



Analisis Mikrotremor untuk Bangunan X, Y dan Z di Wilayah Jakarta dan Sekitarnya dengan Menggunakan Metode *Floor Spectral Ratio* (FSR) dan *Random Decrement Method* (RDM)

Microtremor Analysis for Buildings X, Y, and Z in Jakarta and its Surroundings Using the Floor Spectral Ratio (FSR) and Random Decrement Method (RDM)

Aditya Setyo Rahman*, Muh. Dede Faisal, dan Hasan Arif Efendi

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jl. Angkasa 1 No. 2, Rw. 10, Gn. Sahari Sel., Kec. Kemayoran, Kota Jakarta Pusat, 10720

*Email: aditya.rahman@bmet.go.id

Naskah Masuk: 29 Desember 2023 | Naskah Diterima: 4 Juni 2024 | Naskah Terbit: 30 Juni 2024

Abstrak. Jakarta merupakan salah satu kota yang paling pesat pembangunannya di Indonesia dan banyak terdapat gedung – gedung bertingkat yang dibangun. Gedung – gedung ini rawan terjadi kerusakan akibat guncangan gempa bumi yang terjadi, di mana kerusakan bangunan dengan skala besar dapat menyebabkan jatuhnya korban jiwa. Analisis *mikrotremor* untuk bangunan bertingkat tinggi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik dari suatu bangunan dengan mengetahui periode dominan, frekuensi natural, amplifikasi, Damping Ratio dan tingkat kekuatan bangunan serta melakukan analisis terhadap bangunan tersebut. Analisis mikrotremor yang dilakukan terhadap bangunan X, Y, dan Z di wilayah Jakarta dan sekitarnya menggunakan metode *Floor Spectral Ratio* (FSR) dan *Random Decrement Method* (RDM) serta diolah menggunakan *software geopsy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin kecil frekuensi natural yang dimiliki suatu gedung, maka semakin besar amplifikasinya. Pada lokasi yang berbeda, kegunaan dari bangunan serta usia dari suatu gedung dapat menjadi faktor penentu karakteristik suatu bangunan baik itu dari frekuensi natural, amplifikasi, indeks kerentanan maupun Damping Ratio yang dimiliki. Analisis *FSR* di dapatkan hasil untuk dari ketiga gedung memiliki *range* frekuensi antara 0.63Hz – 0.91Hz, amplifikasi antara 1.72 – 10.31 dan indeks kerentanan dari 109.08 – 562.93, serta nilai *RDM* yang bernilai 0.95Hz – 1.10Hz. Untuk frekuensi naturalnya dan memiliki Damping Ratio antara 0.54 – 2.32%.

Kata Kunci: Mikrotremor, Bangunan, Indeks Kerentanan, Damping Ratio, Geopsy

Abstract. Jakarta is the most developed city in Indonesia, boasting numerous skyscrapers. However, these buildings are susceptible to destructive earthquakes that can damage them and injure people. Therefore, assessing seismic hazard potential for multistory buildings using Microtremor analysis is necessary to characterize building properties such as dominant period, natural frequency, site amplification, damping ratio, and building strength. We utilized the Floor Spectral Ratio (FSR) and Random Decrement Method (RDM) methods for buildings X, Y, and Z, using Geopsy software. Our results show that a smaller natural frequency leads to a greater amplification. Additionally, the building's location, purpose, and lifetime are crucial factors that characterize a building in terms of natural frequency, amplification, vulnerability index, and damping ratio. FSR analysis results show that these three buildings have a frequency range of 0.63 Hz to 0.91 Hz, amplification of 1.72 to 10.31, and vulnerability index of 109.09 to 562.93.

Meanwhile, RDM values range from 0.95 Hz to 1.10 Hz, and the natural frequency of damping ratio values is 0.54% to 2.32%.

Keywords: *Microtremor, Building, Vulnerability Index, Ratio Damping, Geopsy*

Pendahuluan

Indonesia secara geografis terletak diantara dua samudera dan dua benua, yaitu Samudera Hindia dan Samudera Pasifik serta Benua Asia dan Benua Australia, serta merupakan negara kepulauan tersebar sepanjang garis khatulistiwa yang memiliki koordinat geografis 6°LU – 11°08'LS dan dari 95°BT – 141°45'BT. Indonesia juga merupakan tempat bertemunya lempeng tektonik antara lain Lempeng Indo – Australia, Lempeng Eurasia dan Lempeng Pasifik.

Indonesia juga merupakan daerah yang rawan dengan bencana alam yaitu gempa bumi yang disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik. Gempabumi yang tercatat oleh beberapa lembaga nasional dan internasional menunjukkan total kejadian gempabumi sebanyak 6615 selama rentan tahun 1899 sampai tahun 2007 dengan magnitude $M_s \geq 5.0$ di wilayah Indonesia [1]. Gempabumi pada dasarnya tidak berbahaya bagi manusia karena gempabumi merupakan pelepasan energi yang dikarenakan lempeng tektonik yang saling bertabrakan dan energi yang di lepaskan berupa gelombang yang merambat ke semua arah, akan tetapi efek samping dari sebuah gempabumi yang biasanya menimbulkan korban jiwa antara lain bangunan yang rusak sehingga dapat menimpa manusia yang berada di dalamnya sehingga menyebabkan korban jiwa.

Jakarta (5°19' LS – 6°23' LS dan 106°22' BT – 106°58' BT) memiliki luas 650 km² dimana terdapat pembangunan di berbagai tempat. Bangunan tinggi menjadi pemandangan lumrah ditemui di seluruh tempat, khususnya wilayah Jakarta dan sekitarnya yang didominasi rumah susun, apartemen dan kantor pusat dari berbagai instansi pemerintah, swasta dan lainnya. Setiap bangunan tinggi memiliki resiko terhadap aktifitas kegempaan di tempat bangunan tersebut berdiri. Sejak tahun 2009, jumlah gedung pencakar langit di Jakarta meningkat dua kali lipat setiap tiga tahun [2].

Meskipun Jakarta tergolong jauh dari sumber gempa bumi, getarannya bisa terasa cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor unik, yaitu Cekungan Jakarta, permukaan tanah yang rendah, banyaknya gedung tinggi, dan efek amplifikasi gelombang. Cekungan Jakarta, terisi sedimen tebal dan lepas, memperkuat gelombang gempa dan menghasilkan getaran lebih terasa. Permukaan tanah yang rendah, sebagian besar di bawah permukaan laut, membuat tanah rentan terhadap likuifaksi, memperparah efek gempa. Banyaknya gedung tinggi di Jakarta memperkuat efek gempa. Getaran gempa diperkuat oleh struktur gedung tinggi, menghasilkan goyangan yang lebih terasa bagi penghuninya. Bentuk cekungan dan kondisi tanah di Jakarta menyebabkan efek amplifikasi gelombang. Gelombang gempa terfokus dan diperkuat saat merambat melalui cekungan, menghasilkan getaran yang lebih besar di wilayah Jakarta [3]. Sebagai bahan pembelajaran pada gempabumi Meksiko tahun 1985 dengan magnitudo 8.0 SR, mengakibatkan runtuhnya gedung – gedung tinggi yang berada di kota yang jaraknya ratusan kilometer dari pusat gempabumi tersebut, setelah di lakukan analisis ternyata penyebabnya karena bangunan tinggi yang berada di kota Mexico City memiliki nilai frekuensi natural yang sama dengan gempabumi yang jaraknya ratusan kilometer yang menyebabkan resonansi antara gelombang gempabumi yang teramplifikasi dengan lapisan tanah di kota tersebut dan frekuensi natural dari bangunannya[4]. Penelitian ini menyelidiki karakteristik menyeluruh suatu bangunan dalam menghadapi gempa bumi. Pengetahuan ini penting untuk memahami perilaku bangunan saat gempa, dan memungkinkan langkah mitigasi untuk meningkatkan ketahanannya.

Penelitian ini berfokus pada beberapa aspek penting, yaitu periode dominan, frekuensi natural, amplifikasi, resonansi, *damping ratio*, dan tingkat kekuatan bangunan. Periode dominan adalah waktu



yang dibutuhkan bangunan untuk berayun satu kali setelah gempa, dan membantu menentukan frekuensi gempa yang paling berbahaya. Frekuensi natural adalah frekuensi alami di mana bangunan berayun. Jika sama dengan frekuensi gempa, maka terjadi resonansi yang dapat menyebabkan kerusakan parah. Amplifikasi adalah perbesaran getaran gempa di dalam bangunan, dan amplifikasi tinggi dapat menyebabkan kerusakan parah. Resonansi adalah fenomena di mana getaran gempa diperkuat oleh getaran alami bangunan, dan dapat menyebabkan kerusakan parah. *Damping ratio* adalah ukuran seberapa cepat getaran bangunan berkurang setelah gempa, dan *damping ratio* tinggi dapat membantu mengurangi kerusakan. Tingkat kekuatan bangunan adalah kemampuannya untuk menahan beban gempa, dan menentukan apakah bangunan aman untuk ditempati. Dengan menganalisis semua aspek ini, penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi berharga tentang karakteristik bangunan dan cara meningkatkan ketahanannya terhadap gempa bumi.

Metode Penelitian

Jenis Penelitian

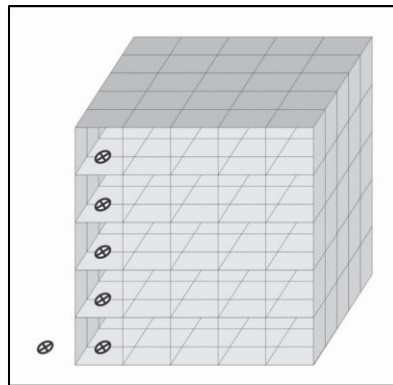
Penelitian menggunakan data primer. Penelitian ini menggunakan salah satu teknik pengukuran dalam geofisika yaitu metode *FSR* dan metode *RDM* berbasis pada data pengukuran langsung/data primer. Data yang digunakan merupakan data *noise* mikrotremor yaitu getaran tanah yang sangat kecil dan terus – menerus terjadi di setiap lantai bangunan bertingkat yang menjadi lokasi penelitian. Penentuan periode dominan akan menghasilkan frekuensi natural (f_0), amplifikasi (a_0), indeks kerentanan (KG) serta *damping ratio* ($z(\%)$) baik menggunakan metode *FSR* ataupun *RDM* untuk mengetahui tingkat performa atau kekuatan dari bangunan – bangunan bertingkat tinggi di Jakarta serta untuk mengetahui tingkat resonansi yang dapat terjadi di bangunan yang dijadikan lokasi pengambilan data.

Akuisisi data dilakukan dengan mempersiapkan peralatan – peralatan yang akan digunakan antara lain sensor mikrotremor periode 1 Hz sebanyak 3 buah, digitizer sebanyak 3 buah, *GPS* sebanyak 3 buah, pembangkit daya berupa accu sebanyak 4 buah, dan kompas untuk menentukan arah utara sebanyak 1 buah, serta kabel – kabel konektor sebagai penghubung antar alat. 1 set alat diletakkan di tempat terbuka (halaman gedung) sebagai “*free field/base*” yang akan menjadi pembanding antara lantai yang akan dilakukan akuisisi data dan 2 set alat yang lain digunakan untuk mengukur tiap lantai. Akuisisi data memerlukan waktu selama 1 jam tiap lantai serta alat tersebut dipasang pada rusuk suatu bangunan dengan asumsi pondasi dari suatu bangunan merupakan tempat dengan amplifikasi yang paling kecil untuk merekam variasi getaran yang signifikan pada suatu lantai. Getaran ini dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti aktivitas manusia. Dengan durasi 1 jam, diharapkan data yang diperoleh dapat mewakili kondisi getaran secara keseluruhan pada lantai tersebut. Data yang diambil merupakan periode natural dari suatu bangunan dengan *noise* terkecil, pada bagian tengah bangunan merupakan bagian dengan amplifikasi yang terbesar karena merupakan bagian yang terjauh dari pondasi dari suatu bangunan sehingga data yang didapatkan diasumsikan kurang bagus karena telah teramplifikasi. Pengambilan data dilakukan pada malam hari (pada pukul 21.00 – 04.00) karena merupakan waktu dengan aktifitas manusia yang rendah baik itu berupa kendaraan, perkantoran, serta aktifitas alami yang lainnya sehingga *noise* alami dari suatu bangunan terekam dengan baik, semakin baiknya data yang di dapatkan dalam suatu penelitian merupakan faktor yang penting dalam suatu penelitian karena semakin besar *error* yang di terjadi dalam akuisisi data maka akan menurunkan kualitas hasil dari suatu penelitian.

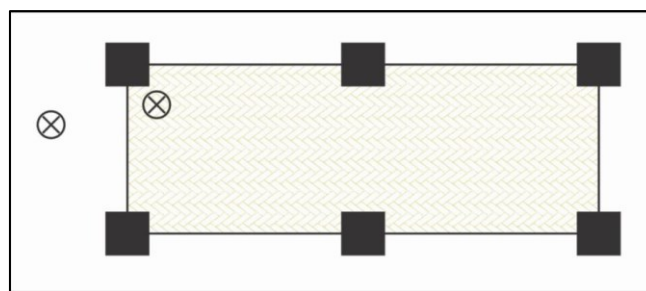
Pengambilan Data

Teknik pengambilan data yang dilakukan dengan menaruh sensor pada pojok bangunan atau rusuk bangunan, hal ini di lakukan untuk mendapatkan sinyal mikrotremor dengan hasil yang baik, yaitu hasil yang memiliki gangguan amplifikasi paling kecil di karenakan di pojok merupakan tempat pondasi dari suatu bangunan.





Gambar 1. Skema Pemasangan Sensor Pada Pojok Gedung/Bangunan dan pada Base (3D). (Lingkaran dan cross menggambarkan sensor/alat)

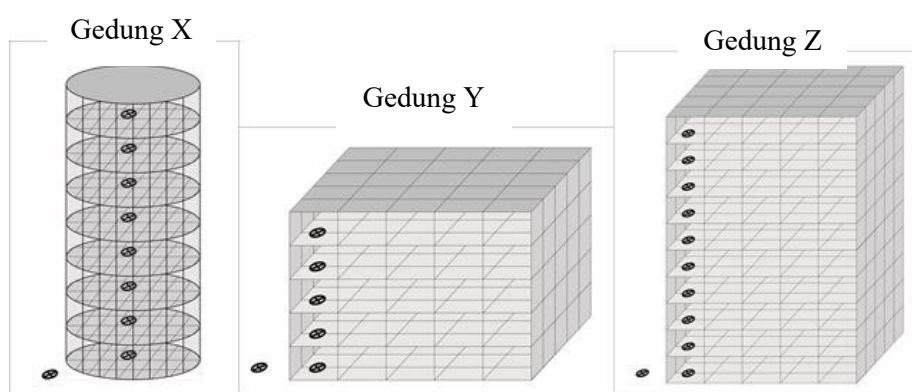


Gambar 2. Skema Pemasangan Sensor Pada Pojok Gedung/Bangunan dan pada Base (2D). (Lingkaran dan cross menggambarkan sensor/alat)

Data yang didapatkan berupa data mikrotremor dengan domain waktu, dengan sampling pengambilan datanya selama 1 jam.

Daerah Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan daerah penelitian yaitu 3 gedung yang memiliki kegunaan serta lokasi yang berbeda, gedung pertama atau Gedung X merupakan bangunan instansi pemerintahan yang terletak di wilayah Jakarta Pusat bagian Utara di Kecamatan Kemayoran di mana gedung ini memiliki total 14 lantai serta ketinggian sekitar 65 meter dari permukaan tanah, gedung ini berbentuk silinder yang memanjang keatas. Gedung ke – 2 atau Gedung Y merupakan hunian vertikal yang terletak di wilayah sekitaran Selatan Jakarta berbentuk persegi panjang dengan sisi timur – barat memanjang di banding sisi utara – selatan, dengan jumlah lantai 20 lantai dengan ketinggian berkisar 60 meter dari permukaan tanah. Gedung ke – 3 atau Gedung Z merupakan gedung perkantoran salah satu BUMN yang terletak di Jakarta Pusat yang tepatnya di bagian Barat Monas dengan jumlah lantai 19 lantai serta memiliki ketinggian sekitar 70 meter dari permukaan tanah, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Konfigurasi Bangunan Untuk Gedung X, Y, dan Z

Metode Analisis FSR

Analisis FSR (*Floor Spectra Ratio*) menggunakan *software Geopsy* dimulai dengan mengubah data mikrotremor dari domain waktu ke domain frekuensi melalui analisis spektrum Fourier. Algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) membagi data menjadi beberapa segmen dan menghitung spektrum amplitudo untuk masing – masing segmen. *Filter smoothing* kemudian diterapkan untuk menghaluskan hasil. Spektrum pengukuran lantai bangunan dibandingkan dengan spektrum pengukuran tanah di bawahnya. Perbandingan ini menghasilkan informasi tentang frekuensi natural bangunan dan tanah, amplifikasi getaran, dan indeks kerentanan bangunan.

$$f(FSR) = \frac{fb NS}{ft NS} \tag{1}$$

$$f(FSR) = \frac{fb EW}{ft EW} \tag{2}$$

Rumus di atas merupakan perhitungan nilai resonansi terhadap tanah serta gedung, pada rumus (1) dan (2) adalah perhitungan analisis *FSR* dimana *fb* merupakan frekuensi natural dari suatu bangunan serta *ft* merupakan frekuensi natural dari tanah disekitaran bangunan tersebut, *NS* dan *EW* merupakan komponen dari tiap datanya. *R* merupakan resonansi yang di hasilkan antara bangunan dengan tanah [3].

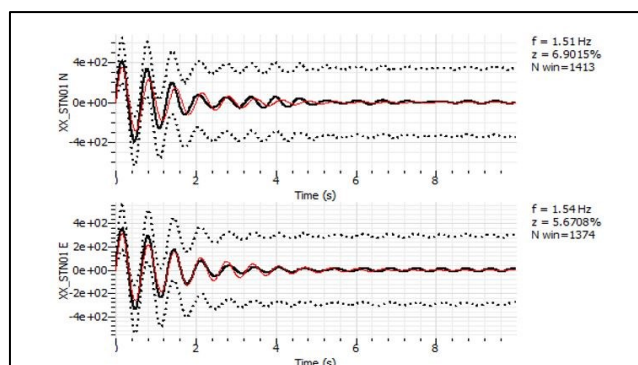
$$KG = \frac{a0}{(2\pi f0)^2} \frac{10000}{H} \tag{3}$$

Rumus (3) digunakan untuk mengetahui nilai indeks kerentanan (*KG*) suatu bangunan dengan menggunakan frekuensi natural (*f0*), nilai amplifikasi (*a0*), ketinggian gedung bertingkat (*H*).

Metode Analisis RDM

RDM adalah salah satu metode dalam mikrotremor yang dianalisis sebagai pembanding data analisis dari *FSR* [5]. Prinsip dari data analisis *RDM* merupakan teknik yang digunakan untuk menghitung *damping ratio* (rasio redaman) bangunan dengan menggunakan *band pass filtering* dan evaluasi frekuensi natural yang berasal dari spektrum *fourier* yang dianalisis terlebih dahulu (*FSR*).

Proses pengolahan dengan menggunakan metode *RDM* akan memperoleh 2 hasil yaitu frekuensi natural dan *Damping Ratio*. Frekuensi natural didapatkan dengan merubah fungsi sinyal dari domain waktu menjadi domain frekuensi dengan menggunakan algoritma *FFT* hingga mendapatkan nilai frekuensi natural dari suatu struktur bangunan sama seperti proses pengolahan dengan menggunakan metode *FSR*, sedangkan untuk *damping ratio* didapatkan dari redaman sinyal hasil mikrotremor, yaitu berupa perbandingan sinyal persatuan waktu sehingga didapatkan nilai rasio / perbandingan disuatu sinyal dengan satuan persen (%).

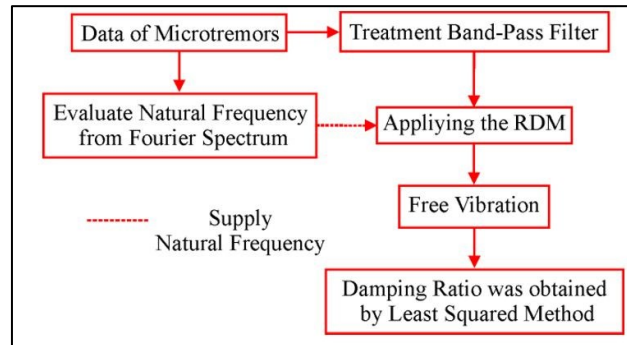


Gambar 4. Grafik *RDM* arah *NS* dan *EW* [6]

Gambar 4 diperoleh berdasarkan analisis *band pass* yang dilakukan. Penentuan filter ini sangat penting untuk mendapatkan data *RDM* yang akurat dimana data tersebut mendekati *FSR* dikarenakan *RDM*

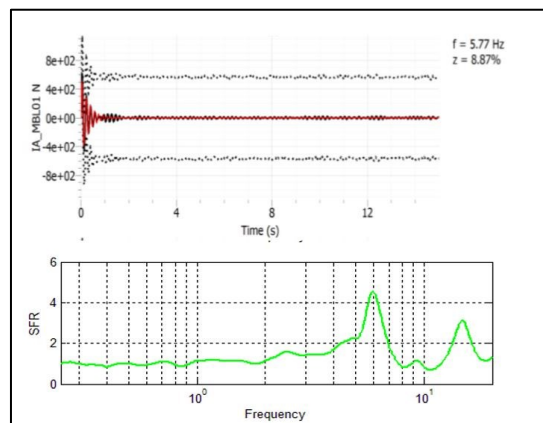


merupakan perbandingan data *FSR* jika data *RDM* yang dihasilkan tidak sama dan berbeda jauh dengan data *FSR* maka data *RDM* tersebut dinilai tidak akurat, sehingga akan dilakukan analisis *RDM* dengan filter yang tepat. Hasil dari analisis *RDM* ini berupa data frekuensi natural dan rasio redaman dari suatu bangunan. Data analisis *RDM* menggunakan hasil analisis dari metode *FSR* frekuensi yang digunakan mulai dari 1 Hz – 10 Hz hasil dari analisis ini menggunakan *damping toolbox* yang berada *software geopsy* [6].



Gambar 5. Proses Pengolahan Data dengan Metode RDM [7]

Gambar 5 merupakan alur dari proses pengolahan data yang berasal dari data mikrotremor berupa domain waktu yang diubah menjadi domain frekuensi dengan menggunakan fungsi *FFT (Fast Fourier Transform)*, dari frekuensi natural yang didapatkan selanjutnya difilter dengan menggunakan *Band – Pass filter* maka akan di dapatkan hasil pengolahan data *RDM* berupa data Damping Ratio (z (dalam satuan %)). Dalam penelitian kali ini penggunaan data hasil dari *transform fourier* yaitu data frekuensi natural dari *FSR*, dimana metode *RDM* ini di gunakan sebagai perbandingan dengan data *FSR* untuk mengetahui karakteristik suatu bangunan bertingkat yang akan diteliti.



Gambar 6. Analisis Data RDM [7]

Gambar 6 menjelaskan tentang analisis *damping* menggunakan metode *RDM* dengan arah getaran *NS* menunjukkan hasil dari pengolahan data dengan menggunakan *RDM* berupa f_0 dengan satuan Hertz (Hz) dan rasio redaman (z) dengan satuan persen (%). *FSR* dengan arah getaran *NS* dengan sumbu X frekuensi natural dan sumbu Y menggunakan amplifikasi [7].

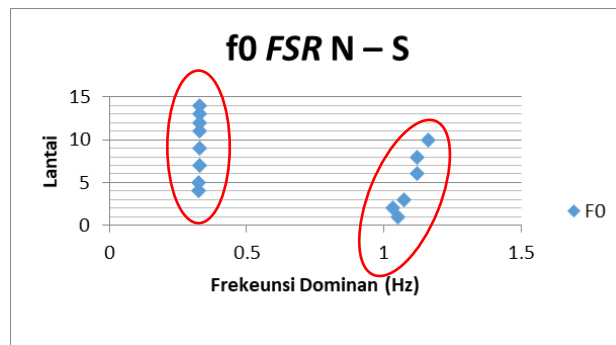
Hasil dan Pembahasan

Analisis *FSR* Gedung X Frekuensi Natural

Hasil analisis yang dilakukan di gedung X menunjukkan nilai frekuensi dominan (f_0) berkisar antara 0,32 Hz hingga 1,12 Hz. Pada lantai 14, yang merupakan puncak gedung, nilai f_0 terendah tercatat. Hal ini wajar karena semakin tinggi lantai, semakin kecil pengaruh getaran dari luar. Di beberapa lantai, nilai

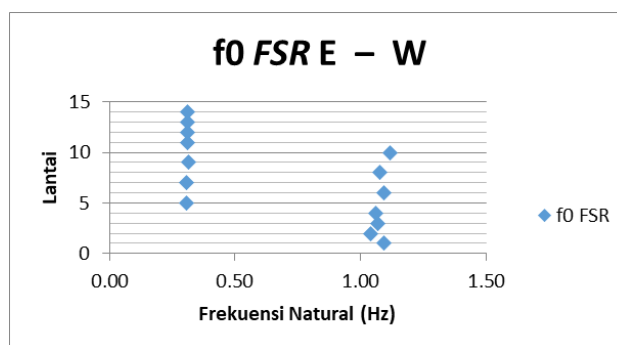


f_0 tercatat lebih dari 1 Hz. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh adanya sumber sinyal lain, seperti sambungan antar lantai, yang menyebabkan resonansi dan menghasilkan lebih dari satu puncak gelombang frekuensi dominan. Hasil analisis menunjukkan bahwa bangunan X tidak berperilaku sebagai kesatuan yang homogen, melainkan sebagai gabungan dari berbagai penyusun di setiap lantainya. Heterogenitas ini menyebabkan variasi nilai f_0 di setiap lantai. Secara grafik dapat digambarkan seperti gambar berikut.



Gambar 7. f_0 FSR untuk gedung X komponen utara – selatan. Lingkaran merah menunjukkan heterogenitas frekuensi setiap lantainya (titik biru)

Hasil dari Gambar 7, adanya *trend* bangunan X dari segi frekuensi di setiap lantai yaitu semakin tinggi suatu bangunan maka akan semakin rendah f_0 yang dimiliki suatu bangunan. Adanya *trend* grafik seperti pada Gambar 7 maka dapat disimpulkan bahwa semakin ke atas suatu bangunan maka akan semakin rendah nilai frekuensinya.



Gambar 8. f_0 FSR untuk Gedung X Komponen Timur – Barat

Analisis untuk arah Timur – Barat dari gedung X juga memiliki kemiripan dengan komponen utara – selatan yang dimiliki oleh bangunan X dimana dibawah ketinggian 15 meter (Lantai 14) dari permukaan tanah memiliki frekuensi dominan diatas 1 Hz dan ketinggian diatas 15 meter mulai terjadi penurunan nilai f_0 hingga menjadi 0.32 Hz. Gedung X juga memiliki anomali berupa terjadinya lebih dari 1 puncak sinyal yang menyebabkan adanya hasil yang berbeda di lantai nomer 4 yaitu pada komponen Utara – Selatan mempunyai nilai sebesar 0.32 Hz sedangkan untuk komponen Timur – Barat pada lantai yang sama memiliki nilai f_0 sebesar 1.06 Hz hal ini bukan berarti pada komponen Utara – Selatan tidak mempunyai nilai f_0 diatas 1 Hz akan tetapi nilai dibawah 1 Hz sedikit lebih dominan dibandingkan dengan nilai frekuensi diatas 1 Hz sehingga yang dimasukkan ke dalam tabel perhitungan adalah nilai dari perekaman sinyal yang paling dominan, hal ini akan berpengaruh pada perhitungan nilai indeks kerentanan bangunan (KG) nantinya.

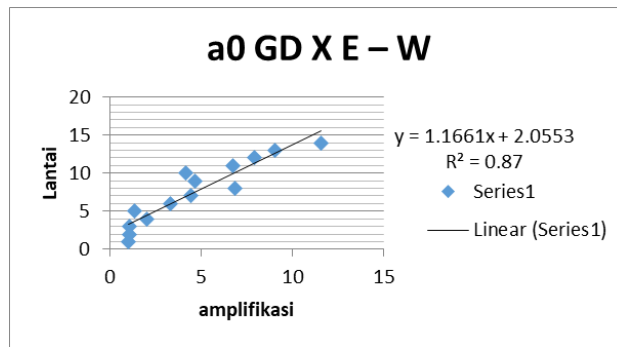
Puncak sinyal yang dimiliki suatu lantai di bangunan X yang memiliki lebih dari 1 puncak sinyal akan lebih berpotensi terjadinya superposisi pada sinyal yang menyebabkan amplifikasi yang lebih besar karena penggabungan lebih dari 1 puncak amplifikasi. Hasil frekuensi diatas 1 Hz merupakan hasil getaran alamiah dari tanah sedangkan hasil frekuensi dibawah 1 Hz merupakan frekuensi alamiah dari



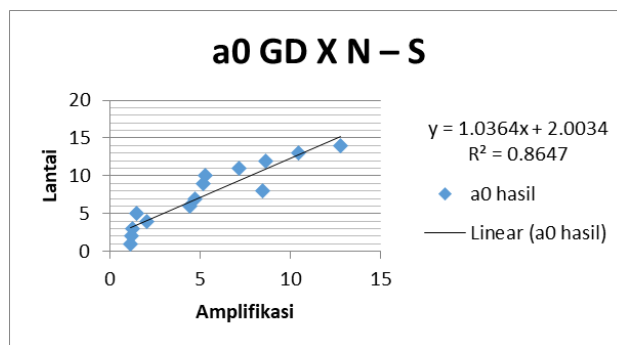
bangunan, hal ini menyebabkan lantai dibawah ketinggian 15 meter (lantai 14) masih terpengaruh dengan frekuensi natural dari tanah sedangkan hasil dibawah 1 Hz merupakan frekuensi alamiah dari gedung. Hal ini dapat dilihat dari gedung X dimana mulai dari lantai 11 hingga 14 hasil yang dominan merupakan frekuensi alamiah dari gedung sudah tidak terpengaruh oleh frekuensi tanah.

Amplifikasi

Amplifikasi yang didapatkan dari hasil analisis dengan *geopsy* pada gedung X berupa Gambar 9 dan Gambar 10.



Gambar 9. a0 FSR untuk Gedung X Komponen Timur – Barat



Gambar 10. a0 FSR untuk Gedung X Komponen utara – selatan

Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan grafik hasil regresi sebesar 0.86 untuk komponen *N – S* dan 0.87 untuk komponen *E – W* dengan hasil ini dapat disimpulkan bahwa nilai amplifikasi di gedung X secara linier meningkat dengan meningkatnya ketinggian suatu bangunan.

Indeks Kerentanan (KG)

Analisis pada Gedung X didapatkan bahwa nilai Indeks kerentanan (KG) fluktuatif. Hal ini disebabkan pengaruh perhitungan nilai KG berdasarkan pada nilai f_0 yang terekam pada peralatan yang digunakan dalam akusisi data pada gedung X. Nilai tertinggi berada di lantai paling atas dengan nilai indeks kerentanan sebesar 463 untuk komponen *N – S* dan 458 untuk komponen *E – W* hal ini disebabkan ketinggian lantai yang semakin tinggi dan nilai f_0 dominan yang terekam oleh peralatan yang digunakan dalam akusisi data.

Gedung Y Frekuensi Natural

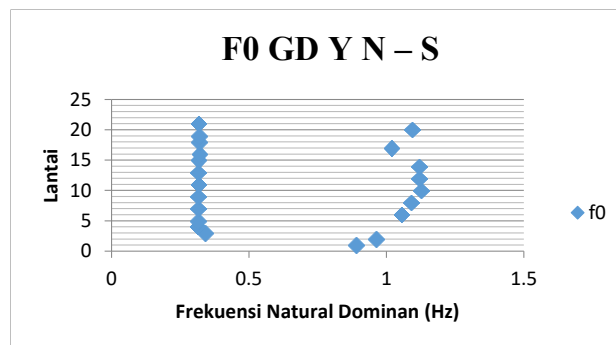
Frekuensi natural merupakan sinyal dominan yang berada di suatu tempat, hasil analisis yang di lakukan di gedung Y mendapatkan frekuensi natural pada gedung tersebut berkisar antara 0.33 Hz – 2.03 Hz. Lantai dasar hingga 15 meter dari permukaan tanah masih mendapat pengaruh yang kuat dari tanah sehingga mendapatkan hasil frekuensi diatas 1 Hz sedangkan untuk hasil yang berkisar diangka 0.33 Hz merupakan frekuensi natural dari bangunan, pada gedung ini juga mengalami lebih dari 1 puncak gelombang sinyal frekuensi yang terbaca oleh seismometer yang digunakan dalam prosesi akusisi data yang dilakukan. Hal ini disebabkan karena lebih dari 1 sumber sinyal yang dapat terbaca oleh peralatan yang digunakan, penyebab lebih dari 1 puncak pada pengukuran sinyal getaran ini dapat membuktikan



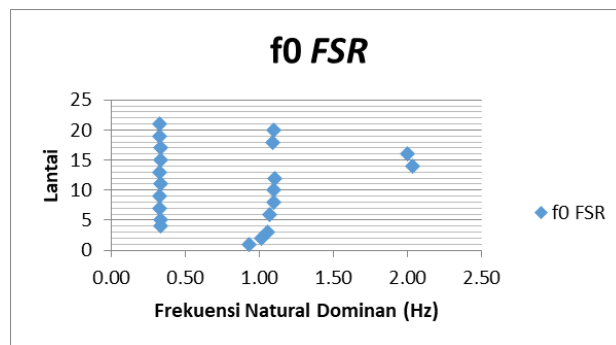
bahwa dalam suatu bangunan bukan merupakan kesatuan yang homogen melainkan gabungan dari berbagai metrial yang bersifat heterogen. Nilai amplifikasi yang berbeda di beberapa lantai dapat menjadi faktor penguat suatu bangunan di karenakan apabila ada suatu lantai memiliki frekuensi yang sama dengan getaran tanah dapat di redam oleh lantai yang lainnya [8], tetapi potensi yang ditimbulkan apabila suatu lantai memiliki lebih dari 1 puncak gelombang sinyal frekuensi yaitu apabila terjadinya superposisi yang menyebabkan aplifikasinya menjadi berlipat dari yang normal.

Hasil rata – rata frekuensi natural untuk gedung Y dengan komponen Utara – Selatan yaitu 0.63 Hz yang merupakan frekuensi natural secara keseluruhan dari suatu bangunan, sedangkan untuk arah Timur – Barat nilai rata – rata frekuensi dominan yaitu 0.80 Hz.

Hasil dari analisis tiap lintai yang berbeda dapat menyebabkan hasil pada perhitungan indeks kerentanan bangunan yang akan menyebabkan fluktuatif, hal ini di karenakan nilai indeks kerentanan (KG) merupakan hasil perhitungan dari nilai amplifikasi, nilai frekuensi dominan maupun ketinggian dari suatu bangunan yang nantinya akan berpengaruh terhadap hasilnya.



Gambar 11. f_0 FSR untuk Gedung Y Komponen utara – selatan



Gambar 12. f_0 FSR untuk Gedung Y Komponen timur – barat

Amplifikasi

Amplifikasi yang didapatkan dari pengolahan data mikrotremor pada Gedung Y adalah sebagai berikut:

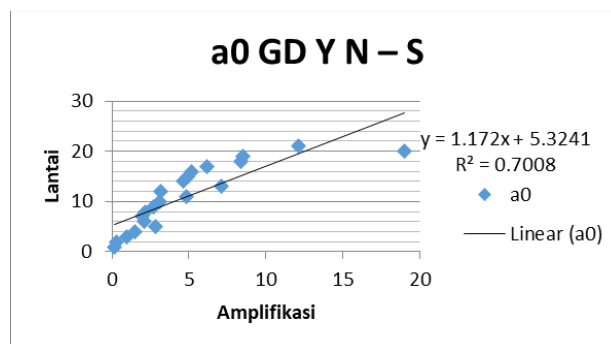
Hasil dari perhitungan amplifikasi pada gedung Y didapatkan hasil linier terhadap ketinggian hal ini dapat menjelaskan teori bahwa dengan suatu tingginya suatu benda maka tingkat amplifikasinya akan semakin tinggi sehingga periodenya makin besar maka akan frekuensinya semakin kecil [9].

Komponen arah utara – selatan untuk analisis amplifikasi didapatkan hasil dengan rentang 0.28 – 18.9 dengan nilai terkecil berada di lantai dasar dan untuk nilai tertinggi berada di lantai 22 (1 lantai di bawah lantai paling atas) dari bangunan gedung Y. Hal ini menunjukkan bahwa getaran di lantai 22 diperkuat hampir 19 kali lipat dibandingkan dengan lantai dasar. Perbedaan ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, karakteristik tanah di bawah gedung Y mungkin berbeda di setiap kedalaman. Lapisan tanah yang lebih lunak dan berongga cenderung memperkuat getaran, sedangkan lapisan tanah yang

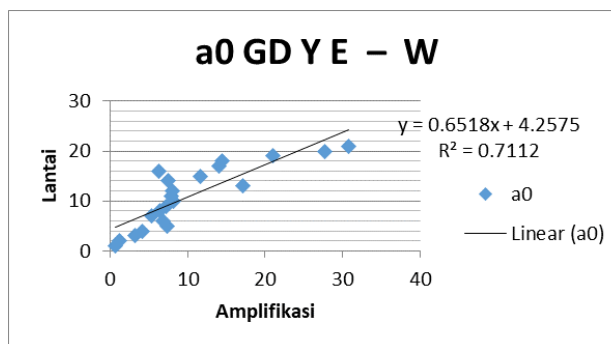


keras dan padat cenderung meredamnya. Kedua, desain struktur gedung Y juga dapat memengaruhi bagaimana getaran ditransmisikan melalui struktur. Bentuk dan geometri gedung, serta material yang digunakan, dapat memengaruhi tingkat amplifikasi di setiap lantai. Ketiga, lokasi dan jenis sumber getaran juga dapat memengaruhi tingkat amplifikasi di setiap lantai. Getaran yang berasal dari sumber yang dekat dengan permukaan tanah, seperti gempa bumi atau lalu lintas, cenderung lebih diperkuat di lantai yang lebih tinggi. Nilai rata – rata yang didapatkan dari hasil analisis amplifikasi komponen utara – selatan yaitu sebesar 4.84 sedangkan untuk komponen timur – barat mempunyai nilai amplifikasi dengan rentang nilai mulai dari 1.25 – 30.78 dengan nilai paling kecil berada di lantai dasar yaitu dengan nilai 1.25 sedangkan untuk nilai amplifikasi terbesar berada pada lantai puncak, sedangkan untuk nilai amplifikasi dengan komponen arah timur – barat memiliki nilai rata – rata sebesar 10.34 untuk seluruh gedung dengan arah komponen timur – barat.

Hasil rata – rata yang berbeda pada komponen di gedung Y disebabkan oleh bentuk dari gedung yang berbentuk huruf L dan berbentuk persegi panjang, dengan panjang sisi utara – selatan lebih pendek dibanding arah timur – barat sehingga menyebabkan perbedaan nilai amplifikasi, dengan hal ini dapat disimpulkan bahwa makin panjang sisi di suatu gedung dapat menyebabkan amplifikasinya semakin besar seperti contoh pada gedung Y. Hasil pada sisi timur – barat lebih besar dibanding arah utara – selatan, sehingga konfigurasi dari gedung juga memiliki pengaruh terhadap besar kecilnya amplifikasi yang dimiliki oleh suatu bangunan, sehingga jika ada suatu arah penjalaran gelombang maka tingkat perbesaran gelombang akan lebih dirasakan terhadap bangunan yang memiliki lebar/panjang yang lebih dibandingkan sisi yang memiliki lebar/panjang yang lebih pendek (seperti pada bangunan Y yang merupakan suatu hunian vertikal berbentuk persegi panjang).



Gambar 13. a_0 FSR untuk Gedung Y Komponen utara – selatan



Gambar 14. a_0 FSR untuk Gedung Y Komponen timur – barat

Indeks Kerentanan (KG)

Indeks Kerentanan merupakan nilai kekuatan bangunan yang didapatkan berdasarkan perhitungan dengan menggunakan nilai frekuensi natural dominan, amplifikasi dan juga ketinggian. Gedung Y juga mendapatkan nilai yang fluktuatif dengan range nilai indeks kerentanan untuk komponen Utara – Selatan mulai 22.55 yang berada di lantai 11 hingga nilai indeks kerentanan yang paling besar dengan nilai 661.67 yang berada di lantai 4, hal ini disebabkan perbedaan ketinggian serta nilai frekuensi dominan



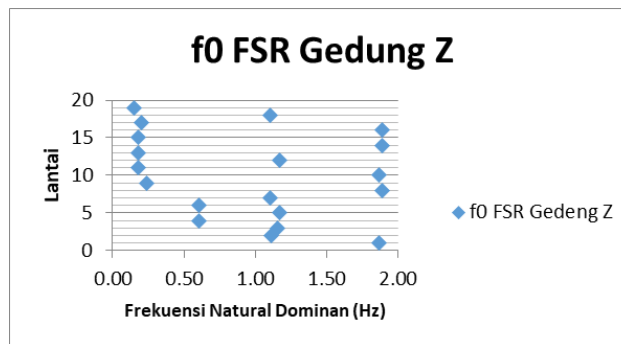
yang dihasilkan memiliki nilai yang berbeda di setiap lantainya untuk nilai rata – rata komponen utara – selatan gedung Y memiliki nilai indeks kerentanan sebesar 271.64.

Komponen arah timur – barat memiliki nilai indeks kerentanan dengan nilai terkecil 10.43 yang berada di lantai 15 sedangkan untuk nilai indeks kerentanan terbesar berada di lantai 4 dengan nilai 1535.30. Nilai rata – rata untuk seluruh bangunan dari komponen Timur – Barat dengan nilai indeks kerentanan sebesar 562.93, nilai indeks kerentanan menggambarkan bahwa semakin besarnya nilai tersebut akan semakin berpengaruh terhadap suatu sinyal.

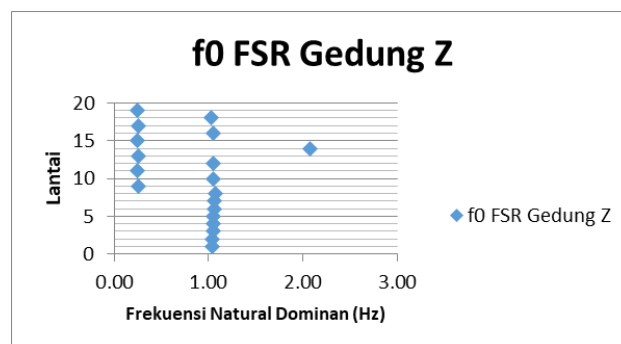
Nilai yang fluktuatif tersebut diharapkan dapat menjadi normal apabila ada sebuah sinyal yang datang, hal tersebut di karenakan nilai yang fluktuatif akan saling meniadakan antara satu dan yang lainnya sehingga persebaran sinyal getaran yang berasal dari tanah dapat menjadi normal ^[10].

Gedung Z Frekuensi Natural

Frekuensi Natural yang didapatkan di gedung Z bernilai fluktuatif hal ini disebabkan oleh penggunaan alat akusisi lebih dari 1 (banyak alat) hal ini berdampak pada hasil yang didapatkan, seperti yang terlihat pada tabel gedung Z nilai berada pada rentan frekuensi natural 0.15 – 1.88 Hz untuk komponen utara – selatan. Kompenen timur – barat dengan rentang 0.24 – 2.08 Hz hal ini disebabkan dapat terlihat pada tabel 4.5 dan 4.6 gedung Z di mana lantai 1 sampai lantai 7 gedung Z memiliki nilai frekuensi natural di atas 1 Hz sedangkan di atas lantai 7 memiliki nilai fluktuatif untuk nilai di atas 1 Hz disebabkan masih ada pengaruh dari getaran tanah sedangkan frekuensi dibawah 1 Hz merupakan frekuensi alamiah dari bangunan itu sendiri. Penyebab dari fluktuatifnya nilai frekuensi natural disebabkan oleh hari yang berbeda dalam pengukuran dan juga alat yang digunakan lebih dari 1 alat (multi alat) sehingga memiliki perbedaan dalam hasil yang terekam.



Gambar 15. f0 FSR untuk Gedung Z Komponen utara – selatan



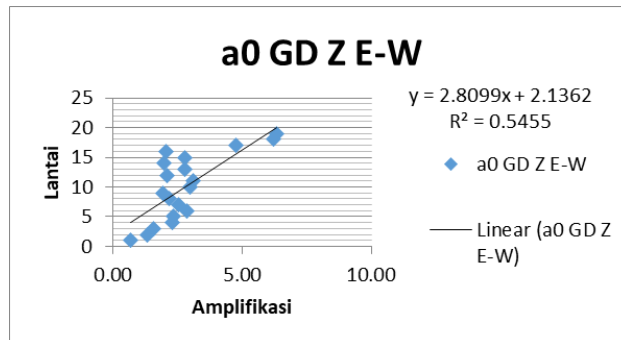
Gambar 16. f0 FSR untuk Gedung Z Komponen timur – barat

Frekuensi natural dominan rata – rata untuk gedung Z memiliki nilai sebesar 0.93 Hz untuk komponen utara – selatan, sedangkan untuk arah timur – barat memiliki nilai frekuensi dominan sebesar 0.85 Hz.

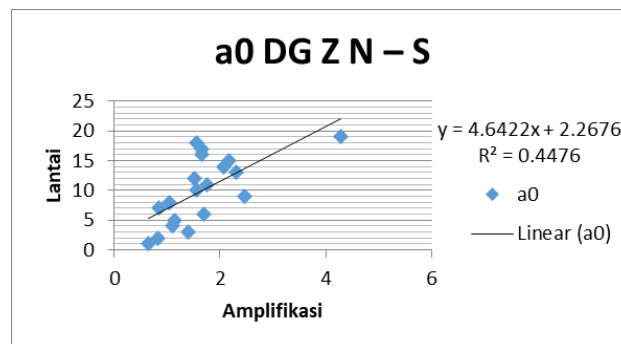


Amplifikasi

Amplifikasi yang didapatkan dari dari gedung Z dapat dilihat pada berikut:



Gambar 17. Amplifikasi di Gedung Z Komponen timur – barat



Gambar 18. Amplifikasi di Gedung Z Komponen utara – selatan

Amplifikasi di gedung Z dapat dilihat memiliki nilai linier dengan regresi sebesar 0.54 untuk komponen timur – barat dan 0.44 untuk komponen utara – selatan. Hasil ini dapat menggambarkan pergerakan suatu bangunan di mana semakin ke atas suatu bangunan maka semakin besar nilai amplifikasinya dimana menandakan bangunan tersebut semakin berayun mengikuti getaran/usikan yang berasal dari tanah.

Indeks Kerentanan (KG)

Nilai Indeks Kerentanan (KG) Gedung Z untuk komponen utara – selatan berkisar antara 4.98 hingga 795.26, sedangkan untuk komponen timur – barat berkisar antara 2.19 hingga 355.10. Hal ini menunjukkan bahwa Gedung Z lebih rentan terhadap gempa bumi yang datang dari arah utara – selatan dibandingkan dengan arah timur – barat. Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti arah angin dominan, sejarah gempa di wilayah itu, atau keterbatasan material dan teknologi saat pembangunan bisa jadi penyebabnya. Nilai frekuensi natural (f_0) yang fluktuatif dapat menyebabkan nilai KG juga mengalami fluktuatif yang searah dengan f_0 .

Nilai rata – rata Indeks kerentanan untuk bangunan Z dengan komponen utara – selatan memiliki nilai 246.01, sedangkan untuk komponen timur – barat memiliki nilai KG rata – rata sebesar 109.08

Analisis RDM Gedung X

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan metode RDM didapatkan nilai dengan rentang 0.98 – 1.57 Hz untuk komponen utara – selatan sedangkan untuk komponen timur – barat memiliki nilai frekuensi dominan dengan rentan 0.89 – 1.57 Hz, serta untuk nilai rata – ratanya memiliki nilai sebesar 1.05 Hz. RDM merupakan metode perhitungan yang digunakan sebagai pelengkap dari metode FSR oleh karena itu hasil dari perhitungan RDM diharapkan dapat menjadi pembanding dari nilai f_0 dengan menggunakan metode FSR, untuk metode RDM ini tidak mengalami anomali yang fluktuatif. Nilai f_0 RDM gedung X ini mengalami kenaikan dan penurunan nilai yang tidak terlampaui jauh nilainya hal



tersebut dikarenakan pada pengolahan *RDM* telah dibatasi dari 1 Hz – 10 Hz sehingga walaupun menggunakan alat yang berbeda hasil yang didapatkan tidak terlampau jauh bedanya.

Damping ratio merupakan nilai redaman yang dimiliki suatu bangunan, digunakan untuk menghitung redaman dari suatu struktur terhadap getaran hasil *damping ratio* yang didapatkan untuk gedung X komponen utara – selatan dengan rentang 0.30 – 1.51% serta untuk komponen timur – barat dengan nilai rentang 0.08 – 1.92%. Nilai rata – rata untuk komponen utara – selatan sebesar 0.65% dan timur – barat sebesar 0.56%.

Gedung Y

Berdasarkan hasil analisis metode *RDM* untuk gedung Y juga didapatkan hasil yang stabil untuk nilai f_0 nya yaitu berkisar antara 0.92 – 1.65Hz untuk arah utara – selatan sedangkan untuk arah timur – barat nilai frekuensinya berkisar antara 1.02 – 1.75Hz. Nilai rata – rata untuk gedung Y komponen utara – selatan yaitu 1.01 Hz, sedangkan untuk arah timur – barat sebesar 1.05Hz.

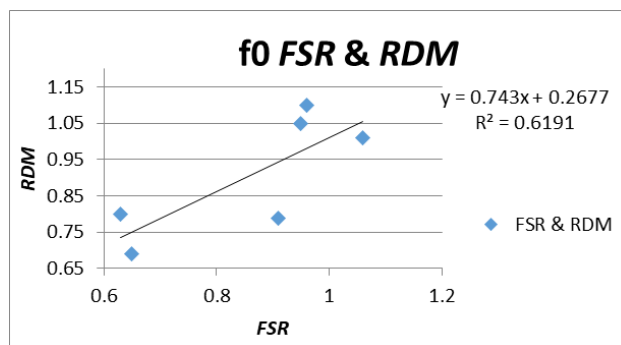
Nilai *damping ratio* untuk gedung Y untuk arah utara – selatan memiliki rentang 0.03 – 0.68% dan rata – ratanya sebesar 0.45% sedangkan untuk arah timur – barat memiliki rentang 0.01 – 1.03% sedangkan rata – ratanya sebesar 0.44%. Semakin besar nilai *damping ratio* maka tingkat redaman terhadap getaran makin besar sehingga sinyal yang melewati struktur akan diredam oleh struktur bangunan tersebut.

Gedung Z

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan metode *RDM* untuk getaran mikrotremor di gedung Z didapatkan hasil f_0 untuk arah utara – selatan dengan rentang nilai 0.64 – 1.39 Hz dengan nilai rata – ratanya sebesar 1.06 Hz, untuk komponen timur – barat memiliki nilai rentang 0.89 – 1.49Hz serta nilai rata – ratanya sebesar 1.03Hz. Nilai dari analisis ini termasuk normal dan tidak memiliki lonjakan nilai f_0 seperti halnya metode *FSR* hal ini dikarenakan untuk metode *RDM* sudah membatasi sinyal antara 1 – 10Hz yang akan diolah. Nilai *Damping Ratio* untuk gedung Z arah utara – selatan memiliki nilai sebesar 0.03 – 2.67% dengan nilai rata – rata sebesar 0.45% sedangkan untuk arah timur – barat memiliki rentang nilai sebesar 0.03 – 13.30% dengan nilai rata – ratanya sebesar 1.32%. Nilai *Damping Ratio* yang kecil mengakibatkan gedung Z ini lebih mudah mengalami getaran, hal ini dikarenakan sinyal getaran yang diterima struktur dapat menjalar dengan baik karena redaman yang kecil sehingga getaran dari tanah nyaris tidak diredam oleh suatu bangunan.

Korelasi Antara Frekuensi Natural *FSR* dan *RDM* pada Bangunan Bertingkat Tinggi

Hasil dari korelasi antara nilai frekuensi natural dari *FSR* dan *RDM* pada bangunan bertingkat tinggi di wilayah Jakarta dan sekitarnya didapatkan nilai regresi sebesar 61.9% dimana hasil regresi tersebut linier, *RDM* merupakan pembanding untuk menentukan tingkat kekuatan suatu bangunan di suatu wilayah. Tingkat kelinieran dari regresi *FSR* dan *RDM* menunjukkan bahwa nilai hasil analisis dari kedua metode tersebut mendekati sama.



Gambar 19. Korelasi Antara *FSR* dan *RDM*

Hasil yang didapatkan dari analisis seluruh gedung (X, Y dan Z) didapatkan bernilai akurat. Semakin besar regresi yang ditunjukkan dari korelasi antara *FSR* dan *RDM* maka akan semakin membuktikan



bahwa *FSR* dan *RDM* merupakan data yang linier/sama sehingga penggunaan metode *RDM* dapat dijadikan salah satu acuan dalam pemantauan kesehatan gedung.

Tingkat Kekuatan Bangunan

Hasil dari *FSR* dan *RDM* rata – rata dari ketiga gedung didapatkan sebagai berikut:

Tabel 1. hasil *FSR* dan *RDM* arah N – S

Building	FSR			RDM	
	f0	a0	KG	f0	Z
X	0.65	5.30	228.29	1.06	0.65
Y	0.63	4.83	288.4	0.96	0.86
Z	0.91	1.72	246.01	0.95	0.54

Tabel 2. hasil *FSR* dan *RDM* arah E – W

Building	FSR			RDM	
	f0	a0	KG	f0	Z
X	0.69	4.66	205.28	1.01	0.56
Y	0.80	10.31	562.93	1.10	2.32
Z	0.79	2.80	109.08	1.05	1.32

Hasil analisa menunjukkan bahwa secara keseluruhan gedung X mendapatkan hasil indeks kerentanan yang stabil hal tersebut disebabkan oleh bentuk gedung itu sendiri yang berbentuk tabung silinder sehingga untuk komponen utara – selatan maupun timur – barat mendapatkan hasil yang mendekati sama. Hasil analisis untuk gedung Y mendapatkan hasil indeks kerentanan bangunan yang sangat besar untuk komponen timur – barat. Penyebab dari tingginya hasil amplifikasi maupun indeks kerentanan di gedung Y untuk komponen timur – barat karena bentuk dari gedung itu sendiri dimana arah timur – barat memanjang dibanding bentuk gedung untuk arah utara – selatan.

Gedung Z mendapatkan hasil indeks kerentanan bangunan yang besar untuk arah utara – selatan dibanding dengan arah timur – barat, hasil analisis menunjukkan bahwa komponen utara – selatan lebih rentan dibanding timur – barat. Bentuk gedung yang berbentuk persegi dengan arah vertikal normalnya memiliki nilai amplifikasi maupun indeks kerentanan bangunan yang mendekati ^[11] akan tetapi untuk gedung Z yang telah berusia lebih dari 30 tahun ini lebih rentan diarah utara – selatan.

Kesimpulan

Analisis kekuatan bangunan X, Y, dan Z dilakukan dengan metode *FSR* dan *RDM* untuk mengetahui karakteristik dinamikanya, seperti frekuensi natural, rasio redaman, dan indeks kerentanan. Hasil analisis ini dapat digunakan untuk menilai tingkat kekuatan bangunan terhadap beban gempa. Gedung X memiliki frekuensi natural terendah (0.32 – 1.12 Hz) dan amplifikasi terbesar (1.08 – 12.75) dibandingkan dengan gedung Y dan Z. Hal ini menunjukkan bahwa Gedung X lebih rentan terhadap gempa dibandingkan dengan kedua gedung lainnya. Indeks kerentanan Gedung X juga tergolong tinggi (27.36 – 463.88). Gedung Y memiliki frekuensi natural yang lebih tinggi (0.33 – 2.03 Hz) dan amplifikasi yang lebih kecil (0.28 – 30.79) dibandingkan dengan Gedung X. Indeks kerentanan Gedung Y juga lebih rendah (78.53 – 1535.30). Gedung Z memiliki frekuensi natural dan amplifikasi yang bervariasi (0.15 – 1.89 Hz dan 0.64 – 6.34) dengan indeks kerentanan yang tergolong tinggi (5.73 – 626.26). Hasil analisis dengan metode *RDM* menunjukkan bahwa rasio redaman Gedung X (0.30 – 1.51%) lebih tinggi dibandingkan dengan Gedung Y (0.03 – 0.68%) dan Gedung Z (0.03 – 13.30%). Hal ini menunjukkan bahwa Gedung X memiliki kemampuan meredam getaran yang lebih baik dibandingkan dengan kedua gedung lainnya. Korelasi antara frekuensi natural *FSR* dan *RDM*



menunjukkan nilai yang cukup tinggi (61.9%), yang berarti bahwa kedua metode ini menghasilkan data yang akurat dan konsisten. Kesimpulannya, Gedung X memiliki tingkat kerentanan terhadap gempa yang lebih tinggi dibandingkan dengan Gedung Y dan Z. Hal ini disebabkan oleh frekuensi natural yang lebih rendah dan amplifikasi yang lebih besar. Rasio redaman Gedung X juga menunjukkan kemampuan meredam getaran yang lebih baik.

Saran

Analisis mikrotremor untuk bangunan bertingkat di wilayah Jakarta dan sekitarnya masih belum sempurna. Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik, perlu dilakukan pengukuran yang lebih baik, lebih variatif, dan dengan data dukung yang lebih banyak.

Ucapan Terimakasih

Terima kasih kepada rekan – rekan Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) yang telah memberikan dukungan dan kontribusinya dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] Weston, J., Engdahl, E. R., Harris, J., Di Giacomo, D., & Storchak, D. A. (2018). ISC – EHB: Reconstruction of a robust earthquake data set. *Geophysical Journal International*, 214(1), 474–484. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy155>.
- [2] BPS (Badan Pusat Statistik) DKI Jakarta. *www.jakarta.bps.go.id*. diakses tanggal 20 januari 2017.
- [3] Irsyam, M., & Marfai, M. A. Kajian Risiko Gempabumi dan Tsunami di Wilayah Pesisir Jakarta. *Jurnal Mitigasi Bencana*, 11(2), 121 – 132. (2022).
- [4] Miranda, E., & Ong, K. C. The Mexico Earthquake of September 19, 1985: Effects on Buildings. *Earthquake Spectra*, 1(1), 113 – 148. (1985).
- [5] Pebrian, P. T., Ibad, M. I., Burhanudin, M. A., & Rahmania, A. Earthquake Microzonation and Strength Building Evaluation at Gelora Bung Tomo Stadium Surabaya Using Micro – Tremor Method. *7th International Conference on Physics and Its Application.*, 2014 (ICOPIAS 2014).
- [6] Rahmat, F., & Setyawan, A. D. Analisis Kerusakan Struktur Bangunan akibat Gempabumi Menggunakan Respon Dinamis Struktur (RDS) dan Sistem Informasi Geografis (SIG). *Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 24(2), 169 – 182. (2022).
- [7] Dwa, D. S., Triwulan, W., & Utama, W., Evaluation of Buildings Strength from Microtremor Analysis. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE – IJENS*. Vol: 11, No: 05. (2011).
- [8] Wibowo, A., & Sudibyso, S. Studi Pengaruh Interaksi Tanah – Struktur pada Amplifikasi Gempa dan Perilaku Struktur Bangunan. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 17(2), 117 – 128. (2021).
- [9] Wijaya, W., & Santoso, A. Analisis Amplifikasi Gempabumi pada Bangunan Bertingkat dengan Sistem Struktur Berbeda. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Sumatera Utara*, 24(2), 147 – 158. (2020).
- [10] Santoso, B., Rahman, A., & Rahayu, T. Fluktuasi Nilai Frekuensi Natural Bangunan Bertingkat Tinggi dan Normalisasi Sinyal Getaran Tanah akibat Gempabumi. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Indonesia*. Vol:24, no. 2, 135 – 146. (2023).
- [11] Pramono, A., & Suparmono, S. Pengaruh Bentuk Bangunan terhadap Amplifikasi Gempabumi. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret*, 24(2), 201 – 210. (2023).

