

**PENENTUAN NILAI PERCEPATAN TANAH MAKSIMUM, INDEKS  
KERENTANAN SEISMIK DAN REGANGAN GESER TANAH BERDASARKAN  
DATA MIKROTREMOR DI WILAYAH KOTA JAYAPURA  
(Studi Kasus Gempa Bumi 19 September 1984)**

**Steven Yohanes Y. Mantiri<sup>1</sup> dan Ego Srivajawaty Sinaga<sup>2</sup>**

<sup>1,2)</sup> Program Studi Teknik Geofisika FMIPA Universitas Cenderawasih Jayapura  
Alamat: Gedung Fisika FMIPA UNCEN, Waena, Jayapura, 99351

<sup>1)</sup> Email: svenlly@gmail.com

<sup>2)</sup> Email: srivajawati@ymail.com

**ABSTRAK**

Percepatan tanah maksimum, indeks kerentanan seismik dan regangan geser tanah merupakan variabel-variabel yang dipakai pada kajian dasar pembangunan infrastruktur di suatu wilayah pembangunan. Tujuan penelitian ini ialah menentukan nilai percepatan tanah maksimum, regangan geser tanah dan indeks kerentanan seismik serta memetakannya untuk wilayah Kota Jayapura. Metode penelitian yang digunakan adalah metode pengukuran langsung di lapangan dan analisis perhitungan di laboratorium komputasi. Sinyal mikrotremor diukur langsung di lapangan dengan menggunakan alat perekam seismograf. Data mikrotremor dianalisis dengan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) untuk memperoleh frekuensi, periode dominan tanah dan amplifikasi setempat, dimana nilai-nilai ini digunakan untuk menghitung nilai percepatan tanah maksimum, indeks kerentanan seismik dan regangan geser tanah. Gempa bumi kontrol yang digunakan adalah gempa bumi yang terjadi pada tanggal 19 September 1984, pukul 20:26:19,35 pada koordinat 140,5920 BT dan 2,6150 LS dengan magnitude ( $m_b$ ) 5,1 SR dan kedalaman 42,40 km. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi, periode dominan dan amplifikasi getaran tanah sangat mempengaruhi nilai percepatan tanah maksimum, indeks kerentanan seismik dan regangan geser tanah. Interval nilai percepatan tanah maksimum adalah 10,9058 – 287,0733 gal. Interval nilai indeks kerentanan seismik adalah  $1,89 \times 10^{-7}$  –  $1,76 \times 10^{-5}$  gal<sup>-1</sup>. Interval nilai regangan geser tanah adalah  $1,61 \times 10^{-5}$  –  $1,10 \times 10^{-3}$ .

Kata kunci : mikrotremor, HVSR, percepatan tanah maksimum, indeks kerentanan seismik, regangan geser tanah, Kota Jayapura

**PENDAHULUAN**

Kota Jayapura merupakan ibukota Provinsi Papua yang terletak di daerah paling timur wilayah Indonesia dengan batas-batas koordinat yaitu 1°28'17,26" LS - 3°58'08,22" LS dan 137°34'10,6" BT - 141°0'8'22" BT. Kota Jayapura termasuk kategori kota yang sedang berkembang, dimana Pemerintah Kota masih terus mengembangkan dan membangun infrastruktur untuk mendukung proses kehidupan yang berlangsung di kota tersebut. Tatanan dan pengembangan infrastruktur yang baik dan berkualitas

tidak bisa terlepas dari hal-hal atau dasar-dasar yang berkaitan dengan perencanaan pengembangan suatu wilayah, karena suatu perencanaan pengembangan yang baik akan berdampak pada terciptanya infrastruktur yang baik demikian juga sebaliknya.

Dalam hal seismisitas, wilayah Kota seirama dan dipengaruhi kuat oleh sistem tatanan tektonik regional yang terjadi atas wilayah Papua dan Papua Barat. Papua dan Papua Barat terletak pada daerah pertemuan 3 lempeng kerak bumi yaitu lempeng Pasifik (lempeng Caroline) yang bergerak dari utara relatif

ke arah barat menyusup di bawah lempeng Hindia-Australia, dimana lempeng Hindia-Australia bergerak relatif ke arah utara dan lempeng Hindia-Australia menyusup di bawah lempeng Eurasia di sebelah barat Papua dan Papua Barat. Akibat kondisi ini, wilayah Papua dan Papua Barat mengalami gaya pemampatan berarah barat daya-timur laut yang menyebabkan di wilayah ini terjadi banyak patahan, lipatan, dan pegunungan. Kondisi-kondisi ini menyebabkan wilayah Papua dan Papua Barat banyak di goncang gempa bumi. Kondisi ini menyebabkan wilayah Jayapura rawan dan telah dilanda oleh beberapa gempa bumi dengan skala magnitude yang relatif besar. Kualitas suatu bangunan dan infrastruktur lain akan teruji apabila terjadi guncangan luar seperti angin ekstim dan gempa bumi. Wilayah Jayapura dikategorikan sebagai daerah dengan tingkat aktivitas gempa bumi yang cukup tinggi. Hal ini terbukti dari jumlah kejadian gempa bumi yang terjadi sejak tahun 1965 sampai 2014 mencapai 1531 kejadian dengan rata-rata 30,05 kejadian setiap tahun (Mantiri, 2016).

Percepatan tanah maksimum, indeks kerentanan seismik dan regangan geser tanah merupakan variabel atau indikator yang dipakai pada kajian dasar pembangunan infrastruktur di suatu wilayah pembangunan. Variabel-variabel ini ditentukan berdasarkan analisis data mikrotremor yaitu periode dominan tanah suatu lokasi. Menurut Kanai (1966) bila periode alami tanah sama dengan periode gempa bumi maka akan terjadi resonansi sehingga terjadi amplifikasi (perbesaran) getaran maksimum. Kondisi ini akan memberikan dampak yang maksimum akibat gempa bumi tersebut yaitu percepatan getaran tanah pada permukaan akan menjadi maksimum. Jika percepatan tanah menjadi maksimum maka ukuran intensitas gempa bumi yaitu ukuran visual kerusakan akibat gempa bumi akan maksimum (Wald *et al*, 1999). Tujuan penelitian ini adalah menentukan dan memetakan nilai percepatan tanah

maksimum berdasarkan data mikrotremor untuk kasus-kasus gempa bumi signifikan yang terjadi di sekitar wilayah Jayapura.

## **TINJAUAN PUSTAKA**

### **1. Mikrotremor**

Mikrotremor merupakan vibrasi lemah di permukaan bumi yang berlangsung terus menerus akibat adanya sumber getar seperti aktivitas manusia, industri dan lalu lintas. Sumber lainnya yang bersifat alami seperti interaksi angin-bangunan, arus laut dan gelombang laut. Mikrotremor merupakan getaran tanah yang sangat kecil dan terus menerus yang bersumber dari berbagai macam getaran seperti lalu lintas, angin, aktivitas manusia dan lain-lain (Kanai, 1983). Mikrotremor dapat juga diartikan sebagai getaran harmonik alamiah tanah yang terjadi secara terus-menerus, terjebak dilapisan sedimen permukaan, terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi tetap, disebabkan oleh getaran mikro dibawah permukaan tanah dan kegiatan lainnya. Mikrotremor didasarkan pada perekaman *ambient noise* (getaran lingkungan) untuk menentukan parameter dinamika (*damping ratio* dan frekuensi natural) dan fungsi perpindahan (frekuensi dan amplifikasi) bangunan (Nakamura, 2000). Analisis mikrotremor dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik lapisan tanah berdasarkan parameter periode dominan dan faktor penguat gelombang (amplifikasi). Hingga saat ini ada beberapa teknik yang banyak digunakan untuk menganalisis data vibrasi, salah satunya adalah *Single Station Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio on noise* (NHVSR) yang kemudian dikembangkan oleh Lermo dan Chavez Garcia (1993).

### **2. Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr)**

Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) merupakan metode membandingkan spektrum komponen horizontal terhadap komponen

vertikal dari gelombang mikrotremor. Selain sederhana, metode ini juga bisa dilakukan kapan dan dimana saja, metode ini mampu mengestimasi frekuensi resonansi secara langsung tanpa harus mengetahui struktur kecepatan gelombang geser dan kondisi geologi bawah permukaan lebih dulu. Nakamura (1989) menyatakan bahwa perbandingan spektrum H/V sebagai fungsi frekuensi berhubungan erat dengan fungsi *site transfer* untuk gelombang S. Perbandingan H/V pada mikrotremor adalah perbandingan kedua komponen yang secara teoritis menghasilkan suatu nilai. Periode dominan suatu lokasi secara dasar dapat diperkirakan dari periode puncak perbandingan H/V mikrotremor. Metode HVSR memberikan nilai amplifikasi H/V dan nilai frekuensi sedangkan nilai periode dominan tanah dihitung dengan persamaan dalam Young dan Freedman (2008) yaitu

$$T = \frac{1}{f} \quad (1)$$

dengan  $T$  adalah periode (s), dan  $f$  adalah frekuensi (Hz).

### 3. Percepatan Tanah Maksimum

Setiap gempa yang terjadi di suatu wilayah akan menimbulkan suatu nilai percepatan getaran tanah pada wilayah tersebut. Percepatan gelombang gempa bumi di permukaan bumi disebut percepatan getaran tanah. Nilai percepatan tanah yang diperhitungkan pada perencanaan bangunan adalah nilai percepatan getaran tanah maksimum atau sering disebut percepatan tanah maksimum (*peak ground acceleration* (PGA)). Percepatan tanah maksimum akibat gempa bumi adalah percepatan tanah maksimum yang terjadi pada suatu titik pada posisi tertentu dalam suatu kawasan yang dihitung dari akibat semua gempa bumi yang terjadi pada kurun waktu tertentu dengan memperhatikan besar magnitude dan jarak hiposenternya, serta periode dominan tanah dimana titik tersebut berada. Satuan yang digunakan

dalam pengukuran percepatan tanah adalah centimeter per sekon<sup>2</sup> (cm/s<sup>2</sup>) atau disebut *gal* (Kirbani *et al.*, 2006). Kondisi geologis tanah yang sangat menentukan besar kecilnya nilai percepatan getaran tanah maksimum adalah tingkat kepadatan tanah di wilayah tersebut. Semakin padat tanah maka nilai percepatan tanah maksimum di wilayah tersebut semakin kecil dan sebaliknya (Lubis dan Hadi, 2005). Penentuan nilai percepatan tanah maksimum di suatu tempat dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu dengan alat pengukur yaitu accelerograf dan dengan cara perhitungan pendekatan secara empiris. Metode empiris merupakan cara alternatif jika jaringan accelerograf kurang mendukung. Pendekatan metode empiris, tidak selalu benar, namun cukup memberikan gambaran umum tentang percepatan tanah maksimum (Ibrahim dan Subardjo, 2003). Pendekatan metode empiris terdiri atas 2 model yaitu pendekatan yang melibatkan karakteristik dinamik lapisan tanah dan pendekatan yang tidak melibatkan karakteristik tersebut. Karakteristik dinamik lapisan tanah meliputi amplifikasi getaran, frekuensi dominan dan periode dominan tanah. Penentuan nilai percepatan tanah maksimum dengan melibatkan periode dominan tanah dihitung berdasarkan persamaan yang dibuat oleh Kanai (1966) yaitu:

$$\alpha_g = \frac{5}{\sqrt{T_0}} 10^{0.61M - \left(1.66 + \frac{3.6}{R}\right) \log R + 0.167 - \frac{1.83}{R}} \quad (2)$$

dengan  $T_0$  adalah periode dominan tanah,  $M$  adalah magnitude gempa bumi dan  $R$  adalah jarak hiposenter. Nilai periode dominan tanah dalam kaitannya dengan gempa bumi dapat mempengaruhi nilai percepatan tanah maksimum.

### 4. Indeks Kerentanan Seismik ( $K_g$ ) dan Regangan Geser Tanah (*Ground Shear Strain*) ( $\gamma$ )

Indeks kerentanan seismik dan *ground shear strain* saling berhubungan. Indeks Kerentanan Seismik adalah suatu bilangan yang dapat menyatakan

kerentanan lapisan tanah permukaan akibat terjadinya perubahan bentuk lapisan tanah tersebut saat terjadinya gempa bumi (Nakamura, 1996). Sedangkan *ground shear strain* menggambarkan level kemampuan tanah di suatu daerah bergeser saat terjadinya gempa bumi. Nilai *ground shear strain* bisa dihitung dengan mengalikan nilai indeks kerentanan seismik dari kurva HVSR dan percepatan di batuan dasar. Menurut Nakamura (1996) dalam mengkaji indeks kerentanan seismik tanah perlu mempertimbangkan nilai *ground shear strain* pada lapisan tanah permukaan. Semakin tinggi nilai *ground shear strain* akan menyebabkan lapisan tanah semakin mudah mengalami deformasi dan sebaliknya. Regangan geser tanah (*ground shear strain*) dinyatakan dengan persamaan

$$\gamma = \frac{A^2 \alpha_g}{f_0 \pi^2 v_b} \quad (3)$$

dengan  $v_b$  adalah kecepatan batuan dasar (*basement*),  $A$  adalah faktor amplifikasi,  $f_0$  adalah frekuensi natural dan  $\alpha_0$  adalah percepatan tanah maksimum di batuan bawah dasar. Indeks kerentanan seismik dinyatakan dengan persamaan

$$K_g = \frac{A^2}{f_0 \pi^2 v_b} \times 10^{-2} \quad (4)$$

Sehingga regangan geser tanah menjadi

$$\gamma = K_g \alpha_g \quad (5)$$

dengan  $K_g$  adalah indeks kerentanan seismik. Nakamura (1996) mengasumsikan kecepatan gelombang S di batuan dasar ( $v_b$ ) adalah 600 m/s,

sehingga  $\frac{1}{\pi^2 v_b} = 1.69 \times 10^{-6}$  s/cm.

Kemudian dengan asumsi bahwa *ground shear strain* efektif adalah 60% dari *ground shear strain* maksimum. Nilai *ground shear strain* dapat dihitung dengan mengalikan indeks kerentanan seismik dengan percepatan tanah maksimum di batuan dasar yang dinyatakan dengan persamaan

$$\gamma = K_g \alpha_g (10^{-6}) \quad (6)$$

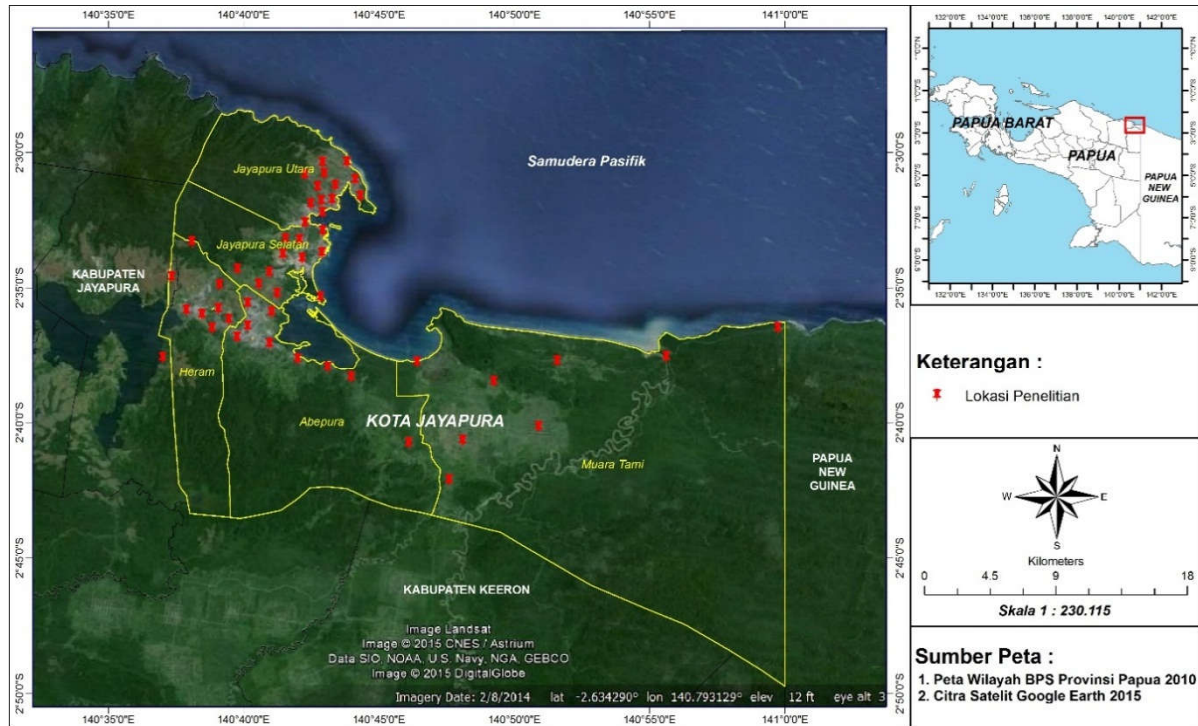
Selain faktor amplifikasi, indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh faktor amplifikasi dan frekuensi resonansi. Suatu daerah yang memiliki frekuensi resonansi rendah dan faktor amplifikasi tinggi ( $A$ ) akan menyebabkan nilai indeks kerentanan seismik tinggi dan sebaliknya. Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi menunjukkan bahwa daerah tersebut merupakan daerah yang memiliki potensi bahaya paling tinggi dibandingkan dengan daerah yang lainnya.

### METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode pengukuran langsung di lapangan dengan menggunakan alat perekam mikrotremor dan analisis perhitungan di laboratorium komputasi. Sinyal mikrotremor diukur langsung di lapangan dengan menggunakan alat perekam seismograf TDL 303S. Pengambilan data mikrotremor mengacu pada aturan yang ditetapkan oleh *SESAME European Research Project* (2004). Durasi pengukuran pada masing-masing titik yaitu selama 20-30 menit pada interval sampling 100 Hz. Data mikrotremor dianalisis dengan menggunakan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Proses HVSR menghasilkan nilai frekuensi dominan dan amplifikasi getaran tanah. Nilai periode dominan tanah merupakan kebalikan dari nilai frekuensi dan digunakan untuk menghitung nilai percepatan tanah maksimum. Selanjutnya nilai frekuensi dominan dan amplifikasi getaran tanah digunakan untuk menghitung nilai percepatan tanah maksimum, indeks kerentanan seismik dan regangan geser tanah dengan menggunakan kasus gempa bumi kontrol. Gempa bumi kontrol yang digunakan adalah gempa bumi yang terjadi pada tanggal 19 September 1984, pukul 20:26:19,35 pada koordinat 140,5920 BT dan 2,6150 LS dengan magnitude ( $m_b$ ) 5,1 SR dan kedalaman 42,40 km. Episenter gempa bumi ini terlokalisasi di wilayah Kabupaten

Jayapura yang bersebelahan dengan wilayah Kota Jayapura. Peta lokasi

pengukuran ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Percepatan tanah maksimum

Nilai percepatan getaran permukaan tanah terendah yaitu 10,9058 gal pada titik JPR 26 terletak di perbatasan RI – PNG Distrik Muara Tami pada koordinat  $2^{\circ}36'30.32''$  LS dan  $140^{\circ}59'43.47''$  BT. Titik JPR 26 memiliki jenis batuan batu gamping koral yang terdiri dari batu gamping koral, pasir, pejal, batu pasir, gampingan dan konglomerat. Sedangkan nilai percepatan getaran tanah tertinggi yaitu 280,0733 gal terdapat pada titik JPR 50 di kompleks gereja GPdI Ekklesia Padang Bulan Distrik Heram pada koordinat  $2^{\circ}36'30.96''$  LS dan  $140^{\circ}38'49.71''$  BT. Tinjauan secara geologi menunjukkan bahwa titik ini memiliki jenis batuan yaitu termasuk dalam Formasi Makats yang terdiri dari gres, berselingan dengan batu lanau dan batu lempung, sisipan napal dan konglomerat. Distribusi nilai percepatan tanah maksimum ditunjukkan pada gambar 2.

### 2. Indeks Kerentanan seismik

Nilai indeks kerentanan seismik terendah adalah  $1,89 \times 10^{-7}$   $s^2/cm$  terdapat pada titik JPR 50 yang berada di kompleks gereja GPdI Ekklesia Padang Bulan Distrik Heram pada koordinat  $2^{\circ}36'30.96''$  LS dan  $140^{\circ}38'49.71$  BT. Nilai indeks kerentanan seismik tertinggi adalah  $1,76 \times 10^{-5}$   $s^2/cm$  terdapat pada titik JPR 40 yang di Halaman BKKBN Kali Acai, Distrik Abepura pada koordinat  $2^{\circ}36'26.39''$  LS dan  $140^{\circ}40'8.49''$  BT. Secara umum titik 40 dan 50 berjenis batuan yang termasuk dalam Formasi Makats yang terdiri dari gres, berselingan dengan batu lanau dan batu lempung, sisipan napal dan konglomerat. Peta sebaran nilai indeks kerentanan seismik dapat dilihat pada gambar 3.

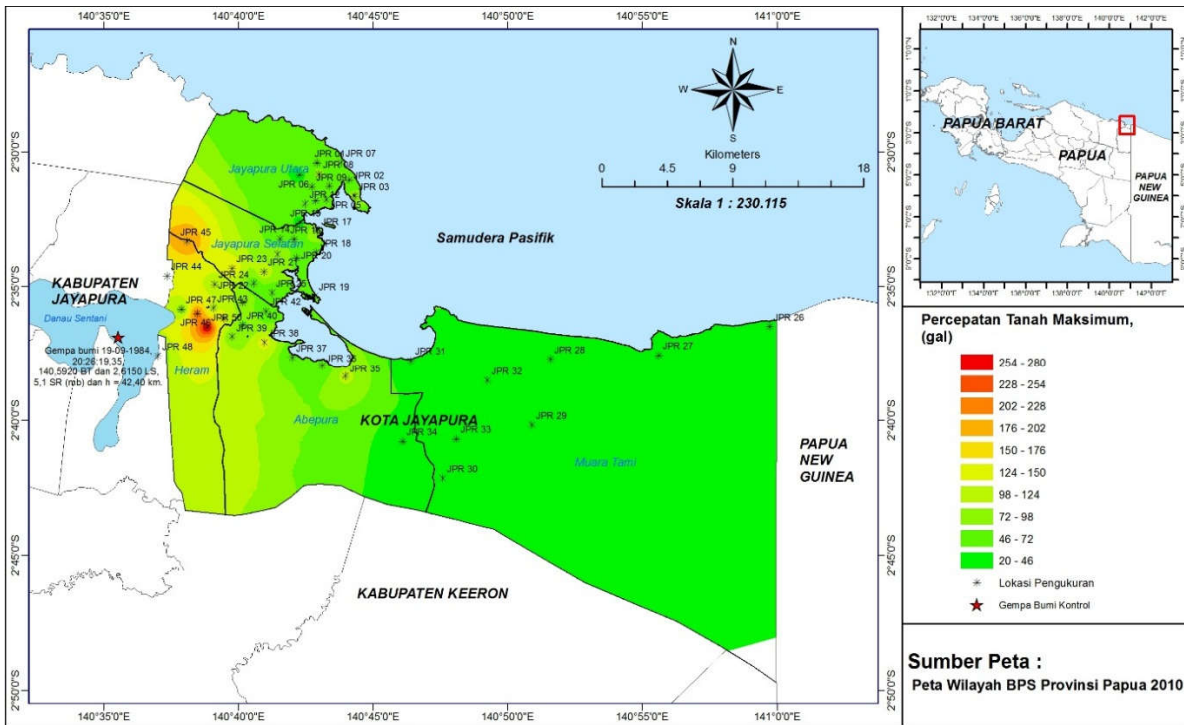
### 3. Regangan Geser Tanah

Nilai regangan geser tanah terendah adalah  $1,61 \times 10^{-5}$ , terdapat pada titik JPR 27 sekitar Pos Kostrad Yonif 323 Distrik Muara Tami pada koordinat  $2^{\circ}37'34,19''$ LS dan  $140^{\circ}55'36,34''$  BT

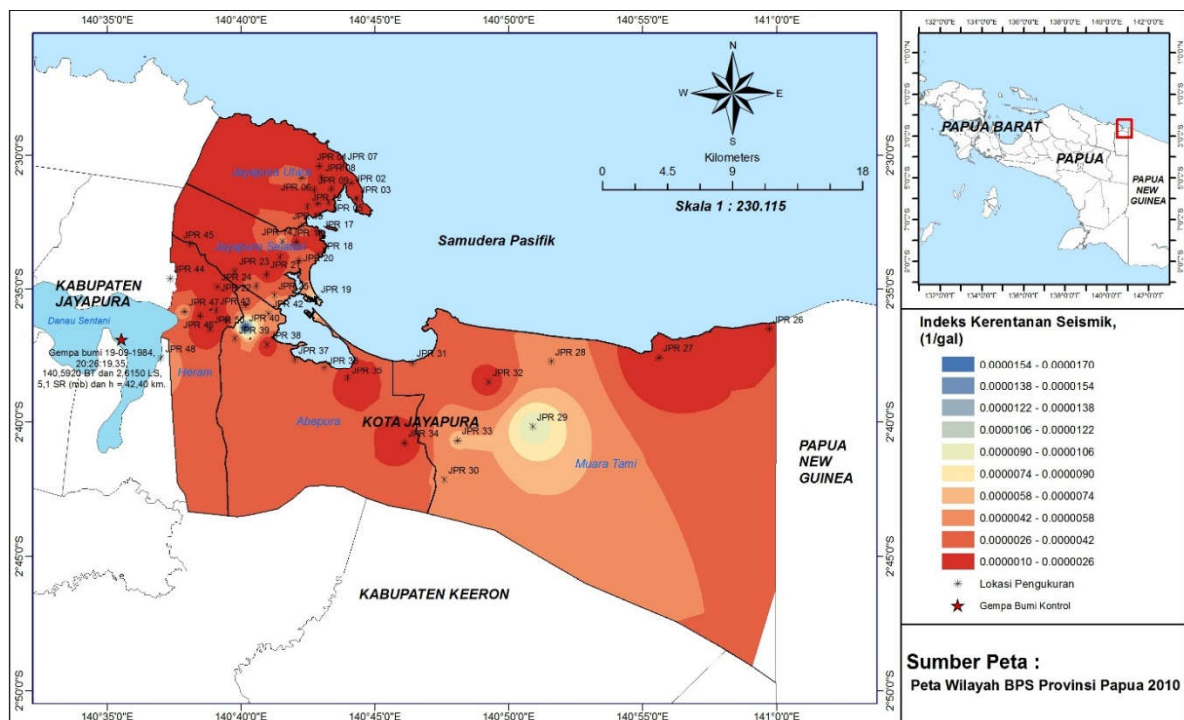
*PENENTUAN NILAI PERCEPATAN TANAH ....*  
(Steven Yohanes Y. Mantiri dan Ego Srivajawaty Sinaga)

yaitu di Distrik Muara Tami. Daerah ini termasuk daerah Aluvial dan Endapan Pantai yang terdiri dari kerakal, kerikil, pasir, lanau dan lumpur di wilayah rawa dan pantai. Nilai regangan geser tanah tertinggi adalah  $1,10 \times 10^{-3}$  terdapat pada titik JPR 40 di Halaman BKKBN Kali Acai, Distrik Abepura pada koordinat

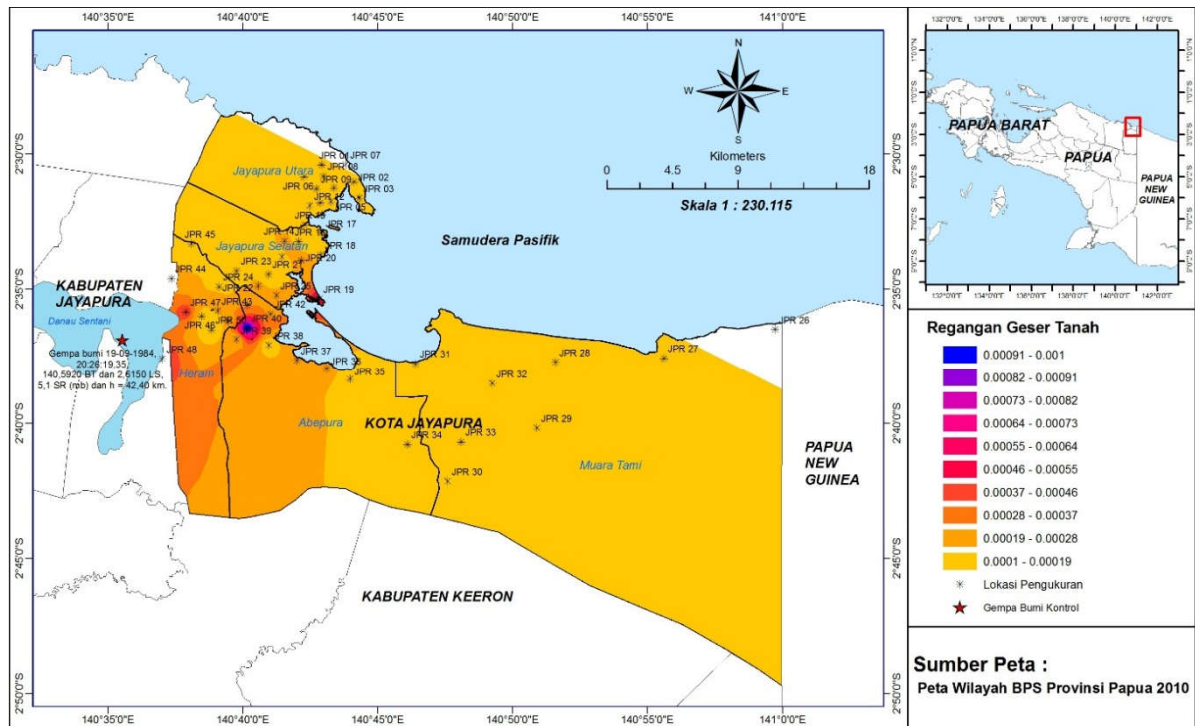
$2^{\circ}36'26,39''$  LS dan  $140^{\circ}40'8,49''$  BT yaitu di Distrik Abepura. Daerah ini termasuk Formasi Makats yang terdiri dari gresak, berselingan dengan batu lanau dan batu lempung, sisipan napal dan konglomerat. Peta sebaran nilai regangan geser tanah dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 2. Peta percepatan tanah maksimum



Gambar 3. Peta sebaran nilai indeks kerentanan seismik



Gambar 4. Peta sebaran nilai regangan geser tanah

## KESIMPULAN DAN SARAN

### 1. Kesimpulan

Penelitian tentang percepatan tanah maksimum, indeks kerentanan seismik dan regangan geser tanah dikembangkan untuk wilayah Kota Jayapura. Gempa bumi kontrol yang digunakan adalah gempa bumi yang terjadi pada tanggal 19 September 1984, pukul 20:26:19,35 pada koordinat 140,5920 BT dan 2,6150 LS dengan magnitudo ( $m_b$ ) 5,1 SR dan kedalaman 42,40 km. Adapun kesimpulan penelitian ini yaitu:

1. Interval nilai percepatan tanah maksimum adalah 10,9058 – 287,0733 gal.
2. Interval nilai indeks kerentanan seismik adalah  $1,89 \times 10^{-7} - 1,76 \times 10^{-5}$  gal<sup>-1</sup>.
3. Interval nilai regangan geser tanah adalah  $1,61 \times 10^{-5} - 1,10 \times 10^{-3}$ .

### 2. Saran

Beberapa saran yang perlu dipertimbangkan dalam kaitannya dengan penelitian ini yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan gempa bumi besar lain sebagai kontrol.
2. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan persamaan atenuasi percepatan tanah lain.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada LPPM Universitas Cenderawasih atas bantuan dana penelitian BOPTN UNCEN 2016.

## DAFTAR PUSTAKA

- Advanced National Seismic System (ANSS) Catalog Search, National California Earthquake Data Center (NCEDC), USA.
- Ibrahim, G. dan Subardjo, 2003. *Pengetahuan Seismologi*, Badan Meteorologi dan Klimatologi, Manado.
- Kanai, K., 1966. *Improved Empirical Formula for Characteristics of Stray Earthquake Motion*, Prociding Japan

- Earthquake Symposium, pp. 1 – 4 (in Japanese).
- Kanai, K., 1983. *Engineering seismology*, University of Tokyo Press, Tokyo, Japan, 251. Katz, L.J. 1976, *Microtremor analysis of local geological conditions*, Bulletin of the Seismological Society of America, 66, pp. 45-60.
- Kirbani, S.B.T. dan Widigdo, F.M., 2006. Percepatan Getaran Tanah Maksimum Daerah Istimewa Yogyakarta 1943-2006, *Jurnal Geofisika, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia*, Edisi 1, hal. 19-22.
- Lermo, J., and Chavez-Garcia, F.J., 1993. *Site Effect Evaluation Using Spectral Ratios with Only One Station*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol 83, No. 5, pp. 1574 – 1594.
- Lubis, A.M. dan Hadi A.I., 2005. Analisis Kecepatan Gelombang Seismik Bawah Permukaan Di Daerah yang terkena Dampak Gempa Bumi 4 Juni 2000: Studi Kasus Kampus Universitas Bengkulu, *Jurnal Gradien*, Vol. 1, No. 2, hal. 69-73.
- Mantiri, S.Y.Y., 2016. Variasi Nilai Frekuensi, Akumulasi Energi dan Parameter Seismik Secara Temporal Di Wilayah Jayapura Periode 1965 – 2014, *Jurnal Sains*, Vol. 16, No. 1, hal 35 – 43.
- Nakamura, Y., 1989. *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremor on the Ground Surface*. Quarterly Report of RTRI, vol. 30, No. 1, Page No. 25 to 33.
- Nakamura, Y., 1996. Real time information systems for seismic hazards mitigation UrEDAS, HERAS and PIC. Quarterly report of RTRI, Vol. 37, No.3, hal.112-127.
- Nakamura, Y., 2000. *Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and Its Applications*, 12<sup>th</sup> WCEE (World Conference on Earthquake Engineering), Auckland, New Zealand.
- SESAME, 2004. *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibrations - Measurements, Processing and Interpretation*, SESAME European research project, European Commission – Research General Directorate.
- Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., Kanamori, H., 1999. *Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California*, Earthquake Spectra, Volume 15, No. 3, pp, 557 – 564.
- Young, H.D. and Freedman, R.A., 2008. *Sears and Zemansky's university physics: with modern physics*, 12<sup>th</sup> edition, page: 487-491, Pearson Education, Inc., San Fransisco.