

## Pemodelan Percepatan Tanah sebagai Parameter Hazard Gempabumi menggunakan Metode Deterministic Seismic Hazard Analysis di Kota Manado

Loresnia Kainde<sup>1)\*</sup>, Cosmas Poluakan<sup>2)</sup>, Alfrie Rampengan<sup>3)</sup> Muhammad Zulkifli<sup>4)</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Fisika, Universitas Negeri Manado, Kabupaten Minahasa, 95618, Indonesia

<sup>4</sup> Stasiun Geofisika Manado, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Kota Manado, 95161, Indonesia

\*E-mail: kaindeloresnia@gmail.com

Diterima 05 Oktober 2023; Disetujui 30 Oktober 2023

### ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian pemodelan percepatan tanah sebagai parameter hazard gempabumi menggunakan metode deterministic seismic hazard analysis di kota manado. Penelitian ini bertujuan untuk membuat skenario pemodelan gempabumi secara DSHA (Deterministic Seismic Hazard Analysis) untuk mengetahui perkiraan nilai PGA dan nilai intensitas dari satu kejadian gempabumi signifikan. Penelitian ini memanfaatkan perangkat lunak SHAKEMAP BMKG untuk mengetahui nilai PGA (peak ground acceleration) yang kemudian dikonversi kedalam nilai intensitas (MMI) modified mercalli intensity. Sebanyak 13 skenario pemodelan dibangun dalam penelitian ini. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario pemodelan gempabumi signifikan di Kota Manado dan sekitarnya yang menggunakan inputan katalog BMKG tahun 2018 menunjukkan hasil yang bervariasi. Adapun skenario model 10 merupakan model yang paling merepresentasikan karena memiliki nilai intensitas yang sama dengan kejadian gempabumi 20 Juni 1991. Nilai PGA yang dihasilkan menunjukkan wilayah yang memiliki PGA tertinggi di Kota Manado berasal dari model ke 3 (8.1 % g) dan terendah dari model ke 12 (1.4 % g). Adanya keterbatasan data intensitas historis dari katalog sehingga hanya delapan (8) model dari 13 model yang dilakukan uji verifikasi RMSE (root mean square error). Secara umum dari kedelapan model memiliki nilai RMSE dari 0 sampai dengan 0.25.

**Kata kunci** : seismic hazard analysis, DSHA, PGA, Intensitas, RMSE

### ABSTRACT

*Research has been carried out on modeling ground acceleration as an earthquake hazard parameter in Manado. This study aims to create an earthquake modeling scenario using Deterministic Seismic Hazard Analysis to determine the estimated PGA value and the intensity value of a significant earthquake. This study utilizes the BMKG SHAKEMAP software to determine the PGA value which is then converted into a modified Mercalli intensity value. A total of 13 modeling scenarios were built in this study. The results show that the scenario of significant earthquake modeling in Manado City and its surroundings using the 2018 BMKG catalog input shows varying results. This depends on the earthquake source parameters as well as the distance from the source to the site. Scenario model 10 is the most representative because it has the same intensity value as the June 20, 1991 earthquake. The resulting PGA value shows the area that has the highest PGA in Manado comes from the 3rd model (8.1% g) and the lowest from the model to 12 (1.4 % g). Due to the limited historical intensity data from the catalog, only 8 models out of 13 models were tested for root mean square error verification ranging values from 0 to 0.25.*

**Keywords** : seismic hazard analysis, DSHA, PGA, intensity, RMSE

### 1. PENDAHULUAN

Secara seismotektonik wilayah provinsi Sulawesi Utara merupakan daerah yang aktif dan rentan terhadap bencana gempabumi. Hal ini dikarenakan Sulawesi Utara berada pada interaksi tektonik yang kompleks yaitu terdapat tiga pergerakan relative di antaranya lempeng makro Eurasia, lempeng Filipina dan lempeng mikro laut Maluku (Bock. 2003). Lempeng

Laut Maluku menunjam ke kedua arah sisi barat dan timur, Lempeng Eurasia di arah barat dan Lempeng Filipina di arah timur (Socquet,dkk. 2006). Proses pergerakan lempeng-lempeng tersebut sebagai generator gempabumi yang menjadikan Sulawesi Utara sebagai salah satu wilayah dengan tingkat seismisitas yang tinggi.

Kota Manado merupakan ibu kota dari Provinsi Sulawesi Utara. Secara geografis

terletak pada koordinat 1°30'LU - 1°40'LU dan 124°40'BT - 126°50'. Luas wilayah Manado sebesar 157,26 Km<sup>2</sup> dengan jumlah penduduk mencapai 431.880431.880 jiwa pada tahun 2018 (Badan Pusat Statistik Kota Manado, 2019). Pada sektor perekonomian kota Manado merupakan daerah yang memiliki tingkat perekonomian yang terbilang maju karena daerah tersebut mengelola sumber daya alam di darat maupun di laut yang meliputi bidang industri, perhotelan, pariwisata, perdagangan dan energi. Sebagai salah satu kota yang direncanakan oleh pemerintah sebagai kota metropolitan di luar pulau Jawa saat ini terjadi pembangunan infrastruktur secara progres di kota ini.

Dipilihnya kota Manado sebagai lokasi studi karena pada daerah tersebut sangat rawan terhadap terjadinya bahaya bencana gempabumi. Permasalahan utama dari peristiwa gempabumi adalah berpotensi mengakibatkan kerugian yang besar menyebabkan kerusakan struktur bangunan, sarana infrastruktur, menimbulkan korban jiwa, serta terhentinya aktifitas ekonomi sosial masyarakat (Unesco. 2007).

Untuk menganalisis dan mengetahui kemungkinan resiko kegempaan biasanya dilakukan studi *seismic hazard*, studi bahaya kegempaan dengan pembuatan peta *hazard* sebagai salah satu bahan masukan dalam melakukan mitigasi gempa bumi. Adapun tujuan pembuatan peta *Hazard* tersebut memungkinkan meminimalisir potensi kerusakan efek dari guncangan gempa bumi, memetakan wilayah yang berpotensi rusak berat ataupun ringan dengan mempertimbangkan faktor percepatan tanah (PGA), kondisi geologi ataupun kondisi seismotektonik daerah setempat (Zulkifli. 2017).

Pada penelitian ini menentukan percepatan tanah maksimum PGA (*peak ground acceleration*) pada wilayah penelitian yakni di kota Manado dengan metode DSHA

(*Deterministic Seismic Hazard Analysis*). Metode *DSHA* menggunakan satu sumber gempabumi (patahan/sesar) yang kemudian diskenariokan dengan nilai magnitudo gempabumi tertentu untuk dianalisis proses penjalaran gelombang gempabumi dan besar guncangan tanah yang ditimbulkan oleh gempabumi tersebut (Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)

## 2. KAJIAN LITERATUR

Gempabumi merupakan peristiwa bergetarnya bumi yang diakibatkan dengan adanya pelepasan energi dari dalam bumi secara tiba-tiba, ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Energi yang terakumulasi tersebut menjadi penyebab terjadinya gempabumi yang dihasilkan dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Energi yang dihasilkan tersebut dipancarkan ke segala arah berupa gelombang gempabumi. Luas daerah yang terkena pengaruh dari terjadinya gempabumi bergantung pada besarnya energi yang dilepaskan serta posisi hiposenter gempabumi. (Gracynthia. 2015).

Gempabumi berdasarkan sumber gempa yang terdiri dari Gempabumi Tektonik yaitu gempabumi yang di sebabkan oleh pergerakan lempeng-lempeng tektonik aktif seperti tumbukan antar lempeng samudera maupun lempeng benua; Gempabumi Vulkanik yaitu gempabumi yang terjadi karena adanya aktivitas vulkanik gunung api seperti naiknya magma akibat desakan dari dalam gunung api ke permukaan; Gempabumi Runtuhan yaitu gempabumi yang terjadi karena adanya suatu runtunan atau longsoran dari batuan; Gempabumi Buatan yaitu gempabumi yang terjadi karena dibuat oleh manusia seperti ledakan dinamit atau ledakan nuklir. (Dewi. 2018).

### Parameter Gempabumi

Informasi seismik yang berkaitan dengan kejadian kegempaan dapat berupa rekaman sinyal berbentuk gelombang yang kemudian diproses secara manual atau non manual akan menjadi data yang kemudian dapat dibaca. Informasi berupa data tersebut selanjutnya akan mengalami proses pengumpulan, pengolahan dan juga analisis sehingga nantinya menjadi suatu parameter gempa bumi. Parameter-parameter gempabumi tersebut meliputi

#### Waktu terjadi gempa (*Origin Time*)

*Origin time*(OT) atau waktu terjadinya gempabumi merupakan waktu dimana terjadinya pelepasan energi pertama kali pada lempeng tektonik bumi yang mengalami tekanan akibat tumbukan ataupun gesekan yang dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*).

Model struktur dalam bumi tidak diperhatikan dalam penggunaan diagram

wadati, sehingga hanya mengasumsikan struktur bumi yang bersifat homogen. Hasil dari pembacaan origin time ini menunjukkan hiposenter yang kurang akurat, sehingga harus dilakukan relokasi ulang untuk mengetahui hiposenter yang lebih akurat dengan struktur bumi yang heterogen (Dewi. 2018).

#### Hiposenter

Hiposenter merupakan pusat gempa bumi yang berada di dalam permukaan bumi. Untuk memudahkan terkadang hiposenter sering diasumsikan sebagai sebuah titik tetapi pada kenyataannya hiposenter merupakan sebuah bidang yang hanya tergantung pada besarnya energi yang dilepaskan oleh bumi (Purnamasari. 2018).

#### Episenter

Episenter merupakan sebuah daerah dipermukaan bumi yang letaknya tegak lurus terhadap hiposenter. Metode yang dipakai dalam penentuan episenter biasanya berupa metode lingkaran dengan minimal 3 stasiun perekam. Metode ini juga bisa digunakan untuk menentukan letak hiposenternya (Purnamasari. 2018).

#### Magnitudo

Magnitudo merupakan ukuran kekuatan gempa bumi yaitu parameter gempa yang mengukur besarnya energi gempa bumi yang dilepaskan dari sumbernya. Jadi pengukuran magnitudo yang dilakukan di berbagai tempat yang berbeda harus menghasilkan nilai yang sama walaupun gempa yang dirasakan di tempat-tempat tersebut tentu berbeda. Magnitudo ini menjadi parameter yang digunakan sebagai tolak ukur kuat atau tidaknya gempa bumi yang terjadi. Satuan magnitudo yang dipakai adalah Skala Richter (Dewi. 2018).

Perhitungan besar gempa bumi dengan skala richter diukur berdasarkan perhitungan logaritma (basis 10) terhadap nilai amplitudo maksimum dari rekaman fase gelombang gempa bumi yang direkam oleh Seismometer Wood Anderson pada jarak 100 km dari pusat gempa. Skala richter pertama kali digunakan untuk mengukur gempa-gempa yang terjadi di daerah California Selatan, namun dalam perkembangannya skala ini banyak diadopsi untuk gempa-gempa yang terjadi di tempat lainnya bahkan hingga diseluruh dunia.

Ada beberapa metode yang biasa dipakai dalam menentukan energi gempa bumi yaitu meneliti besaran simpangan gelombang dengan menggunakan gelombang badan (*body wave*) yang merambat di bumi dikenal dengan nama *Magnitude Body* (Mb), metode lainnya menggunakan gelombang permukaan (*surface wave*) atau disebut *Magnitude Surface* (Ms) dan *Magnitude Durasi* (Md) yaitu metode yang berdasarkan rentang waktu gempa bumi. Ketiga metode ini mempunyai korelasi antara satu dengan yang lainnya sehingga bisa menjadi penentuan magnitudo suatu gempa bumi (Satriyo. 2010).

#### *Deterministic Seismic Hazard Analysis*

Metode *DSHA* menggunakan satu sumber gempa bumi (patahan/sesar) yang kemudian skenario dengan nilai magnitudo gempa bumi tertentu untuk di analisis proses penjalaran gelombang gempa bumi dan besar guncangan tanah yang ditimbulkan oleh gempa bumi tersebut pada suatu kawasan (Rusydy. 2018).

Secara umum metode *DSHA* dapat dibagi menjadi empat tahap. Tahap pertama adalah identifikasi sumber-sumber gempa bumi yang meliputi lokasi sumber-sumber gempa bumi, geometri sumber, mekanisme kegempaan, sejarah kegempaan dan parameter kegempaan seperti magnitudo maksimum dan frekuensi keberulangan kejadian gempa bumi. Tahap kedua adalah untuk setiap sumber gempa bumi yang berada di sekitar lokasi studi ditentukan (diskenario) parameter gempa bumi yang akan menghasilkan dampak di lokasi studi seperti magnitudo yang maksimum dan lokasi kejadian yang terdekat ke lokasi studi. Tahap ketiga adalah menghubungkan parameter sumber gempa bumi dengan parameter pergerakan tanah di lokasi studi dengan menggunakan fungsi atenuasi. Tahap keempat adalah menentukan parameter gempa bumi desain berdasarkan skenario yang menghasilkan parameter pergerakan tanah terbesar (*worst case scenario*) (Irsyam,dkk. 2010).

Metode *DSHA* umumnya di aplikasikan untuk mengestimasi percepatan gempa untuk konstruksi yang sangat membahayakan jika terjadi kerusakan, seperti bangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), bendungan besar, konstruksi yang dekat dengan sesar aktif dan untuk keperluan *emergency response* (Irsyam,dkk. 2010). Kelebihan

metode ini adalah mudah digunakan untuk memprediksi gerakan gempa pada skenario terburuk. Sedangkan kelemahannya adalah metode ini tidak mempertimbangkan probabilitas terjadinya gempa dan pengaruh berbagai ketidakpastian yang terkait dalam analisis (Kramer, 1996).

Perbedaan utama antara pendekatan *DSHA* dan *PSHA* adalah pada pendekatan probabilistik (*PSHA*) frekuensi untuk setiap skenario pergerakan tanah yang akan terjadi juga diperhitungkan. Dengan demikian, pendekatan *PSHA* juga bisa digunakan untuk memprediksi seberapa besar probabilitas kondisi terburuk akan terjadi di lokasi studi.

Analisis *DSHA* dan *PSHA* pada kenyataannya saling melengkapi. Hasil *DSHA* dapat diverifikasi dengan *PSHA* untuk memastikan bahwa kejadian tersebut masih realistis atau mungkin terjadi. Sebaliknya, hasil analisis *PSHA* dapat diverifikasi oleh hasil analisis *DSHA* untuk memastikan bahwa hasil analisis tersebut rasional. Lebih jauh, McGuire (2001) menyampaikan bahwa *DSHA* dan *PSHA* akan saling melengkapi tetapi dengan tetap memberikan penekanan pada salah satu hasil (Irsyam,dkk. 2010).

### Model Sumber Gempabumi

Model sumber gempabumi yang digunakan dalam analisis ini yaitu sumber gempabumi subduksi. Parameter-parameter yang diperlukan untuk analisis deterministik dengan model sumber gempabumi sesar adalah *fault trace*, *dip*, panjang dan lebar *fault*. Sedangkan parameter yang diperlukan untuk analisis deterministik dengan model sumber gempabumi subduksi adalah koordinat *latitude* dan *longitude*, kemiringan bidang subduksi(*dip*) dan panjang daerah subduksi yang bisa didapatkan dari data gempabumi historis serta batas kedalaman area subduksi.

### Shakemap

*Shakemap* merupakan representasi dari getaran tanah yang dihasilkan oleh gempabumi. Informasi yang diberikan berbeda dengan besarnya gempabumi dan pusat terjadinya gempabumi yang biasanya di berikan setelah kejadian gempabumi, *Shakemap* fokus pada bergetarnya tanah akibat gempabumi, bukan parameter yang menggambarkan sumber gempabumi.

### 3. METODE PENELITIAN

Alat dan Lokasi penelitian berada di kota Manado dengan batasan koordinat geografis 1°30' LU -1°40' LU dan 124°40' BT-126°50' dengan luas wilayah 157,26 Km<sup>2</sup>.

Peralatan penelitian ini adalah Software Linux Ubuntu 2019 untuk menjalankan aplikasi shakemap BMKG 2018. Microsoft Excel digunakan untuk pengolahan data PGA (*peak ground acceleration*). Aplikasi GIS-Esri (*geografis informasi system*) yang digunakan untuk pemetaan.

Desain penelitian ini terdiri dari beberapa tahap. Tahap pertama kajian penelitian terdahulu melakukan studi literatur. Tahap selanjutnya yaitu tahap pelaksanaan di dalam tahap pelaksanaan yang perlu dilakukan pertama melakukan pengambilan data di dalam pengambilan data memiliki data parameter subduksi dan data parameter gempa kemudian yang kedua melakukan pengolahan data. Tahap terakhir yaitu tahap penyelesaian yang perlu dilakukan pertama melakukan interpretasi dan analisa kemudian yang kedua kesimpulan.

Variabel penelitian ini yaitu Parameter gempa : Lintang, Bujur, Magnitudo, Kedalaman; Jarak terhadap site terdekat; GMPE (*Ground motion prediction equations*).

Sumber data penelitian ini merupakan data sekunder yang didapatkan dari referensi Katalog BMKG tahun 2018 berupa data parameter gempabumi (*longitude*, *latitude* dan kedalaman) seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

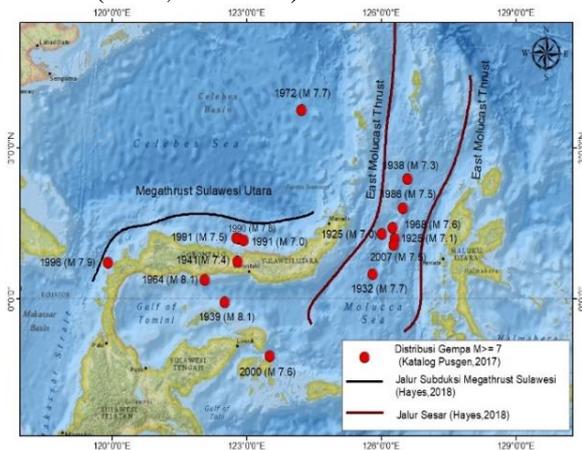
Diagram alir penelitian dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahap. Tahap pertama yaitu menentukan data dari katalog gempabumi signifikan di Kota Manado dan sekitarnya. Tahap selanjutnya yaitu pemilihan model GMPE (*Ground Motion Prediction Equations*). Tahap selanjutnya yaitu pengolahan model bahaya seismik menggunakan perangkat lunak SHAKEMAP dari BMKG tahun 2018 dengan mengintegrasikan model GMPE dan parameter gempabumi seperti lintang, bujur, kedalaman dan magnitudo. Proses tersebut kemudian menghasilkan grid PGA di setiap titik di Kota Manado. Tahap terakhir dari proses ini yaitu pemetaan (*ploting*) menggunakan perangkat lunak Arcgis Pro dari ESRI (*environmental systems research institute*) yang menyediakan *educational license* secara gratis.

**Tabel 1.** Data Kejadian Gempa yang Digunakan Dalam Penelitian Ini

Year	Month	Day	Time	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude (Mw)
1925	6	3	04:33:54	1.292	126.01	15	7.0
1925	5	3	17:21:47	1.19	126.3	15	7.1
1932	5	14	13:11:04	0.493	125.81	15	7.7
1938	10	10	20:48:07	2.379	126.59	15	7.3
1939	12	21	21:00:31	-0.073	122.51	35	8.1
1941	11	8	23:37:28	0.742	122.79	35	7.4
1964	3	28	11:30:11	0.375	122.06	140	7.4
1968	8	10	02:07:04	1.418	126.25	19.8	7.6
1972	6	11	06:59:19	3.752	124.22	331	7.7
1986	8	14	19:39:21	1.801	126.48	29	7.5
1990	4	18	13:39:21	1.197	122.82	26	7.8
1991	6	20	05:18:54	1.205	122.77	31	7.5
1991	5	19	00:58:02	1.158	122.94	20.9	7.0
2000	5	4	04:21:17	-1.142	123.52	26	7.6
2007	1	21	11:27:45	1.065	126.28	22	7.5

**4. HASIL DAN PEMBAHASAN**

Data Percepatan tanah (*peak ground acceleration*) merupakan salah satu parameter dalam analisis bahaya seismik (*seismic hazard*). Parameter ini sebagai kuantifikasi tingkat guncangan tanah atau kerusakan pada bangunan di suatu lokasi (*site*) yang dibangkitkan oleh gempabumi. Pada penelitian ini diperoleh peta *hazard* percepatan tanah (PGA) di batuan dasar (*bedrock*) di Kota Manado berdasarkan model DSHA dari skenario setiap gempabumi dengan model GMPE (Zhao,dkk. 2006).

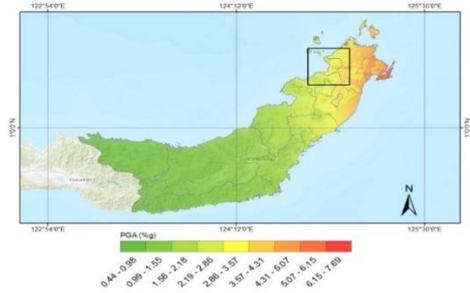


**Gambar 1.** Plot Distribusi Gempabumi Yang Digunakan Untuk Skenario Model DSHA. Data Gempa Bersumber Dari Katalog BMKG Tahun 2018.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 3 Juni 1925**

Studi kasus kejadian gempabumi 3 Juni 1925, selanjutnya disebut model 1. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2

dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 1 berasal dari patahan Laut Maluku (gambar 4.1). Model ini menghasilkan hasil peta kontur nilai PGA (dalam % g) dimana  $g = \text{nilai (gravitasi)} / 100$  pada gambar 4.2. *Color ramp* pada peta dari warna hijau sampai dengan merah menunjukkan nilai PGA rendah sampai dengan tinggi. Adapun distribusi nilai PGA pada model 1 di Kota Manado berkisar antara 2.19 % g sampai dengan 3.57 % g. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 1 adalah III MMI sampai IV MMI (*modified mercalli intensity*).

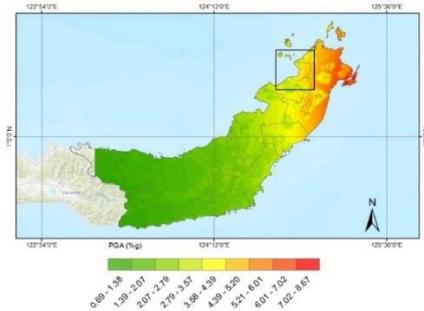


**Gambar 2.** Peta Hazard PGA Model 1 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 3 Mei 1925**

Studi kasus kejadian gempabumi 3 Mei 1925, selanjutnya disebut model 2. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 2 berasal dari patahan Laut Maluku (gambar 4.1). Model 2 menghasilkan

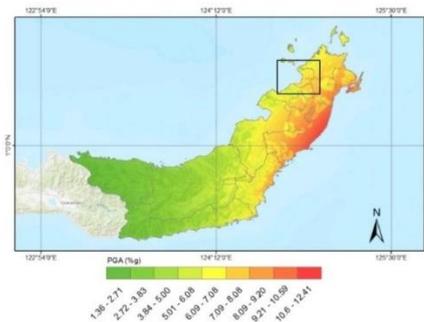
hasil peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 4.39 % g sampai 5.20 % g. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 2 adalah IV sampai V MMI.



**Gambar 3.** Peta *Hazard* PGA Model 2 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 14 Mei 1932**

Model skenario gempabumi 14 Mei 1932, selanjutnya disebut model 3. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 3 berasal dari patahan Laut Maluku (gambar 1). Model 3 menghasilkan hasil peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 6.09 % g sampai 8.08 % g. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukan intensitas guncangan di kota Manado dari model 3 adalah VI MMI.

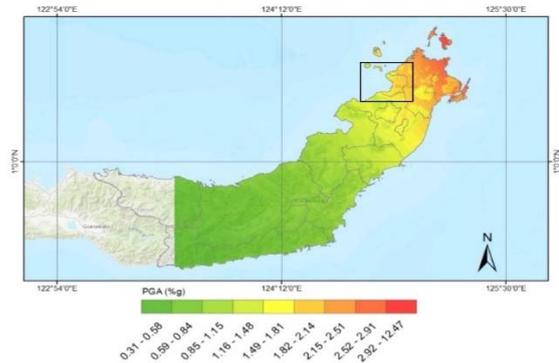


**Gambar 4.** Peta *Hazard* PGA Model 3 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 10 Oktober 1938**

Model skenario gempabumi 10 Oktober 1938, selanjutnya disebut model 4. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 3 berasal dari patahan Laut Maluku (gambar 1). Hasil perhitungan Model 4

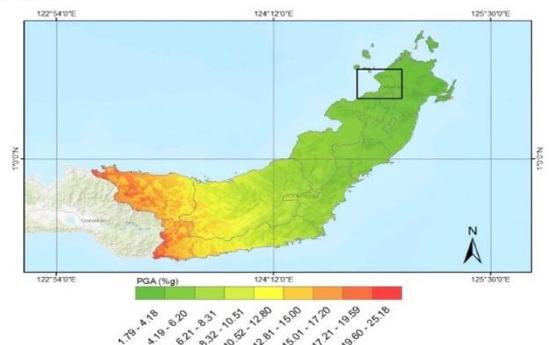
menghasilkan hasil peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 2.14 % g sampai 2.51 % g. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 4 adalah IV MMI.



**Gambar 5.** Peta *Hazard* PGA Model 4 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 21 Desember 1939**

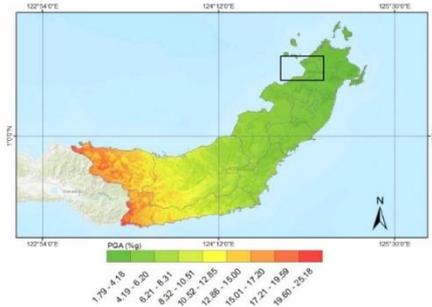
Studi kasus kejadian gempabumi 21 Desember 1939, selanjutnya disebut model 5. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 5 berada di bagian Barat Daya Kota Manado. Model 5 menghasilkan hasil peta kontur nilai PGA (dalam % g) dimana  $g = \text{nilai (gravitasi)} / 100$  pada gambar 6. *Color ramp* pada peta dari warna hijau sampai dengan merah menunjukkan nilai PGA rendah sampai dengan tinggi. Adapun distribusi nilai PGA pada model 5 di Kota Manado berkisar antara 1.79 % g sampai dengan 4.18 % g. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 5 adalah III sampai IV MMI.



**Gambar 6.** Peta *Hazard* PGA model 5 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

### Hasil Pemodelan Gempabumi 8 November 1941

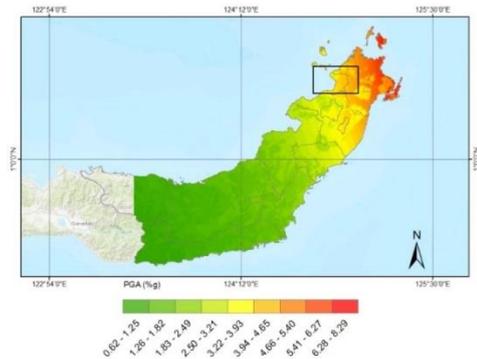
Studi kasus kejadian gempabumi 8 November 1941, selanjutnya disebut model 6. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 6 berada di bagian Barat Kota Manado tepatnya di patahan Gorontalo bagian Selatan. Model 6 menghasilkan hasil peta kontur nilai PGA (dalam % g) dimana  $g = \text{nilai (gravitasi)} / 100$  pada gambar 7. Adapun distribusi nilai PGA pada model 6 di Kota Manado berkisar antara 1.79 % g sampai dengan 4.18 % g. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 6 adalah III sampai IV MMI.



**Gambar 7.** Peta Hazard PGA model 6 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

### Hasil Pemodelan Gempabumi 10 Agustus 1968

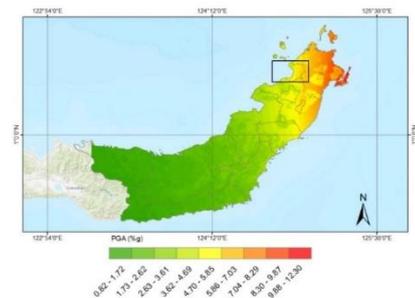
Model skenario gempabumi 10 Agustus 1968, selanjutnya disebut model 7. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 7 berasal dari patahan Laut Maluku (gambar 1). Hasil perhitungan Model 7 menghasilkan peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 4.65 % g sampai 5.40 % g pada gambar 4.8. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 7 adalah IV MMI sampai V MMI.



**Gambar 8.** Peta Hazard PGA model 7 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

### Hasil Pemodelan Gempabumi 14 Agustus 1986

Model skenario gempabumi 14 Agustus 1986, selanjutnya disebut model 8. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 8 berasal dari patahan Laut Maluku (gambar 1). Hasil perhitungan Model 8 menghasilkan peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 4.69 % g sampai 7.30 % g pada gambar 4.9. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 8 adalah VI MMI.

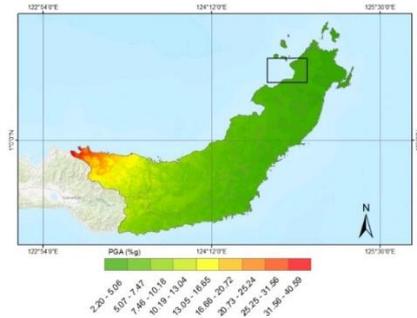


**Gambar 9.** Peta Hazard PGA model 8 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

### Hasil Pemodelan Gempabumi 18 April 1990

Model skenario gempabumi 18 April 1990, selanjutnya disebut model 9. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk.2006) Sumber gempa dari model 9 berasal dari subduksi Sulawesi Utara (gambar 1). Hasil perhitungan Model 9 menghasilkan peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 2.50 % g sampai 5.06 % g pada gambar 4.10. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012)

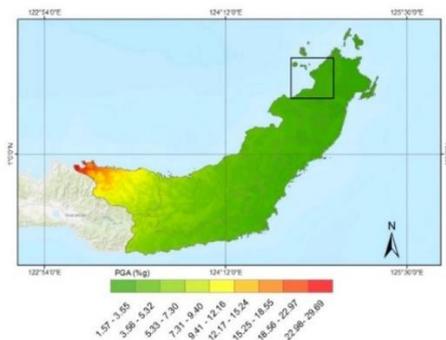
menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 9 adalah V MMI.



**Gambar 10.** Peta *Hazard* PGA Model 9 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 20 Juni 1991**

Model skenario gempabumi 20 Juni 1991, selanjutnya disebut model 10. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 10 berasal dari subduksi Sulawesi Utara (gambar 1). Hasil perhitungan Model 10 menghasilkan peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 1.57 % g sampai 3.55 % g pada gambar 11. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 10 adalah IV MMI.

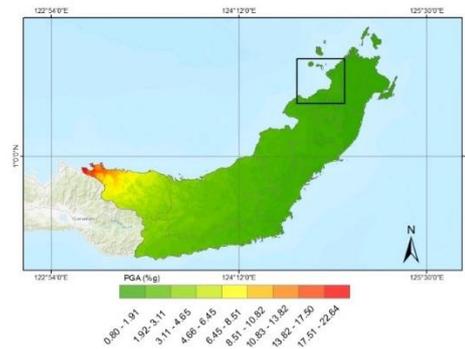


**Gambar 11.** Peta *Hazard* PGA model 10 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 19 Mei 1991**

Model skenario gempabumi 19 Mei 1991, selanjutnya disebut model 11. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 11 berasal dari subduksi Sulawesi Utara (gambar 1). Hasil perhitungan Model 11 menghasilkan peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 0.80 % g sampai 1.91 % g pada gambar

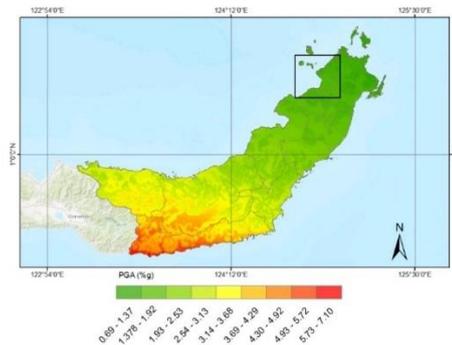
12. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 11 adalah III MMI.



**Gambar 12.** Peta *Hazard* PGA model 11 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 4 Mei 2000**

Model skenario gempabumi 4 Mei 2000, selanjutnya disebut model 12. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2 dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 12 berasal dari arah Selatan Kota Manado (gambar 1). Hasil perhitungan Model 12 menghasilkan peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 0.69 % g sampai 1.37 % g pada gambar 13. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 12 adalah II MMI.

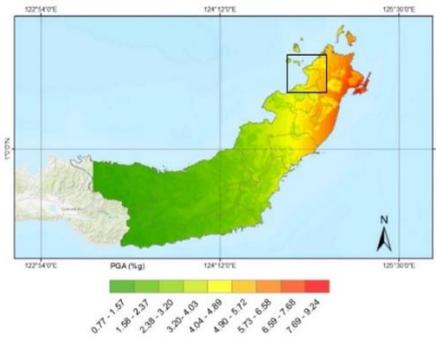


**Gambar 13.** Peta *Hazard* PGA model 12 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado.

**Hasil Pemodelan Gempabumi 21 Januari 2007**

Model skenario gempabumi 21 Januari 2007, selanjutnya disebut model 13. Diskenariokan dengan menggunakan parameter yang tercantum dalam Tabel 2

dengan GMPE (Zhao,dkk. 2006) Sumber gempa dari model 13 berasal dari arah Selatan Kota Manado (gambar 1). Hasil perhitungan Model 12 menghasilkan peta kontur nilai PGA di Kota Manado berkisar antara 4.90 % g sampai 5.72 % g pada gambar 14. Dari tabel 1 berdasarkan model dari (Worden,dkk. 2012) menunjukkan intensitas guncangan di kota Manado dari model 13 adalah V MMI.



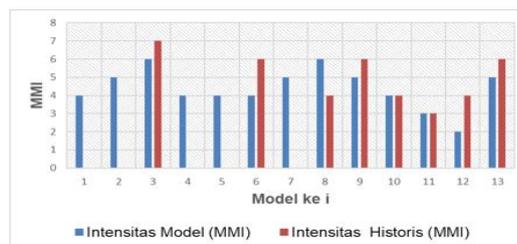
**Gambar 14** Peta Hazard PGA model 13 Untuk PGA Di Batuan Dasar. *Rectangular* Hitam Pada Peta Merupakan Area Kota Manado. **Verifikasi Model**

Suatu model skenario yang didesain harus memiliki validitas yang baik sehingga diperlukan verifikasi terhadap model tersebut. Tujuan dilakukan verifikasi untuk memastikan apakah penerapan simulasi sudah sesuai model konseptual atau belum (Manuj,dkk. 2009). Pada penelitian ini terdapat keterbatasan data historis intensitas dari katalog BMKG tahun 2018. Dari 13 kejadian gempa historis yang digunakan dalam penelitian ini, Namun hanya 8 kejadian gempa yang memiliki data intensitas kejadian historis yang tertulis dalam katalog tersebut yang digunakan untuk verifikasi. Kedelapan (8) model tersebut dijelaskan pada tabel 3 yang ditandai dengan warna (*fill color*) biru laut.

Lebih jauh lagi, untuk menyederhanakan dalam analisa data pada tabel 3 dilakukan plotting ke dalam grafik histogram yang direpresentasikan pada gambar 15. Histogram pada gambar tersebut menjelaskan perbandingan antara intensitas model (MMI) terhadap intensitas historis (MMI) berdasarkan data kejadian gempa yg dilakukan skenario.

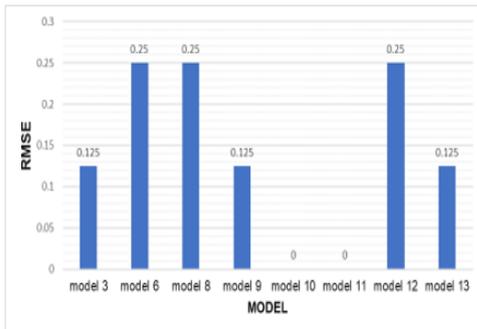
**Tabel 2.** Data Yang Digunakan Dalam Verifikasi Intensitas

No	Model	PGA (%g)	Intensitas Model (MMI)	Intensitas Historis (MMI)	RMSE
1	Model 1	3.57	4	-	
2	Model 2	5.2	5	-	
3	Model 3	8.1	6	7	0.125
4	Model 4	2.5	4	-	
5	Model 5	4.9	4	-	
6	Model 6	4.2	4	6	0.25
7	Model 7	5.4	5	-	
8	Model 8	7.3	6	4	0.25
9	Model 9	5.1	5	6	0.125
10	Model 10	3.6	4	4	0
11	Model 11	1.9	3	3	0
12	Model 12	1.4	2	4	0.25
13	Model 13	5.7	5	6	0.125



**Gambar 15.** Grafik Perbandingan Intensitas Model (MMI) Terhadap Intensitas Historis (MMI) Berdasarkan Data Kejadian Gempa Yang Dilakukan Skenario.

Secara umum, pola yang dihasilkan oleh setiap model mendekati catatan historisnya (gambar 15). Namun, jika dilihat lebih rinci terdapat nilai intensitas (MMI) dari model cenderung *underestimated* (rata – rata lebih kecil) dari kejadian intensitas historis (MMI). Akan tetapi untuk model 10 dan 11 memiliki nilai yang sama antara intensitas model dengan intensitas historis.



**Gambar 16.** Grafik Nilai RMSE Model

Selanjutnya, dilakukan verifikasi kedelapan (8) model tersebut dengan menentukan nilai RMSE (*root mean square error*) berdasarkan variabel intensitas (MMI) model terhadap variabel intensitas historis (MMI). Perhitungan RMSE setiap model untuk mengetahui model mana yang memiliki nilai error terkecil. Artinya semakin kecil nilai RMSE maka semakin baik pula ketelitiannya (Rudianto, 2011).

Perhitungan RMSE yang sudah dihitung kemudian diplot ke dalam grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 16 . Pada grafik tersebut ditunjukkan bahwa secara umum nilai RMSE dari 8 model memiliki nilai dari 0 sampai dengan 0.25. Artinya bahwa sebaran nilai error dari intensitas model terhadap data intensitas historis memiliki validitas yang baik.

Penelitian ini mengkaji skenario pemodelan dari kejadian gempabumi di Kota Manado dan sekitar dengan memanfaatkan perangkat lunak *SHAKEMAP* BMKG tahun 2018 untuk mengetahui nilai PGA dan intensitas (MMI) pada kejadian gempabumi tersebut. Adapun kejadian gempabumi dari katalog BMKG tahun 2018 memiliki beberapa keterbatasan catatan historis mengenai intensitas (MMI). Oleh karena itu, dibuat beberapa skenario pemodelan yang berisi parameter sumber gempabumi dengan menerapkan GMPE dari (Zhao,dkk. 2006)

Hasil keluaran dari perangkat lunak *SHAKEMAP* yaitu nilai PGA dari beberapa

model yang sudah dibuat. Selanjutnya nilai PGA hasil keluaran dikonversi menjadi nilai intensitas (MMI) sehingga didapatkan nilai intensitas (MMI) dari beberapa model tersebut. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh bahwa nilai PGA dan intensitas tertinggi di Kota Manado berasal dari model 3 dengan nilai PGA (8.1 % g). Sebaliknya nilai terendah PGA di Kota Manado berasal dari model 12 yaitu (1.4 % g).

Selanjutnya, nilai intensitas (MMI) tersebut kemudian diverifikasi menggunakan metode RMSE untuk menentukan model dengan *error* terkecil. Setelah dilakukan verifikasi terlihat bahwa ke delapan (8) model memiliki nilai RMSE intensitas terkecil dianggap paling merepresentasikan kejadian gempabumi di Kota Manado. Selain itu, dari hasil yang didapatkan menunjukkan bahwa secara umum nilai keluaran model relatif *under - estimated* dimana nilai intensitas model lebih kecil dibandingkan nilai intensitas catatan historisnya. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah hasil keluaran model tersebut merupakan nilai PGA pada batuan dasar (*bedrock*) dengan asumsi yang dibangun tidak ada amplifikasi ataupun deamplifikasi yang berlebihan. Sedangkan dalam menentukan nilai intensitas yang lebih akurat dibutuhkan nilai PGA pada permukaan. Selain itu GMPE yang digunakan mengacu pada GMPE yang telah dibuat untuk wilayah di luar Indonesia.

Sedangkan, GMPE yang dibuat khusus untuk wilayah Indonesia sampai saat ini belum tersedia, sehingga sulit untuk mendapatkan model yang akurat terhadap observasi. (Nguyen,dkk. 2015) menyebutkan bahwa estimasi nilai intensitas (MMI) untuk peristiwa gempabumi historis memiliki keterbatasan yang disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor pertama yaitu nilai intensitas (MMI) didasarkan pada observasi, sehingga hanya berlaku pada lokasi dimana ada manusia yang mengamati peristiwa gempabumi. Hal ini dipengaruhi oleh jumlah penduduk yang berbeda yaitu masih sedikit dibandingkan dengan masa sekarang. Faktor kedua yaitu pengamatan kerusakan yang dirasakan tergantung pada bahan bangunan dan jenis tanah yang dibangun. Faktor ini tidak ada dalam catatan historis sehingga ada kesalahan yang tidak diketahui yang tidak dapat diukur. Faktor ketiga yaitu data historis bias dalam banyak cara. Misalnya, data didasarkan pada apa yang dianggap penting untuk dicatat oleh

otoritas Belanda pada waktu itu, terutama struktur nilai ekonomi atau politik. Laporan individu juga bias oleh persepsi. Gempabumi dengan magnitudo yang sama dapat dirasakan secara berbeda di lokasi yang berbeda tergantung pada frekuensi di mana gempa terjadi di daerah yang berbeda. Laporan historis cenderung melaporkan kerusakan paling hebat, yang berarti estimasi tentang intensitas (MMI) untuk seluruh kota bias oleh situs amplifikasi terkuat dan bangunan yang paling rentan.

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian pemodelan percepatan tanah dengan menggunakan metode DSHA di Kota Manado, maka dapat diperoleh kesimpulan bahwa hasil dari skenario pemodelan percepatan tanah di Kota Manado menggunakan data historis kejadian gempabumi menunjukkan hasil yang bervariasi. Nilai PGA yang dihasilkan menunjukkan wilayah yang memiliki PGA tertinggi di Kota Manado berasal dari model 3 (8.1 % g) dan terendah dari model 12 (1.4 % g). Secara umum nilai RMSE dari 8 model memiliki nilai dari 0 sampai dengan 0.25. Artinya bahwa sebaran nilai error dari intensitas model terhadap data intensitas historis memiliki validitas yang baik.

## 6. REFERENSI

- Bock, 2003. *Crustal motion in Indonesia from Global Positioning System measurements*, *Journal of Geophysical Research*, Volume 108, Issue B8
- Manuj, I., Mentzer, J. T., & Bowers, M. R., 2009, *Improving the rigor of discrete event simulation in logistics and supply chain research*, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*.
- Nguyen, N., Cipta, A., Cummins, P. dan Griffin, J., 2015, *Indonesia's Historical Earthquakes: Modelled Examples for Improving the National Hazard Map*, *Geoscience Australia, Canberra*.
- Pusat Studi Gempa Nasional, 2017. *Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia*, Jakarta, 2017.
- Rudianto B, (2011). Analisis Pengaruh Sebaran *Ground Control Point* terhadap Ketelitian Objek pada Peta Citra Hasil Ortorektifikasi. *Jurnal Rekayasa LPPM Itenas | No.1 | Vol. XV Institut Teknologi Nasional*.
- Socquet, A., W. Simons, C. Vigny, R. McCaffrey, C. Subarya, D. Sarsito, B. Ambrosius, and W. Spakman (2006) *Microblock rotations and fault coupling in SE Asia triple junction (Sulawesi, Indonesia) from GPS and earthquake slip vector data*, *J. Geophys. Res.*, 111, B08409, doi:10.1029/2005JB003963.
- Unesco, 2007. *Pedoman menghadapi bencana gempa dan tsunami, programme and meeting document*.
- Worden, C, B, M. C. Gerstenberger, D. A. Rhoades, and D.J. Wald (2012). Probabilistic relationships between ground-motion parameters and modified Mercalli intensity in California, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 102, no. 1, 204-221.
- Zhao, J.X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P.G., Asano, A., Ohno, Y., Oouchi, T., Takahashi, T. and Ogawa, H., 2006. An empirical site classification method for strong motion stations in Japan using H/V response spectral ratio. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(3), pp.914-925
- Zulkifli, 2017. *The View Of Seismic Hazard In The Halmahera Region*, *American Institute Of Physics*, 1857(1):050004