

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan perancangan struktur Masjid Nurul Falah sebagai fasilitas shelter evakuasi vertikal tsunami terintegrasi di Kelurahan Pasie Nan Tigo, Kota Padang, yang mengacu pada SNI 1726:2019, SNI 2847:2019, SNI 1727:2020, SNI 8460:2017, dan FEMA P-646 sebagai berikut:

1. Besaran gaya lateral akibat beban gempa dinamis respons spektrum dan gaya hidrodinamika tsunami pada suprastruktur telah dihitung secara komprehensif, dengan hasil sebagai berikut:
 - Faktor skala percepatan gempa arah X dan Y ditetapkan sebesar 1,839 m/s^2 ($I_e = 1,5$ untuk Kategori Risiko IV; $R = 8$ untuk SRPMK). Periode getar fundamental hasil analisis ragam, setelah dikoreksi terhadap batas periode pendekatan (T_a) sesuai SNI 1726:2019, diperoleh sebesar 0,761 detik (Gedung Utama arah X), 0,761 detik (Gedung Utama arah Y), 0,739 detik (Ramp arah X), dan 0,660 detik (Ramp arah Y, diambil dari T_a karena Mode 2 didominasi rotasi torsi).
 - Kontrol gaya geser dasar pada Gedung Utama menunjukkan gaya geser statik ekuivalen (V_{statis}) sebesar 1.335,30 kN pada kedua arah, tercapai oleh gaya geser dinamis akhir sebesar 1.339,71 kN arah X dan 1.339,97 kN arah Y (masing-masing 100,33% dan 100,35% terhadap V_{statis}) setelah faktor skala dikalibrasi ulang dari 1,839 menjadi 2,005 (arah X) dan 2,0085 (arah Y) sesuai Pasal 7.8.1 SNI 1726:2019. Pada Struktur Ramp, V_{statis} sebesar 858,56 kN dicapai oleh $V_{dinamis}$ akhir 858,745 kN (X) dan 858,735 kN (Y), atau 100,02% pada kedua arah; kedua struktur memenuhi syarat minimum $V_{dinamis} \geq 100\% V_{statis}$ sesuai Pasal 7.9.4.1 SNI 1726:2019.
 - Beban hidrodinamika tsunami dihitung berdasarkan tinggi genangan desain (H_{max}) 7,8 m mengacu FEMA P-646, diperoleh gaya hidrostatis 123,43 kN per titik kolom, gaya apung (buoyancy, F_b) 36,33 kN, gaya hidrodinamis/drag (F_d) 55,54 kN, gaya impuls ($F_s = 1,5 \times F_d$) 83,31 kN, gaya hantaman puing/debris impact (F_i) 528,51 kN, gaya akibat bendung

puing (F_{dm}) 666,50 kN, dan gaya angkat hidrodinamik/uplift (F_u) 0,052 kN; seluruh gaya tersebut diaplikasikan sebagai beban luar pada kombinasi pembebanan model ETABS sesuai SNI 1727:2020.

- Simpangan antar-lantai (drift) Gedung Utama seluruhnya berada di bawah simpangan izin ($\Delta \leq \Delta_a$); pada Struktur Ramp, simpangan pada beberapa elevasi melampaui batas izin konservatif namun masih dapat ditoleransi karena Ramp merupakan struktur terbuka tanpa elemen non-struktural getas, dengan stabilitas orde kedua dan kapasitas penampang tetap terverifikasi aman.
 - Koefisien stabilitas (θ) maksimum akibat efek P-Delta tercatat 0,0233 (Gedung Utama arah Y, Tingkat 1), jauh di bawah batas kritis 0,10, sehingga kedua struktur dinyatakan bebas dari instabilitas guling sekunder; pemeriksaan ketidakberaturan tingkat lemah menunjukkan rasio kuat lateral antartingkat tetap 100% pada seluruh elevasi sehingga struktur diklasifikasikan reguler.
 - Celah pemisah bersih minimum (S_{min}) yang disyaratkan metode SRSS sebesar 137,38 mm, sedangkan jarak antar-as kolom Gedung Utama dan Ramp yang direncanakan sebesar 1.000 mm ($L_{aktual} > L_{min}$), sehingga kedua struktur dinyatakan bebas dari risiko benturan antarbangunan (pounding effect) pada kondisi gempa maksimum.
2. Desain teknis komponen suprastruktur beton bertulang yang memenuhi kriteria daktilitas penuh (fully ductile), termasuk perencanaan geometris ramp mandiri eksternal, telah dihasilkan dengan rincian sebagai berikut:
- Dimensi awal (preliminary design) ditetapkan sebesar 500×850 mm untuk balok induk gedung, 300×500 mm untuk balok anak dan balok ramp 300×600 mm, Ø850 mm untuk kolom gedung (K1), Ø700 mm untuk kolom ramp, 180 mm untuk pelat gedung sistem dua arah, dan 150 mm untuk pelat ramp; seluruh dimensi memenuhi batasan geometri daktail SRPMK sesuai Pasal 18.6.2 dan 18.7.2 SNI 2847:2019.
 - Balok induk dan balok anak Gedung serta Ramp (tipe B1–B5) ditulangi dengan tulangan lentur 3D19 sampai dengan 5D25 dan sengkang D13 berspasi 100–250 mm sesuai kebutuhan daerah sendi plastis. Kolom Gedung Utama ditulangi dengan konfigurasi K1 (Ø850 mm, 28D25, $\rho =$

2,42%), K2 (20D25, $\rho = 1,73\%$), dan K3 (12D25, $\rho = 1,04\%$), sedangkan kolom Ramp (K4, Ø700 mm, 12D25, $\rho = 1,08\%$) dilengkapi tulangan transversal spiral D13-80 mm pada zona sendi plastis (lo) dan D13-150 mm pada zona luar sendi plastis. Pelat lantai P1 (180 mm) serta pelat ramp P2 dan P3 (120–150 mm) ditulangi D19 dengan spasi 240–250 mm pada kedua arah.

- Seluruh tipe joint Hubungan Balok-Kolom (HBK) pada Gedung Utama dan Ramp dinyatakan aman dengan faktor keamanan berkisar 1,47–5,78 ($SF > 1,0$); kontrol Strong Column-Weak Beam (SCWB) menghasilkan rasio $\sum M_{nc}/1,2\sum M_{nb}$ sebesar 1,611–2,299 pada Gedung Utama dan 1,78 pada seluruh elevasi Ramp, sehingga syarat kolom kuat–balok lemah sesuai Pasal 18.7.3.2 SNI 2847:2019 terpenuhi.
3. Kinerja elemen struktural kritis pada lantai bawah serta stabilitas sistem fondasi dalam terhadap hantaman gelombang tsunami, tekanan hidrostatik, gaya apung, gaya cabut, dan beban kejut puing telah dievaluasi dengan hasil sebagai berikut:
- Pada kedalaman rencana 30 m, kapasitas dukung aksial ultimit tiang bor (Q_{ult}) diperoleh sebesar 3.476,53 kN dengan kapasitas izin (Q_{all}) 1.390,61 kN ($F_k = 2,5$, metode OCDI). Kapasitas dukung lateral metode Broms menghasilkan defleksi aktual 0,41 mm, jauh di bawah defleksi layan izin 12 mm ($F_k = 3,0$), dengan kedalaman gerusan (scour) desain sebesar 2,22 m berdasarkan metode HEC-18. Kontrol kapasitas cabut netto (uplift), yang memperhitungkan kontribusi gaya apung dan gaya hidrodinamika tsunami, menunjukkan gaya tarik maksimum 166,41 kN masih berada jauh di bawah kapasitas cabut izin 835,47 kN, sehingga tiang dinyatakan tidak tercabut.
 - Efisiensi kelompok tiang metode Converse-Labarre berkisar 0,72–0,88 tergantung konfigurasi (2 s.d. 5 tiang), dengan reaksi tiang terbesar pada seluruh tipe pile cap (PC-1, PC-2, PC-3) Gedung Utama maupun Ramp tetap berada di bawah kapasitas izin tiang ($Q_{all} = 1.390,61$ kN). Tiang bor didesain dengan diameter Ø600 mm, kedalaman 30 m, tulangan utama 12D19, dan tulangan transversal spiral D13-100 mm (zona tumpuan) serta D13-200 mm (zona lapangan); pile cap didesain dengan ketebalan 800 mm dan tulangan D19-150 mm pada kedua arah, dinyatakan aman terhadap geser pons (punching shear).

4. Prototipe desain teknis yang andal beserta estimasi pembiayaan konstruksi melalui Rencana Anggaran Biaya (RAB) telah disediakan, dengan hasil sebagai berikut:

- Luas area evakuasi efektif bangunan sebesar 450 m² menghasilkan kapasitas fisik teoretis maksimum 450 jiwa berdasarkan FEMA P-646 (1 m² per jiwa). Kapasitas operasional shelter ditetapkan mutlak sebesar 440 jiwa, sesuai jumlah riil hunian pada radius layanan utama 210 m (110 unit rumah × 4 jiwa/rumah, BPS Kota Padang 2024). Penduduk di luar radius layanan utama, mengingat kawasan Kuala Nyiur 2 berkepadatan tinggi, diarahkan ke Shelter Rencana 1 dan Shelter Rencana 2 melalui skema crowd splitting, sehingga desain Masjid Nurul Falah tetap konsisten sebagai shelter berbasis masyarakat untuk kawasan padat pemukiman nelayan Pasie Nan Tigo.
- Total biaya konstruksi keseluruhan proyek, termasuk Pajak Pertambahan Nilai (PPN) 11%, adalah sebesar Rp10.582.039.734,88 atau dibulatkan menjadi Rp10.582.040.000,00, dengan komponen biaya terbesar berasal dari pekerjaan struktur atas (41,33%) dan struktur bawah (36,14%) yang secara kumulatif merepresentasikan 77,47% dari total anggaran konstruksi.

Secara keseluruhan, hasil analisis dan perancangan menunjukkan bahwa struktur Masjid Nurul Falah layak dan aman digunakan sebagai bangunan fungsi ganda, yaitu tempat ibadah pada kondisi normal dan shelter evakuasi vertikal tsunami pada kondisi darurat, dengan seluruh kriteria kekuatan, kekakuan, daktilitas, dan stabilitas telah memenuhi ketentuan standar nasional maupun pedoman internasional yang berlaku.

5.2. SARAN

Berdasarkan hasil analisis, pembahasan, dan keterbatasan yang ditemukan selama penelitian, beberapa saran yang dapat disampaikan untuk pengembangan maupun tindak lanjut penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan analisis lanjutan berupa evaluasi pushover atau riwayat waktu (time-history) khususnya pada Struktur Ramp, mengingat simpangan pada beberapa elevasi melampaui batas izin konservatif SNI 1726:2019, terutama

apabila di kemudian hari terdapat penambahan elemen non-struktural pada akses ramp tersebut.

2. Mitigasi non-struktural perlu dilaksanakan secara konsisten, meliputi pemasangan rambu jalur evakuasi definitif pada setiap blok perumahan serta simulasi tanggap darurat (tsunami drill) secara berkala, guna memastikan strategi crowd-splitting berjalan efektif dan jumlah pengungsi tidak melampaui kapasitas 110 unit rumah (440 jiwa) yang telah ditetapkan.
3. Mitigasi non-struktural perlu dilaksanakan secara konsisten, meliputi pemasangan rambu jalur evakuasi definitif pada setiap blok perumahan serta simulasi tanggap darurat (tsunami drill) secara berkala, guna memastikan strategi crowd splitting berjalan efektif dan jumlah pengungsi tidak melampaui kapasitas mutlak 110 unit rumah (440 jiwa) yang telah ditetapkan.
4. Perlu dilakukan pemantauan (monitoring) berkala terhadap potensi gerusan (scour) di sekitar pondasi tiang bor, khususnya pasca kejadian gelombang ekstrem atau banjir rob, sesuai rekomendasi metode HEC-18 yang digunakan dalam perencanaan ini.
5. Perlu dilakukan analisis potensi likuifaksi (liquefaction) pada lapisan tanah di sekitar lokasi rencana, mengingat kawasan pesisir Pasie Nan Tigo berada pada zona rawan gempa megathrust dengan kondisi tanah yang berpotensi jenuh air; analisis dapat menggunakan metode simplified procedure (Seed & Idriss) atau korelasi N-SPT terkoreksi (SNI 8460:2017) untuk mengevaluasi faktor keamanan terhadap likuifaksi (FS_{liq}) serta potensi penurunan tanah (settlement) yang dapat memengaruhi kinerja fondasi tiang bor.
6. Perlu koordinasi lebih lanjut dengan instansi kebencanaan setempat (BPBD Kota Padang) untuk mengintegrasikan shelter Masjid Nurul Falah ke dalam rencana kontinjensi evakuasi tsunami kawasan Pasie Nan Tigo, termasuk penyediaan sistem peringatan dini (early warning system) yang terhubung dengan jalur evakuasi menuju bangunan ini.
7. Untuk penelitian atau perancangan berikutnya, dapat dilakukan kajian optimasi RAB melalui pendekatan value engineering pada komponen pekerjaan struktur atas dan struktur bawah, mengingat kedua komponen tersebut mendominasi 77,47% dari total anggaran biaya konstruksi.
8. Diperlukan pemeliharaan rutin (maintenance) pada elemen struktur, khususnya bagian yang berpotensi terpapar korosi akibat lingkungan pesisir, agar kapasitas

layan struktur sebagai shelter evakuasi vertikal tsunami tetap terjaga sepanjang umur rencana bangunan.

