



dapat diakses melalui: <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmuo/index>



Analisis Percepatan Tanah Maksimum Akibat Adanya Gempa Bumi di Lengan Utara Pulau Sulawesi Menggunakan Metode Fukushima Tanaka

Clarita Maramis^{a*}, Guntur Pasau^a, Gerald Hendrik Tamuntua^a

^aJurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sam Ratulangi, Manado

KATA KUNCI

Gempa Bumi
Percepatan Tanah Maksimum
Metode Fukushima-Tanaka

ABSTRAK

Percepatan tanah maksimum (*Peak Ground Acceleration*) Adalah salah satu parameter yang digunakan dalam mengestimasi tingkat kerusakan akibat guncangan gempa bumi. Lengan utara pulau Sulawesi merupakan salah satu bagian dari pulau Sulawesi yang sangat rentan terhadap gempa bumi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan peta sebaran nilai *PGA* di lengan utara Sulawesi berdasarkan perhitungan percepatan tanah dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka sebagai upaya mitigasi bencana. Hasil analisis nilai *PGA* menunjukkan bahwa daerah utara provinsi Gorontalo, sebelah timur provinsi Sulawesi Utara (laut Maluku) dan daerah Sulawesi Tengah (kota Palu) memiliki tingkat kerawanan yang tinggi terhadap bencana gempa bumi.

KEYWORDS

Earthquake
Peak Ground Acceleration
Fukushima-Tanaka Method

ABSTRACT

Peak Ground Acceleration Is one of the parameters used in estimating the level of damage due to earthquake shocks. The northern arm region of Sulawesi island is one part of the island of Sulawesi which is very vulnerable to earthquakes. The purpose of this study was to obtain a map of the distribution of *PGA* values in the north arm of Sulawesi based on ground acceleration calculations using the Fukushima-Tanaka and method as a disaster mitigation effort. The results of the *PGA* analysis showed that the northern area of Gorontalo province, east of North Sulawesi province (Maluku sea) and Central Sulawesi area (Palu city) had a high level of vulnerability to earthquake disasters.

TERSEDIA ONLINE

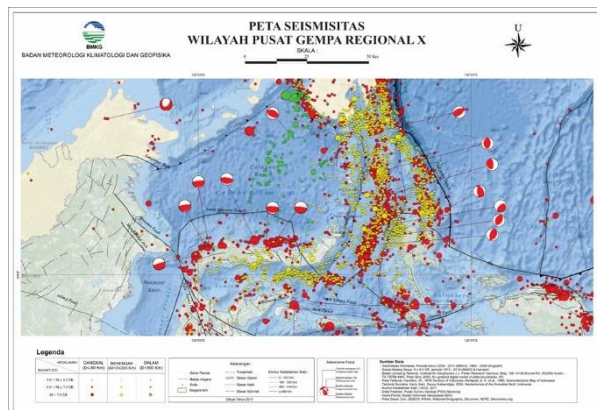
01 Agustus 2020

Pendahuluan

Indonesia adalah salah satu negara di dunia yang sering dilanda gempa bumi. Hal ini dilatarbelakangi oleh letaknya yang berada pada jalur cincin api (*ring of fire*) dan pada pertemuan tiga lempeng tektonik besar dunia yaitu lempeng Pasifik, Indo-Australia, dan Eurasia (Febriani *et al.*, 2013) sehingga menjadikan Indonesia sebagai salah satu daerah di dunia dengan tingkat resiko gempa yang cukup tinggi (Tenda, 2013). Lengan utara Sulawesi merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang mempunyai tingkat seismisitas yang sangat tinggi jika dibandingkan dengan wilayah-wilayah lainnya di pulau Sulawesi hal ini disebabkan kedudukan lengan utara pulau Sulawesi dikontrol oleh aktivitas

tunjaman lempeng laut Sulawesi di sebelah utara semenanjung Minahasa dan lempeng Pasifik di sebelah timurnya. Selain itu di daratan lengan utara pulau Sulawesi ini dijumpai adanya patahan aktif Gorontalo. Elemen-elemen tektonik ini berperan sebagai jalur sumber gempa bumi tektonik yang sangat menentukan tingkat kerawanan wilayah ini terhadap bahaya gempa bumi. Sumber gempa di wilayah ini berasal dari beberapa penunjaman seperti subduksi Sulawesi Utara (*North Sulawesi Trench*), tumbukan ganda laut Maluku (*East Molucas and West Molucas Thrust*), penunjaman lempeng laut Filipina dan beberapa sesar aktif di daratan lengan utara Sulawesi. Oleh karena itu wilayah ini sangat rawan terhadap bencana gempa-gempa tektonik (Harmsen, 2007).

Gempa bumi merupakan salah satu fenomena fisis pelepasan energi gelombang seismik akibat dari pergerakan lempeng-lempeng bumi ataupun proses vulkanik yang terjadi secara tiba-tiba dan itu merupakan peristiwa alam yang tidak dapat dicegah oleh manusia. Permasalahan yang timbul pasca terjadi bencana gempa bumi biasanya berupa kerusakan-kerusakan baik secara fisik maupun moral yang menyebabkan kerugian yang besar terhadap daerah ataupun penduduk yang tinggal disekitar tempat terjadinya gempa (Kapojos *et al.*, 2015). Oleh karena itu telah dilakukan banyak upaya mitigasi untuk meminimalisir dampak dan kerugian akibat gempa bumi, salah satunya yaitu dengan memetakan daerah-daerah dengan potensi efek gempa bumi yang sangat merusak berdasarkan distribusi nilai percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration (PGA)* (Pasau dan Tanauma, 2015). *PGA* merupakan salah satu faktor yang dapat menentukan besar kecilnya kerusakan sebagai akibat dari adanya gempa bumi (Edwiza, 2008).



Gambar 1. Peta Seismisitas Regional X BMKG, Stasiun Geofisika Kelas 1 Manado (BMKG, 2019).

Percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration (PGA)* adalah nilai percepatan tanah terbesar pada permukaan yang pernah terjadi di suatu wilayah dalam periode waktu tertentu akibat getaran gempa bumi (Massinai *et al.*, 2016). Nilai *PGA* dinyatakan dalam satuan gal yang merupakan satuan dari percepatan gelombang seismik dimana $1 \text{ gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$ (Kapojos *et al.*, 2015).

Studi tentang resiko gempa berdasarkan nilai *PGA* telah dilakukan oleh beberapa peneliti pada beberapa wilayah di lengan utara Sulawesi. Kapojos *et al.*, (2015) mengatakan bahwa dengan menghitung *PGA* menggunakan metode rumusan Esteva dan Donovan didapatkan hasil analisis yang menunjukkan bahwa perubahan nilai percepatan tanah dari rumusan tersebut memiliki pola perubahan yang sama terhadap jarak. Nilai percepatan tanah menurut rumusan Donovan lebih tinggi dibandingkan dari rumusan Esteva. Perbandingan dengan data akselerograf mengindikasikan bahwa rumusan Esteva lebih cocok digunakan dalam mengestimasi *PGA* di semenanjung utara pulau Sulawesi. Pasau *et al.*, (2018) menganalisis *PGA* akibat adanya gempa bumi di kota

Manado, dengan melakukan perhitungan percepatan tanah menggunakan metode Donovan dan McGuire dimana kota Manado merupakan bagian dari lengan utara pulau Sulawesi yang terletak pada batas pertemuan beberapa lempeng besar sehingga wilayah ini sangat rawan akan guncangan gempa bumi dan itu menjadi salah satu upaya mitigasi dalam memetakan *PGA* di permukaan. Hasil analisis menunjukkan bahwa besar *PGA* di Kota Manado menggunakan metode Donovan sekitar 42.12 gal sampai dengan 51.82 gal sedangkan metode Mc Guire diperoleh nilai percepatan tanah sekitar 59.13 gal sampai 72.53 gal. Pasau dan Tanauma, (2015) menganalisis resiko gempa bumi wilayah lengan utara pulau Sulawesi menggunakan metode Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) untuk mengantisipasi bencana gempa bumi di masa yang akan datang kita perlu melakukan antisipasi atau mitigasi yang bersifat preventif, salah satunya adalah dengan cara memodelkan sumber-sumber gempa bumi. Hasil analisis probabilistik seismik hazard menunjukkan bahwa besar *PGA* di batuan dasar lengan utara Sulawesi pada periode ulang 500 tahun berkisar 0,05 - 1,4 gal. Kurva hazard menunjukkan bahwa sumber gempa dominan berasal dari zona patahan. Selain itu terdapat juga metode lain yang dapat digunakan dalam penentuan nilai *PGA* yaitu Fukushima-Tanaka. Rumusan atenuasi Fukushima dan Tanaka digunakan pertama kali pada tahun 1990 di Kepulauan Jepang dimana sumber gempa bumi yang berada di wilayah Jepang berasal dari zona subduksi. Fungsi atenuasi ini dikembangkan untuk percepatan maksimum horizontal (Putri *et al.*, 2012; Gusdalina *et al.*, 2018).

Besar nilai *PGA* untuk suatu wilayah menggambarkan tingkat resiko gempa di wilayah tersebut terhadap gempa bumi. Semakin besar nilai *PGA* suatu wilayah berarti semakin besar bahaya dan resiko gempa yang mungkin terjadi. Percepatan tanah adalah faktor utama yang mempengaruhi konstruksi bangunan dan menimbulkan momen gaya yang terdistribusikan merata di titik-titik bangunan, sehingga percepatan tanah merupakan titik tolak perhitungan bangunan tahan gempa. Penelitian ini menentukan tingkat resiko lengan utara pulau Sulawesi terhadap gempa bumi berdasarkan nilai *PGA* yang dihitung dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka sebagai upaya mitigasi bencana gempa.

Material dan Metode

Material

Penelitian ini menggunakan data gempa bumi yang terjadi dari Januari 2000 – Juli 2019 pada rentang wilayah $119^{\circ} - 126^{\circ} \text{ BT}$ dan $0^{\circ} - 2.75^{\circ} \text{ LU}$ dengan $M \geq 6,0$. Data tersebut diakses melalui <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

Metode

Perhitungan nilai *PGA* di lengan utara pulau Sulawesi dilakukan menggunakan metode Fukushima-Tanaka. Rumusan Fukushima-Tanaka digunakan pada penelitian ini dikarenakan sumber

gempa bumi yang berada di Kep. Jepang berasal dari zona subduksi sama seperti sumber gempa pada lengan utara Sulawesi. Metode tersebut telah digunakan beberapa peneliti sebelumnya (Putri *et al.*, 2012; Gusdalina *et al.*, 2018; Jena dan Pradhan, 2018). Berikut merupakan rumusan Fukushima-Tanaka untuk besar percepatan tanah maksimum :

$$\log A = \{0,41 M - \log(R + 0,032 \times 10^{0,41 M}) - 0,0034 R + 1,30\} \dots \dots \dots (1)$$

$$R = \Delta^2 + h^2 \dots \dots \dots (2)$$

dimana, A adalah nilai PGA di titik pengukuran (gal), M adalah magnitudo gempa (SR), R adalah jarak hiposenter ke titik pengukuran (km), Δ adalah jarak episenter (km), dan h adalah kedalaman sumber gempa (km).

Data gempa (*Latitude* dan *Longitude*) yang diperoleh dari USGS kemudian digunakan untuk mendapatkan nilai R dan Δ . Proses perhitungan nilai PGA dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Microsoft Excel 2016*. Untuk menampilkan peta sebaran gempa bumi yang terjadi disekitar wilayah lengan utara Sulawesi maka digunakan *ZMAP*. Sementara untuk menampilkan peta kontur percepatan tanah digunakan *software Surfer 11*.

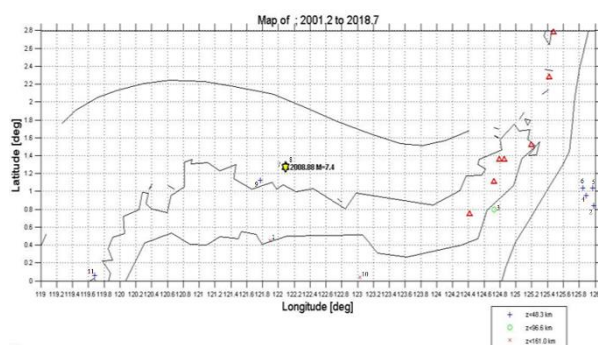
Hasil dan Pembahasan

Berikut adalah data gempa yang diperoleh dari USGS pada periode Januari 2000 – Juli 2019 dengan $M \geq 6,0$ SR (Tabel 1), kemudian data tersebut divisualisasi dengan menggunakan *ZMAP* (gambar 2).

Tabel 1. Data Gempa Bumi Selama Periode Observasi.

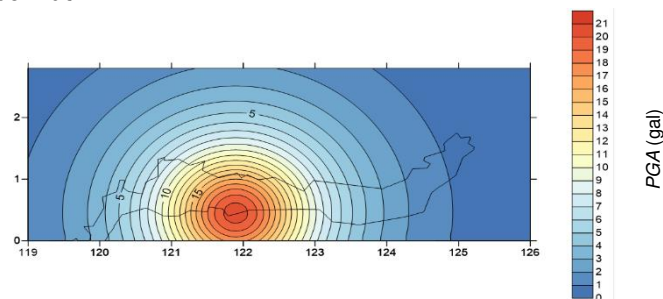
No	Longitude	Latitude	Year	Month	Day	Hour	Minute	Magnitude	Depth (km)
1.	121.892	0.451	2001	03	14	18	56	6.0	109.4
2.	125.98	0.839	2001	10	13	16	27	6.0	33
3.	124.726	0.797	2004	06	30	23	37	6.3	90.8
4.	125.888	0.955	2007	01	21	11	54	6.0	10
5.	125.969	1.042	2007	01	21	14	39	6.0	10
6.	125.849	1.041	2007	01	21	19	50	6.0	10
7.	122.091	1.271	2008	11	16	17	02	7.4	30
8.	122.106	1.291	2008	11	16	17	34	6.0	35
9.	121.775	1.127	2008	11	16	18	20	6.0	35
10.	123.03	0.041	2011	12	13	07	52	6.0	161
11.	119.683	0.059	2018	09	28	13	35	6.1	10

Sumber : USGS, (2019).

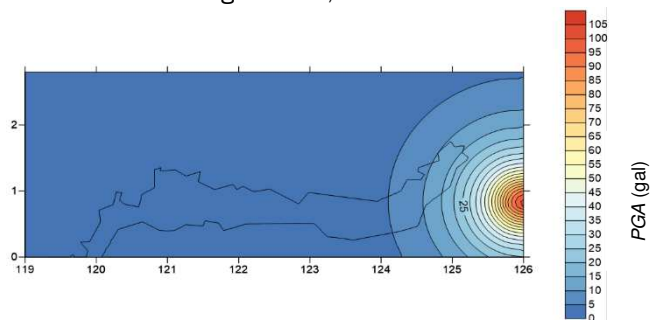


Gambar 2. Sebaran 11 titik gempa bumi dengan magnitudo $\geq 6,0$ SR di sekitar lengan utara pulau Sulawesi yang telah diolah dengan *software ZMAP*.
Sumber : USGS, (2019).

Peta kontur percepatan tanah untuk masing-masing gempa dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.

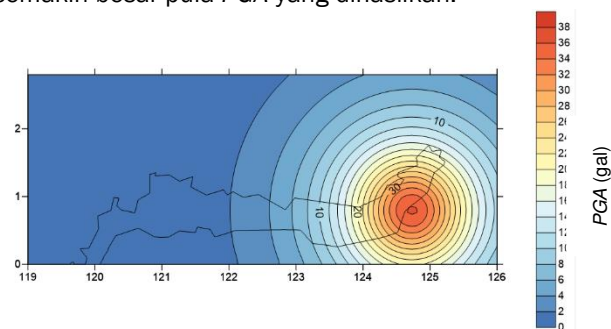


Gambar 3. Peta kontur PGA menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.



Gambar 4. Peta kontur PGA menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

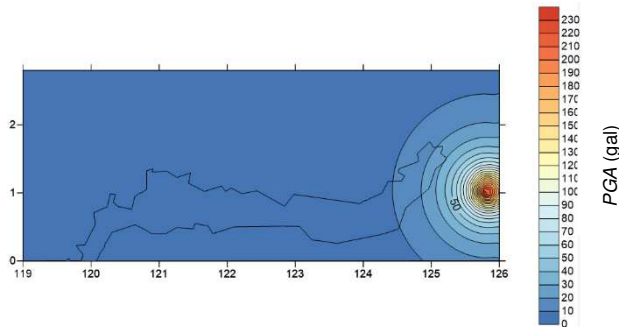
Gambar 3 dan 4 memperlihatkan peta kontur PGA dari gempa bumi dengan magnitudo yang sama yaitu 6,0 SR tapi dengan kedalaman yang berbeda yaitu 109,4 km dan 33 km. Sumber gempa pada gambar 3 terdapat pada koordinat 0,451° LU dan 121,892° BT sementara pada gambar 4 sumber gempa berada di koordinat 0,839° LU dan 125,98° BT. Nilai PGA tertinggi yang didapatkan masing-masing sebesar 20,4 gal dan 104,1 gal. Dari hasil tersebut terlihat bahwa perbedaan kedalaman sumber gempa mempengaruhi nilai PGA yang didapatkan. Semakin dalam sumber gempa maka nilai PGA semakin kecil, sebaliknya jika sumber gempa lebih dekat ke permukaan bumi maka semakin besar pula PGA yang dihasilkan.



Gambar 5. Peta kontur PGA menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,3 SR.

Gambar 5 merupakan peta kontur percepatan tanah dari gempa bumi yang memiliki besar magnitudo 6,3 SR dan berkedalaman 90,8 km

dengan pusat gempa berada di koordinat $0,797^{\circ}$ LU dan $124,726^{\circ}$ BT. Nilai *PGA* tertinggi yang didapatkan dari hasil perhitungan sebesar 36,2 gal. Nilai tersebut lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai *PGA* pada gambar 4 yang pada kenyataannya memiliki magnitudo gempa yang lebih kecil. Hal tersebut dipengaruhi oleh perbedaan kedalaman pusat gempa.



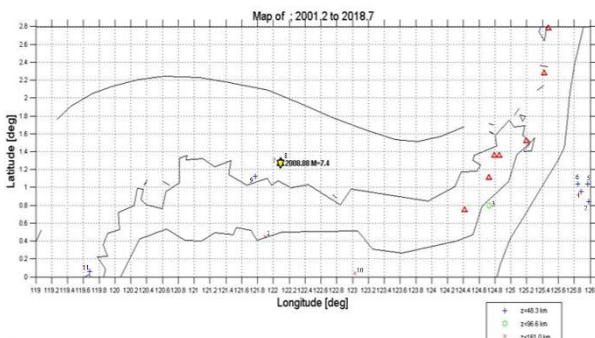
Gambar 6. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

Berikut adalah data gempa yang diperoleh dari USGS pada periode Januari 2000 – Juli 2019 dengan $M \geq 6,0$ SR (Tabel 1), kemudian data tersebut divisualisasi dengan menggunakan ZMAP (gambar 2).

Tabel 1. Data Gempa Bumi Selama Periode Observasi.

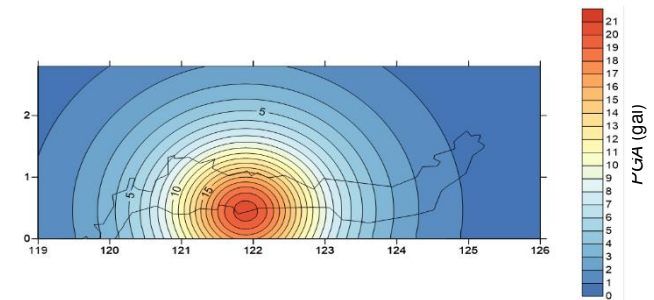
No	Longitude	Latitude	Year	Month	Day	Hour	Minute	Magnitude	Depth (km)
1.	121.892	0.451	2001	03	14	18	56	6.0	109.4
2.	125.98	0.839	2001	10	13	16	27	6.0	33
3.	124.726	0.797	2004	06	30	23	37	6.3	90.8
4.	125.888	0.955	2007	01	21	11	54	6.0	10
5.	125.969	1.042	2007	01	21	14	39	6.0	10
6.	125.849	1.041	2007	01	21	19	50	6.0	10
7.	122.091	1.271	2008	11	16	17	02	7.4	30
8.	122.106	1.291	2008	11	16	17	34	6.0	35
9.	121.775	1.127	2008	11	16	18	20	6.0	35
10.	123.03	0.041	2011	12	13	07	52	6.0	161
11.	119.683	0.059	2018	09	28	13	35	6.1	10

Sumber : USGS, (2019).

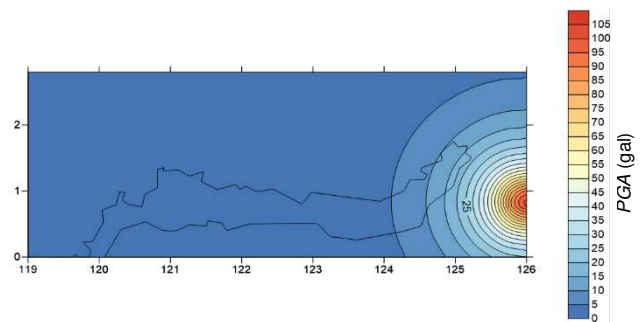


Gambar 2. Sebaran 11 titik gempa bumi dengan magnitudo $\geq 6,0$ SR di sekitar lengan utara pulau Sulawesi yang telah diolah dengan software ZMAP. Sumber : USGS, (2019).

Peta kontur percepatan tanah untuk masing-masing gempa dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.

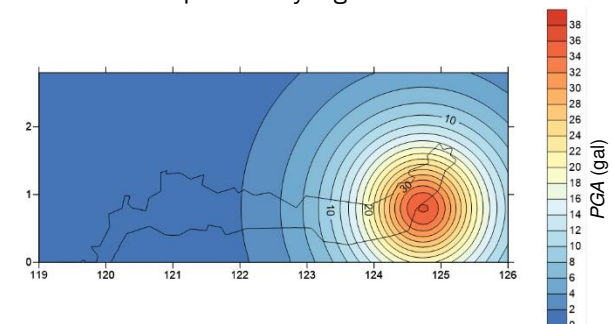


Gambar 3. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.



Gambar 4. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

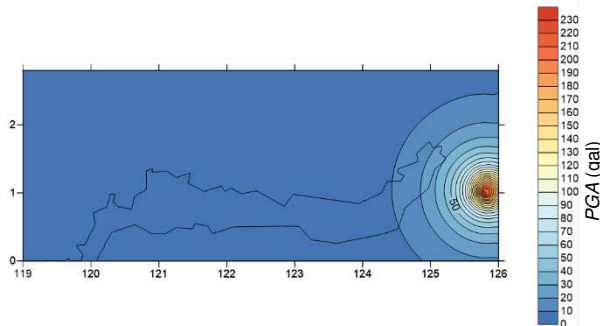
Gambar 3 dan 4 memperlihatkan peta kontur *PGA* dari gempa bumi dengan magnitudo yang sama yaitu 6,0 SR tapi dengan kedalaman yang berbeda yaitu 109,4 km dan 33 km. Sumber gempa pada gambar 3 terdapat pada koordinat $0,451^{\circ}$ LU dan $121,892^{\circ}$ BT sementara pada gambar 4 sumber gempa berada di koordinat $0,839^{\circ}$ LU dan $125,98^{\circ}$ BT. Nilai *PGA* tertinggi yang didapatkan masing-masing sebesar 20,4 gal dan 104,1 gal. Dari hasil tersebut terlihat bahwa perbedaan kedalaman sumber gempa mempengaruhi nilai *PGA* yang didapatkan. Semakin dalam sumber gempa maka nilai *PGA* semakin kecil, sebaliknya jika sumber gempa lebih dekat ke permukaan bumi maka semakin besar pula *PGA* yang dihasilkan.



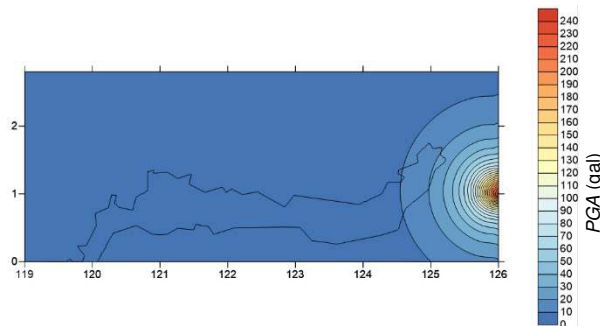
Gambar 5. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,3 SR.

Gambar 5 merupakan peta kontur percepatan tanah dari gempa bumi yang memiliki besar

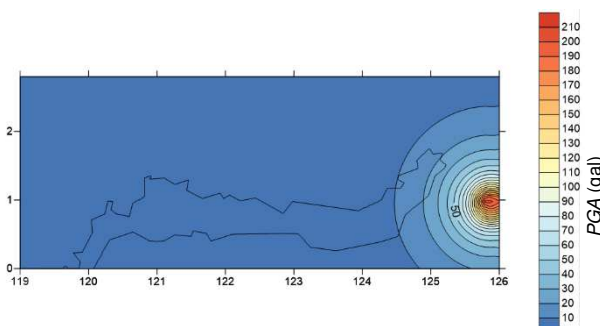
magnitudo 6,3 SR dan berkedalaman 90,8 km dengan pusat gempa berada di koordinat $0,797^{\circ}$ LU dan $124,726^{\circ}$ BT. Nilai PGA tertinggi yang didapatkan dari hasil perhitungan sebesar 36,2 gal. Nilai tersebut lebih kecil bila dibandingkan dengan nilai PGA pada gambar 4 yang pada kenyataannya memiliki magnitudo gempa yang lebih kecil. Hal tersebut dipengaruhi oleh perbedaan kedalaman pusat gempa.



Gambar 6. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.



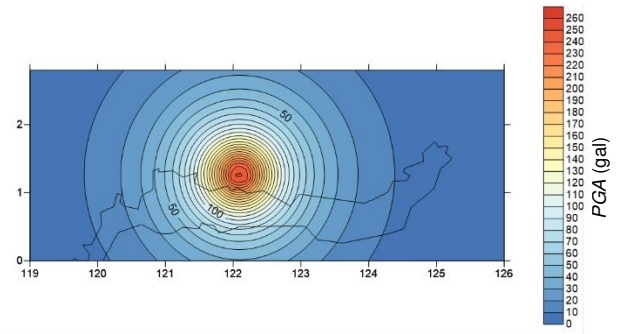
Gambar 7. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.



Gambar 8. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

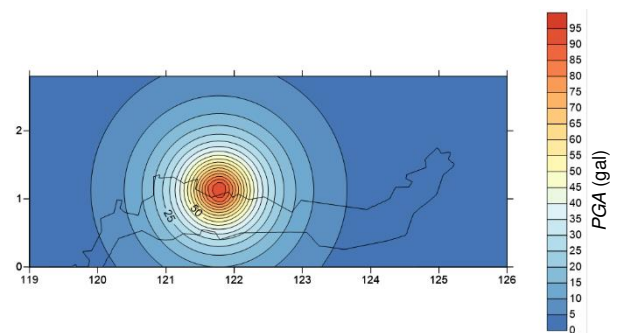
Gambar 6, 7 dan 8 merupakan peta kontur percepatan tanah dari kasus gempa dengan besar magnitudo yang sama yaitu 6,0 SR dan terjadi pada kedalaman yang sama yaitu 10 km. Masing-masing gempa terjadi pada koordinat $0,955^{\circ}$ LU dan $125,888^{\circ}$ BT, $1,042^{\circ}$ LU dan $125,969^{\circ}$ BT, serta $1,041^{\circ}$ LU dan $125,849^{\circ}$ BT. Nilai PGA tertinggi yang didapatkan sebesar 243,3 gal, 252,9 gal dan 212,8 gal. Perbedaan hasil tersebut disebabkan oleh perbedaan nilai *R* (jarak hiposenter ke titik

pengukuran) dari masing-masing gempa. Semakin kecil nilai *R* maka nilai percepatan tanah akan semakin meningkat sebaliknya jika nilai *R* meningkat maka nilai percepatan tanah menurun.

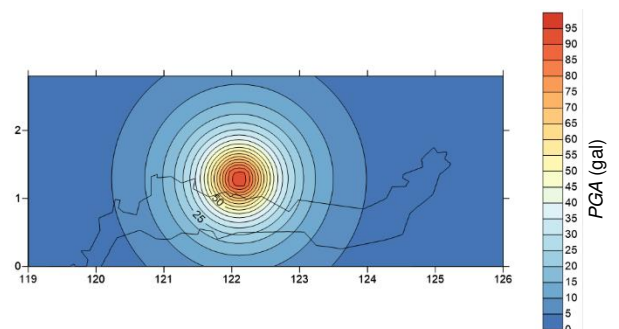


Gambar 9. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 7,4 SR.

Gambar 9 merupakan peta percepatan tanah dari gempa bumi dengan besar magnitudo 7,4 SR dan kedalaman pusat gempa sejauh 30 km. Pusat gempa terletak pada koordinat $1,271^{\circ}$ LU dan $122,091^{\circ}$ BT. Nilai *PGA* yang didapatkan sebesar 248,6 gal. Nilai tersebut lebih kecil dari nilai *PGA* untuk gempa ke-5 (gambar 7) yang memiliki nilai *PGA* sebesar 252,9 gal. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman pusat gempa juga mempengaruhi nilai percepatan tanah.



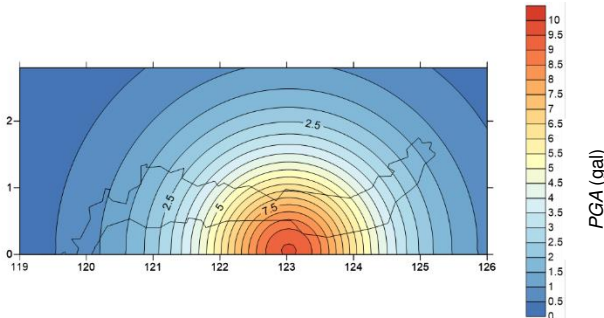
Gambar 10. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.



Gambar 11. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

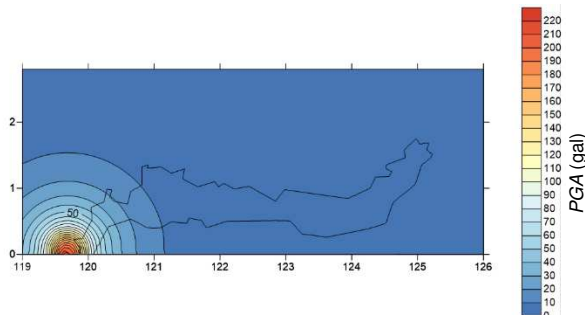
Gambar 10 dan 11 adalah peta kontur percepatan tanah untuk kasus gempa dengan besar magnitudo 6,0 SR dan dengan kedalaman 35 km.

Pada gambar 10 pusat gempa berada pada koordinat $1,291^{\circ}$ LU dan $122,106^{\circ}$ BT sementara pada gambar 11 pusat gempa terletak di koordinat $1,127^{\circ}$ LU dan $121,775^{\circ}$ BT. Nilai PGA tertinggi yang diperoleh berturut-turut yaitu 95,9 gal dan 90,8 gal. Perbedaan nilai PGA disebabkan oleh perbedaan koordinat pusat gempa yang mempengaruhi nilai R.



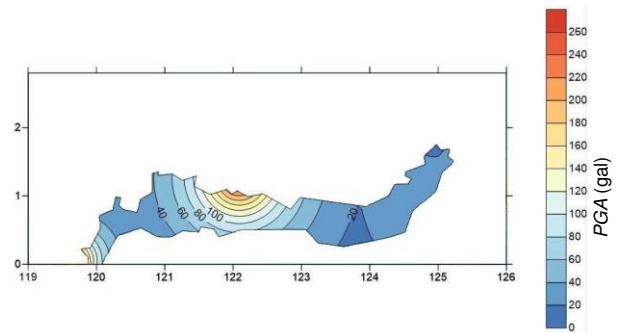
Gambar 12. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

Gambar 12 merupakan peta percepatan tanah dari gempa bumi yang pusat gempanya terletak pada koordinat $0,041^{\circ}$ LU dan $123,03^{\circ}$ BT dengan besar magnitudo 6.0 SR dan kedalaman pusat gempa sejauh 161 km. Hasil perhitungan menunjukkan nilai *PGA* sebesar 9,6 gal.



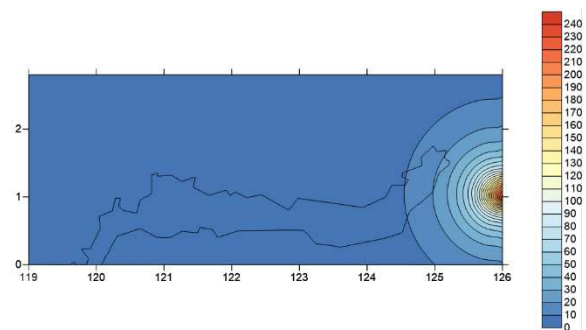
Gambar 13. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,1 SR.

Gambar 13 menunjukkan sebaran nilai percepatan tanah dari gempa bumi yang pusat gempanya terletak pada koordinat $0,059^{\circ}$ LU dan $119,683^{\circ}$ BT dengan besar magnitudo 6.1 SR dan kedalaman pusat gempa sejauh 10 km. Hasil perhitungan menunjukkan nilai *PGA* sebesar 222,7 gal. Dari kesebelas sebaran percepatan tanah diambil setiap nilai tertinggi untuk masing-masing koordinat untuk kemudian digabungkan menjadi satu peta kontur nilai *PGA* dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka yang dapat dilihat pada gambar 14.

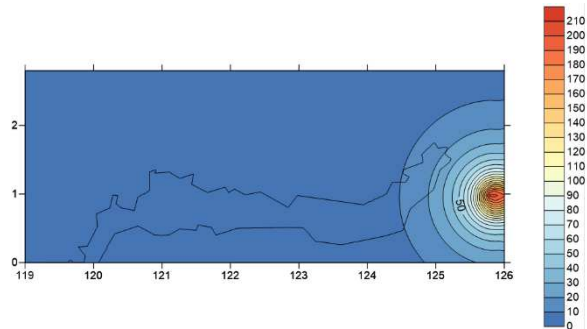


Gambar 14. Peta kontur *PGA* yang diperoleh dari penggabungan nilai *PGA* tertinggi untuk setiap gempa dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka.

Berdasarkan perhitungan nilai *PGA* paling maksimum menggunakan metode Fukushima-Tanaka di lengan utara pulau Sulawesi dalam gambar 14 terlihat bahwa daerah utara provinsi Gorontalo, wilayah sebelah timur provinsi Sulawesi Utara (laut Maluku) dan daerah Sulawesi Tengah yang memiliki nilai percepatan tanah yang tinggi. Hal ini disebabkan karena adanya aktivitas beberapa lempeng tektonik seperti Indo-Australia, lempeng laut Filipina, subduksi Sulawesi Utara, tumbukan ganda laut Maluku ditambah dengan beberapa sesar aktif di wilayah tersebut seperti patahan Gorontalo dan sesar Palu-Koro (Harmsen, 2007). Nilai perhitungan *PGA* tertinggi dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka sebesar 252,9 gal sedangkan nilai *PGA* terendah sebesar 9,6 gal. Nilai *PGA* sebesar 252,9 gal diperoleh dari gempa dengan magnitudo 6,0 SR, berkedalaman sejauh 10 km dan pusat gempa terletak pada koordinat $1,042^{\circ}$ LU dan $125,969^{\circ}$ BT, sementara nilai *PGA* sebesar 9,6 gal didapatkan dari gempa dengan magnitudo 6,0 SR, berkedalaman sejauh 161 km dan pusat gempa terletak pada koordinat $0,041^{\circ}$ LU dan $123,03^{\circ}$ BT

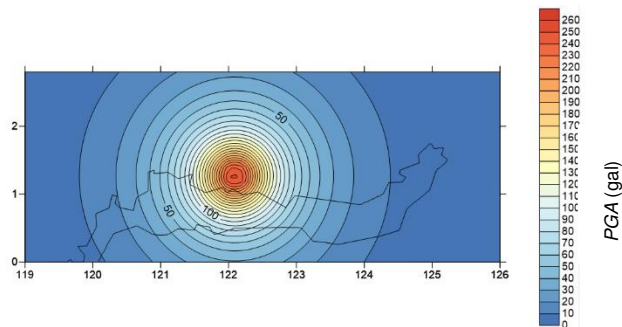


Gambar 7. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.



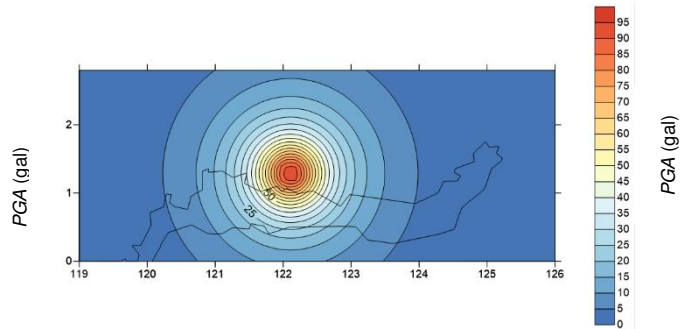
Gambar 8. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

Gambar 6, 7 dan 8 merupakan peta kontur percepatan tanah dari kasus gempa dengan besar magnitudo yang sama yaitu 6,0 SR dan terjadi pada kedalaman yang sama yaitu 10 km. Masing-masing gempa terjadi pada koordinat $0,955^{\circ}$ LU dan $125,888^{\circ}$ BT, $1,042^{\circ}$ LU dan $125,969^{\circ}$ BT, serta $1,041^{\circ}$ LU dan $125,849^{\circ}$ BT. Nilai *PGA* tertinggi yang didapatkan sebesar 243,3 gal, 252,9 gal dan 212,8 gal. Perbedaan hasil tersebut disebabkan oleh perbedaan nilai *R* (jarak hiposenter ke titik pengukuran) dari masing-masing gempa. Semakin kecil nilai *R* maka nilai percepatan tanah akan semakin meningkat sebaliknya jika nilai *R* meningkat maka nilai percepatan tanah menurun.

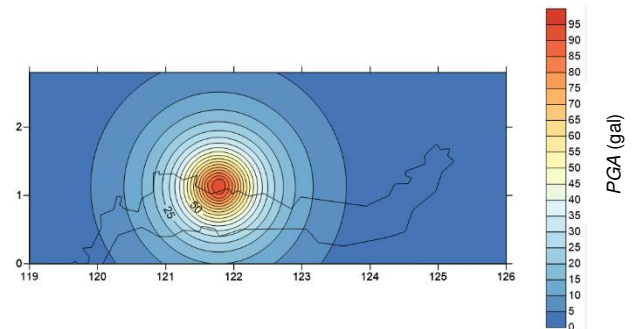


Gambar 9. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 7,4 SR.

Gambar 9 merupakan peta percepatan tanah dari gempa bumi dengan besar magnitudo 7,4 SR dan kedalaman pusat gempa sejauh 30 km. Pusat gempa terletak pada koordinat $1,271^{\circ}$ LU dan $122,091^{\circ}$ BT. Nilai *PGA* yang didapatkan sebesar 248,6 gal. Nilai tersebut lebih kecil dari nilai *PGA* untuk gempa ke-5 (gambar 7) yang memiliki nilai *PGA* sebesar 252,9 gal. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman pusat gempa juga mempengaruhi nilai percepatan tanah.

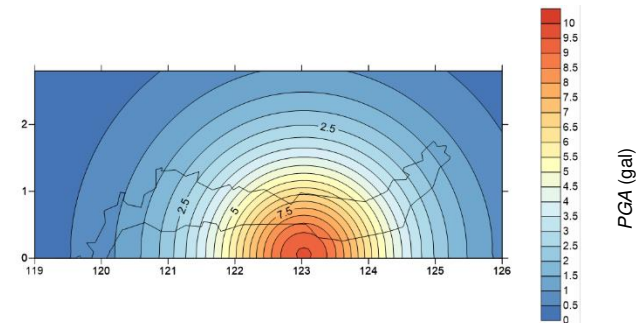


Gambar 10. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.



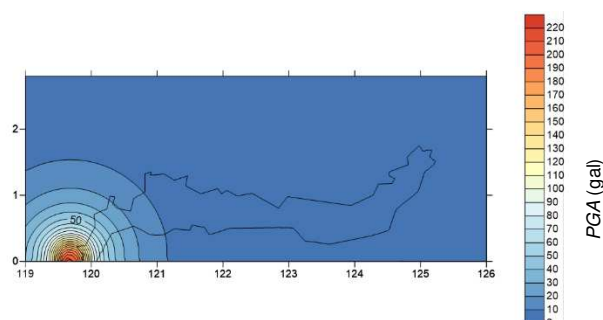
Gambar 11. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

Gambar 10 dan 11 adalah peta kontur percepatan tanah untuk kasus gempa dengan besar magnitudo 6,0 SR dan dengan kedalaman 35 km. Pada gambar 10 pusat gempa berada pada koordinat $1,291^{\circ}$ LU dan $122,106^{\circ}$ BT sementara pada gambar 11 pusat gempa terletak di koordinat $1,127^{\circ}$ LU dan $121,775^{\circ}$ BT. Nilai *PGA* tertinggi yang diperoleh berturut-turut yaitu 95,9 gal dan 90,8 gal. Perbedaan nilai *PGA* disebabkan oleh perbedaan koordinat pusat gempa yang mempengaruhi nilai *R*.



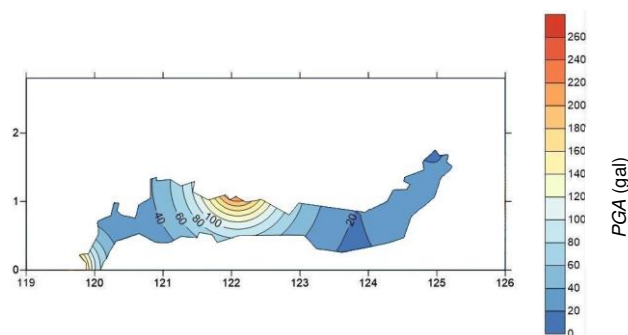
Gambar 12. Peta kontur *PGA* menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,0 SR.

Gambar 12 merupakan peta percepatan tanah dari gempa bumi yang pusat gempanya terletak pada koordinat $0,041^{\circ}$ LU dan $123,03^{\circ}$ BT dengan besar magnitudo 6.0 SR dan kedalaman pusat gempa sejauh 161 km. Hasil perhitungan menunjukkan nilai *PGA* sebesar 9,6 gal.



Gambar 13. Peta kontur PGA menggunakan metode Fukushima-Tanaka pada kasus gempa bumi dengan magnitudo 6,1 SR.

Gambar 13 menunjukkan sebaran nilai percepatan tanah dari gempa bumi yang pusat gempanya terletak pada koordinat $0,059^{\circ}$ LU dan $119,683^{\circ}$ BT dengan besar magnitudo 6.1 SR dan kedalaman pusat gempa sejauh 10 km. Hasil perhitungan menunjukkan nilai PGA sebesar 222,7 gal. Dari kesebelas sebaran percepatan tanah diambil setiap nilai tertinggi untuk masing-masing koordinat untuk kemudian digabungkan menjadi satu peta kontur nilai PGA dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka yang dapat dilihat pada gambar 14.



Gambar 14. Peta kontur PGA yang diperoleh dari penggabungan nilai PGA tertinggi untuk setiap gempa dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka.

Berdasarkan perhitungan nilai PGA paling maksimum menggunakan metode Fukushima-Tanaka di lengan utara pulau Sulawesi dalam gambar 14 terlihat bahwa daerah utara provinsi Gorontalo, wilayah sebelah timur provinsi Sulawesi Utara (laut Maluku) dan daerah Sulawesi Tengah yang memiliki nilai percepatan tanah yang tinggi. Hal ini disebabkan karena adanya aktivitas beberapa lempeng tektonik seperti Indo-Australia, lempeng laut Filipina, subduksi Sulawesi Utara, tumbukan ganda laut Maluku ditambah dengan beberapa sesar aktif di wilayah tersebut seperti patahan Gorontalo dan sesar Palu-Koro (Harmsen, 2007). Nilai perhitungan PGA tertinggi dengan menggunakan metode Fukushima-Tanaka sebesar 252,9 gal sedangkan nilai PGA terendah sebesar 9,6 gal. Nilai PGA sebesar 252,9 gal diperoleh dari gempa dengan magnitudo 6,0 SR, berkedalaman sejauh 10 km dan pusat gempa terletak pada koordinat $1,042^{\circ}$ LU dan $125,969^{\circ}$ BT, sementara nilai PGA sebesar 9,6 gal

didapatkan dari gempa dengan magnitudo 6,0 SR, berkedalaman sejauh 161 km dan pusat gempa terletak pada koordinat $0,041^{\circ}$ LU dan $123,03^{\circ}$ BT18.

Kesimpulan

Berdasarkan pengolahan dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nilai percepatan tanah bernilai cukup tinggi pada daerah utara provinsi Gorontalo, sebelah timur provinsi Sulawesi Utara (laut Maluku) dan daerah Sulawesi Tengah (kota Palu dan Toli-toli). Dengan kata lain daerah tersebut mempunyai tingkat kerawanan yang tinggi terhadap bencana gempa bumi tektonik.

Daftar Pustaka

- Edwiza, D. 2008. Analisis Terhadap Intensitas dan Percepatan Tanah Maksimum Gempa Sumatera Barat. *Jurnal TeknikA*. **1(29)** : 73-79.
- Febriani, Y., I. Daruwati dan R.G. Hatika. 2013. Analisis Nilai Peak Ground Acceleration dan Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Data Mikroseismik Pada Daerah Rawan Gempa Bumi di Kota Bengkulu. *Jurnal Ilmiah Edu Research*. **2(2)** : 85-90.
- Gusdalina, S., Syafriani, dan Ma'muri. 2018. Studi Percepatan Tanah Maksimum Wilayah Sumatera Barat Dengan Metode NGA (Next Generation Attenuation). *Pillar of Physics*. **11(2)** : 33-40.
- Harmsen, Stephen. 2007. USGS Software for Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Draft Document. United States of Geological Surveys (USGS). USA.
- Jena, R., dan B. Pradhan. 2018. A novel model for comparing Peak Ground Acceleration derived from three attenuation laws using an integrated GIS technique in Sabah area, Malaysia. *International Journal of Scientific and Research Publications*. **8(9)** : 191-200.
- Kapojos, C., G. Pasau, dan G. Tamuntuan. 2015. Analisis Percepatan Tanah Maksimum Dengan Menggunakan Rumusan Esteva dan Donovan (Studi Kasus Pada Semenanjung Utara Pulau Sulawesi). *Jurnal Ilmiah Sains*. **15(2)** : 99-104.
- Massinai, M. A., K. R. Amaliah, Lantu, Virman, dan M. F. Ismullah. 2016. Analisis Percepatan Tanah Maksimum, Kecepatan Tanah Maksimum dan MMI di Wilayah Sulawesi Utara. Di dalam: Back to Fundamental Physics to Get Comprehensive Understanding on Science, Education and Technology. Prosiding Seminar Nasional Fisika; Jakarta, 28 Mei 2016. Prodi Pendidikan Fisika dan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Jakarta dan Himpunan Fisika Indonesia Cabang Jakarta. Hlm 33-36.
- Pasau, G., dan A. Tanauma. 2015. Analisis Resiko Gempa Bumi di Wilayah Lengan Utara Sulawesi Menggunakan Data Hiposenter Resolusi Tinggi Sebagai Upaya Mitigasi Bencana. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. **16(3)** : 6-10.
- Pasau, G., M.D. Bobanto, dan D.P. Pandara. 2018. Model Percepatan Tanah Maksimum Di Kota Manado Menggunakan Metode Donovan dan

-
- McGuire. *Jurnal MIPA Unsrat Online*. **7(1)** : 52-55.
- Putri R, A., M. S. Purwanto, dan A. Widodo. 2017. Identifikasi Percepatan Tanah Kaksimum (*Peak Ground Acceleration*) dan Kerentanan Tanah Menggunakan Metode *Micrometer* I Jalur Sesar Kendeng. *Jurnal Geosaintek*. **3(2)** : 107-114.
- Tenda, J.E. 2013. Evaluasi Gempa Daerah Sulawesi Utara Dengan Statistika Ekstrim Tipe-1. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*. **3(1)**: 1-5.
- United States Geological Survey. 2019. Earthquake Data. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> [11 Agustus 2019].
- Vipin, K.S., P. Anbazhagan, dan T.G. Sitharam. 2009. Estimation of Peak Ground Acceleration And Spectral Acceleration for South India With Local Site Effects: Probabilistic Approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **9** : 865-878