

Pendekatan Penilaian Gedung Penting Yang Tidak Direncanakan Secara Patut (Studi Kasus: Tower *Air Traffic Control* Airnav Bandara Halu Oleo, Kendari)

Masykur Kimsan^{1,*}

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo

Koresponden*, Email: masykur.kimsan@uho.ac.id

Info Artikel	Abstract
Diajukan : 25 April 2024 Diperbaiki : 12 Oktober 2024 Disetujui : 13 Desember 2024	<p><i>This study investigates the technical condition of the Air Traffic Control (ATC) tower at Halu Oleo Airport, Kendari, with a focus on its foundation and structure. The selection of this building is motivated by the critical need to ensure its safety and adequacy in earthquake-prone areas, particularly following the devastating Palu earthquake in 2018. This research encompasses a comprehensive scope of field testing, including visual surveys, soil testing using cone penetration tests and hand-boring, as well as non-destructive testing such as hammer tests, ultrasonic pulse velocity measurements, and rebars locators. The selection of these methods is tailored to the operational requirements of the building. Both field and laboratory analyses reveal significant shortcomings in the structure's compliance with required concrete strength standards for earthquake-resistant buildings. Additionally, deflections in the structure do not meet the necessary criteria for optimal performance during seismic events. Finite Element Method (FEM) analyses of the upper and foundation structures indicate that the foundation's load-bearing capacity is insufficient for demanded earthquake loads, while the upper structure's natural period exceeds standard requirements. For all seismic scenarios considered, the structure fails to meet criteria for deflection (serviceability) and strength, resulting in performance at the Immediate Occupancy – Life Safety level. This implies that while the structure is safe for use, it requires maintenance and repairs to achieve better performance levels. Recommendations for improvement include reinforcing the entire structure, from the foundation to the upper levels, with construction materials that meet earthquake standards, or constructing a new ATC building that adheres to current regulations. Consequently, this study offers an alternative approach for evaluating critical buildings in earthquake-prone areas.</i></p>

Keywords: Assessment; Technical Condition; Strength Capacity; Building Performance; Earthquake Risks

Abstrak

Penelitian ini mengkaji kondisi teknis menara Air Traffic Control (ATC) di Bandara Halu Oleo, Kendari, dengan fokus pada fondasi dan struktur bangunan. Pemilihan bangunan ini didasarkan pada kebutuhan mendesak untuk memastikan keamanan dan kelayakannya di wilayah rawan gempa, khususnya setelah gempa dahsyat di Palu pada tahun 2018. Penelitian ini mencakup lingkup pengujian lapangan yang komprehensif, termasuk survei visual, pengujian tanah menggunakan uji sondir dan bor tangan, serta pengujian non-destruktif seperti uji hammer test, pengukuran UPV, dan pendeteksian tulangan. Pemilihan metode ini disesuaikan dengan kebutuhan operasional bangunan tersebut. Analisis lapangan dan laboratorium menunjukkan adanya kekurangan signifikan dalam kepatuhan struktur terhadap standar kekuatan beton yang diperlukan untuk bangunan tahan gempa. Selain itu, lendutan pada struktur tidak memenuhi kriteria yang diperlukan untuk kinerja optimal selama peristiwa seismik. Analisis Metode Elemen Hingga pada struktur atas dan fondasi menunjukkan bahwa kapasitas daya dukung fondasi tidak memadai untuk beban gempa yang diperlukan, sementara periode alami struktur atas melebihi persyaratan standar. Untuk semua skenario gempa yang dipertimbangkan, struktur gagal memenuhi

Kata kunci: Penilaian; Kondisi Teknis; Kapasitas Kekuatan; Kinerja Bangunan; Resiko Gempa.

kriteria lendutan dan kekuatan, sehingga hanya mencapai tingkat kinerja **Immediate Occupancy – Life Safety**. Ini menunjukkan bahwa meskipun struktur aman untuk digunakan, diperlukan perawatan dan perbaikan untuk mencapai tingkat kinerja yang lebih baik. Rekomendasi perbaikan mencakup penguatan seluruh struktur, mulai dari fondasi hingga bagian atas, dengan material konstruksi yang memenuhi standar gempa, atau membangun gedung ATC baru yang sesuai dengan peraturan saat ini. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan pendekatan alternatif untuk mengevaluasi bangunan kritis di wilayah rawan gempa.

1. PENDAHULUAN

Dalam hal kegempaan, faktor keutamaan suatu gedung akan sangat menentukan besaran gaya yang akan diberikan pada struktur. Gedung dengan tingkat keutamaan yang penting diharapkan tetap beroperasi dalam situasi darurat, untuk menjadi media dalam pertolongan terhadap korban dan revitalisasi infrastruktur [1]. Perencanaan konstruksi gedung yang memiliki faktor keutamaan sangat penting terkait kegempaan haruslah memperhatikan beberapa aspek krusial. Pertama, pemilihan material bangunan yang sesuai dengan standar kegempaan yang berlaku, seperti beton bertulang dan baja struktural yang memiliki kekuatan dan elastisitas yang cukup untuk menahan gaya-gaya gempa. Kedua, desain struktur yang memperhitungkan mekanisme redistribusi beban dan pemilihan sistem tahan gempa yang sesuai dengan kondisi lokal, seperti sistem rangka pemikul momen [2], [3] atau dinding geser [4], [5]. Selain itu, perlu juga mempertimbangkan faktor-faktor seperti topografi lokasi, jenis tanah, dan potensi gempa di daerah tersebut untuk menghasilkan bangunan yang aman dan tahan gempa [6]–[8].

Di Indonesia, beberapa wilayah mengalami kesulitan dalam mengikuti perkembangan perubahan peraturan teknis bangunan gedung yang cepat. Faktor-faktor seperti kurangnya pemahaman akan pentingnya kepatuhan terhadap aturan baru [9], keterbatasan sumber daya manusia dan keuangan [10], serta kurangnya pemantauan dan penegakan hukum [11], [12] dapat menjadi penyebab utama. Beberapa studi melaporkan keengganan untuk berubah terkait pada interkasi aktif dari pemangku kebijakan dan pelaku serta keadilan yang menyertainya [13], [14]. Hal ini menyebabkan beberapa wilayah masih menggunakan peraturan lama dalam pembangunan, bahkan ketika aturan baru yang lebih ketat telah diterapkan. Terkadang, hal ini juga berdampak pada ketidakpatuhan terhadap kaidah baru terkait kegempaan, yang menjadi perhatian penting mengingat Indonesia merupakan negara dengan risiko gempa yang tinggi. Penulis juga telah beberapa kali melaporkan terkait hal serupa [15], [16]. Oleh karena itu, diperlukan upaya yang lebih serius dari pemerintah dan pemangku kepentingan terkait untuk meningkatkan pemahaman, pemantauan, dan penegakan aturan guna memastikan keselamatan bangunan dan penghuninya.

Kejadian gempa bumi di Palu pada tanggal 28 September 2018 yang lalu, telah membangkitkan kesadaran banyak pihak tentang pentingnya keamanan bangunan terhadap risiko bahaya gempa bumi yang dapat mengakibatkan korban jiwa dan/atau terhentinya kegiatan-kegiatan penting dalam suatu institusi. Bahwa dalam gempa palu, juga telah terjadi korban jiwa pada petugas ATC Bandara Mutiara. Wilayah Sulawesi Tenggara juga termasuk wilayah yang cukup rawan terjadi gempa, berdasarkan peta risiko gempa yang dikeluarkan oleh Kementerian PUPR. Tercatat 5 (lima) kejadian gempa dengan skala 2 – 5 SR telah terjadi di wilayah ini pasca gempa Lombok dan gempa Palu.

Menindak lanjuti hal tersebut, pihak AirNav Indonesia cabang Kendari bekerja sama dengan Program Studi D-III Teknik Sipil - Universitas Haluoleo melakukan kegiatan investigasi teknis dan assessment terhadap kondisi pondasi serta struktur eksisting dari menara ATC Bandara Halu Oleo. Dan apabila ditemukan ketidaklayakan pondasi dan struktur bangunan, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan rekomendasi perbaikan yang dapat dilakukan untuk menjamin keamanan dan kelayakan struktur pondasi dan struktur tersebut, ataupun rekomendasi untuk membangun baru sesuai dengan standar-standar yang berlaku.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan panduan alternatif dalam melakukan penilaian terhadap gedung eksisting dengan kategori keutamaan dimaksud.

2. METODE

2.1 Ruang Lingkup

Ruang lingkup pekerjaan dalam penelitian ini mencakup dua bagian utama. Pertama, adalah pengujian di lapangan, yang meliputi survei/investigasi visual, pengujian tanah dengan sondir dan hand-boring, serta pengujian non-destructive seperti hammer test, UPV dan rebar locator. Kedua, adalah analisis hasil pengujian dan analisis struktur untuk mengetahui kondisi pondasi dan struktur eksisting. Hasil analisis ini akan menentukan kelayakan bangunan dan metode perbaikan serta perkuatan yang diperlukan agar bangunan tersebut memenuhi standar yang berlaku.

Bangunan yang menjadi objek studi adalah gedung menara *air traffic control* AirNav Bandara Halu Oleo Kendari. Gedung ini terletak pada Kecamatan Ranommeto, Kabupaten Konawe Selatan, Provinsi Sulawesi Tenggara. Gedung ini telah dibangun sejak tahun 2006. Dan tidak adanya dokumen berupa dokumen perencanaan lengkap serta gambar *as built drawing* menjadi asumsi awal bahwa gedung ini tidak direncanakan dengan patut sesuai standard yang berlaku.

Adapun peraturan-peraturan teknis yang dijadikan kriteria penilaian dan metode pengujian lapangan adalah:

- ASCE 41-17 “*Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Building*”
- SNI 2847:2013/2019 “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung”
- SNI 1726:2012/2019 “Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung”
- ASTM A706M/A706M-14 “*Standard Specification for Deformed and Plain Low-Alloy Bars for Concrete Reinforcement*”
- ASTM A615M/A615M-09 “*Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement*”

2.2 Pengujian Lapangan

Pengujian lapangan diawali dengan pengamatan visual untuk menentukan strategi penentuan titik. Pada tahap awal sebuah penelitian, pengamatan visual merupakan langkah penting untuk memulai pemahaman terhadap karakteristik struktur bangunan. Sasaran dari survei atau pemeriksaan global pada pondasi dan struktur eksisting adalah untuk memahami karakteristik struktur, memilih area yang akan diperiksa secara detail, dan menentukan teknik pengujian yang tepat. Langkah-langkah yang dilakukan pada tahap ini meliputi pemeriksaan visual dan pengukuran beda tinggi, pengambilan dokumentasi, pengamatan geometri, retak, dan kerusakan lainnya, serta penetapan lokasi pengambilan sampel, sondir, dan hand boring.

Pengamatan visual menjadi kunci untuk mengidentifikasi permasalahan awal yang terjadi pada struktur bangunan. Pada tahap ini, dilakukan deteksi terhadap hal-hal yang tidak normal, seperti penurunan elevasi dari kolom, retak pada beton, penutup beton yang terkelupas, serta kondisi baja tulangan yang berkarat atau putus. Hasil dari pengamatan visual ini akan memberikan rekomendasi penentuan titik uji yang akan menjadi landasan untuk langkah-langkah pengujian lebih lanjut.

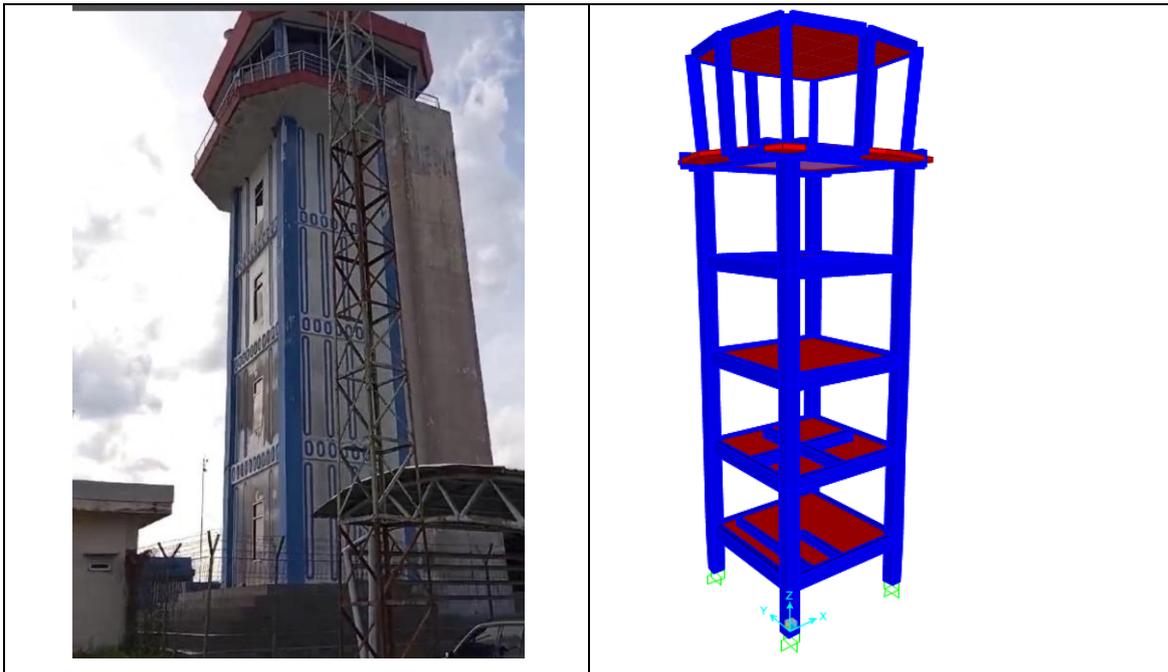
Pengujian tanah dilakukan pada 2 titik sondir dan 1 titik bor dangkal (*handbor*) yang mengikuti ASTM D. Sementara itu, dilakukan pula pengujian elevasi untuk memeriksa apakah terjadi penurunan pada struktur atas atau tidak. Untuk struktur atas dilakukan pengujian hammer test pada tahun 2018, kemudian dilakukan

kembali pengukuran dengan UPV Test pada tahun 2022 untuk menguji validitasnya. *Destructive test* semisal *core drill* tidak dilakukan untuk kenyamanan operasional, dan diharapkan penggunaan kedua metode uji *non destructive test* cukup mewakili mutu kuat tekan beton.

2.3 Metode Analisis

Dalam analisis struktur atas dan pondasi, langkah pertama adalah memahami sifat struktur berdasarkan temuan hasil uji lapangan. Analisis ini dilakukan dalam dua tahap utama. Pertama, adalah analisis hasil uji laboratorium yang menghasilkan data kualitatif dan kuantitatif tentang material yang digunakan dalam struktur. Kedua, adalah analisis menggunakan program berbasis Metoda Elemen Hingga (FEM) yang memungkinkan untuk memodelkan struktur secara digital dan melakukan simulasi terhadap berbagai kondisi beban.

Pemodelan struktur (gambar 1) secara umum dilakukan untuk memahami kinerja bangunan saat terkena gaya gempa nominal rencana. Kriteria pemodelan didasarkan pada periode alami struktur, *performance level*, dan kapasitas elemen terhadap gaya-gaya dalam yang bekerja. Dasar penyusunan spectra gempa rencana seperti yang tercantum dalam peta resiko gempa 2017, yang kemudian diselaraskan dengan peta deagregasi gempa 2023. Hasil simulasi ini kemudian diuji terhadap metode-metode perbaikan yang diatur dalam standar atau peraturan yang berlaku. Dengan demikian, analisis struktur atas dan pondasi ini tidak hanya memungkinkan untuk mengetahui kondisi struktur eksisting, tetapi juga memberikan panduan dalam menentukan metode perbaikan yang efektif dan sesuai dengan standar yang berlaku.



Gambar 1. Struktur eksisting dan pemodelan

3. PENGUJIAN DAN INTERPRETASI HASIL

3.1 Pengujian Visual dan Beda Tinggi

Investigasi visual merupakan tahapan pertama dalam pekerjaan investigasi. Tujuan dari investigasi visual adalah untuk memahami karakteristik dan kondisi struktur eksisting. Hasil dari investigasi visual ini kemudian digunakan untuk memilih jenis pengujian lapangan yang sesuai dan menentukan lokasi pengujian yang tepat. Selain itu, pengukuran beda tinggi dilakukan untuk mengevaluasi penurunan kolom struktur

secara keseluruhan, yang menjadi penting untuk menentukan lokasi titik penyelidikan sondir dan hand boring.

Hasil pengukuran beda tinggi menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan tinggi antar titik dalam satu lantai. Oleh karena itu, penentuan titik-titik sondir dan hand boring dilakukan pada titik yang berseberangan. Hal ini dilakukan untuk memastikan representasi yang baik dari kondisi lantai tersebut, sehingga hasil pengujian dapat memberikan informasi yang akurat tentang kondisi struktur dan tanah di lokasi tersebut.

3.2 Pengujian Tanah

Dari dua titik pengujian Sondir di lokasi yang dimaksud, kedalaman pengujian di mana nilai hambatan konus (q_c) mencapai 150 kg/cm^2 dari satu titik pengujian dapat dilihat pada Tabel 1. Selain itu, informasi tambahan tentang kondisi cuaca saat pengujian dilakukan adalah cerah. Untuk memvisualisasikan profil tanah dari data hasil pengujian Sondir, dilakukan analisis data yang kemudian disajikan dalam bentuk grafik dengan indikasi pembacaan hambatan konus (q_c), total hambatan pelekat (*cumulative friction*, f_c), *friction ratio* (f_r), dan *side friction* (f_s).

Tabel 1. Kedalaman tanah keras dari interpretasi hasil pengujian Sondir

No. Titik Pengujian	Simbol	Kedalaman ($q_c \geq 150 \text{ kg/cm}^2$) (m)	Kedalaman Pengujian (m)	q_c sampai pada kedalaman pengujian (kg/cm^2)
Sondir 1	SO-1	3.0	3.2	180
Sondir 2	SO-2	4.6	4.8	175

Deskripsi kondisi geoteknis pada titik pengujian BH-1 adalah sebagai berikut: untuk kedalaman $0 - 0.25\text{m}$, tanah berupa lempung/lanau berwarna coklat kehitam-hitaman. Pada kedalaman $0.25 - 1\text{m}$, tanah adalah lempung/lanau berwarna kuning dan mengandung kerikil. Sedangkan pada kedalaman $1 - 2\text{m}$, tanah berupa lempung/lanau berwarna kuning kemerah-merahan dan juga mengandung kerikil. Hasil pengujian ini direpresentasikan dalam bentuk bor log yang dapat dilihat pada Gambar 2. Selanjutnya, diambil satu sampel DS pada kedalaman $2 - 2.5\text{m}$ untuk deskripsi kondisi geoteknis lebih lanjut di titik pengujian BH-1, dimana diperoleh *engineering properties* antara lain kuat tekan bebas $231,47 \text{ kN/m}^2$, kohesi $0,16 \text{ gr/cm}^2$ serta sudut geser dalam sebesar $14,88^\circ$.

		KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI UNIVERSITAS HALU OLEO PROGRAM PENDIDIKAN VOKASI DIVISI KETEKNIKSIPILAN BENGKEL VOKASI Jl. HEA. Mokodompit Kampus Bumi Tridarma Anduonohu, Kendari	
		Project : Analisis Kelayakan Struktur Gedung ATC Bandara Halu Oleo	Weather : Cerah
Location : Kecamatan Ranomeeto, Kabupaten Konawe Selatan		Date : 29 November 2018	
Test No. : BH-01		Tested By : Ichsan Arisandi	
Elevation : -			
DATA BORING LOG			
Kedalaman (m)	Muka Air Tanah	Sampel	Deskripsi & Klasifikasi Tanah & Batuan
0.5			Lempung/lanau, coklat kehitam-hitaman
1			Lempung/lanau, kuning, kerikil
1.5			Lempung/lanau, kuning kemerah-merahan, kerikil
2			
2.5			Undisturbed Sample (UDS)
3			END OF BORE HOLE
LEGENDA :  = MUKA AIR TANAH  = SAMPEL TANAH		Elevasi Banjir : Muka Air Tanah Tertinggi : Meter Catatan : Bila tidak ditemukan air tanah hingga kedalaman 6,00 m, lihat sumur penduduk sekitar lokasi. Pastikan muka air tanah tertinggi merupakan elevasi air tanah tertinggi di site ini, atau elevasi air sumur tertinggi di sekitar site ini.	

Gambar 2. Bor log hasil pengujian BH-1

3.3 Pengujian Struktur Atas

Berdasarkan investigasi visual, terdapat retak beton pada dinding struktur penahan tanah di lantai dasar tower. Retak tersebut memiliki panjang dan lebar yang signifikan, hampir melingkari dinding dengan lebar retak mencapai 3-5 cm. Standar kualitas tulangan untuk struktur dengan karakteristik desain (KDS) D, E, F sebagaimana dijelaskan dalam pasal 21.1.5 dari Standar Nasional Indonesia (SNI) 2847:2013 menetapkan bahwa tulangan yang menahan lentur dan aksial, atau keduanya, yang muncul akibat beban gempa harus sesuai dengan standar ASTM A706M dengan kekuatan mutu 420 Mpa. Namun, untuk struktur tower ini, tidak ada informasi mengenai mutu tulangan yang digunakan. Hanya ada indikasi bahwa struktur ini tidak memenuhi persyaratan mutu tulangan yang dipersyaratkan pada saat pembangunan dan standar tipikal struktur yang dibangun bersamaan pada tahun 2006.

Tabel 2 menyajikan hasil terkait kuat tekan beton dengan uji *rebound hammer*. Hasil pengujian menggunakan rebound hammer menunjukkan bahwa kualitas material beton di permukaan cukup bervariasi, dengan beberapa kolom memiliki kuat tekan karakteristik di bawah 20 MPa. Hal ini tidak memenuhi persyaratan dari SNI yang menetapkan kuat tekan minimum beton untuk struktur bangunan tahan gempa sebesar 20 MPa, terutama untuk struktur dengan Kategori Desain Seismic (KDS) D, E, dan F, yang dijelaskan secara rinci dalam Pasal 21.1.4, SNI 2847:2013. Namun, terdapat juga titik-titik pengujian yang memberikan hasil kuat tekan cukup besar, bahkan mencapai 46 MPa. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh

posisi pengujian yang bertepatan dengan posisi tulangan. Oleh karena itu, secara rata-rata, mutu beton yang digunakan dalam struktur ini kurang dari 20 MPa.

Tabel 2. Hasil pengujian hammer test dengan metode *10th percentile curve*

No	Status	Mean value	Unit	Valid	Total	Std dev.
1	Valid	9.5	MPa	10	10	1.0
2	Valid	26.5	MPa	11	11	7.5
3	Valid	46.0	MPa	10	10	8.0
4	Valid	18.0	MPa	13	13	3.3
5	Valid	18.0	MPa	11	11	2.0
6	Valid	15.5	MPa	10	10	2.0
7	Valid	14.5	MPa	10	10	1.8
8	Valid	29.0	MPa	10	10	2.5
9	Valid	20.5	MPa	12	12	2.3
10	Valid	17.0	MPa	13	13	4.3
11	Valid	9.0	MPa	5	5	2.5

Tabel 3. Hasil pengujian *ultrasonic pulse velocity (UPV)* pada kolom lantai 1

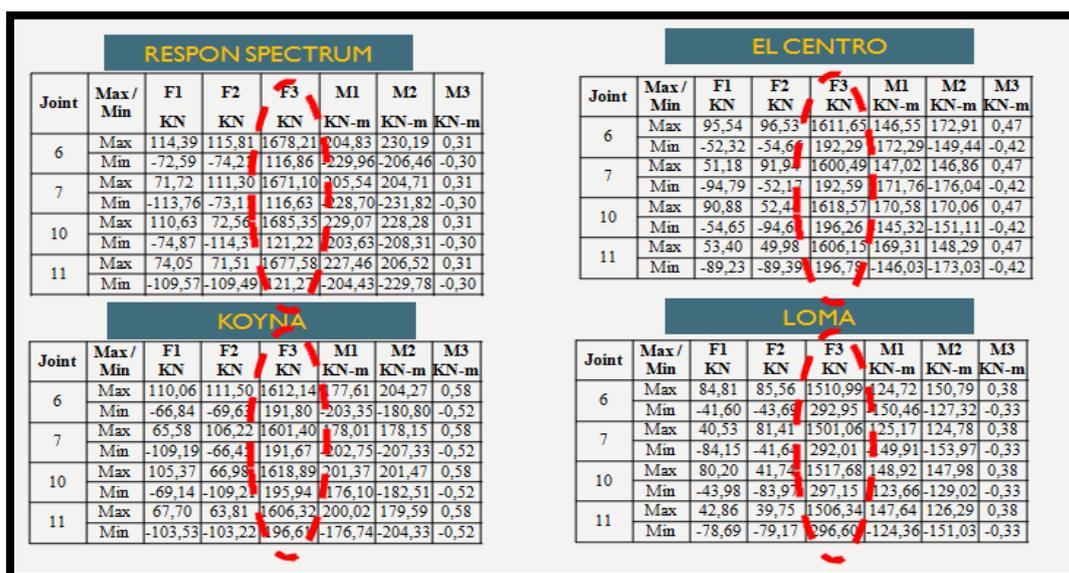
Member	Velocity (km/s)	Metode Transmisi	Kualitas Beton	Prediksi Kuat Tekan (Mpa)
K1	3,78	Direct	Good	16,7
K2	3,77	Direct	Good	16,6
K3	3,57	Direct	Good	14,1

Sementara itu, dilakukan pengujian kembali pada tahun 2022 untuk memastikan validitas metode pengujian kuat tekan sebelumnya. Hasilnya memberikan konfirmasi akurasi nilai kuat tekan sebelumnya.

4. ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Struktur Bawah

Analisis struktur bawah dilakukan dengan membandingkan reaksi perletakan untuk kondisi maksimum pada respon spectra, dan non linear time history analysis dengan menggunakan 3 rekaman gempa yakni, gempa el-centro, loma dan koyna. Reaksi perletakannya dapat dilihat pada gambar 3. Sedangkan perhitungan daya dukung tanah disajikan dalam tabel 4.



Gambar 3. Reaksi perletakan untuk kondisi layan pada struktur

Tabel 4. Perhitungan daya dukung ijin tanah

Titik Sondir	Lebar fondasi	Kedalaman D (m)	Faktor kedalaman Kd	Rata-rata q_c 0 - B kg/cm^2	Kap. Daya dukung ijin netto	
	B (m)				kg/cm^2	kN/m^2
Sondir 01 (SO-01)	1.0	1.0	1.33	49.167	3.349	328.421
		1.5	1.50	53.222	8.404	824.209
	1.5	1.0	1.22	56.667	6.222	610.192
		1.5	1.33	88.333	10.574	1036.943
Sondir 02 (SO-02)	1.0	1.0	1.33	48.667	6.837	670.480
		1.5	1.33	52.444	7.367	722.527
	1.5	1.0	1.33	55.833	6.683	655.426
		1.5	1.33	59.444	7.116	697.817

Selain itu, dilakukan juga analisis dengan software ALLPILE V.6.0 untuk memvalidasi metode perhitungan daya dukung pondasi dangkal. Berdasarkan hasil tersebut, tampak bahwa kapasitas vertikal pondasi belum cukup memenuhi untuk beban gempa rencana untuk seluruh skenario kombinasi pembebanan kegempaan. Dan daya dukung horisontalnya juga terkonfirmasi serupa.

4.2 Struktur Atas

Berdasarkan tinggi dan tipe bangunan, maka rentang periode alami struktur yang diijinkan adalah $0.753 \text{ detik} < T_n < 1.053 \text{ detik}$, sedangkan struktur tower memiliki periode alami melampaui persyaratan tersebut, yakni 1.481 detik. Pasal 7.9.1 SNI 1726:2012 juga menyebutkan bahwa Analisis harus mencakup jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan kombinasi partisipasi massa setidaknya 90 % dari massa aktual dalam setiap arah horizontal ortogonal dari respons yang diolah oleh model, seperti yang ditunjukkan dalam tabel 5.

Tabel 5. Periode alami dan partisipasi massa

Mode	Kondisi Teraman			Kondisi Terburuk		
	Period	SumUX	SumUY	Period	SumUX	SumUY
1	1,464	0,798	0,000	1,481	0,800	0,000
2	1,463	0,798	0,798	1,480	0,800	0,800
3	0,972	0,798	0,798	0,988	0,800	0,800
4	0,426	0,891	0,798	0,430	0,890	0,800
5	0,425	0,891	0,890	0,430	0,890	0,890
6	0,281	0,891	0,890	0,284	0,890	0,890
7	0,263	0,910	0,892	0,264	0,910	0,890
8	0,262	0,912	0,912	0,264	0,910	0,910
9	0,193	0,912	0,912	0,193	0,910	0,910
10	0,174	0,912	0,912	0,175	0,930	0,910
11	0,173	0,936	0,912	0,175	0,930	0,930
12	0,173	0,936	0,936	0,174	0,930	0,930

Hasil analisis simpangan struktur untuk respon spectra dan NLTHA disajikan pada tabel 6 dan 7, dimana terdapat beberapa lantai yang tidak memenuhi syarat simpangan.

Tabel 6. Simpangan struktur akibat spektra desain

Tingkat	H (m)	δ_{xe} (mm)		δ_x (mm)		δ (mm)		δ_s / ρ (mm)
		X	Y	X	Y	X	Y	
6	22	75,8	75,76	277,97	277,79	24,05	24,09	46,15
5	18	69,25	69,19	253,92	253,70	41,65	41,65	46,15
4	14	57,89	57,83	212,26	212,04	61,42	61,45	46,15
3	10	41,14	41,07	150,85	150,59	72,20	72,16	46,15
2	6	21,45	21,39	78,65	78,43	66,04	65,89	46,15
1	2	3,44	3,42	12,61	12,54	12,61	12,54	23,08

Tabel 7. Simpangan Struktur Akibat NLTHA

Tingkat	El Centro		Koyna		Loma		δ_s / ρ (mm)
	δ (mm)		δ (mm)		δ (mm)		
	X	Y	X	Y	X	Y	
6	40,99	41,07	21,52	21,47	21,52	21,52	46,15
5	52,80	53,24	59,00	58,87	33,26	33,29	46,15
4	61,09	62,48	90,24	90,11	47,56	47,41	46,15
3	216,66	215,89	97,72	97,33	54,27	54,27	46,15
2	-64,61	-64,31	92,53	92,22	51,92	51,74	46,15
1	-12,06	-11,95	17,29	17,16	9,42	9,31	23,08

Dari sisi kekuatan, maka evaluasi terhadap kolom dan balok juga memberikan beberapa indikasi bahwa penampang yang ada, tidak mampu menahan beberapa beban rencana. Sedangkan dari sisi kinerja, Secara umum, kinerja struktur berada pada level *Immediate Occupancy* dan *Life Safety*. hal ini tentu saja tidak sesuai harapan dimana struktur ATC tower seharusnya tetap berada pada level *operational* pada saat gempa rencana terjadi. Kapasitas momen lentur dari penampang balok rencana (251 kN-m) juga tidak memenuhi momen lentur yang terjadi akibat gaya gempa rencana, yakni sebesar 325 kN-m.

Penilaian kinerja struktur bangunan penting seperti tower *Air Traffic Control* (ATC) di bandara pada kondisi ekstrim memiliki signifikansi yang besar dalam memastikan keselamatan dan kehandalan bangunan tersebut. Dalam studi oleh Cao et al. [17], mereka menekankan bahwa evaluasi kinerja bangunan pada kondisi ekstrim seperti gempa bumi harus memperhitungkan aspek kekuatan dan simpangan struktur yang memadai. Namun, terdapat tantangan dalam memenuhi persyaratan kekuatan dan simpangan struktur yang ketat, seperti yang dinyatakan dalam SNI untuk kuat tekan minimum beton. Beberapa studi lain [18], [19] juga menunjukkan bahwa kualitas material beton yang bervariasi dapat mempengaruhi kinerja struktur pada kondisi gempa, dengan beberapa bagian struktur mungkin tidak memenuhi standar kekuatan yang diperlukan.

Dalam konteks ini, perbandingan dengan level kinerja bangunan penting seperti tower ATC di bandara pada kondisi ekstrim dapat menggambarkan terkait pentingnya memastikan kepatuhan terhadap persyaratan kekuatan dan simpangan struktur. Studi lebih lanjut dapat mengeksplorasi dampak dari ketidakpatuhan terhadap persyaratan ini terhadap keselamatan dan kinerja bangunan pada kondisi ekstrim, serta strategi perbaikan yang dapat diterapkan untuk melakukan revitalisasi kinerja struktur untuk menghadapi ancaman gempa bumi dan kondisi ekstrem lainnya.

5. KESIMPULAN

Gambaran daya dukung ijin tanah (Q_{ijin}) fondasi pada titik pengujian menunjukkan variasi nilai tergantung pada kedalaman dan lebar fondasi. Namun, kapasitas daya dukung pondasi tidak dapat memikul gaya gempa rencana yang terjadi, yang mengindikasikan bahwa fondasi tidak memenuhi persyaratan untuk tahan gempa. Kondisi ini juga tercermin pada material beton dan tulangan yang tidak memenuhi kriteria untuk tahan gempa. Untuk semua skenario gempa rencana, struktur tidak memenuhi syarat untuk simpangan (*serviceability*) dan kekuatan (*strength*), sehingga kinerja struktur berada pada level *Immediate Occupancy – Life Safety*, yang berarti bahwa struktur dapat digunakan untuk operasional tetapi perlu pemeliharaan dan perbaikan untuk mencapai kondisi kinerja yang lebih baik.

Untuk memenuhi semua persyaratan dari SNI, diperlukan perkuatan yang massif mulai dari struktur bawah (pondasi) hingga struktur atas. Perkuatan ini tidak hanya mencakup penggunaan material konstruksi yang lebih kuat dan tahan gempa, tetapi juga mungkin melibatkan penggunaan teknologi konstruksi modern seperti base isolators atau sistem dinding geser yang dapat meningkatkan kinerja bangunan dalam menghadapi gempa bumi. Namun, perlu dicatat bahwa perkuatan semacam ini biasanya memerlukan investasi yang signifikan karena teknologi dan material yang digunakan cenderung mahal. Alternatif lain yang lebih efisien mungkin adalah dengan membangun gedung ATC baru yang memenuhi persyaratan dan ketentuan yang berlaku sejak awal perencanaan dan konstruksi. Dengan demikian, gedung baru dapat dirancang dan dibangun sesuai dengan standar terbaru dalam hal kekuatan, ketahanan gempa, dan kinerja struktural lainnya, mengurangi risiko dan biaya perbaikan struktur lama yang tidak memenuhi standar.

UcapanTerima Kasih

Penulis mengucapkan teima kasih kepada pihak AirNav Bandara Halu Oleo yang telah mendanai studi ini. Apresiasi juga penulis haturkan kepada Filzah dan Saleh yang telah membantu dalam analisis NLTHA, juga kepada PT. RMR dan RCM yang telah membantu dalam proses pengujian lapangan.

Daftar Pustaka

- [1] P. Daly *et al.*, “Rethinking relief, reconstruction and development: Evaluating the effectiveness and sustainability of post-disaster livelihood aid,” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 49, p. 101650, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101650>.
- [2] Z. Huang, L. Cai, Y. Pandey, Y. Tao, and W. Telone, “Hysteresis effect on earthquake risk assessment of moment resisting frame structures,” *Eng. Struct.*, vol. 242, p. 112532, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112532>.
- [3] T. Ishida *et al.*, “Experimental study on full-scale steel moment-resisting frames with nonstructural walls subjected to multiple earthquakes,” *Eng. Struct.*, vol. 242, p. 112549, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112549>.

- [4] W. Al Agha and N. Umamaheswari, "Analytical study of irregular reinforced concrete building with shear wall and dual Framed-Shear wall system by using Equivalent Static and Response Spectrum Method," *Mater. Today Proc.*, vol. 43, pp. 2232–2241, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.525>.
- [5] T. A. Ozkul, A. Kurtbeyoglu, M. Borekci, B. Zengin, and A. Kocak, "Effect of shear wall on seismic performance of RC frame buildings," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 100, pp. 60–75, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.02.032>.
- [6] J. Sucasaca and E. Sáez, "Topographical and structure-soil-structure interaction effects on dynamic behavior of shear-wall buildings on coastal scarp," *Eng. Struct.*, vol. 247, p. 113113, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113113>.
- [7] M. J. Shabani, M. Shamsi, and M. Zakerinejad, "Slope topographic impacts on the nonlinear seismic analysis of soil-foundation-structure interaction for similar MRF buildings," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 160, p. 107365, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107365>.
- [8] A. Martin and G. G. Deierlein, "Structural topology optimization of tall buildings for dynamic seismic excitation using modal decomposition," *Eng. Struct.*, vol. 216, p. 110717, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110717>.
- [9] C. Herfeld and C. Lisciandra, "Knowledge transfer and its contexts," *Stud. Hist. Philos. Sci. Part A*, vol. 77, pp. 1–10, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2019.06.002>.
- [10] M. Barak and A. Levenberg, "Flexible thinking in learning: An individual differences measure for learning in technology-enhanced environments," *Comput. Educ.*, vol. 99, pp. 39–52, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.04.003>.
- [11] Anton, Ediwarman, Madiasa, and M. Hamdan, "Law enforcement on the issuance of construction permits violating spatial planning in Medan City," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 452, no. 1, p. 12073, Apr. 2020, doi: [10.1088/1755-1315/452/1/012073](https://doi.org/10.1088/1755-1315/452/1/012073).
- [12] S. D. Kebede and T. Zhang, "Enforcement of legal remedies against construction projects time overrun in Ethiopia: A critical appraisal," *Heliyon*, vol. 6, no. 10, p. e05126, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05126>.
- [13] J. P. Krügel and S. Traub, "Reciprocity and resistance to change: An experimental study," *J. Econ. Behav. Organ.*, vol. 147, pp. 95–114, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jebo.2017.12.017>.
- [14] K. W. Khaw, A. Alnoor, H. AL-Abrow, V. Tiberius, Y. Ganesan, and N. A. Atshan, "Reactions towards organizational change: a systematic literature review," *Curr. Psychol.*, vol. 42, no. 22, pp. 19137–19160, 2023, doi: [10.1007/s12144-022-03070-6](https://doi.org/10.1007/s12144-022-03070-6).
- [15] M. Kimsan, "RE-DESAIN BETON JACKETING UNTUK MENCAPAI MUTU Studi Kasus : Kolom & Rak Stoplog PLTA Musi - Bengkulu," *STABILITA*, vol. 11, no. 1, pp. 35–43, 2023, [Online]. Available: https://ojs.uho.ac.id/index.php/stabilita_jtsuho.
- [16] M. Kimsan, S. Meilani, and M. Rizal, "TINJAUAN PERENCANAAN DETAIL STRUKTUR KOLOM PADA REVITALISASI TERMINAL PENUMPANG TYPE A PUUWATU TERHADAP SNI 2847-2019," *Media Konstr.*, vol. 7, no. 3, pp. 141–146, 2022.
- [17] X.-Y. Cao, D. Shen, D.-C. Feng, C.-L. Wang, Z. Qu, and G. Wu, "Seismic retrofitting of existing frame buildings through externally attached sub-structures: State of the art review and future perspectives," *J. Build. Eng.*, vol. 57, p. 104904, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104904>.
- [18] Y. Pang, L. Cai, H. Ouyang, and X. Zhou, "Seismic performance assessment of different fibers reinforced concrete columns using incremental dynamic analysis," *Constr. Build. Mater.*, vol. 203, pp. 241–257, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.087>.
- [19] J. Zhang, C. Li, X. Rong, X. Zhang, and Y. Li, "Experimental study on the seismic performance of steel–concrete beam–column connections for prefabricated concrete frames," *J. Build. Eng.*, vol. 43, p. 103236, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103236>.

Halaman ini sengaja dikosongkan