

Optimasi Proses Evakuasi dalam Menghadapi Situasi Darurat pada Gedung Grha Sabha Pramana (Studi Kasus Acara Wisuda)

Pradita Khalis Andhika¹, Fadli Kasim², Singgih Hawibowo³

^{1,2,3}Jurusan Teknik Fisika FT UGM

Jln. Grafika 2 Yogyakarta 55281 INDONESIA

¹pradita_khalis@mail.ugm.ac.id

²fadli@ugm.ac.id

³singgih@ugm.ac.id

Intisari— UGM termasuk Gedung GSP berada di kawasan DIY yang termasuk zona gempa 3. Gedung GSP adalah gedung publik yang mampu memuat lebih dari 7000 orang untuk acara wisuda. Analisis untuk mengetahui area berbahaya di dalam gedung menjadi kebutuhan. Setelah gempa bumi berlalu, pengunjung perlu segera dievakuasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi evakuasi antara lain faktor pengunjung, petugas, jalur evakuasi, dan kekuatan gedung. Analisis faktor yang berpengaruh digunakan untuk optimasi waktu total evakuasi. Tujuannya adalah menjamin keselamatan pengunjung gedung. Analisis optimasi proses evakuasi dilakukan dengan memperhitungkan waktu evakuasi optimal, analisis performa fisik gedung, dan karakteristik pengunjung gedung. Perhitungan waktu evakuasi optimal didasarkan kepada teori Togawa yang menggunakan variabel jumlah orang, lebar pintu / lorong, kapasitas aliran pada pintu / lorong, jarak terjauh yang ditempuh, dan kecepatan gerak manusia. Perhitungan kecepatan gerak didasarkan kepada teori Chien untuk ruang dan area yang luas, dan didasarkan kepada data empiris dari perekaman video digital untuk lorong dan tangga. Pengunjung dibagi menjadi 2 kelompok (orang tua dan wisudawan) untuk memudahkan perhitungan kecepatan evakuasi. Waktu evakuasi (untuk mengosongkan gedung) dalam kondisi optimal dari dalam gedung maksimal 32 menit untuk menuju luar gedung. Sedangkan untuk menuju tempat berkumpul maksimal 35 menit dari dalam gedung. Waktu evakuasi (untuk mengosongkan gedung) pada kondisi saat ini sebagai pembandingnya adalah maksimal 108 menit dan 111 menit untuk masing-masing tujuan. Hal ini menunjukkan manajemen evakuasi saat ini masih jauh dari optimal.

Kata kunci— evakuasi, waktu evakuasi, kecepatan, densitas, acara wisuda.

Abstract— UGM including GSP building is located in DIY which inside the Earthquake Zone 3. GSP usually used for UGM graduation ceremony which can accommodate more than 7000 people. Since a lot of people inside this building, the analysis to determine the hazardous areas is essentially needed. In case an earthquake occurs, people inside this building need to be evacuated immediately after earthquake stop. Several factors affecting the evacuation process such as the number of visitors, officer's respond, evacuation routes, and the strength of building are considered. These factors are utilized to optimize the total of evacuation time. The purpose is to ensure the safety of people inside the building. Analysis of the evacuation process optimization is done by calculating the optimal evacuation time, the physical performance analysis of the building, and the characteristics of people. Calculation for an optimal evacuation time is based on the Togawa's theory which uses some variables i.e., number of people, width of door/hallway, flow capacity, furthest distance, and movement speed. For movement speed, it is based on the Chien's theory for large room and based on empirical data from video recording for hallways and staircases. In this research, people are divided into two groups; parents and graduates. This method is used for obtaining an easier the distribution areas and evacuation speed calculation. The evacuation time to empties the building from inside to outside building and from inside building to the assembly point in an optimal condition is 32 minutes and 35 minutes, respectively. As comparison with the current condition, the maximum evacuation time to empties GSP building is 108 minutes and 111 minutes, respectively. This condition shows that the current evacuation management is far from an optimal condition.

Keywords— evacuation, evacuation time, speed, density, graduation ceremony.

I. PENDAHULUAN

UGM termasuk Gedung GSP berada di kawasan DIY. Salah satu bahaya yang mengancam kawasan DIY adalah gempa bumi. DIY memiliki potensi gempa 8 – 9 MMI untuk 50 tahun mendatang sehingga masuk zona gempa 3 [1].

Respon seseorang terhadap situasi darurat sangat bervariasi dipengaruhi oleh banyak hal diantaranya faktor fisik dan psikis. Respon yang bervariasi pada setiap orang secara tidak langsung akan mempengaruhi respon dari

komunitas di dalam gedung. Dalam situasi darurat respon komunitas harus dikelola secara efisien untuk menghindari adanya korban jiwa.

Kesiapan untuk mengevakuasi pengunjung gedung harus menjadi prioritas. Pada Penelitian ini, penulis menghitung estimasi waktu evakuasi menggunakan variabel pengaruh berupa desain gedung, performa fisik gedung (khususnya jalur evakuasi), dan karakteristik pergerakan orang. Waktu evakuasi dijadikan dasar rekomendasi terhadap kesiapan evakuasi pada gedung GSP.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Fadli Kasim pada prosiding tahun 2004 menjelaskan tentang identifikasi bahaya bertujuan untuk mendapatkan pemahaman menyeluruh terhadap proses ataupun operasi dan pengetahuan yang terinci sehingga mampu mengidentifikasi, mengkategorikan, memprioritaskan bahaya [2].

Pengujian model struktur *rong-rongan* terhadap getaran gaya gempa dengan *horizontal slip table* dilakukan oleh Yulianto P. Prihatmaji tahun 2007. Hasilnya menunjukkan bahwa sistem pembebanan yang diterapkan di rumah Joglo menyumbang kestabilan, pada gempa frekuensi tinggi dan akselerasi rendah-tinggi [3]. Hasil penelitian Bambang Supriyadi tahun 2008 menyimpulkan frekuensi natural dari lantai 2 gedung Grha Sabha Pramana adalah 4,7 Hz. Selain itu menunjukkan bahwa strukturnya mampu menerima beban lebih dari 5000 orang dengan lendutan dinamis maksimal 2,6 cm. Saat 35 orang berjoget diiringi musik dengan beberapa jenis ketukan dan irama, frekuensinya 4,175-4,822 Hz dengan lendutan dinamis maksimal 3,31 cm (batas maksimal lendutan dinamis 2,729 cm) [4].

Shi Pu dan Sisi Zlatanova pada sebuah buku tahun 2005 menjelaskan kondisi darurat bukan merupakan situasi statis tapi faktor dinamis yang akan mempengaruhi keadaan darurat. Faktor tersebut yaitu status kerusakan, tempat yang tak dapat dijangkau, kapasitas jalan, kepadatan manusia, kecepatan berjalan, dan efek perlambatan dalam proses evakuasi [5]. Candy M.Y. Ng dan W.K. Chow dalam penelitiannya tahun 2006 menjelaskan waktu evakuasi. Waktu evakuasi adalah waktu yang diperlukan oleh orang untuk pindah dari daerah bahaya ke daerah aman ketika mengenali bahaya dan mulai mengungsi [6]. Yutaka Ohta dan Shun'itiro Omote dalam sebuah prosiding tahun 1977 menjelaskan respon manusia terhadap gempa juga dipengaruhi oleh jenis kelamin selain dipengaruhi besarnya intensitas gempa [7]. Pada disertasi Tzu-Sheng Shen tahun 2003 dijelaskan dalam perhitungan waktu evakuasi terdapat dua metode, yaitu teoritikal dan empiris. penggunaan teori Togawa dianjurkan karena luas aplikasinya. Pada gedung dengan banyak ruang dan lantai dapat disederhanakan dengan *adjacency matrix* [8].

III. DASAR TEORI

A. Gempa Bumi

Kekuatan gempa bumi dan pengaruhnya pada bangunan diukur menggunakan skala gempa bumi. Magnitudo (M) gempa bumi ditentukan berdasarkan gerakan seismik maksimal dengan skala Richter (SR). Intensitas (I) merupakan ukuran pengaruh gempa bumi atas orang, gedung, dan lanskap (*Modified Mercalli Intensity scale / MMI*). Syarat pembuatan struktur tahan gempa adalah saat intensitas kecil ($MMI < 8,0$) tidak boleh ada kerusakan struktural, saat intensitas kuat ($MMI > 8,0$) tidak boleh terjadi kerusakan yang membahayakan nyawa manusia hingga proses evakuasi selesai [9].

B. Kecepatan Objek pada Video Digital

Tracking yaitu proses mencari objek bergerak dalam urutan *frame*. Dengan menggunakan nilai posisi objek di setiap *frame*, dapat diketahui posisi dan kecepatan objek bergerak. Jarak dihitung dengan rumus jarak Euclidean (pada 2 dimensi adalah perpindahan antara satu titik ke titik lainnya pada sumbu X dan Y) [11].

$$d = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (1)$$

$$v = \frac{d}{t} \quad (2)$$

$$\text{jumlah frame} = \text{frame rate} \times \text{durasi} \quad (3)$$

$$v = \frac{d \times \text{frame rate}}{\text{jumlah frame}} \quad (4)$$

C. Evakuasi

Evakuasi adalah pemindahan orang dari tempat berbahaya menuju tempat yang lebih aman. Dalam perancangan evakuasi harus mempertimbangkan performa fisik gedung dan faktor orang yang bisa menghambat proses evakuasi. Terdapat dua fase dalam proses evakuasi gedung, yaitu fase pre-evacuation dan fase movement. Fase pre-evacuation adalah tahap sebelum pengunjung gedung meninggalkan ruang dan fase movement adalah tahap pengunjung mulai berjalan atau berlari menuju tempat berkumpul [10].

D. Algoritma Floyd-Warshall

Algoritma ini menggunakan prinsip optimalitas. Algoritma ini menghitung bobot terkecil dari semua jalur yang menghubungkan sebuah pasangan titik, dan melakukannya sekaligus untuk semua pasangan titik. Solusi-solusi dibentuk dari solusi yang berasal dari tahap sebelumnya dan ada kemungkinan solusi lebih dari satu [12].

E. Karakteristik Orang

Karakteristik dasar gerakan manusia untuk menghitung aliran manusia [8]:

- 1) Densitas (D): jumlah orang dalam unit dari ruangan atau jalan (orang/m^2).
- 2) Kecepatan (S): suatu fungsi dari densitas populasi. Jika densitas populasi kurang dari $\pm 0,54 \text{ orang/m}^2$ di jalan keluar, maka individu dapat bergerak dengan kecepatan mereka sendiri. Jika densitas manusia melebihi $\pm 3,8 \text{ orang/m}^2$, maka aliran hampir tidak bergerak.
- 3) Aliran (F): jumlah orang yang melewati beberapa titik acuan dalam satuan waktu. Aliran terbagi 2 yaitu:
 - a) Aliran spesifik (F_s):

$$F_s = v \times D \quad (5)$$

- b) Aliran Terhitung (F_c):

$$F_c = F_s \times B \quad (6)$$

F. Kalkulasi Waktu Evakuasi

Nelson dan MacLennan menjelaskan deskripsi gerakan orang. Persamaan mereka menunjukkan hubungan dari kecepatan dan densitas dengan k sesuai Tabel I [8]:

$$v = k - (c \times k \times D) \quad (7)$$

Tabel I. Konstanta (k) [8]

| Elemen rute jalan keluar | | k |
|---------------------------------------|----------------|------|
| Koridor, lorong, bidang miring, pintu | | 1,40 |
| Tangga | | |
| Ketinggian (in) | Kedalaman (in) | |
| 7,5 | 10 | 1,00 |
| 7,0 | 11 | 1,08 |
| 6,5 | 12 | 1,16 |
| 6,2 | 13 | 1,23 |

Chien di Taiwan melakukan penelitian berdasarkan teori Nelson dan MacLennan. Chien membangun teori hubungan antara kecepatan aliran orang secara horizontal dan densitas di terminal kereta bawah tanah. Teori Chien direkomendasikan untuk mengetahui estimasi kecepatan terlama dalam proses evakuasi. Karena teori Chien menghasilkan kecepatan yang lebih lambat untuk densitas yang sama daripada teori Nelson-MacLennan [8]. Penelitian Chien menghasilkan persamaan turunan sebagai berikut [8]:

$$v = 1,32 - 0,34D \quad (8)$$

Kikuiji Togawa membuat sebuah persamaan sederhana untuk menghitung waktu yang dibutuhkan untuk evakuasi. Berdasarkan teori karakteristik orang dan teori hubungan kecepatan dengan densitas, teori dibawah ini dibangun [8].

$$Te = \frac{Na}{B \times N} + \frac{Ks}{v} \quad (9)$$

Dalam persamaan Togawa, aplikasi pertama adalah waktu total aliran. Aplikasi kedua adalah waktu tempuh orang terjauh dalam kerumunan menuju tempat yang aman [8].

IV. PELAKSANAAN PENELITIAN

Pada dasarnya penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap yaitu :

- 1) Perumusan masalah.
- 2) Pengumpulan data kegempaan, denah dan ukuran gedung, performa fisik gedung, kesiapan sarana penopang evakuasi, rekaman aliran orang pada acara wisuda, kesiapan petugas dan studi literatur.
- 3) Analisis kecepatan gerak dan densitas orang pada saat keluar gedung dalam acara wisuda.
- 4) Pemetaan hubungan antar ruang menuju tempat berkumpul dan jarak terjauh yang harus ditempuh dari tiap area.
- 5) Penentuan asumsi.
- 6) Analisis waktu evakuasi optimal berdasar variabel-variabel diatas dan pendekatan asumsi.
- 7) Komparasi waktu evakuasi antara kondisi saat ini dibandingkan dengan kondisi optimal.
- 8) Penarikan kesimpulan.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengenalan Bahaya

DIY mengalami gempa terberat tanggal 27 Mei 2006 pada magnitudo gempa 6,3 SR berpusat di Sungai Oyo Kecamatan Dlingo Kabupaten Bantul pada kedalaman 10 km dengan intensitas gempa yang dirasakan antara 8 – 9 MMI. DIY memiliki potensi dalam kurun 50 tahun mendatang akan kembali dilanda gempa dengan intensitas 8 – 9 MMI.

B. Performa Fisik Gedung

Gedung terdiri dari 2 lantai. Lantai 1 terdapat 3 ruang kecil (250 orang), 1 ruang utama (800 orang), dan lobi. Lantai 2 terdapat auditorium (5000 orang) dan balkon (1200 orang). Grha Sabha Pramana mengadopsi desain rumah joglo limasan yang dimodifikasi. Meski berdesain joglo limasan tapi struktur konstruksi gedung adalah beton bertulang. Pemerataan beban mati struktur dan bentuk-bentuk ruang yang sederhana dimanfaatkan untuk mengkompensasi perbedaan kemampuan menopang gedung pada desain joglo kayu. Berdasar catatan kegempaan gedung memenuhi syarat ketahanan gedung.

Akan tetapi, terdapat kelemahan pada struktur lantai 2 di area struktur inti yang menyimpan potensi untuk runtuh jika beban mati lantai dikombinasikan dengan gempa bumi dan ribuan orang yang panik. Penyebabnya yaitu struktur lantai didalam area struktur inti tidak memiliki penopang vertikal dari lantai 1 dan penopang horizontal yang tidak cukup kuat. Struktur mampu menopang hingga 5000 orang dalam kondisi normal tanpa masalah. Akan tetapi struktur melebihi batas lendutan hanya karena 35 orang melompat-lompat selama beberapa waktu. Area ini dijadikan prioritas oleh penulis untuk segera dikosongkan baik untuk lantai 2 maupun lantai 1 setelah gempa bumi berhenti.

C. Kecepatan Normal Gerak Orang Keluar Gedung

Data kecepatan diperoleh dengan cara menganalisis hasil rekaman video digital. Sampel yang diambil sebanyak 120 sampel yang terdiri dari kelompok orang tua / wali pria, orang tua / wali wanita, wisudawan, dan wisudawati yang menuruni tangga dengan 3 jenis kepadatan aliran yaitu $\leq 2,1$ orang/m², $\leq 2,9$ orang/m², dan $\leq 3,6$ orang/m². Rerata sampel menunjukkan penurunan kecepatan 0,03 - 0,06 m/s untuk kenaikan densitas rata-rata 0,75 orang/m². Sampel menunjukkan bahwa densitas, jenis kelamin, dan umur orang mempengaruhi kecepatan aliran orang. Kecepatan wisudawan dan wisudawati adalah yang paling banyak mengalami penurunan akibat peningkatan densitas karena adanya perbedaan umur. Kecepatan rerata untuk orang tua / wali secara umum adalah 0,13 m/s dan untuk mahasiswa yang diwisuda adalah 0,15 m/s. Kecepatan rerata secara umum adalah 0,14 m/s dengan rerata densitasnya sebesar 2,9 orang/m².

D. Hubungan Antar Ruang Menuju Tempat Berkumpul

Pembagian area dan penentuan jalur didasarkan pada urgensi masing-masing area sesuai dengan analisis performa fisik gedung, perkiraan jumlah orang, perkiraan jarak tempuh, perkiraan waktu pengosongan, dan pembagian

kelompok pengunjung sehingga didapatkan data yang homogen untuk setiap jalur. Pada lantai balkon, tiap area terbagi menjadi 2 sesuai jumlah pintu keluar yang bisa diakses oleh masing-masing area. Tiap bagian area memiliki jarak terjauh menuju pintu keluar dan densitas yang hampir sama. Pada lantai 2, dibagi menjadi 4 area inti. Pembagian area pada lantai 2 yaitu :

- 1) Area A adalah area VIP dan para pengisi acara yang memang disediakan sebuah pintu keluar khusus dibelakang panggung.
- 2) Area B adalah area wisudawan dan wisudawati yang dikelompokkan karena ancaman bahayanya paling tinggi. Tujuannya untuk mempermudah proses evakuasi, menyeragamkan densitas dan kecepatan pada lantai 2 menuju luar gedung (untuk area B melalui pintu utama).
- 3) Area C dan D adalah area orang tua yang dikelompokkan dengan tujuan untuk mempermudah proses evakuasi, menyeragamkan densitas dan kecepatan pada lantai 2 menuju luar gedung (untuk area C dan D melalui tangga luar). Masing-masing area ini dibagi menjadi 2 sesuai jumlah tangga.

Pada lantai 1 terdapat 5 jenis area dengan struktur fisik ruangan, jumlah orang, dan kelompok orang yang berbeda. Area tersebut antara lain :

- 1) Area I adalah area publik umum selain wisudawan, wisudawati, dan orang tua. Area ini dibagi menjadi 3 yaitu utara, tengah, dan selatan. Sisi utara dibebani 400 orang dengan 4 akses keluar, sisi tengah 300 orang dengan 2 akses keluar, dan sisi selatan 300 orang dengan 4 akses keluar. Pembagian area didasarkan pada pemerataan densitas dan kecepatan gerak orang.
- 2) Area A, B, C, S, dan K adalah area petugas dan ruang tamu VIP yang sudah hafal seluk beluk gedung. Oleh karena itu penentuan jarak tempuh dan lebar pintu dapat disederhanakan untuk ruang dengan pintu keluar lebih dari 1. Caranya dengan menjadikan titik terjauh dari setiap pintu sebagai acuan titik terjauh dalam ruang.
- 3) Area H adalah area lobi yang menjadi area promosi dan stand penjualan. Jarak tempuh dan lebar pintu dapat disederhanakan karena sudut pandang ke pintu yang tak terhalang dan area ini fungsi utamanya adalah area penghubung.

E. Perhitungan Waktu Evakuasi

Asumsi yang diambil untuk mempermudah analisis perhitungan tidak mengurangi bobot penelitian. Karena asumsi diambil berdasarkan logika berpikir yang bersumber dari referensi dan data yang ada. Asumsi-asumsi yang diambil adalah sebagai berikut :

- 1) Evakuasi ditujukan untuk pengunjung di lantai 1 dengan jumlah 1200 orang, lantai 2 dengan jumlah 4800 orang, dan lantai balkon dengan jumlah 1200 orang sehingga total mencapai 7200 orang.
- 2) Kecepatan gerak orang yang dijadikan dasar perhitungan waktu evakuasi pada area tangga dan lorong diambil dari

pengolahan video digital (kecepatan rerata orang tua / wali dan mahasiswa yang diwisuda).

- 3) Faktor yang mempengaruhi perhitungan adalah kecepatan, dan densitas.
- 4) Evakuasi dilakukan serentak setelah gempa berhenti dan tidak terjadi kepanikan, petugas telah menenangkan pengunjung gedung dan memberi arahan jalur evakuasi secara ringkas.
- 5) Semua pintu dan tangga dapat dibuka dan dapat dijadikan jalan keluar dari gedung.
- 6) Kecepatan gerak orang di lorong lantai 1 disetarakan dengan kecepatan orang tua / wali di tangga.
- 7) Jalur aliran sesuai dengan pembagian area yang telah dipetakan. Lantai balkon ditempati orangtua / wali, lantai 2 area A ditempati jajaran petinggi kampus dan B ditempati wisudawan dan wisudawati sedangkan area C serta D ditempati orangtua / wali, lantai 1 ditempati keluarga mahasiswa yang diwisuda selain orang tua.
- 8) Waktu evakuasi terhitung adalah waktu terlama untuk mengevakuasi seluruh orang di dalam gedung dan bukan waktu tempuh.

Untuk menghitung waktu evakuasi, perhitungan waktu dibagi menjadi beberapa bagian yaitu :

1. Waktu untuk mencapai pintu keluar ruangan (P) dari masing-masing area tiap lantai jika tidak bisa langsung berhubungan dengan pintu terluar (X) karena harus melalui lorong atau tangga.
2. Waktu untuk mencapai pintu terluar (X) secara langsung dari masing-masing area tiap lantai atau dari masing-masing pintu keluar ruangan (P) yang ruangnya tidak langsung berhubungan dengan pintu terluar (X).
3. Waktu untuk mencapai titik luar gedung (1 atau 2) dari masing-masing pintu terluar (X).
4. Waktu untuk mencapai tempat berkumpul (TB) dari masing-masing titik luar gedung (1 atau 2) dan waktu untuk mencapai titik berkumpul akhir (Lapangan Pancasila) dari tempat-tempat berkumpul (TB) jika kondisi sangat membahayakan.

Penentuan waktu dilakukan per bagian agar memperoleh relasi dari tiap bagian yang dievakuasi dan mendekati teori yang dipakai dengan kenyataan yang ada. Hasil-hasil perhitungan waktu untuk mencapai titik-titik yang ditentukan (P, X, 1, 2, TB, Lapangan Pancasila) selanjutnya dirangkum dan disederhanakan.

Pada pembagian area terdapat beberapa data yang perlu diubah untuk menyesuaikan kondisi pertemuan jalur evakuasi antara beberapa area. Hal ini dilakukan misalnya, karena 2 area hanya memiliki 1 jalur evakuasi yang sama. Maka lebar jalur evakuasi dalam perhitungan dibagi menjadi setengah dari lebar jalur evakuasi yang ada. Begitu juga berlaku sebaliknya jika ada 1 area memiliki beberapa jalur evakuasi. Maka luas area dan jumlah orang yang dievakuasi terbagi menjadi beberapa bagian sesuai jumlah jalur evakuasi yang ada.

Untuk area dan ruangan, kecepatan yang dipakai dalam perhitungan didasarkan pada teori Chien (rumus 3.8) karena kesamaan teori tersebut dengan kondisi di lapangan. Kesamaannya adalah dari sebuah area yang luas dan berperan sebagai titik awal evakuasi menuju pintu keluar dari area tersebut. Untuk area penghubung ruang dengan pintu terluar gedung atau pintu terluar dengan area luar gedung, kecepatan yang dipakai dalam perhitungan didasarkan pada kecepatan gerak orang saat menuruni tangga karena kesamaan karakter antara aliran orang saat menuruni tangga dan aliran orang saat menyusuri lorong.

Teori Chien tidak bisa digunakan untuk menghitung kecepatan pada area tangga dan lorong. Penyebabnya adalah kecepatan terhitung berdasar teori Chien jauh lebih cepat dari kenyataan. Teori Chien sebenarnya adalah teori untuk menghitung kecepatan horizontal pada subway yang serupa dengan karakteristik ruang pada gedung. Sedangkan ruangan memiliki karakteristik yang berbeda dengan lorong dan tangga.

Oleh sebab itu, dipakailah hasil olah video sebagai data densitas dan kecepatan gerak orang pada lorong dan tangga. Kecepatan orang berdasar data rekam video adalah kecepatan untuk kondisi normal. Akan tetapi kecepatan tersebut bisa digunakan sebagai pedoman kecepatan paling kecil jika orang bergerak dengan densitas < 3,8 orang/m². Hal ini masih sesuai dengan teori Nelson-MacLennan yang menjelaskan tentang fungsi kecepatan terhadap densitas.

Tabel II. Perhitungan waktu dari dalam gedung menuju pintu keluar (P) atau langsung menuju pintu terluar (X) berdasar pada teori Chien dan Togawa

| Area Dalam Gedung | Na | D | B | V | N | Ks | Te |
|------------------------------|------|------|-----|------|------|------|-------|
| Balkon A dan C sisi Utara | 210 | 1,74 | 0,9 | 0,73 | 1,27 | 21,4 | 213,5 |
| Balkon A dan C sisi Selatan | 230 | 1,60 | 0,9 | 0,78 | 1,24 | 25,4 | 238,6 |
| Balkon B | 160 | 1,88 | 0,9 | 0,68 | 1,28 | 19,4 | 167,4 |
| Lantai 2 area A | 40 | 0,19 | 1,4 | 1,25 | 0,24 | 33,4 | 144,5 |
| Lantai 2 area B | 2000 | 1,43 | 3,6 | 0,83 | 1,19 | 51,4 | 527,7 |
| Lantai 2 area C dan D | 700 | 1,59 | 1,8 | 0,78 | 1,24 | 39,6 | 364,7 |
| Lantai 1 area I sisi Utara | 200 | 1,28 | 3,6 | 0,88 | 1,13 | 15,4 | 66,4 |
| Lantai 1 area I sisi Tengah | 150 | 1,28 | 1,8 | 0,88 | 1,13 | 22,6 | 99,1 |
| Lantai 1 area I sisi Selatan | 150 | 1,28 | 3,6 | 0,88 | 1,13 | 15,4 | 54,2 |
| Lantai 1 area A, B, dan C | 40 | 0,14 | 5,4 | 1,27 | 0,17 | 20 | 58,2 |
| Lantai 1 area K | 20 | 0,15 | 1,8 | 1,27 | 0,19 | 28 | 82,0 |
| Lantai 1 area S | 10 | 0,15 | 1,8 | 1,27 | 0,20 | 10 | 36,4 |

Tabel III. Perhitungan waktu pada area penghubung dari pintu keluar (P) menuju pintu terluar (X) berdasar data olah video dan rumusan Togawa

| Area Penghubung | Na | D | B | V | N | Ks | Te |
|--|------|-----|-----|------|------|------|-------|
| Tangga balkon sisi utara-lantai 1 (P-X) | 210 | 2,9 | 1,8 | 0,13 | 0,38 | 50,5 | 697,9 |
| Tangga balkon sisi selatan-lantai 1 (P-X) | 390 | 2,9 | 1,8 | 0,13 | 0,38 | 50,5 | 963,2 |
| Tangga belakang-lantai 1 (P-X) | 40 | 2,9 | 1,8 | 0,13 | 0,38 | 22,5 | 232,0 |
| Pintu lantai 2 lobi (P-X) | 2000 | 2,9 | 6,6 | 0,15 | 0,44 | 22,6 | 847,3 |
| Pintu lantai 1 area I sisi Utara (P-X) | 200 | 2,9 | 1,8 | 0,13 | 0,38 | 11,8 | 385,5 |
| Pintu lantai 1 area I sisi Tengah, A, K, dan S (P-X) | 220 | 2,9 | 1,8 | 0,13 | 0,38 | 29,8 | 553,4 |
| Pintu lantai 1 area I sisi Tengah, B, dan C (P-X) | 230 | 2,9 | 1,8 | 0,13 | 0,38 | 29,8 | 568,2 |
| Lobi H dan Pintu Lantai 1 area I sisi Selatan (P-X) | 350 | 2,9 | 3,6 | 0,13 | 0,38 | 26,2 | 459,4 |

Tabel IV. Perhitungan waktu pada area penghubung dari pintu terluar (X) menuju luar gedung (1 atau 2) berdasar data olah video dan rumusan Togawa

| Area Penghubung | Na | D | B | V | N | Ks | Te |
|--|------|-----|------|------|------|------|--------|
| Pintu lantai 2 lobi (X-2) | 2000 | 2,9 | 14,4 | 0,15 | 0,44 | 15,4 | 422,0 |
| Pintu tangga balkon sisi utara (X-2) | 210 | 2,9 | 3,6 | 0,13 | 0,38 | 58,6 | 605,5 |
| Pintu tangga balkon sisi selatan (X-2) | 390 | 2,9 | 3,6 | 0,13 | 0,38 | 58,6 | 738,1 |
| Pintu tangga belakang (X-1) | 40 | 2,9 | 3,6 | 0,13 | 0,38 | 29,8 | 258,7 |
| Tangga lantai 2 area C dan D (X-2) | 700 | 2,9 | 1,8 | 0,13 | 0,38 | 24 | 1216,2 |
| Pintu lantai 1 sisi Utara (X-1) | 200 | 2,9 | 3,6 | 0,13 | 0,38 | 26,2 | 348,9 |
| Pintu lantai 1 area 1 sisi Tengah, A, K, dan S (X-1) | 220 | 2,9 | 7,2 | 0,13 | 0,38 | 22,6 | 254,9 |
| Pintu lantai 1 area I sisi Tengah, B, dan C (X-1) | 230 | 2,9 | 7,2 | 0,13 | 0,38 | 22,6 | 258,6 |
| Pintu lantai 1 sisi Selatan (X-1) | 350 | 2,9 | 14,4 | 0,13 | 0,38 | 26,2 | 266,0 |

Tabel V. Perhitungan waktu pada area luar gedung menuju tempat berkumpul (TB) dan tempat berkumpul akhir (Lapangan Pancasila)

| Area Luar Gedung | Na | D | B | V | N | Ks | Te |
|-------------------------|------|------|------|------|------|-----|-------|
| Area Utara - TB | 240 | 0,26 | 7,2 | 1,23 | 0,32 | 129 | 209,4 |
| Area Timur - TB | 2230 | 0,77 | 36 | 1,06 | 0,82 | 80 | 151,4 |
| Area Barat - TB | 2230 | 0,77 | 36 | 1,06 | 0,82 | 80 | 151,4 |
| Area Selatan 1 - TB | 175 | 0,38 | 7,2 | 1,19 | 0,45 | 64 | 107,5 |
| Area Selatan 2 - TB | 1000 | 0,80 | 14,4 | 1,05 | 0,84 | 87 | 165,9 |
| TB - Lapangan Pancasila | 3245 | 1,39 | 36 | 0,85 | 1,18 | 65 | 153,2 |

Tabel VI. Simplifikasi data waktu evakuasi pada setiap lantai

| Area | Na | Ks | Te |
|----------|------|---------|----------|
| Balkon | 1200 | 214,5 m | 2091,3 s |
| Lantai 2 | 4800 | 176,4 m | 1962,9 s |
| Lantai 1 | 1200 | 155,0 m | 1062,5 s |
| Total | 7200 | 214,5 m | 2091,3 s |

Dari hasil perhitungan waktu evakuasi diketahui bahwa untuk mengevakuasi seluruh pengunjung menuju area di luar gedung membutuhkan paling lama 1940 s atau 32 menit. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi seluruh pengunjung gedung menuju tempat berkumpul dari area di dalam gedung adalah 2091 s atau 35 menit. Sebagai perbandingan dengan kondisi yang ada saat ini pada lampiran D terlihat bahwa pada kondisi saat ini jika dilakukan evakuasi maka akan memakan waktu 6479 s atau 108 menit lamanya untuk menuju area di luar gedung. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi seluruh pengunjung gedung menuju tempat berkumpul dari area di dalam gedung adalah 6653 s atau 111 menit lamanya.

Perhitungan waktu evakuasi dipengaruhi oleh bentuk fisik gedung, jumlah orang yang dievakuasi, kecepatan gerak orang, pemetaan jalur aliran yang mengacu pada performa fisik gedung, dan lebar jalur evakuasi. Perbedaan waktu untuk mengevakuasi gedung bukan berarti metode analisis yang dipakai adalah salah untuk pembagian area, pemerataan jumlah orang, lebar jalur yang tidak berubah ketika ada perubahan pada data masukan aliran, dan pemilihan jalur untuk tiap area. Pemilihan metode analisis yang demikian untuk mempermudah analisis. Harapannya hasil analisis waktu evakuasi terhitung lebih lama daripada saat diimplementasikan di lapangan.

Agar waktu terhitung pada penelitian ini lebih lama daripada waktu sebenarnya saat di lapangan maka harus ada elemen pendukung proses evakuasi yang terdiri dari :

- 1) SOP situasi darurat pada gedung,
- 2) jumlah petugas yang memadai dan kesiapannya saat situasi darurat,
- 3) pengendalian kepanikan pengunjung gedung,
- 4) pengarahan dan pelatihan untuk situasi darurat,
- 5) paneling jalur evakuasi dan denah gedung,
- 6) pencahayaan darurat pada tangga di dalam gedung,
- 7) pembangkit listrik darurat untuk pencahayaan dan *sound system*.

VI. KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan, penulis memperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Performa fisik gedung mampu untuk menahan gempa hingga intensitas 8 MMI. Karena itu prosedur evakuasi setelah gempa berhenti dapat dijalankan tanpa kepanikan yang berarti. Area B pada lantai 2 dan area I pada lantai 1 rawan terhadap gempa bumi.
- 2) Kecepatan gerak rerata pengunjung saat menuruni tangga dalam kondisi normal pada densitas rerata 2,9 orang/m² adalah 0,15 m/s untuk wisudawan dan wisudawati dan 0,13 m/s untuk orang tua pria dan wanita.
- 3) Waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi pengunjung gedung dari dalam gedung menuju area di luar gedung berdasarkan hasil optimasi adalah 32 menit dan waktu untuk mengevakuasi dari dalam gedung menuju tempat berkumpul membutuhkan waktu 35 menit. Sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk mengevakuasi pengunjung

gedung dalam kondisi saat ini adalah 108 menit (dari dalam gedung menuju area di luar gedung) dan 111 menit (dari dalam gedung menuju tempat berkumpul).

- 4) Kesiapan manajemen dalam menghadapi situasi darurat perlu ditingkatkan. Hal ini penting untuk menjamin keselamatan pengunjung gedung saat terjadi dan pasca terjadi gempa bumi.

Saran yang diberikan penulis adalah sebagai berikut :

- 1) Perlunya evaluasi kesiapan dan pengadaan elemen pendukung proses evakuasi. Hal ini sebagai rekomendasi peningkatan kesiapan pihak manajemen gedung dalam menghadapi situasi darurat.
- 2) Penelitian-penelitian selanjutnya perlu menganalisis :
 - a) Waktu evakuasi menggunakan pemodelan komputasi yang lebih akurat dan mendekati kenyataan.
 - b) Respon psikologis orang di dalam gedung ketika menghadapi kondisi darurat dan saat menjalankan proses evakuasi
 - c) Respon gedung Grha Sabha Pramana terhadap gempa bumi lebih dari 8 MMI.
- 3) Adanya kolaborasi berbagai bidang keilmuan untuk menyatukan hasil penelitian-penelitian mengenai proses evakuasi dan/atau hal-hal yang mempengaruhinya pada gedung Grha Sabha Pramana dengan analisis yang lebih akurat dan presisi. Tujuannya agar dapat disusun langkah optimasi yang presisi dan akurat untuk bisa diterapkan pada gedung secara menyeluruh ditinjau dari berbagai aspek secara detail dan terarah.

REFERENSI

- [1] Masyhur Irsyam, Wayan Sengara, Fahmi Aldiamar, Sri Widiyantoro, Wahyu Triyoso, Danny Hilman, Engkon Kertapati, Irwan Meilano, Suhardjono, M. Asrurifak, M. Ridwan. *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010*. Laporan Penelitian, Revisi Peta Gempa Indonesia, BNPB, Australia-Indonesia Facility for Disaster Reduction, Kementerian RISTEK, Kementerian PU, ITB, BMKG, LIPI, dan Kementerian ESDM, Bandung, 2010.
- [2] Fadli Kasim. "Identifikasi Bahaya". *Kursus Manajemen dan Kajian Resiko Keteknikan*, Pusat Studi Energi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 6 Mei 2004.
- [3] Yulianto P. Prihatmaji. "Perilaku Rumah Tradisional Jawa "Joglo" Terhadap Gempa". *Dimensi Teknik Arsitektur Universitas Islam Indonesia Yogyakarta*, volume 35 : nomer 1, halaman 1-12, 2007.
- [4] Bambang Supriyadi. "Pengaruh Beban Sejumlah Orang Beryanyi dan Berjoget Bersama pada Struktur Lantai Gedung Berbentang Panjang (Studi Kasus Gedung Grha Sabha Pramana)". *Media Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada*, edisi Juli : halaman 121-124, 2008.
- [5] Shi Pu dan Sisi Zlatanova (penulis), Peter van Oosterom, Siyka Zlatanova, dan Elfriede M. Fendel (editor). *"Evacuation Route Calculation of Inner Buildings"*, *Geo-information for Disaster Management*. Springer, Belanda, 2005.
- [6] Candy M.Y. Ng dan W.K. Chow. "A Brief Review on the Time Line Concept in Evacuation". *International Journal on Architectural Science*, volume 7 : nomer 1, halaman 1-13, 2006.
- [7] Yutaka Ohta dan Shun'itiro Omote. "An Investigation into Human Psychology and behavior During An Earthquake". *Prosiding the Sixth World Conference on Earthquake Engineering*, halaman 702-708, New Delhi India, 1977.

| | | | | |
|------|---|---|--|----------------------|
| [8] | Tzu-Sheng Shen. <i>Building Planning Evaluations for Emergency Evacuation</i> . Disertasi, Civil Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2003. | DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN Daftar Lambang | Deskripsi | Satuan |
| [9] | Heinz Frick, Antonius Ardiyanto, dan A.M.S. Darmawan. <i>Seri Konstruksi Arsitektur 8: Ilmu Fisika Bangunan</i> . Universitas Soegijapranata. Semarang, 2008. | I | Intensitas gempa bumi | MMI |
| [10] | Ariani Tyas Sukrisno dan Arief Rahman. <i>Perancangan Prototype Dynamic Exit Sign Dengan Mengembangkan Metode Floyd-Warshall Algorithm Pada Perancangan Proses Evakuasi Gedung Bertingkat</i> . Skripsi, Jurusan Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, 2010. | M | Magnitudo gempa bumi | SR |
| [11] | Pribadi Hartato. <i>Sistem Deteksi Kecepatan Kendaraan Bermotor Pada Real Time Traffic Information System</i> . Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, 2011. | f | Frekuensi | Hz |
| [12] | Janoe Hendarto. <i>Modul Pengantar Analisis Algoritma</i> . Diktat, Jurusan Ilmu Komputer, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, 2007. | L | Panjang | m, cm, in, km |
| | | d | Jarak yang ditempuh | m |
| | | X | Koordinat posisi titik pada sumbu X 1 atau 2 | - |
| | | Y | Koordinat posisi titik pada sumbu Y 1 atau 2 | - |
| | | v | Kecepatan | m/s |
| | | t | Waktu | s atau detik |
| | | D | Densitas | orang/m ² |
| | | Fs | Aliran spesifik | orang/m/s |
| | | Fc | Kecepatan aliran terhitung | orang/s |
| | | B | Lebar efektif jalan | m |
| | | k | konstanta | - |
| | | c | 0,266 (konstanta) | - |
| | | Te | Waktu evakuasi | s atau menit |
| | | Na | Jumlah orang | orang |
| | | N | Kapasitas aliran | orang/m/s |
| | | Ks | Jarak terjauh | m |
| | | fr | Frame rate | fps |