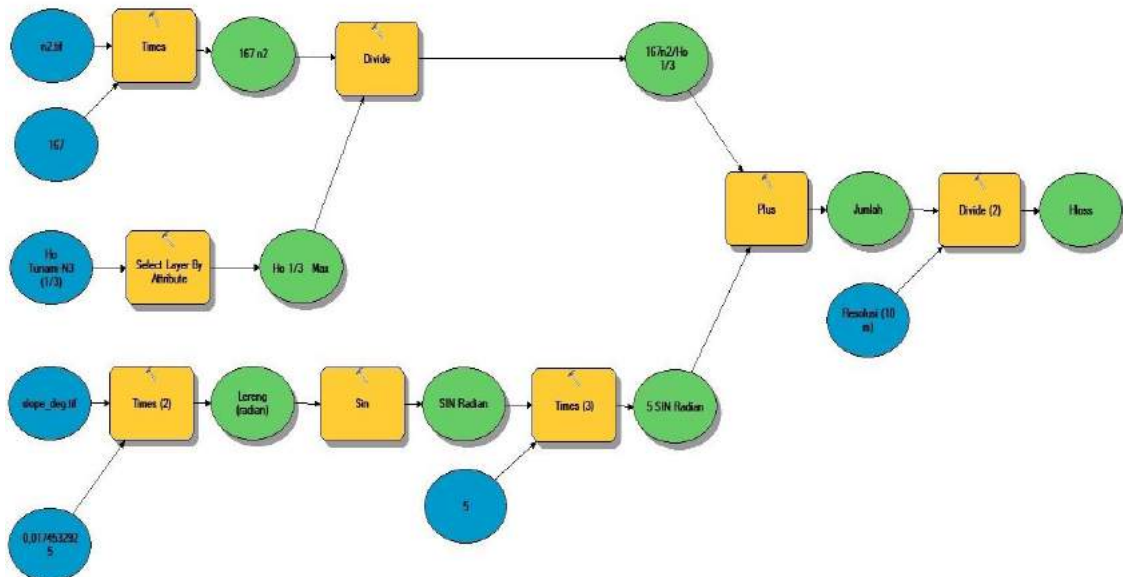
Gambar. 5.4. Peta Penggunaan Lahan Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung  
(Sumber: Hasil olahan data Arcgis 2021)



#### 5.2.4. Perancangan Model Builder

Model *Builder* dapat digunakan untuk membuat, mengedit, dan mengelola model spasial. Ada dua jenis elemen dalam model *Builder* yaitu alat dan variabel. Elemen alat diwakili dengan persegi panjang dan merupakan proses yang dilakukan dengan cara menambahkan dari *Arctoolbox* di *ArcGis*. Variabel diwakili dengan bangun oval yang terdiri data/input dan hasil proses. Untuk menjalankan model yang telah dibuat dilakukan dengan menggunakan menu *Run*. Proses *Run* model ditandai dengan perubahan warna menjadi merah pada kotak proses (persegi panjang), kemudian terdapat bayangan di bawahnya. Bayangan menandakan bahwa proses telah selesai tanpa ada kesalahan.

Operasi matematis pada model genangan ini dilakukan pada perangkat lunak *ArcGis* dengan data berbasis raster. *Hloss* merupakan fungsi dari koefisien kekasaran permukaan ( $n$ ), ketinggian tsunami pada garis pantai ( $H_0$ ) serta kelergaan ( $S$ ). *Hloss* hanya menunjukkan ketinggian tsunami yang hilang dan bukan arah tsunami. Hasil dari operasi *Hloss* (kehilangan ketinggian tsunami) dan *cost distance* (arah rambatan tsunami) menghasilkan potensi genangan tsunami. Desain model *Builder* untuk memodelkan jangkauan maksimum dan luas genangan tsunami di pesisir Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung disajikan dalam Gambar 5.5.



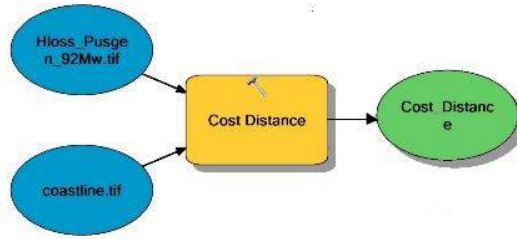
Gambar 5.5 Desain Model Builder untuk Pemodelan *Hloss*.  
(Sumber: Hasil Olah Model *Builder*, 2021)

Tahapan dalam *model builder* berdasarkan gambar tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Masukkan parameter nilai kekasaran permukaan ( $n^2$ ) terdiri atas data penggunaan lahan, nilai tersebut dikuadratkan, kemudian dilakukan perkalian antara nilai kekasaran permukaan ( $n^2$ ) dan konstanta 167, menghasilkan  $167n^2$ .
2. Masukkan parameter tinggi tsunami digaris pantai yang dianotasikan sebagai  $H_o$ , dimana sebelumnya nilai  $H_o$  dipangkatkan  $1/3$  ( $H_o^{1/3}$ ) dahulu untuk selanjutnya diseleksi nilai  $H_o^{1/3}$  maksimum.
3. Masukkan parameter nilai *sloperadian* yang diperoleh dari peta DTM nilai atribut yang digunakan adalah *slopdegree*, kemudian dilanjutkan perhitungan matematika untuk mendapatkan *sin radian*, perkalian antara *sin radian* dengan konstanta 5 menghasilkan  $5 \sin \text{radian}$ .
4. Hasil langkah 1 dan 2 dilakukan operasi pembagian antara  $167n^2$  dengan  $H_o^{1/3}$ .
5. Hasil langkah 4 dijumlahkan dengan hasil pada langkah 3 ( $5 \sin \text{radian} + 167 n^2$  dibagi  $H_o^{1/3}$ ) menghasilkan penjumlahan pada ukuran piksel 10 meter. Pembagian hasil langkah 5 dengan konstanta 10 akan menghasilkan menghasilkan  $H_{loss}$  dengan ukuran piksel 1 meter.

Pemodelan daerah tergenang disimulasikan dengan menghitung perambatan genangan perpiksel ( $H_{loss}$ ) dengan mempertimbangkan elevasi, koefisien kekasaran permukaan, dan ketinggian tsunami di garis pantai. Hasil penerapan persamaan pemodelan genangan tsunami adalah nilai yang menunjukkan berkurangnya nilai  $H_{loss}$  pada setiap piksel.

Untuk mengetahui arah tsunami dilakukan operasi *cost distance*. *Cost distance analysis* menentukan jarak terdekat dari satu piksel ke piksel lain menuju ke lokasi sumber gelombang, dalam hal ini adalah garis pantai. Untuk mendapatkan sebaran genangan dari garis pantai maka digunakan deliniasi garis pantai. Pembagian antara  $H_{loss}$  dengan sel piksel bernilai 10 m untuk mendapatkan *cost distance*. Proses matematis *cost distance* menggunakan parameter tinggi tsunami di garis pantai yang dianotasikan dengan *maximum distance*. Hasil dari perhitungan *cost distance* dapat diketahui sebaran genangan di garis pantai sampai ke daratan. Rancangan model *Builder* yang digunakan dalam penelitian ini disajikan dalam Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Desain Model Builder untuk Pemodelan Genangan Tsunami  
(Sumber: Hasil Olah Model *Builder*, 2021)

Hasil pemodelan *Builder* mendapatkan nilai *Hloss*, tahapan selanjutnya adalah mencari jangkauan maksimum genangan dan luas genangan tsunami. Nilai *Hloss* diproses lagi dengan menggunakan *tool cost-distance*. Analisis *cost distance* menggunakan parameter tinggi tsunami di garis pantai yang dianotasikan dengan *maximum distance*. Ketinggian tsunami dapat dihitung dengan proses pengurangan antara ketinggian tsunami di garis pantai ( $H_0$ ) terhadap hasil *cost distance*. Batasan ini menyebabkan ketinggian tsunami akan hilang pada ketinggian  $H_0$  dari permukaan laut. Nilai ketinggian tsunami per satu meter jarak genangan diperoleh dari pembagian data *Hloss* dengan ukuran resolusi yang digunakan. Ketinggian tsunami di garis pantai akan terus berkurang disebabkan pengaruh elevasi dan kekasaran permukaan. *Hloss* hanya menunjukkan berapa tsunami yang hilang dan bukan arah tsunami. Untuk mengetahui arah gelombang tsunami dilakukan operasi *cost distance*. Analisis *cost distance* menentukan jarak terdekat dari satu piksel ke piksel lain menuju ke garis pantai.

### 5.3. Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami.

Pemodelan potensi genangan tsunami dirancang dengan mengembangkan konsep kehilangan ketinggian air yang dikembangkan oleh Berryman (2006). Dalam konsep ini, dilakukan perhitungan matematis berdasarkan kalkulasi kehilangan ketinggian tsunami per 1 m jarak inundasi (ketinggian genangan) dihitung dengan mempertimbangkan harga jarak terhadap lereng dan kekasaran permukaan. Data utama yang digunakan untuk pemodelan genangan tsunami adalah elevasi dan kekasaran permukaan. Data elevasi diekstrak dari peta DEM (Gambar 5.3), sedangkan data kekasaran permukaan dikonversi dari peta penggunaan lahan (Gambar 5.4). Hasil interpretasi dan klasifikasi penggunaan lahan dikonversi menjadi nilai indeks kekasaran permukaan dan disajikan dalam tabel daftar nilai koefisien kekasaran permukaan (Tabel 5.4).

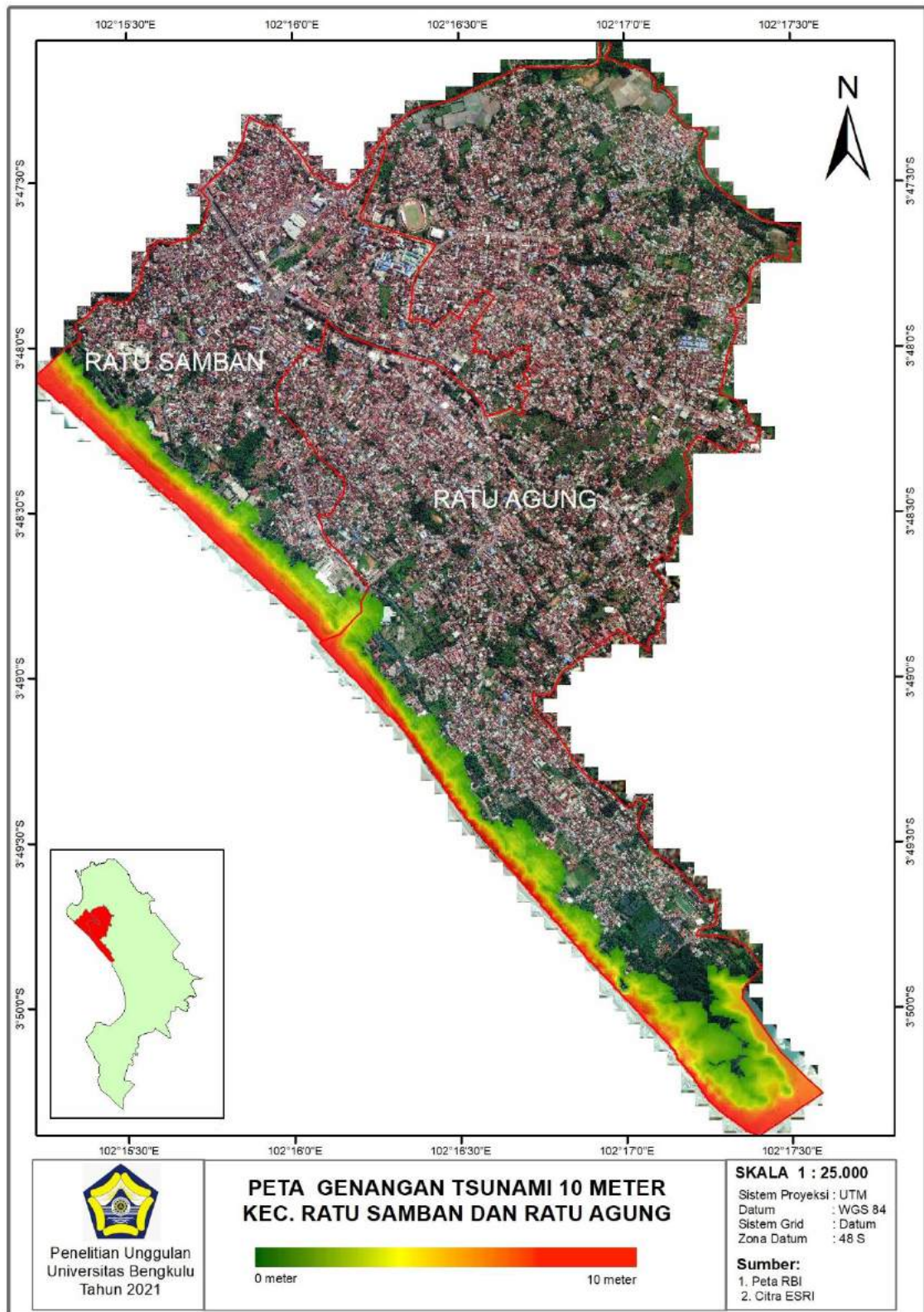
Data input pemodelan dalam penelitian menggunakan resolusi 10 meter, hal ini mengacu pada hasil penelitian Handayani (2014) dan Marfai *et al.*, (2018) bahwa model

genangan tsunami hasilnya lebih akurat pada resolusi data menengah. Semakin besar resolusi data input maka semakin luas area genangan tsunami yang dihasilkan pada pemodelan. Setelah diperoleh peta indeks kekasaran permukaan dan peta DTM maka dilakukan proses pemodelan mengikuti persamaan yang diberikan oleh Berryman (2006). Untuk menghitung sebaran genangan tsunami di daratan digunakan analisis *cost distance* dengan nilai *maximum distance* adalah ketinggian tsunami di garis pantai. Perhitungan *cost distance* menghasilkan sebaran genangan tsunami mulai dari garis pantai sampai ke daratan.

Model yang digunakan untuk memodelkan genangan tsunami adalah *Builder*, model ini sering disebut juga sebagai '*visual programming language*' atau sering juga disebut sebagai sebuah alat yang digunakan untuk membuat sebuah *script*. Model *Builder* dapat digunakan untuk memetakan sebuah alur pekerjaan yang repetitif yang melibatkan banyak pekerjaan yang lainnya, sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan tugasnya. Pembuatan model genangan tsunami dirancang menggunakan Model *Builder* yang diolah dengan perangkat lunak *ArcGis*.

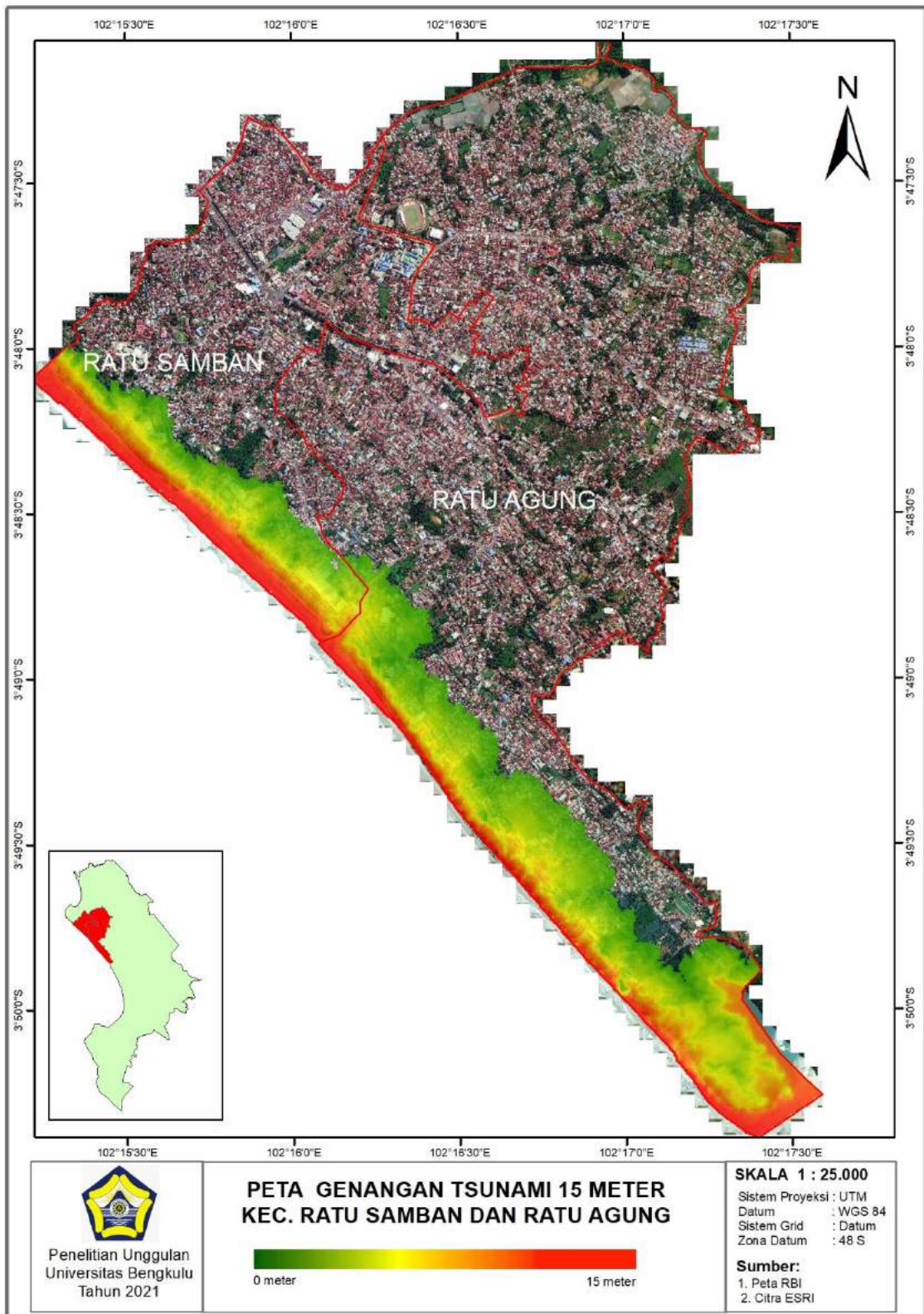
Hasil perhitungan *cost distance* terhadap nilai *Hloss* menghasilkan sebaran genangan tsunami di daratan Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung mulai dari garis pantai. Wilayah yang tergenang kemudian dianalisis untuk mencari luas genangan dan jangkauan maksimum genangan tsunami. Hasil simulasi pemodelan genangan tsunami untuk tiga skenario terburuk yaitu  $H_0 = 10$  meter, 15 meter dan 20 meter menggunakan persamaan Berryman disajikan dalam Gambar 5.7, Gambar 5.8 dan Gambar 5.9.

Hasil simulasi model genangan tsunami dengan skenario 10 meter, potensi sebaran genangan tsunami mencapai 1,4 km<sup>2</sup> dari luas Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung, dengan jangkauan tsunami ke daratan sejauh 415 meter. Simulasi model genangan tsunami dengan skenario 15 meter, potensi sebaran genangan tsunami mencapai 2,5 km<sup>2</sup> dari luas Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung, dengan jangkauan tsunami ke daratan sejauh 570 meter. Simulasi model genangan tsunami dengan skenario 20 meter, potensi sebaran genangan tsunami mencapai 3,5 km<sup>2</sup> dari luas Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung, dengan jangkauan tsunami ke daratan sejauh 765 meter. Luas dan jangkauan genangan tsunami berbanding lurus dengan ketinggian tsunami di garis pantai, semakin tinggi tsunami di garis pantai maka semakin luas genangan tsunami dan semakin jauh jangkauan tsunami di daratan.

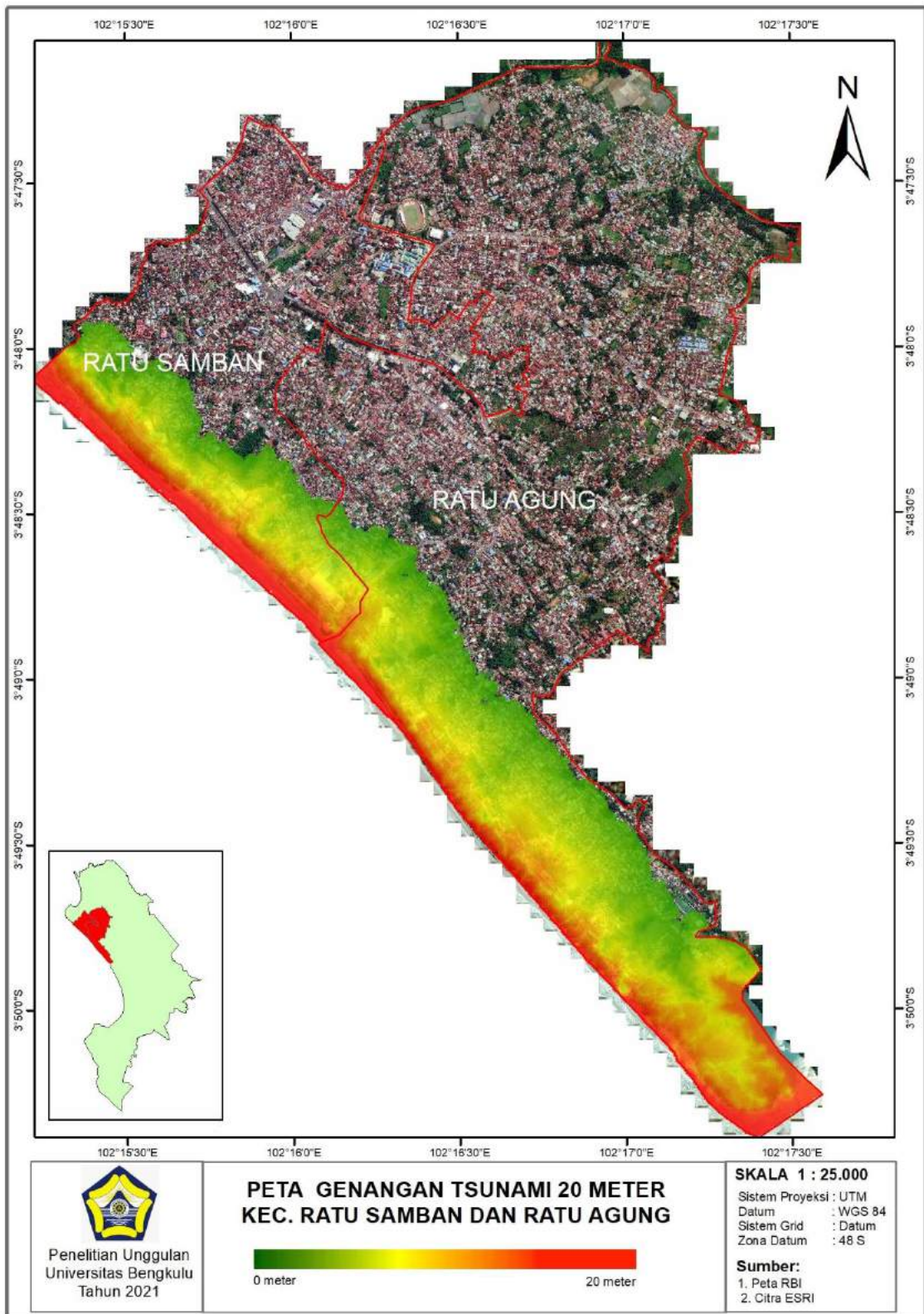


Gambar 5.7. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 10 meter  
 (Sumber: Hasil Olah Model *Builder*, 2021)





Gambar 5.8. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 15 meter  
 (Sumber: Hasil Olah Model *Builder*, 2021)



Gambar 5.9. Hasil Simulasi Pemodelan Genangan Tsunami dengan Ketinggian 20 meter  
 (Sumber: Hasil Olah Model *Builder*, 2021)

Pengembangan model genangan tsunami dengan mempertimbangkan prinsip hidrolika sederhana dilakukan oleh Smart *et al.* (2016). Genangan tsunami dikaji dari perspektif satu dimensi dengan kemiringan garis pantai adalah diukur sejajar dengan arah datangnya tsunami dan perbedaan topografi daratan tidak diperhitungkan. Kedua model genangan tsunami (Berryman dan Smart) menggunakan input model yang sama yaitu tinggi tsunami di garis pantai. Hasil pengukuran jangkauan genangan tsunami dengan tinggi tsunami di garis pantai 10 meter menghasilkan jangkauan maksimum genangan tsunami sejauh 621,89 meter untuk model Berryman, 537,5 meter untuk model Smart. Sedangkan jangkauan minimum genangan tsunami bisa mencapai 186,54 meter untuk model Berryman dan 312,3 meter untuk model Smart. Perbedaan jangkauan maksimum dari kedua model, dapat dikarenakan kedua persamaan menggunakan klasifikasi elevasi dan kekasaran permukaan yang berbeda dalam pemodelan. Model Smart menggunakan 3 kelas elevasi yaitu kemiringan ringan (0,01), kemiringan sedang (0,5) dan kemiringan curam (0,2). Nilai koefisien kekasaran permukaan dalam model Smart dibagi dalam 4 kelas jenis tutupan lahan seperti yang terlihat dalam Tabel 5.5.

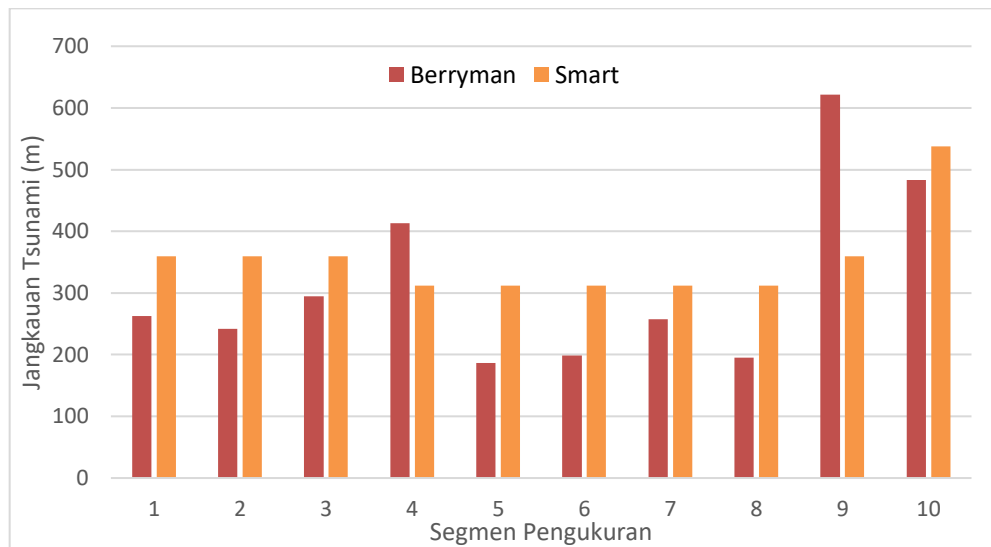
Tabel 5.5. Daftar Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan Model Smart

No	Jenis Tutupan Lahan	Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan
1	Smooth open ground, beach (tanah terbuka yang halus, pantai)	200
2	Undulating open ground (tanah terbuka bergelombang)	100
3	Light buildings, coconut plantations (bangunan ringan, perkebunan kelapa)	80
4	Dense vegetation, jungle (Vegetasi lebat, hutan)	10

Sumber: Smart et al., (2016)

Model Berryman kekasaran permukaan ditetapkan berdasarkan kelas penggunaan lahan seperti yang disajikan dalam Tabel 5.4. Analisis terhadap hasil pemodelan menunjukkan bahwa jangkauan genangan tsunami hasil model Smart menghasilkan hasil yang hampir sama dibandingkan dengan model Berryman. Jangkauan genangan tsunami hasil model Smart hampir sama untuk setiap segmen pengukuran, hal ini dikarenakan nilai koefisien kekasaran permukaan belum bervariasi. Hasil model genangan tsunami yang dihasilkan oleh Model Berryman dan Smart disajikan dalam gambar berikut.

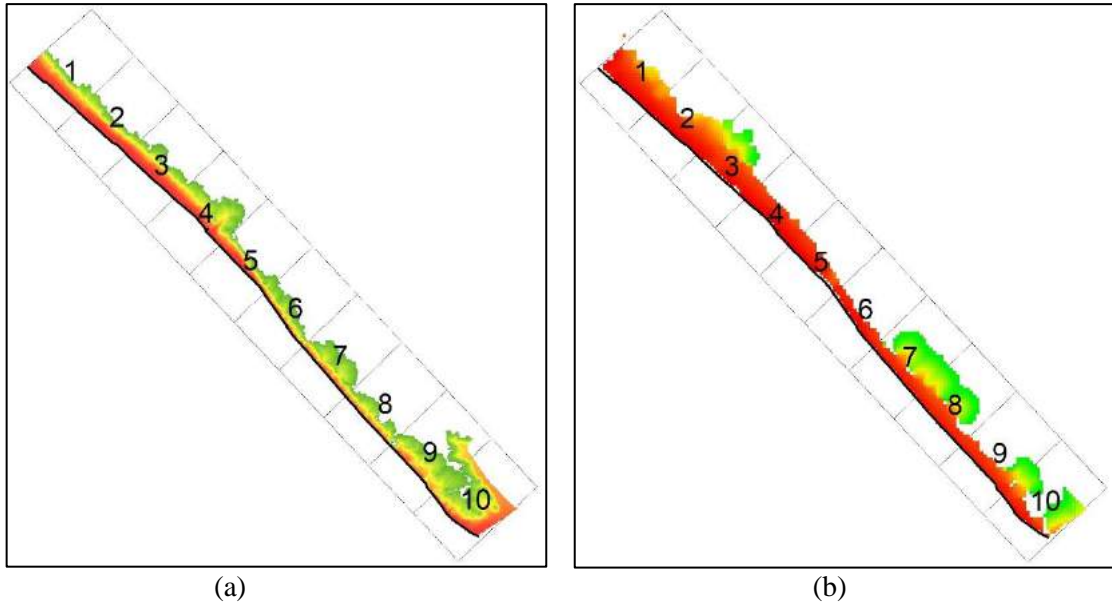




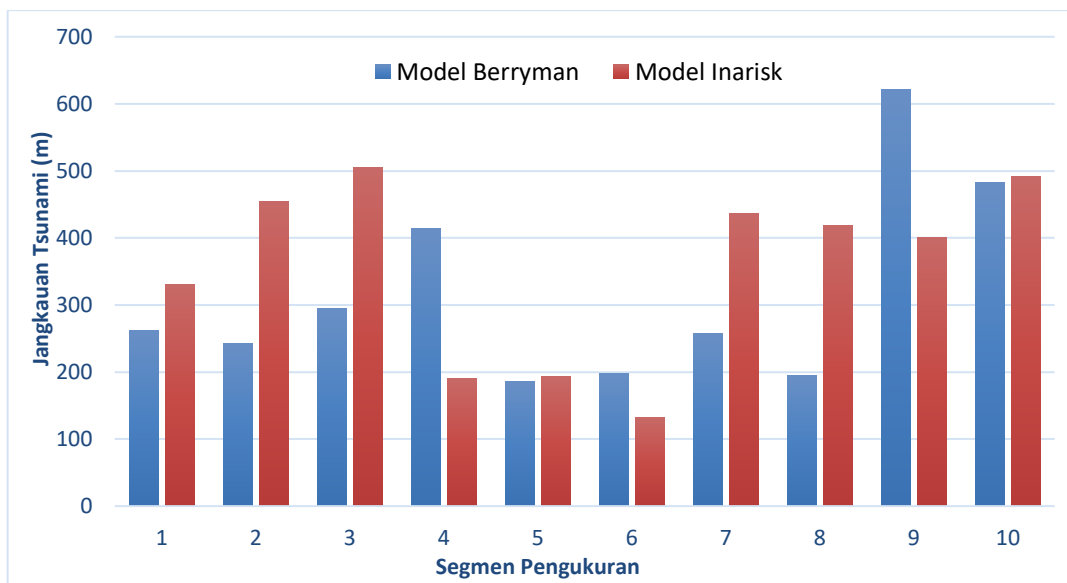
Gambar 5.10 Jangkauan Genangan Tsunami Model Berryman dan Smart  
(Sumber: Hasil Analisis, 2021)

#### 5.4. Validasi Model

Validasi hasil pemodelan potensi genangan tsunami model Berryman dilakukan dengan cara melakukan pengukuran jangkauan genangan tsunami menggunakan model genangan tsunami dari inarisk BNPB. Metode yang digunakan adalah membandingkan jangkauan dari genangan tsunami hasil model Berryman dan Inarisk BNPB. Untuk mendapatkan perbandingan jangkauan tsunami hasil dari kedua model diperlukan metode pengukuran yang sama pada lokasi yang sama menggunakan segmen pengukuran. Pengukuran jangkauan genangan tsunami diperoleh dengan cara mengukur jarak horizontal dari garis pantai pada batas genangan maksimum dalam segmen pengukuran. Wilayah penelitian dibagi menjadi 10 segmen pengukuran dengan ukuran per segmen 0,6 km x 1 km. Pengukuran dilakukan dengan cara menghitung batas genangan tsunami terjauh dalam segmen pengukuran yang diukur dari garis pantai. Jangkauan tsunami di lokasi pengukuran merupakan genangan tsunami yang berasal dari penjalaran tsunami dari laut bukan merupakan limpasan dari sungai. Gambar segmen pengukuran jangkauan tsunami dilokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 5.11. Sedangkan perbandingan jangkauan genangan tsunami di daratan dari model Berryman dan Inarisk disajikan dalam Gambar 5.12.



Gambar 5.11. Segmen Pengukuran Jangkauan Genangan Tsunami (a) Model Berryman, (b) Model Inarisk BNPB (Sumber: Hasil Olah Arcgis, 2021)



Gambar 5.12. Jangkauan Genangan Tsunami Hasil Model Berryman dan Inarisk BNPB (Sumber: Hasil Analisis, 2021)

Validasi model potensi genangan tsunami dalam penelitian dilakukan dengan membandingkan antara genangan tsunami yang dihasilkan oleh model Berryman dengan model Inarisk BNPB. Validasi potensi genangan tsunami di wilayah penelitian menggunakan skenario ketinggian tsunami 10 meter, hal ini senada dengan data potensi ketinggian tsunami di Kota Bengkulu yang dikeluarkan oleh BNPB melalui Panduan Nasional Pengkajian Risiko Bencana Tsunami Indonesia Tahun 2011.

Potensi genangan tsunami yang dihasilkan dari model Berryman dan Inarisk BNPB memberikan nilai dengan pola pergerakan yang hampir sama. Hal ini bisa dilihat dari sebaran genangan tsunami di daratan yang meluas pada saat melalui sungai yang ada di wilayah penelitian. Analisis terhadap hasil pemodelan potensi genangan tsunami menunjukkan bahwa genangan tsunami akan semakin luas apabila melewati penggunaan lahan lahan kosong dan tubuh air (sungai). Tetapi kedua model menghasilkan luas dan jangkauan genangan tsunami yang berbeda. Perbedaan ini disebabkan bahwa model inariks yang dikembangkan oleh BNPB menggunakan data dalam skala nasional, sehingga resolusi spasial yang digunakan dalam pemodelan sangat besar. Sedangkan model Berryman yang dikembangkan dalam penelitian menggunakan data dengan resolusi spasial kecil untuk skala pemetaan kabupaten.

Perbandingan yang dilakukan secara visual kurang memberikan informasi yang lebih akurat. Untuk itu perbandingan kedua model dilakukan dengan cara menghitung nilai *Root Mean Square Deviation* (RMSD) serta *Normalised Root Mean Square Deviation* (NRMSD). Nilai RMSD dan NRMSD antara model Berryman dan Model Inarisk BNPB mempunyai perbedaan yang jauh. Perhitungan nilai RMSD menghasilkan 166,9 dan nilai NRMSD 44,8 %. Nilai RMSD sebesar 166,9 membuktikan bahwa kedua model memiliki hasil yang jauh berbeda.

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1. Kesimpulan**

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan yaitu:

1. Pemodelan potensi genangan tsunami di wilayah pesisir Kecamatan Ratu Samban dan Ratu Agung Kota Bengkulu melibatkan banyak parameter dan data yang harus dipersiapkan, khususnya data topografi dan penggunaan lahan dalam skala detail. Pemanfaatan data DEMNAS telah memberikan alternatif penyediaan data pemodelan tsunami dalam skala detail dan *up to date*. Dengan memanfaatkan DEMNAS dapat diekstraksi data DEM yang berfungsi sebagai basis pengukuran ketinggian tsunami di daratan. Data penggunaan lahan diinterpretasi dari data citra google earth dan data penggunaan lahan OSM. Data Penggunaan lahan dikonversi menjadi nilai kekasaran permukaan yang berguna sebagai penghambat penjalaran tsunami di daratan. Kedua data ini sangat berguna untuk pemodelan genangan tsunami sebagai data elevasi dan kekasaran permukaan.
2. Hasil simulasi dengan menggunakan berbagai skenario ketinggian tsunami di garis pantai memberikan gambaran dampak genangan tsunami di lokasi penelitian berupa luas dan jangkauan maksimum. Luas dan jangkauan genangan tsunami berbanding lurus dengan ketinggian tsunami di garis pantai, semakin tinggi tsunami di garis pantai maka semakin luas genangan tsunami dan semakin jauh jangkauan tsunami di daratan.
3. Peta potensi genangan tsunami hasil pemodelan Berryman memberikan pola genangan yang sama dengan peta genangan tsunami Inariks yang dikeluarkan oleh BNPB. Jangkauan genangan tsunami dari kedua model memberikan hasil yang cukup berbeda dengan nilai RMSD sebesar 166,9 dengan NRMSD sebesar 44,8 %.

#### **6.2. Saran**

Penelitian genangan tsunami yang dihasilkan dalam penelitian ini belum mengkaji dan menganalisis berapa pengaruh dari masing-masing objek kekasaran permukaan dalam menghalangi gelombang tsunami. Untuk itu perlu dilakukan kajian khusus tentang keefektifan dan besaran nilai indeks kekasaran permukaan sebagai penahan gelombang tsunami yang masuk ke daratan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Annunziato, A. & Best. C., 2005. *The tsunami event analyses and models*. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, European Commission. <http://tsunami.jrc.it/model/simulation.pdf>.
- Berryman, K., 2006. *Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand*. Lower Hutt, Institute of Geological and Nuclear Science.
- BNPB, 2012. Lampiran Perka BNPB No. 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Bencana, *Panduan Nasional Pengkajian Risiko Bencana Tsunami*. Jakarta, BNPB.
- Bryant, E., 2008. *Tsunami the Underrated Hazard*, Second Edition. Chichester, Springer-Praxis Publishing.
- Dao, M. H. & Tkalich, P., 2007. Tsunami Propagation Modelling? a Sensitivity Study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 7, 741–754.
- Fauzi, Y., Suwarsono, S. & Mayasari, Z. M., 2014. The Run up Tsunami Modeling in Bengkulu using the Spatial Interpolation of Kriging Technique. *Forum Geografi*, 28 (2), 103–112. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v28i2.427>
- Fauzi, Y., 2015. Aplikasi Matematika dalam Pemodelan Risiko Bencana Tsunami, *Prosiding Seminar Nasional Matematika*, Universitas Parahyangan, 10, 32-36.
- Fauzi, Y., Hartono, H. & Kongko, W., 2020. Numerical Modeling of Tsunami and Tsunami Vulnerability Analysis of Temon Coastal Region in Yogyakarta, Indonesia. *Disaster Advances*, 13 (5), 33- 41.
- Flouri, E. T., Kalligeris, N., Alexandrakis, G., Kampanis, N. A. & Synolakis, C. E., 2013. Application of a finite difference computational model to the simulation of earthquake generated tsunamis. *Applied Numerical Mathematics*, 67, 111–125. <http://doi.org/10.1016/j.apnum.2011.06.003>.
- Hills, J.G. & Mader, C.L., 1997. Tsunami Produced by the Impacts of the Small Asteroids, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **822**, 381-394.
- Jaffe, B. E. & Gelfenbuam, G., 2007. A Simple Model for Calculating Tsunami Flow Speed from Tsunami Deposits. *Sedimentary Geology*, 200 (3–4), 347–361. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.013>.
- Latief, H., 2013. *Pedoman Teknik Pembuatan Peta Bahaya Rendaman Tsunami*. Bandung, Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB.
- Pignateli, C., Sanso, P. & Mastronuzzi. G., 2009. Evaluation of Tsunami Flooding Using Geomorphologic Evidence. *Marine Geology*, 260, 6-18. <https://doi:10.1016/j.margeo.2009.01.002>.

- Putra, R., 2008. Kajian Risiko Tsunami Terhadap Bangunan Gedung Non-Hunian dengan Skenario Variasi Ketinggian Run-up pada Garis Pantai; Studi Kasus Kota Banda Aceh Indonesia. *Tesis*. Universitas Gadjah Mada.
- Purbani, 2012. Strategi Mitigasi Tsunami Berbasis Ekosistem Mangrove Pantai Timur Pulau Weh. *Disertasi*. Institut Pertanian Bogor.
- Santius, S. H., 2015. Pemodelan Tingkat Risiko Bencana Tsunami pada Permukiman di Kota Bengkulu Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Pemukiman*, 10 (2), 92–105. <http://dx.doi.org/10.31815/jp.2015.10.92-105>
- Smart, G.M., Crowley, K.H.M. & Lane, E.M., 2016. Estimating Tsunami Run Up. *Natural Hazard*, 80, 1933-1947. Springer. <http://doi:10.1007/s11069-015-20528>
- Wahyuni, 2020. Analisis Risiko Bencana Tsunami untuk Mendukung Tata Ruang Pesisir di Kabupaten Kulonprogo. *Disertasi*. Universitas Gadjah Mada.
- Zahro, Q., 2017. Spatial Study of Tsunami Risk in Serang, Banten, *Jurnal Sains dan Teknologi Bencana*, 12 (1), 44-52. <https://doi.org/10.29122/jstmb.v12i1.3699>

**LAMPIRAN:**

**Lampiran 1. Draft Artikel Ilmiah pada Jurnal Internasional**

**Lampiran 2. Sertifikat HKI (Hak Cipta)**

# Spatial Modeling of Tsunamis and Tsunami Inundation Analysis of “Panjang” Beach in Bengkulu City, Indonesia

Fauzi Yulian<sup>1\*</sup>, Hardiansyah<sup>2</sup>, and Mayasari Zulfia Memi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Bengkulu, Bengkulu, INDONESIA

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, University of Bengkulu, Bengkulu, INDONESIA

\* Corresponding author: yulianfauzi@unib.ac.id

## Abstract

*The tsunami inundation model is a spatial model that is used to simulate the characteristics of the tsunami inundation by calculating the decrease in the height of the tsunami inundation every one meter on the mainland. Tsunami inundation modeling is used to estimate the range and extent of tsunami inundation from the coastline to the mainland and generally, this model is developed through empirical methods. The purpose of this study was to obtain a spatial description of the potential distribution of tsunami inundation in the tourist area of Pantai Panjang, Bengkulu City. Specifically, the objectives of this research are 1). Spatial modeling of the potential distribution of tsunami inundation to produce the range and extent of tsunami inundation in the Pantai Panjang tourist area, Bengkulu City. 2). Taking an inventory of the level of tsunami vulnerability as an effort to create a level of alertness and anticipation in a disaster in the Pantai Panjang tourist area, Bengkulu City. The stages to achieve the objectives of this research were carried out by collecting data and research materials, developing and analyzing a spatial model of tsunami inundation through a mathematical approach, determining and setting research variables in the form of surface roughness index values and the elevation of the research site, compiling and building a spatial model using ArcGIS and validation and analysis of potential tsunami inundation models. The innovation developed is to model the potential distribution of tsunami inundation in coastal tourism areas, as an effort to develop the level of awareness and anticipation of disasters in the coastal area of Bengkulu City.*

**Keywords:** Spatial Model, Tsunami Inundation, Tsunami Hazard Zoning, Tsunami Hazard Map, and Beach Panjang

## Introduction

The coastal of Bengkulu city is an area that has a fairly rapid growth dynamic. This is marked by the development of residential and shopping centers as well as the tourism industry in the coastal area of Bengkulu City. “Panjang” Beach tourist area is one of the best beach in Bengkulu City and is increasingly visited by tourists from year to year. The arrangement of the coastal area, both by the government and the private sector, makes this area a favorite for tourists to visit. The high number of tourist visits keeps the economy of the people in Bengkulu City alive, especially the food, beverage and other businesses in the “Panjang” beach tourist area. It's just that the factor of economic needs ignores the threat that always lurks in this area, namely the tsunami disaster. Based on UU Number. 24 on 2007 concerning Disaster Management states that everyone is obliged to carry out disaster management activities, and provide correct information to the public about disaster management. This chapter provides space for academics to be able to participate in disaster management, in relation to planning and providing good and correct information through spatial modeling of tsunami inundation potential and making tsunami hazard maps.

A tsunami is a natural disaster caused by an earthquake and this disaster is very difficult to predict when it will occur, besides the hazard effects generated are also very powerful so efforts are needed to reduce the risk of the disaster (Fauzi et al., 2020). Seeing the hazard effect caused by the tsunami disaster is not small, it is necessary to have a tsunami disaster mitigation management system, especially in pre-disaster. Tsunami disaster mitigation management at the local level must be supported by tsunami hazard maps, tsunami inundation maps, hazard zoning maps, evacuation maps, and tsunami risk maps as well as clear policies on early warning procedures. Based on studies and observations in the “Panjang” beach tourist area, there were no guidelines or signs for



tsunami evacuation. Currently the existing guidelines are only instructions for tsunami evacuation routes. Meanwhile, hazard maps and vulnerability zones in the event of a tsunami disaster have not been seen and are available in the “Panjang” Beach tourist area.

Modeling the potential for tsunami inundation requires parameters and variables that are accurate and have similarities with the real in the field, because inundation modeling is a representation of the real conditions that exist in the research area. The parameters for modeling the potential for tsunami inundation are the topography and land cover of the coastal area which are manifested in the form of DEM data and land use. The extent and extent of tsunami inundation in coastal areas is strongly influenced by these two parameters. As a consequence, different topography and land cover of coastal areas will also produce different characteristics of tsunami inundation.

Making inundation maps or tsunami hazard maps can be done by tracing tsunami historical data or by tsunami modeling. One method for estimating a tsunami disaster and the level of tsunami hazard and vulnerability can be done through spatial modeling. The tsunami inundation model is a spatial model that is used to simulate the characteristics of the tsunami inundation through the calculation of the decrease in the height of the tsunami inundation on the mainland. The variables used in this model consist of slope, surface roughness (land cover/land use), and run-up height at the coastline (Berryman, 2006; and Smart et al., 2016). Tsunami modeling in coastal tourism areas is very important to do as an effort to minimize the potential risk of a tsunami disaster in the area. The number of activities of residents and tourists in the “Panjang” beach tourist area of Bengkulu City needs to be anticipated and planned for the level of safety in the event of a tsunami disaster.

**Material and Methods**

**Study Area and Data:** The study area is located in the Ratu Samban and Ratu Agung Sub-District of Bengkulu City. The research materials used in this study can be seen in the Table 1.

**Table 1  
Research Material**

<b>Jenis Data</b>	<b>Data</b>	<b>Spesifikasi</b>	<b>Sumber Data</b>
Base Maps	RBI	Scale 1:50.000	Downloaded from RBI BIG data <a href="https://tanahair.indonesia.go.id">https://tanahair.indonesia.go.id</a>
Topografi	DEMNAS	Spatial Resolution 8,5 m (0,27 Arc Second)	Downloaded from Demnas BIG <a href="https://tides.big.go.id">https://tides.big.go.id</a>
Surface Roughness	Land Use	Skala 1:50.000	<i>Google Earth</i> Interpretation and field survey

**Research Steps**

The steps of this research are:

**Model formulation**

Modeling the potential for tsunami inundation is made by developing the concept of water loss (Hloss) developed by Berryman (2006) and simple hydraulics principles developed by Smart et al., (2016). Both of these tsunami inundation models work in the spatial domain so that the model developed is a spatial model. The activity carried out in this stage is to examine the tsunami inundation model through a mathematical approach, so that the model variables and parameters can be well defined.

**Determination of Elevation and Surface Roughness Index**

Spatial modeling of potential tsunami inundation using the Berryman and Smart equations using slope/elevation variables and surface roughness. The elevation data is derived from the DTM data downloaded from the DEMNAS BIG data. The elevation variable from the DTM is converted into radian data by utilizing the tool facilities contained in ArcGis. Land use data at the study site are interpreted and classified based on land cover and then converted to surface roughness index values. The surface roughness index value is derived and

converted from detailed land use data and land cover types which refer to the research of Berryman (2006) and Putra (2008).

### Building a Tsunami Inundation Model

The next step is to build a potential tsunami inundation model based on the Berryman Model (Equation 1) through the creation of a Builder model algorithm.

$$H_{loss} = \left( \frac{167n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S \quad (1)$$

Information:

- $H_{loss}$  : Decrease in water level per meter from inundation distance  
 $n$  : Roughness Surface coefficient  
 $H_0$  : The height of the tsunami waves at the coastline  
 $S$  : Slope

The modeling of tsunami inundation follows the equation for decreasing the height of the tsunami inundation and the distance of the tsunami inundation on the mainland with inputs of tsunami height at the coastline, surface roughness index values and slope/elevation slopes. The model builder algorithm developed in this study is described as follows:

**Input:** Surface roughness value ( $n^2$ )  
 Tsunami height at the coastline ( $H_0$ )  
 Elevation ( $S$ )

**Process:** Count  $H_{loss} = \left( \frac{167n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S$   
 Count  $L = \frac{3a}{2} \ln \left( \frac{Y_s}{aS_0} + 1 \right)$

**Output:** Cost Raster  $H_{loss}$  (tsunami height)  
 $L$  (tsunami inundation distance)

The results of the Builder model in the ArcGis software are calculated and analyzed the distance of the tsunami inundation horizontally from the coastline to the mainland using the Cost Distance method. The results of the calculation of the cost distance will get the potential range of a tsunami in coastal areas. The calculation of the tsunami range using the Smart Model (Equation 2) is carried out using the help of ArcGis and Excel. Surface roughness data was developed from the research results of Smart et al., (2016).

$$L = \frac{3a}{2} \ln \left( \frac{Y_s}{aS_0} + 1 \right) \quad (2)$$

Information:

- $L$  : Tsumani inundation distance  
 $Y_s$  : Run up heigth at the coastline  
 $S_0$  : Slope  
 $a$  : Surface roughness

### Validation and Model Analysis

The model validation test was carried out by calculating the Root Mean Square Deviation (RMSD) and Normalized Root Mean Square Deviation (NRMSD) values. The purpose of this calculation is to determine the accuracy of the tsunami inundation distance from the Berryman Model to the results of the Smart Model statistically. The smaller the RMSD and NRMSD values obtained, the smaller the difference between the results

of the Berryman Model and the results of the Smart Model. Calculation of the value of RMSD and NRMSD data is carried out using the equations:

$$RMSD(m) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_n - y_n)^2}{n}} \quad (3)$$

$$NRMSD (\%) = \frac{RMSD}{y_{max} - y_{min}} \quad (4)$$

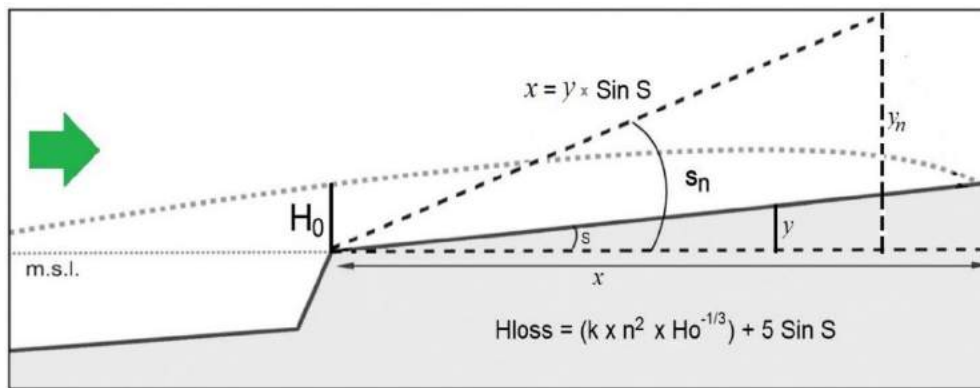
Information:

- $x_n$  : Modeling data 1 to  $n$
- $y_n$  : Modeling data 2 to  $n$
- $n$  : Number of data
- $y_{max}$  : Maximum data observation
- $y_{min}$  : Minimum data observation

## Results and Discussion

### Tsunami Spatial Model Formulation

Modeling the tsunami inundation using the Berryman equation using altitude data in the form of DEM data. DEM data is converted into radian data by utilizing the tool facilities contained in ArcGIS. Tsunami inundation modeling is used to estimate tsunami inundation from the coastline to the mainland and generally this model is developed through empirical methods. This model was developed through mathematical calculations based on the calculation of the loss of tsunami height per meter of inundation distance. The slope ( $\sin S$ ) represents the straight line of the sloping side of a triangle, corresponding to the mean slope taken from the sloping soil profile (topography) of the coastline. In this way,  $\sin S$  compensates for the flat topography of the Hills and Mader equation (Pignatelli et al., 2009). The onshore tsunami inundation diagram resulting from the Berryman model is modified from the tsunami wave diagram developed by Pignatelli et al., (2009) as shown in Figure 1.



**Figure 1. Tsunami wave diagram**  
(Source: modified from Pignatelli et al., 2009)

The slope also affects the tsunami inundation on land. Tsunamis can move uphill when fast-moving water has sufficient momentum. The Hloss method is an inundation modeling method based on wave height from the shoreline, slope slope, and surface roughness coefficient. This equation is implemented using a cost-distance function which calculates the distance to the nearest source for each pixel, by minimizing the distance specified in a cost surface. The source for the function is the pixel value representing the ocean/tsunami wave, and the cost surface is the pixel representing the tsunami wave height loss (Hloss), where  $n$  is the surface roughness pixel and  $S$  is the slope pixel. The modified equation is presented in Equation (1). The implementation of Equation (1) in modeling tsunami inundation in Indonesia uses the parameter of tsunami height at the coastline by referring to the results of the BNPB study which is an attachment to Perka No. 2 BNPB on 2012 namely the National Guidelines for the Assessment of Tsunami Disaster Risk. This model has been widely applied to model tsunami inundation in Indonesia, as did Mardiatno, (2008); Purbani (2012); BNPB, (2016); Fauzi et al, (2014); and Putri et al, (2017).

### Mapping of the Height Location/Elevation and Land Use

Research on tsunami inundation modeling begins with mapping the location/elevation and land use. The height of the research area is manifested in DEM data taken from DEMNAS data from the Geospatial Information Agency (BIG). DEM data in TIFF format has a spatial resolution of 0.27 arc-second ( $\sim 8\text{ m}$ ) which is higher than that of SRTM and ASTER GDEM. In addition to DEM data, the main data in tsunami inundation modeling is land use data sourced from open street map (OSM) data. Open Street Map or OSM is a web-based project for creating a free and open world map. OSM was built entirely by volunteers by conducting surveys using GPS, digitizing satellite images, and collecting and releasing publicly available geographic data. The research area for tsunami inundation modeling in this study is limited to two sub-districts, namely Ratu Samban and Ratu Agung sub-districts. The selection of these two sub-districts was used as research locations based on the fact that the coastal areas of these two sub-districts are favorite tourist sites in Bengkulu City. The number of tourists who visit the research site is very crowded, especially on weekend and holidays. The image map of the research area is presented in Figure 2.

### Determination of Elevation and Surface Roughness Index

The altitude data used in this study is DEM data, namely altitude data taken from the ground surface which reflects the height of the ground surface. DEM data sourced from DEMNAS is then processed into altitude data in the form of slope radian format so that it can be included in the tsunami inundation model. From the DEM height data in the study area, it can be concluded that the elevation of the coastal surface of Ratu Samban and Ratu Agung sub-districts is a fairly gentle elevation. This condition causes the research area to be an area prone to tsunami disasters. Several public facilities are located in this area such as Bencolen Mall, Sport Center, Hotel and Cafe/restaurant. The DEM map of the research area can be seen in Figure 3.

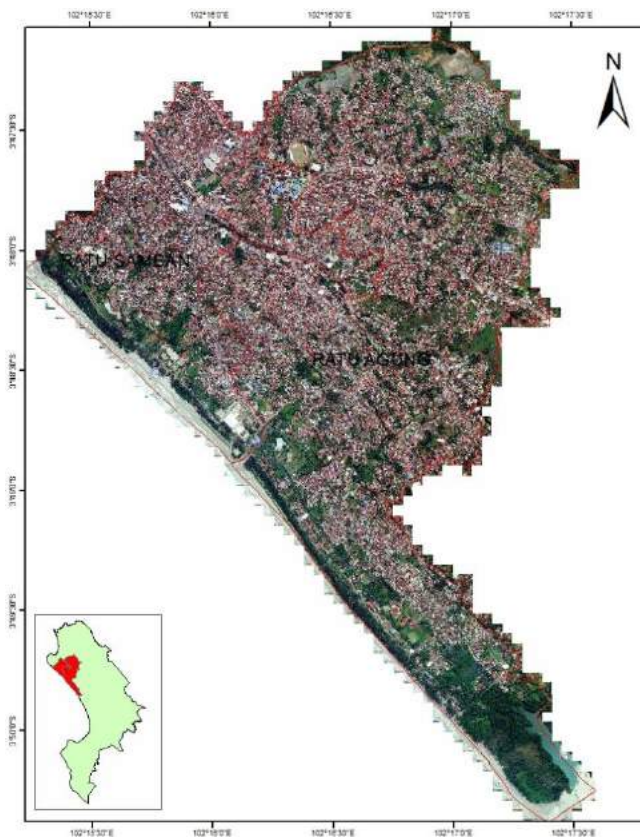


Figure 2. Image Map of Research Area

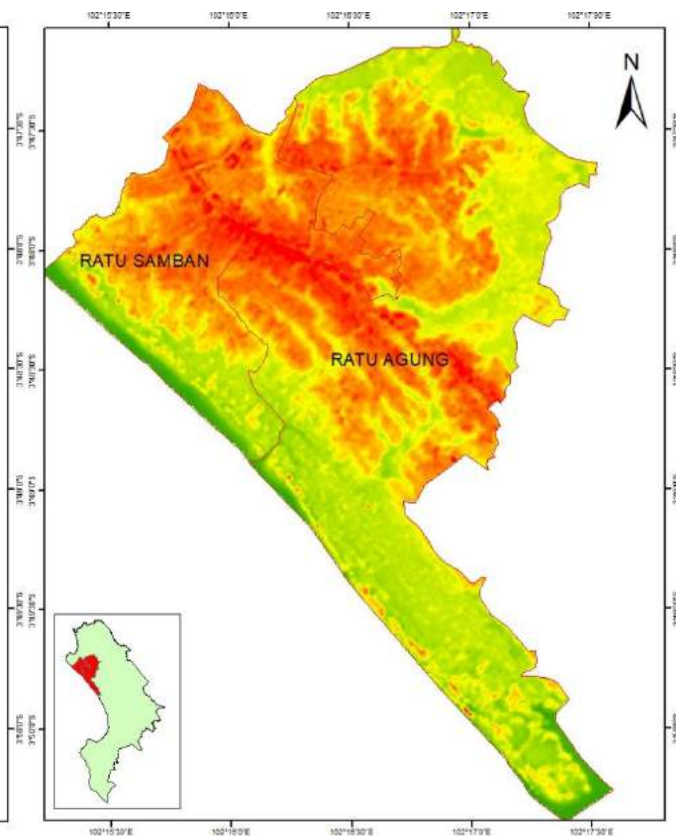


Figure 3. DEM Map of Ratu Samban and Ratu Agung Districts

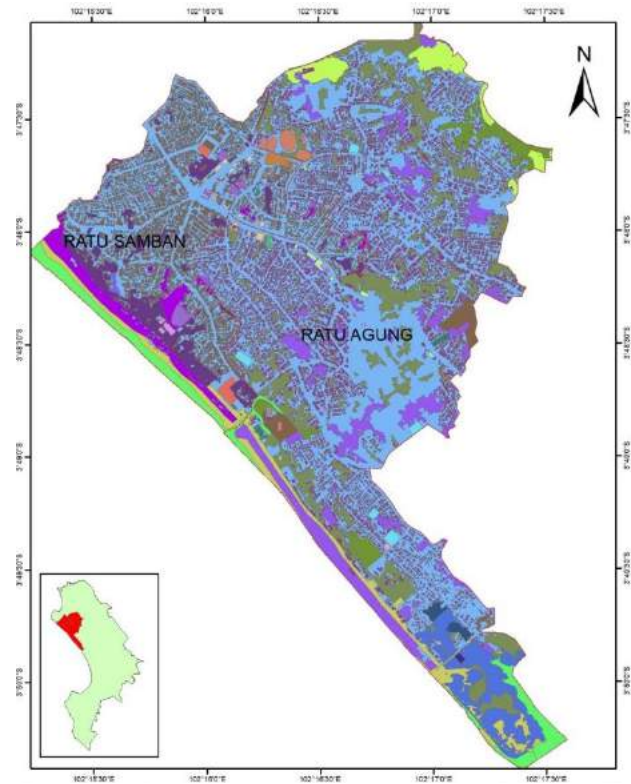


Land use is using the land that is carried out optimally by utilizing all available resources in an effort to develop the using lang in an area. The composition of built and undeveloped land in Bengkulu City is almost the same. The built-up land is 4,900,111 *Ha* (31.77%) and the rest is non-built land, generally in the form of mixed gardens and shrubs. Built-up land is used for housing, trade and offices. Housing (4,350,886 *Ha.*) is generally evenly distributed in all sub-districts, while trade and offices are scattered sporadically in several districts that are more oriented towards the city center, namely Muara Bangkahulu District, Teluk Segara District, Ratu Agung District, Ratu Samban District and Gading District. Cempaka, with a total area of about 342,568 *Ha.* Non-developed land is still quite extensive and is a potential area to be developed in the future. Types of non-built land use which quite dominates in Bengkulu City are mixed gardens covering an area of 2,041,470 *Ha* and shrubs covering an area of 3,109,762 *Ha.* Mixed gardens and shrubs are evenly distributed in all sub-districts except in Teluk Segara and Ratu Samban sub-districts. The result of the interpretation of land use is converted into a surface roughness index value. The coefficient of surface roughness is distinguished by the type of detailed land use according to Putra (2008) and the type of land cover made by Berryman (2006). Surface roughness values based on land use are shown in Table 2. Land use map of Ratu Samban and Ratu Agung Subdistricts can be seen in Figure 4.

**Table 2**  
**List of Surface Roughness Coefficient Value**

No	Type of land use	Surface Roughness Coefficient
1	Pond	0,010
2	River	0,007
3	Sand	0,018
4	Open field	0,015
5	Meadow	0,020
6	Ricefield	0,020
7	Empty land	0,015
8	Moor	0,025
9	Field	0,025
10	Plantation/ coastal forest	0,035
11	Shrubs	0,040
12	Settlements/ build-up land	0,045
13	Mangrove forest	0,025

Source: Berryman (2006); BNPB (2012);

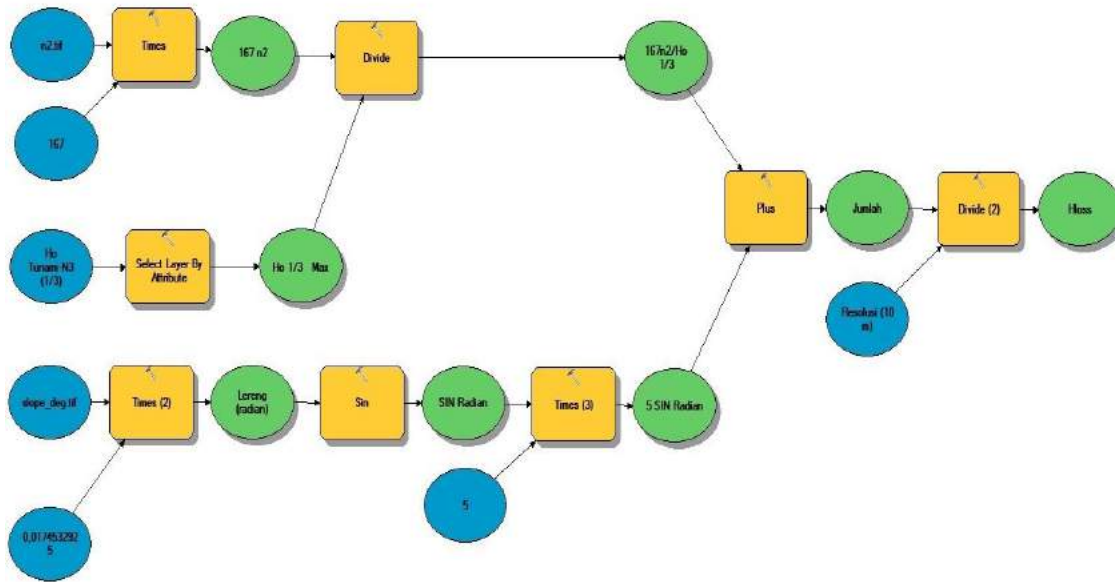


**Figure 4. Land Use Map of Ratu Samban and Ratu Agung Subdistricts (Source: Processed results of Arcgis data 2021)**

### Model Builder Design

Model Builder can be used to create, edit, and manage spatial models. There are two types of elements in the Builder model: tools and variables. Tool elements are represented by rectangles and are a process by adding from Arc toolbox in ArcGis. Variables are represented by ovals consisting of data/input and process results. To run the model that has been created, use the Run menu. The Run model process is marked by a red color change in the process box (rectangle), then there is a shadow below it. The shadow indicates that the process has completed without any errors. Mathematical operations on this inundation model are performed on ArcGis software with raster-based data. Hloss is a function of the surface roughness coefficient ( $n$ ), the tsunami height at the coastline ( $H_0$ ) and the slope ( $S$ ). Hloss only shows the height of the missing tsunami and not the direction of

the tsunami. The results of the Hloss operation (loss of tsunami height) and cost distance (direction of tsunami propagation) generate the potential for tsunami inundation. The design of the Builder model to model the maximum range and area of tsunami inundation on the coast of Ratu Samban Sub-District and Ratu Agung Sub-District are presented in Figure 5.

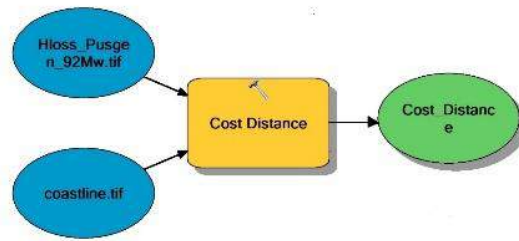


**Figure 5. Design Model Builder for Hloss Modelling**  
(Source: Model Builder Results, 2021)

The stages in the model builder based on the image can be explained as follows:

1. Input the surface roughness value parameter ( $n^2$ ) consisting of land use data, the value is squared, then multiplied between the surface roughness value ( $n^2$ ) and the constant 167, resulting in  $167n^2$ .
2. Input the tsunami height parameter on the coastline which is annotated as  $H_0$ , where previously the value of  $H_0$  was raised to the power of  $1/3$  ( $H_0^{1/3}$ ) first, then the maximum  $H_0^{1/3}$  value was selected.
3. Enter the sloperadian value parameter obtained from the DTM map, the attribute value used is slopedegree, then continue with mathematical calculations to get sin radians, multiplication between sin radians and constant 5 produces 5 sin radians.
4. The results of steps 1 and 2 are divided between  $167n^2$  and  $H_0^{1/3}$ .
5. The results of step 4 are added to the results in step 3 ( $5 \sin \text{ radians} + 167 n^2$  divided by  $H_0^{1/3}$ ) resulting in a sum at a pixel size of 10 meters. Dividing the result of step 5 by a constant of 10 will result in a Hloss with a pixel size of 1 meter.

The inundation area modeling is simulated by calculating the per pixel inundation propagation (Hloss) by considering the elevation, surface roughness coefficient, and tsunami height at the coastline. The result of applying the tsunami inundation modeling equation is a value that shows the reduced Hloss value for each pixel. To determine the direction of the tsunami, a cost distance operation was carried out. Cost distance analysis determines the closest distance from one pixel to another to the location of the wave source, in this case the coastline. To get the distribution of inundation from the shoreline, shoreline delineation is used. The division between Hloss and pixel cells is 10 m to get the cost distance. The mathematical process of cost distance uses the tsunami height parameter on the coastline which is annotated with the maximum distance. The results of the calculation of the cost distance can be seen the distribution of inundation on the coastline to the mainland. The design of the Builder model used in this study is presented in Figure 6.



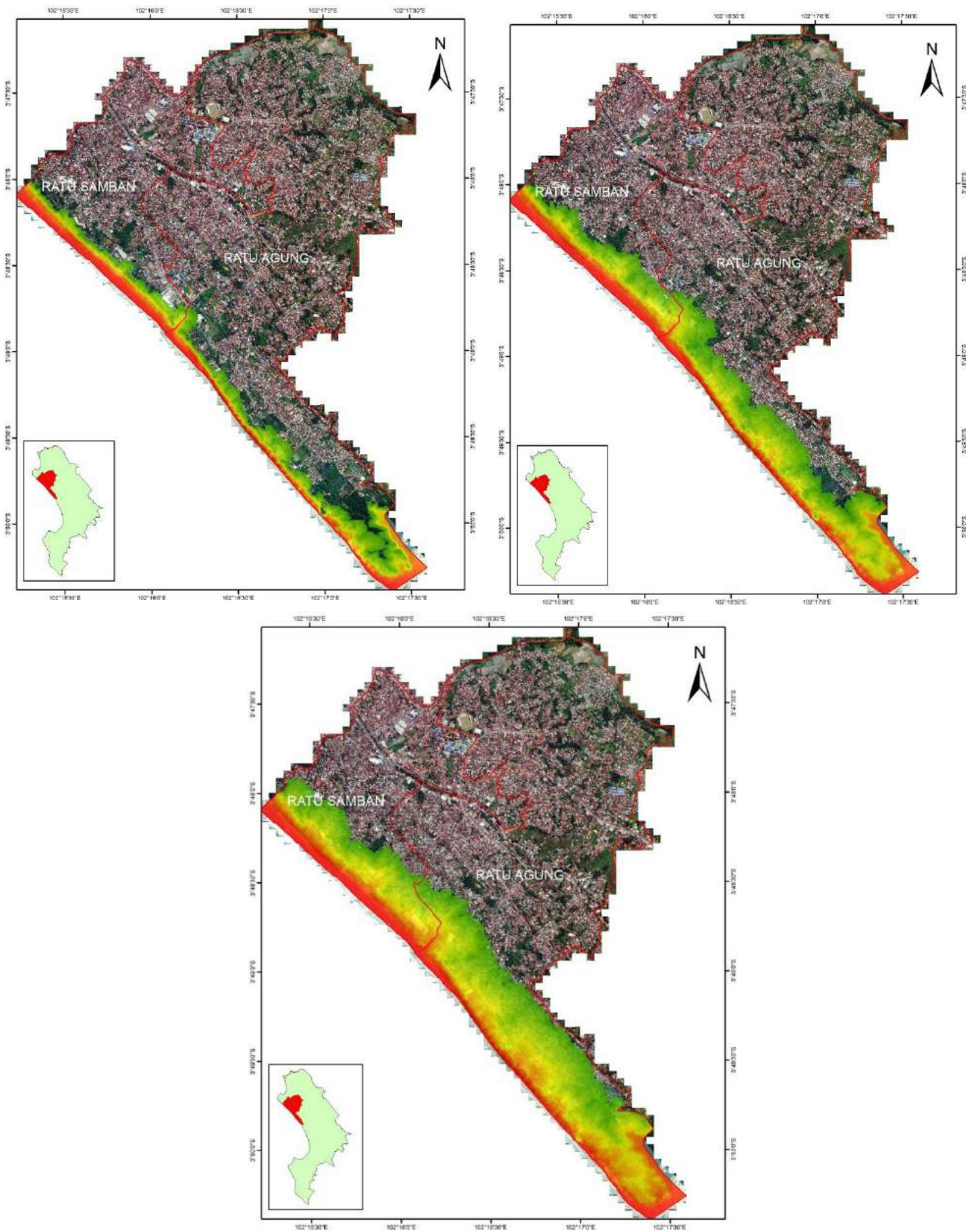
**Figure 6. Model Builder Design fir Tsunami Inundation Model**  
(Suorce: Model Builder Results, 2021)

The results of the Builder modeling get the Hloss value, the next step is to find the maximum inundation range and the tsunami inundation area. The Hloss value is processed again using the cost-distance tool. The cost distance analysis uses the tsunami height parameter at the coastline which is annotated by the maximum distance. The height of the tsunami can be calculated by the process of subtracting the height of the tsunami at the coastline ( $H_0$ ) against the result of the cost distance. This limitation causes the tsunami height to be lost at  $H_0$  height above sea level. The value of the tsunami height per one meter inundation distance is obtained from the division of the Hloss data by the size of the resolution used. The tsunami height on the coastline will continue to decrease due to the influence of elevation and surface roughness. Hloss only shows how many tsunamis were lost and not the direction of the tsunami. To find out the direction of the tsunami waves, a cost distance operation is carried out. Cost distance analysis determines the closest distance from one pixel to another to the coastline.

### **Tsunami Inundation Modeling Simulation**

The tsunami inundation potential model was designed by developing the concept of water level loss developed by Berryman (2006). In this concept, a mathematical calculation is carried out based on the calculation of the loss of tsunami height per 1 m of inundation distance (inundation height) calculated by considering the distance to the slope and surface roughness. The main data used for modeling tsunami inundation are elevation and surface roughness. The elevation data was extracted from the DEM map (Figure 3), while the surface roughness data was converted from the land use map (Figure 4). The results of the interpretation and classification of land use are converted into surface roughness index values and presented in a table listing the surface roughness coefficient values (Table 2). The modeling input data in this study uses a resolution of 10 meters, this refers to the results of research by Handayani (2014) and Marfai et al., (2018) that the tsunami inundation model is more accurate at medium data resolution. The greater the resolution of the input data, the wider the tsunami inundation area generated in the modeling. After obtaining the surface roughness index map and the DTM map, the modeling process was carried out following the equation given by Berryman (2006). To calculate the distribution of tsunami inundation on land, a cost distance analysis is used with the maximum distance value being the height of the tsunami on the coastline. The calculation of the cost distance results in the distribution of the tsunami inundation from the coastline to the mainland. The model used to model the tsunami inundation is Builder, this model is often referred to as a 'visual programming language' or often referred to as a tool used to create a script. Model Builder can be used to map out a repetitive workflow that involves many other jobs, making it easier for users to perform their tasks. The tsunami inundation model was designed using the Model Builder which was processed with ArcGis software. The results of the calculation of the cost distance to the Hloss value produce the distribution of tsunami inundation on the mainland of the Ratu Samban and Ratu Agung sub-districts starting from the coastline. The inundated area is then analyzed to find the area of inundation and the maximum range of tsunami inundation. The simulation results of tsunami inundation modeling for the three worst scenarios, namely  $H_0 = 10$  meters, 15 meters and 20 meters using the Berryman equation are presented in Figure 7.





**Figure 7. Simulation Results of Tsunami Inundation Modeling with a Height of 10, 15 and 20 meters (Suource: Model Builder Results, 2021)**



## Conclusions

Modeling the potential for tsunami inundation in the coastal areas of Ratu Samban and Ratu Agung Subdistricts, Bengkulu City involves many parameters and data that must be prepared, especially topographic data and land use at a detailed scale. Utilization of DEMNAS data has provided an alternative for providing tsunami modeling data in a detailed and up to date scale. By utilizing DEMNAS, DEM data can be extracted which serves as a basis for measuring tsunami heights on land. Land use data is interpreted from google earth image data and OSM land use data. Land use data is converted into a surface roughness value which is useful as a barrier to tsunami propagation on land. These two data are very useful for modeling tsunami inundation as elevation and surface roughness data.

## Acknowledgments

Thank you very much to the University of Bengkulu which has funded this research through the Penelitian Unggulan Universitas scheme with contract number 1775/UN30.15/PG/2021.

## References

- Annunziato, A. & Best. C., 2005. *The tsunami event analyses and models*. Institute for the Protection and Security of the Citizen, Joint Research Centre, European Commission. <http://tsunami.jrc.it/model/simulation.pdf>.
- Berryman, K., 2006. *Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand*. Lower Hutt, Institute of Geological and Nuclear Science.
- BNPB, 2012. Lampiran Perka BNPB No. 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Bencana, *Panduan Nasional Pengkajian Risiko Bencana Tsunami*. Jakarta, BNPB.
- Bryant, E., 2008. *Tsunami the Underrated Hazard*, Second Edition. Chichester, Springer-Praxis Publishing.
- Dao, M. H. & Tkalich, P., 2007. Tsunami Propagation Modelling? a Sensitivity Study. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, 7, 741–754.
- Fauzi, Y., Suwarsono, S. & Mayasari, Z. M., 2014. The Run up Tsunami Modeling in Bengkulu using the Spatial Interpolation of Kriging Technique. *Forum Geografi*, 28 (2), 103–112. <https://doi.org/10.23917/forgeo.v28i2.427>
- Fauzi, Y., 2015. Aplikasi Matematika dalam Pemodelan Risiko Bencana Tsunami, *Prosiding Seminar Nasional Matematika*, Universitas Parahyangan, 10, 32–36.
- Fauzi, Y., Hartono, H. & Kongko, W., 2020. Numerical Modeling of Tsunami and Tsunami Vulnerability Analysis of Temon Coastal Region in Yogyakarta, Indonesia. *Disaster Advances*, 13 (5), 33– 41.
- Flouri, E. T., Kalligeris, N., Alexandrakis, G., Kampanis, N. A. & Synolakis, C. E., 2013. Application of a finite difference computational model to the simulation of earthquake generated tsunamis. *Applied Numerical Mathematics*, 67, 111–125. <http://doi.org/10.1016/j.apnum.2011.06.003>.
- Hills, J.G. & Mader, C.L., 1997. Tsunami Produced by the Impacts of the Small Asteroids, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **822**, 381–394.
- Jaffe, B. E. & Gelfenbuam, G., 2007. A Simple Model for Calculating Tsunami Flow Speed from Tsunami Deposits. *Sedimentary Geology*, 200 (3–4), 347–361. <http://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.01.013>.
- Latief, H., 2013. *Pedoman Teknik Pembuatan Peta Bahaya Rendaman Tsunami*. Bandung, Pusat Penelitian Mitigasi Bencana ITB.
- Pignatelli, C., Sanso, P. & Mastronuzzi, G., 2009. Evaluation of Tsunami Flooding Using Geomorphologic Evidence. *Marine Geology*, 260, 6–18. <https://doi:10.1016/j.margeo.2009.01.002>.
- Putra, R., 2008. *Kajian Risiko Tsunami Terhadap Bangunan Gedung Non-Hunian dengan Skenario Variasi Ketinggian Run-up pada Garis Pantai; Studi Kasus Kota Banda Aceh Indonesia*. Tesis. Universitas Gadjah Mada.
- Purbani, 2012. *Strategi Mitigasi Tsunami Berbasis Ekosistem Mangrove Pantai Timur Pulau Weh*. Disertasi. Institut Pertanian Bogor.
- Santius, S. H., 2015. Pemodelan Tingkat Risiko Bencana Tsunami pada Permukiman di Kota Bengkulu Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Pemukiman*, 10 (2), 92–105. <http://dx.doi.org/10.31815/jp.2015.10.92-105>

- Smart, G.M., Crowley, K.H.M. & Lane, E.M., 2016. Estimating Tsunami Run Up. *Natural Hazard*, 80, 1933-1947. Springer. <http://doi:10.1007/s11069-015-20528>
- Wahyuni, 2020. Analisis Risiko Bencana Tsunami untuk Mendukung Tata Ruang Pesisir di Kabupaten Kulonprogo. *Disertasi*. Universitas Gadjah Mada.
- Zahro, Q., 2017. Spatial Study of Tsunami Risk in Serang, Banten, *Jurnal Sains dan Teknologi Bencana*, 12 (1), 44-52. <https://doi.org/10.29122/jstmb.v12i1.3699>



REPUBLIC INDONESIA  
KEMENTERIAN HUKUM DAN HAK ASASI MANUSIA

# SURAT PENCATATAN CIPTAAN

Dalam rangka perlindungan ciptaan di bidang ilmu pengetahuan, seni dan sastra berdasarkan Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta, dengan ini menerangkan:

Nomor dan tanggal permohonan : EC00202178337, 13 Desember 2021

## Pencipta

Nama : **Dr. Yulian Fauzi, M.Si, Dr. Hardiansyah, ST., MT. dkk**  
Alamat : Jl. Barito, Perum Citra Kapuas Indah No. 18, RT.18, RW. 04, Kelurahan Padang Harapan, Kota Bengkulu, Bengkulu, BENGKULU, 38225  
Kewarganegaraan : Indonesia

## Pemegang Hak Cipta

Nama : **Dr. Yulian Fauzi, M.Si, Dr. Hardiansyah, ST., MT. dkk**  
Alamat : Jl. Barito, Perum Citra Kapuas Indah, No. 18, RT. 18, RW. 04, Kelurahan Padang Harapan, Kota Bengkulu, Bengkulu, BENGKULU, 38225  
Kewarganegaraan : Indonesia  
Jenis Ciptaan : **Peta**  
Judul Ciptaan : **PETA SEBARAN GENANGAN TSUNAMI DI KAWASAN WISATA PANTAI PANJANG KOTA BENGKULU MELALUI PEMODELAN SPASIAL**  
Tanggal dan tempat diumumkan untuk pertama kali : 13 Desember 2021, di Bengkulu  
di wilayah Indonesia atau di luar wilayah Indonesia  
Jangka waktu perlindungan : Berlaku selama hidup Pencipta dan terus berlangsung selama 70 (tujuh puluh) tahun setelah Pencipta meninggal dunia, terhitung mulai tanggal 1 Januari tahun berikutnya.  
Nomor pencatatan : 000300148

adalah benar berdasarkan keterangan yang diberikan oleh Pemohon.  
Surat Pencatatan Hak Cipta atau produk Hak terkait ini sesuai dengan Pasal 72 Undang-Undang Nomor 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta.



a.n Menteri Hukum dan Hak Asasi Manusia  
Direktur Jenderal Kekayaan Intelektual  
u.b.  
Direktur Hak Cipta dan Desain Industri

Dr. Syarifuddin, S.T., M.H.  
NIP.197112182002121001

## Disclaimer:

Dalam hal pemohon memberikan keterangan tidak sesuai dengan surat pernyataan, Menteri berwenang untuk mencabut surat pencatatan permohonan.

**LAMPIRAN PENCIPTA**

No	Nama	Alamat
1	Dr. Yulian Fauzi, M.Si	Jl. Barito, Perum Citra Kapuas Indah No. 18, RT.18, RW. 04, Kelurahan Padang Harapan, Kota Bengkulu
2	Dr. Hardiansyah, ST., MT.	Jl. Hibrida 13, Gang Medika, No. 33, RT. 29, RW. 04, Kelurahan Sumur Dewa, Selebar, Kota Bengkulu
3	Zulfia Memi Mayasari, S.Si., M.Si.	Jl. Barito, Perum Citra Kapuas Indah, No. 18, RT. 18, RW. 04, Kelurahan Padang Harapan, Kota Bengkulu

**LAMPIRAN PEMEGANG**

No	Nama	Alamat
1	Dr. Yulian Fauzi, M.Si	Jl. Barito, Perum Citra Kapuas Indah, No. 18, RT. 18, RW. 04, Kelurahan Padang Harapan, Kota Bengkulu
2	Dr. Hardiansyah, ST., MT.	Jl. Hibrida 13, Gang Medika, No. 33, RT. 29, RW. 04, Kelurahan Sumur Dewa, Selebar, Kota Bengkulu
3	Zulfia Memi Mayasari, S.Si., M.Si.	Jl. Barito, Perum Citra Kapuas Indah, No. 18, RT. 18, RW. 04, Kelurahan Padang Harapan, Kota Bengkulu

