



ANALISIS PERILAKU STRUKTUR GEDUNG KANTOR DENGAN METODE RESPON	59
SPEKTRUM STUDI KASUS: KANTOR BPKAD PROVINSI SULAWESI TENGAH	
<i>Arzal M. Zain, Wahiduddin Basry, Eko Widodo, Fadli</i>	
STUDI NORMALISASI SUNGAI PADA SUNGAI PALU	67
<i>Sulfiati, Dewi Ayu Setiawati, Yulfin Tanduk Allo Biyang</i>	
EVALUASI PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PADA PEKERJAAN PEMBANGUNAN RUAS	77
JALAN BORA-PANDERE DI KABUPATEN SIGI	
<i>Eko Widodo, Ahmad Solihin Ansari, Devi Eka Ikhwana</i>	
ANALISIS STABILITAS LERENG BERDASARKAN NILAI STANDARD PENETRATION TEST	85
PADA PROYEK JALAN TOL JAKARTA – CIKAMPEK PAKET 2B RUAS SUKARAGAM	
SUKABUNGAH STA 30+450	
<i>Muhammad Rafi Basyar, Ilham, Arzal M. Zain</i>	
ANALISIS KINERJA SEISMIK STRUKTUR GEDUNG TIDAK BERATURAN	93
MENGGUNAKAN METODE PUSHOVER ANALYSIS	
<i>Elza Zeanti Slamet, Euneke Widyaningsih</i>	
STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER AKIBAT PENGARUH	103
LIMBAH ABU TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI BINDER	
<i>Erma Desmaliana, Muhammad An Dharu, Ratih Dewi Shima</i>	



# Jurnal surya Teknika

Volume 2 Edisi 2 (Desember 2025)

ISSN 3063-055X

## Pimpinan Editor

Ir. Arzal M. Zain, S.T., MT.

Universitas Muhammadiyah Palu

## Dewan Editor

Ir. Wahiduddin Basry, S.T., M.T.

Universitas Muhammadiyah Palu

Andi Rizal, S.T., M.T.

Universitas Tadulako

Ir. H. Eko Widodo, S.T., M.T.

Universitas Muhammadiyah Palu

Nursalim, S.Kom., M.Kom.

Universitas Muhammadiyah Palu

Budi Mulyono, S.Kom., M.Kom.

Universitas Muhammadiyah Palu

## Reviewer

Prof. Dr. H. Rajindra, S.E., M.M.

Universitas Muhammadiyah Palu

Prof. Dr. Ir. Galib Ishak, M.S.

Universitas Tadulako

Prof. Dr. H. Zakir Sabara, S.T., M.T.

Universitas Muslim Indonesia

Dr. Ir. Muhammad Yazdi Pusadan, S.Kom., M.Eng.

Universitas Tadulako

Dr. Astuti Masdar, S.T., M.T.

Sekolah Tinggi Teknologi Payakumbuh

Jurnal Surya Teknika (JST) adalah jurnal teknik enam bulanan. JST berfokus pada bidang teknik dan ilmu sains lain yang berkaitan dengan permasalahan teknik.

## ANALISIS PERILAKU STRUKTUR GEDUNG KANTOR DENGAN METODE RESPON SPEKTRUM STUDI KASUS: KANTOR BPKAD PROVINSI SULAWESI TENGAH

Arzal M. Zain<sup>\*1</sup>, Wahiduddin Basry<sup>1</sup>, Eko Widodo<sup>1</sup>, Fadli<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palu, Palu, Jalan Hang Tuah No. 114

\*Penulis korespondensi: achal1808@gmail.com

DISUBMIT 23 Juni 2025

DIREVISI 2 Februari 2026

DITERIMA 4 Februari 2026

**ABSTRAK** Indonesia merupakan salah satu negara kategori rawan gempa bumi, khususnya di daerah Kota Palu pada tahun 2018 silam mengalami bencana gempa bumi yang sangat dahsyat, diakibatkan adanya patahan sesar palu koro, sehingga mengakibatkan korban jiwa. hal itu karena berdekatan dengan tiga lempeng tektonik yang setiap saat dapat saling bertabrakan sehingga menghasilkan gempa tektonik. Dengan adanya kejadian gempa di Indonesia, maka dari itu diperlukan pengembangan analisis gempa terhadap struktur bangunan. Analisis respon spektrum merupakan salah satu metode yang digunakan dengan cara menganalisa hubungan antara periode struktur bangunan dengan nilai percepatan bangunan ketika terjadinya suatu gempa bumi. Penelitian ini menggunakan objek Gedung Kantor BPKAD Provinsi Sulawesi Tengah, yang bertujuan untuk mengetahui tingkat keamanan dari suatu gedung akibat beban gempa menurut SNI 1726-2019 yang menggunakan program SAP2000. Berdasarkan hasil analisis Gedung Kantor BPKAD Provinsi Sulawesi Tengah simpangan antar lantai dan gaya geser dasar berdasarkan analisis respon spektrum yaitu simpangan antar lantai yang terjadi pada struktur gedung lebih kecil dari pada simpangan antar lantai yang diizinkan. Adapun gaya geser yang terjadi pada struktur pada Gedung A arah X sebesar 795,684 kN dan pada arah Y sebesar 795,761 kN sedangkan Gedung B arah X sebesar 1280,082 kN dan pada arah Y sebesar 1280,235 kN, oleh karena itu struktur bangunan dinilai layak..

**KATA KUNCI** *respons spektrum, gaya geser dasar, perpindahan, simpangan antar lantai*

### 1 PENDAHULUAN

Indonesia merupakan daerah kategori rawan gempa salah satunya di Kota Palu dari sekian kota di Indonesia yang rawan terjadi bencana alam. Hal tersebut disebabkan oleh Pulau Sulawesi berdekatan dengan tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Pasifik, lempeng Filipina dan lempeng Australia. Sedangkan letak geografis Kota Palu berada tepat di jalur patahan sesar palu koro. Kondisi ini membuat Kota Palu menjadi daerah yang rawan terjadi gempa bumi. Menurut Pusat Studi Gempa Nasional (PuSGeN) Kota Palu dilanda gempa bumi yang kuat sejak tahun 1907, 1909, 1927, 1937, 1968, 2012 dan yang terakhir 2018. Gempa yang terjadi di tahun 2018 dengan kekuatan 7,4 M tidak hanya menyebabkan terjadinya tsunami, gempa juga menyebabkan terjadinya fenomena likuifaksi di beberapa daerah di Kota Palu.

Berada tepat di jalur patahan sesar palu koro, Kota Palu memiliki resiko tinggi untuk terjadi gempa bumi. Setiap gempa bumi yang terjadi akan memberikan ancaman

yang besar terhadap bangunan yang berada diatas permukaan tanah. Kondisi ini memungkinkan akan terjadi kerusakan pada bangunan gedung atau rumah tinggal tergantung seberapa kuatnya kekuatan dari bencana alam tersebut. Oleh karena itu struktur bangunan harus direncanakan mampu memikul simpangan serta gaya geser pada portal beton bertulang tersebut. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui simpangan serta gaya geser pada masing-masing jenis tanah dan apakah simpangan serta gaya geser tersebut memenuhi syarat berdasarkan regulasi yang ada.

Metode respon spektrum gempa rencana adalah metode yang akan digunakan dalam penelitian ini untuk menentukan respon spektrumnya. Dalam analisis dinamik metode respon spektrum hanya digunakan untuk menetapkan gaya geser tingkat nominal dinamik akibat pengaruh gaya gempa rencana.

**Analisis Respon Spektrum.** Analisis yang akan dilakukan pada gedung kantor BPKAD

Provinsi Sulawesi Tengah merupakan jenis analisis dinamis. Beban dinamik merupakan beban yang berubah-ubah menurut waktu dan arahnya. Contohnya getaran akibat gempa dimana terkadang terasa keras dan terkadang lemah. Arahnya pun kadang horizontal (kekanan dan kiri), kadang vertikal (naik turun). Metode analisis yang digunakan adalah metode respons spektrum.

Analisis respon spektrum adalah suatu metode analisis struktur dengan menyajikan spektrum berupa kurva antar periode struktur  $T$ , dengan respon-respon maksimum berdasarkan rasio redaman gempa tertentu.

Dalam SNI 1726-2019 (Badan Standardisasi Nasional (BSN), ditetapkan jenis tanah di Indonesia ada 6 kategori diantaranya; batuan keras (SA), batuan (SB), tanah keras (SC), tanah sedang (SD) tanah lunak (SE), dan tanah khusus (SF).

SNI 1726-2019 adalah standar nasional Indonesia dalam bidang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. Dalam SNI ini diberikan persyaratan minimum perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non-gedung.

Parameter percepatan spektral desain untuk periode pendek, SDS dan pada periode 1 detik, SD1, harus ditentukan melalui perumusan berikut ini:

$$S_{DS} = S_{MS}$$

$$S_{D1} = S_{M1}$$

Jika digunakan prosedur desain yang disederhanakan, maka nilai  $S_{DS}$  harus ditentukan dan nilai  $S_{D1}$  tidak perlu ditentukan.

**Gaya Geser.** Gaya geser dasar seismik ( $V$ ) merupakan keseluruhan dari gaya lateral akibat gaya gempa yang diterima oleh bangunan. Gaya geser dasar seismik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini.

$$V = C_s \times W$$

Keterangan:  $V$  = Gaya geser dasar seismik,  $C_s$  = Koefisien respon seismik,  $W$  = Berat seismik gedung efektif

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\left(\frac{R}{I_e}\right)}$$

Nilai  $C_s$  yang dihitung sesuai dengan persamaan tidak perlu melebihi hasil berikut ini.

$$\text{Untuk } T \leq T_L, \text{ Maka } C_s = \frac{S_{D1}}{T \left(\frac{R}{I_e}\right)}$$

$$\text{Untuk } T \geq T_L, \text{ Maka } C_s = \frac{S_{D1} T_L}{T^2 \left(\frac{R}{I_e}\right)}$$

$C_s$  harus tidak kurang dari  $C_s = 0,044 S_{DS} I_e \geq 0,01$ .

Keterangan:  $S_{D1}$  = parameter spektrum respons percepatan periode 1 detik,  $S_{DS}$  = parameter spektrum respons percepatan periode pendek,  $R$  = faktor modifikasi respons,  $I_e$  = faktor keutamaan gempa.

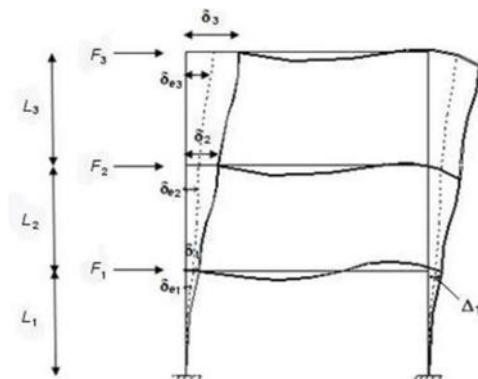
**Simpangan.** Menurut SNI 1726-2019 pasal 7.8.6, simpangan antar lantai hanya terjadi satu kinerja, yaitu pada kinerja batas ultimit. Analisis simpangan antar lantai tingkat rencana ( $\Delta$ ) dapat diperhitungkan sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa di tingkat paling atas dan paling bawah dari titik yang ditinjau. Jika letak pusat massa struktur bangunan tidak terletak satu garis garis dalam arah vertikal, maka diizinkan untuk menghitung defleksi di dasar tingkat berdasarkan proyeksi vertikal dari pusat massa di tingkat atasnya.

Defleksi pusat massa di Tingkat x ( $\delta x$ ) (mm) harus ditentukan sesuai dengan persamaan berikut:

$$\delta x = \frac{C_d \delta x_e}{I_e}$$

Keterangan:  $C_d$  = faktor pembesaran defleksi,  $\delta x_e$  = defleksi pada lokasi yang diisyaratkan dengan analisis elastis,  $I_e$  = faktor keutamaan gempa.

Simulasi penentuan simpangan antar lantai dapat di lihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1** Penentuan Simpangan Antar Lantai. (Sumber: SNI 1726-2019)

Keterangan:  $F_3$  = Gaya gempa desain tingkat kekuatan,  $\delta_{e3}$  = Perpindahan elastis yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan,  $\delta_3 = C_d \cdot \delta_{e3} / I_e$  = perpindahan yang diperbesar,  $\Delta_3 = (\delta_{e3} - \delta_{e2}) C_d / I_e \leq \Delta_a$ ,  $F_2$  = Gaya gempa desain tingkat kekuatan,  $\delta_{e2}$  = Perpindahan elastis yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan,  $\Delta_2 = (\delta_{e2} - \delta_{e1}) C_d / I_e \leq \Delta_a$ ,  $F_1$  = Gaya gempa desain tingkat kekuatan,  $\delta_{e1}$  = Perpindahan elastis yang dihitung akibat gaya gempa desain tingkat kekuatan,  $\Delta_1 = \delta_{e1} \cdot C_d / I_e$  = perpindahan yang diperbesar,  $\Delta_1 = \delta_1 \cdot C_d / I_e \leq \Delta_a$ .

## 2 METODOLOGI

Lokasi dan Objek Penelitian ini merupakan gedung 4 lantai Kantor Badan Pengelolaan Keuangan dan Aset Daerah Provinsi Sulawesi Tengah, yang berlokasi di Jl. Dr. Samratulangi No. 101 Palu, adapun denah bangunan dapat dilihat pada **Gambar 2, 3, 4** dan **5**.

Jenis data yang digunakan adalah data kuantitatif, yaitu data berupa variabel data atau bilangan yang dapat diukur dan dihitung. Dalam penelitian ini yang termasuk data kuantitatif adalah, data mutu beton, baja tulangan, dan profile material.

Pile cap dan bore pile,  $f'c = 30$  MPa. Balok, kolom dan pelat,  $f'c = 25$  MPa. Core wall lift,  $f'c = 25$  MPa. Kolom dan balok praktis,  $f'c = 15$  MPa.

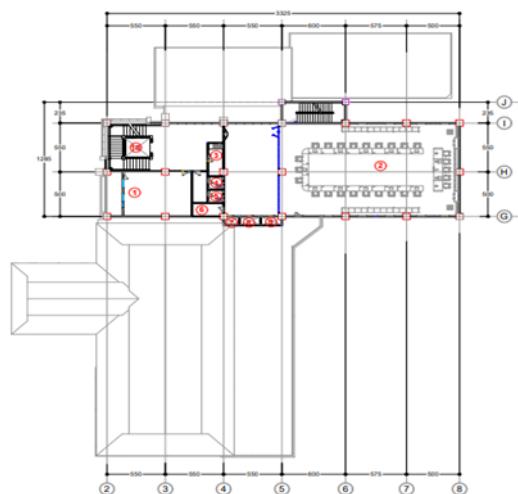
Baja tulangan dengan diameter  $\geq 10$  mm dipakai jenis baja tulangan ulir dengan tegangan leleh sebesar 420 MPa.



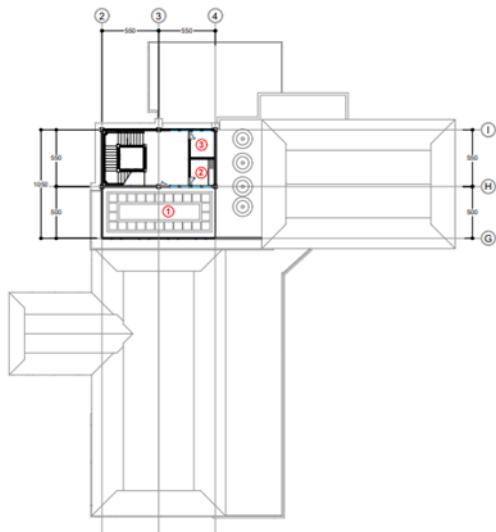
**Gambar 2** Denah Lantai 1



**Gambar 3** Denah Lantai 2



**Gambar 4** Denah Lantai 3



Gambar 5 Denah Lantai 4

Baja tulangan dengan diameter  $\leq 10$  mm dipakai jenis baja tulangan polos dengan tegangan leleh sebesar 280 MPa.

Tabel 1 Profile Material

KOLOM	BALOK	PELAT
KL 1 700x700	BL 1 200 x 300	P1 100
KL 2 600 x 600	BL 2 200 x 350	P2 120
KL 3 500 x 500	BL 3 200 x 400	
KL 4 500 x 700	BL 4250 x 350	
KL 5 400 x 400	BL 5 250 x 400	
KL 6 350 x 350	BL 6 250 x 450	
KP 111 x 111	BL 7 250 x 500	
CI 300 x 300	BL 8 300 x 450	
	BL 9 400 x 600	
	TB 1 300 x 500	
	TB 2 400 x 600	

Sumber: *Data Detail Engineering Design* (2022)

### 3 PEMBAHASAN DAN DISKUSI

**Partisipasi Massa.** Menurut SNI 1726-2019 pasal 7.9.1.1, Analisis harus dilakukan untuk menentukan ragam getar alami untuk struktur. Analisis harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar 100 % dari massa struktur. Untuk mencapai ketentuan ini, untuk ragam satu badan kaku (single rigid body) dengan periode 0,05 detik, diizinkan untuk mengambil semua ragam dengan periode di bawah 0,05 detik. Nilai partisipasi massa pada masing-masing mode dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **3** berikut ini.

Tabel 2 Gedung A Nilai Partisipasi Massa

Mode	Periode (detik)	SumUX (%)	SumUY (%)
1	0,316679	0,83989	0,00009833
2	0,299747	0,84047	0,65632
3	0,272789	0,84102	0,86681
4	0,127446	0,99848	0,86682
5	0,117876	0,99853	0,98653
6	0,111279	0,99853	0,98655
7	0,108344	0,99864	0,99933
8	0,076349	0,99871	0,99933
9	0,064515	0,99871	0,99939
10	0,046493	0,99897	0,99939
11	0,027317	0,99931	0,99966
12	0,02724	0,99987	0,99982

Tabel 3 Gedung B Nilai Partisipasi Massa

Mode	Periode (detik)	SumUX (%)	SumUY (%)
1	0,477964	0,00011	0,62543
2	0,410423	0,77215	0,62674
3	0,360369	0,77671	0,7728
4	0,16416	0,77671	0,8579
5	0,150302	0,91838	0,85857
6	0,125043	0,92068	0,92787
7	0,123847	0,9212	0,93187
8	0,098632	0,92148	0,9518
9	0,089418	0,96126	0,95189
10	0,067016	0,96172	0,99935
11	0,065627	0,99905	0,99969
12	0,042019	0,99975	0,99971

Dari hasil analisis dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **3**, pada mode ke 12 menghasilkan respon total arah X dan Y adalah 99% atau mendekati nilai 100%, sehingga jumlah ragam (mode) sudah memenuhi syarat sesuai SNI 1726-2019.

**Gaya Geser Dasar.** Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.9.1.4.1 apabila kombinasi respons untuk gaya geser dasar hasil analisis ragam ( $V_t$ ) kurang dari 100% dari gaya geser ( $V$ ) yang dihitung melalui metode statik ekivalen, maka gaya tersebut harus dikalikan dengan  $V/V_t$  dimana  $V$  yaitu gaya geser dasar statik ekivalen yang dihitung berdasarkan pasal ini dan pasal 7.8, dan  $V_t$  adalah gaya dasar yang diperoleh dari hasil kombinasi ragam.

**Tabel 4 Hasil Analisis Gaya Geser Dasar Gedung A**

Analisis	Vx	Vy
Dinamik Respon Spektrum (SAP2000)	795,684	795,761
Statik Ekuivalen	653,73	653,73

**Tabel 5 Hasil Analisis Gaya Geser Dasar Gedung B**

Analisis	Vx	Vy
Dinamik Respon Spektrum (SAP2000)	1280,082	1280,235
Statik Ekuivalen	1280,028	1280,028

Setelah dilakukan analisis kembali penskalaan faktor gaya didapatkan nilai analisis ragam ( $V_t$ ) lebih besar dari gaya geser ( $V$ ) yang dihitung. Nilai tersebut dihitung menggunakan metode statik ekivalen yang dihitung, berdasarkan ketentuan SNI 1726-2019.

**Perpindahan.** Dari hasil analisis menggunakan program bantuan SAP2000 diperoleh hasil perpindahan dari Tabel Joint Perpindahan yang ditampilkan dalam bentuk Tabel Gedung A 6, 7 dan Tabel Gedung B 8, 9 sebagai berikut:

**Tabel 6 Gedung A Perpindahan arah X**

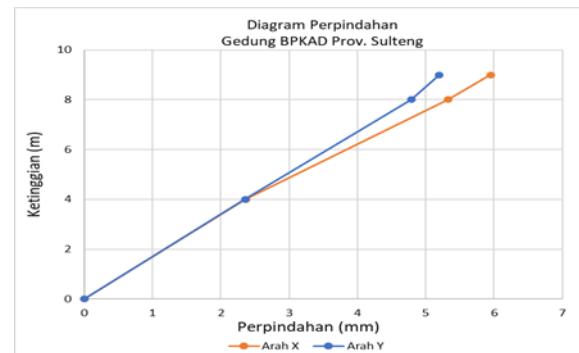
Tingkat	Elevasi	Displacement		
		Ux	Uy	Uz
		mm	mm	mm
Story 3	+ 9,00	5,94712	0,17547	0,00368
Story 2	+ 8,00	5,32221	0,16047	0,00445
Story 1	+ 4,00	2,36560	0,07929	0,00272
Base	+ 0,00	0	0	0

**Tabel 7 Gedung A Perpindahan arah Y**

Tingkat	Elevasi	Displacement		
		Ux	Uy	Uz
		mm	mm	mm
Story 3	+ 9,00	0,29049	5,20026	0,01554
Story 2	+ 8,00	0,26430	4,78841	0,01524
Story 1	+ 4,00	0,12935	2,35847	0,01082
Base	+ 0,00	0	0	0

Dari grafik **Gambar 6**, dapat dilihat bahwa nilai perpindahan terbesar dari arah X sebesar 5,94712 mm dan pada arah Y sebesar 5,20026 mm. Dari kedua nilai

tersebut, nilai maksimal terdapat pada penutup atap kantor.



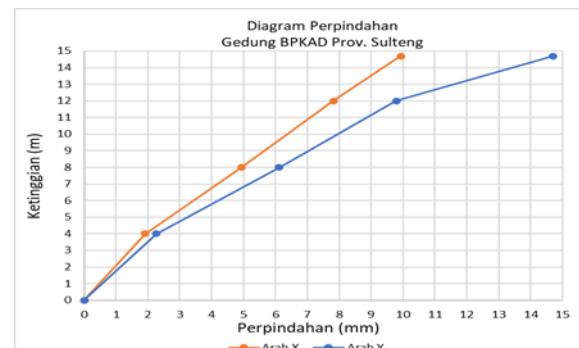
**Gambar 6 Grafik Gedung A Nilai Maksimum Perpindahan**

**Tabel 8 Gedung B Perpindahan arah X**

Tingkat	Elevasi	Displacement		
		Ux	Uy	Uz
		mm	mm	mm
Story 4	+ 14,70	9,93175	0,30604	0,00541
Story 3	+ 12,00	7,81241	0,35743	0,00780
Story 2	+ 8,00	4,92658	0,22917	0,00789
Story 1	+ 4,00	1,91846	0,08857	0,00522
Base	+ 0,00	0	0	0

**Tabel 9 Gedung B Perpindahan arah Y**

Tingkat	Elevasi	Displacement		
		Ux	Uy	Uz
		mm	mm	mm
Story 4	+ 14,70	2,98564	14,70163	0,05659
Story 3	+ 12,00	2,38888	9,78339	0,10268
Story 2	+ 8,00	1,47375	6,11272	0,08827
Story 1	+ 4,00	0,55220	2,26185	0,05294
Base	+ 0,00	0	0	0



**Gambar 7 Grafik Gedung B Nilai Maksimum Perpindahan**

Dari grafik diatas, dapat dilihat bahwa nilai perpindahan terbesar dari arah X sebesar 9,93175 mm dan pada arah Y sebesar

Tabel 10 Gedung A Besaran Simpangan Arah X

Tingkat	$h_{sx}$ (mm)	$h$ (mm)	$\delta_e$ (mm)	$\Delta$ (mm)	$\Delta_i$ (mm)	$\Delta_{izin}$ (mm)	Ket
Story 3	9000	1000	5,94712	32,70918	3,43704	15,38	Oke
Story 2	8000	4000	5,32221	29,27214	16,26136	61,54	Oke
Story 1	4000	4000	2,36560	13,01078	13,01078	61,54	Oke
Base	0	0	0	0	0	0	

Tabel 11 Gedung A Besaran Simpangan Arah Y

Tingkat	$h_{sx}$ (mm)	$h$ (mm)	$\delta_e$ (mm)	$\Delta$ (mm)	$\Delta_i$ (mm)	$\Delta_{izin}$ (mm)	Ket
Story 3	9000	1000	5,20026	28,60144	2,26519	15,38	Oke
Story 2	8000	4000	4,78841	26,33624	13,36468	61,54	Oke
Story 1	4000	4000	2,35847	12,97157	12,97157	61,54	Oke
Base	0	0	0	0	0	0	

Tabel 13 Gedung B Besaran Simpangan Arah X

Tingkat	$h_{sx}$ (mm)	$h$ (mm)	$\delta_e$ (mm)	$\Delta$ (mm)	$\Delta_i$ (mm)	$\Delta_{izin}$ (mm)	Ket
Story 4	14700	2700	9,93175	54,62463	11,65636	41,54	Oke
Story 3	12000	4000	7,81241	42,96827	15,87206	61,54	Oke
Story 2	8000	4000	4,92658	27,09621	16,54467	61,54	Oke
Story 1	4000	4000	1,91846	10,55154	10,55154	61,54	Oke
Base	0	0	0	0	0	0	

Tabel 14 Gedung B Besaran Simpangan Arah Y

Tingkat	$h_{sx}$ (mm)	$h$ (mm)	$\delta_e$ (mm)	$\Delta$ (mm)	$\Delta_i$ (mm)	$\Delta_{izin}$ (mm)	Ket
Story 4	14700	2700	14,70163	80,85895	27,05030	41,54	Oke
Story 3	12000	4000	9,78339	53,80865	20,18871	61,54	Oke
Story 2	8000	4000	6,11272	33,61994	21,17975	61,54	Oke
Story 1	4000	4000	2,26185	12,44019	12,44019	61,54	Oke
Base	0	0	0	0	0	0	

14,70163 mm. Dari kedua nilai tersebut, nilai maksimal terdapat pada lantai 4.

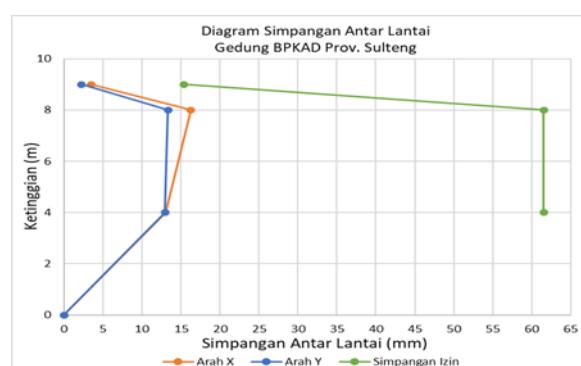
**Simpangan Antar Tingkat.** Berdasarkan SNI 1726-2019 Pasal 7.12.1 Tabel 20 tentang batas simpangan antar tingkat yang tidak boleh melebihi simpangan antar tingkat izin ( $\Delta_a$ ). Tabel tersebut dapat dilihat pada **Tabel 10, 11, 12** dan **13** berikut ini.

Dari grafik Gedung B, dapat dilihat bahwa nilai terbesar dari arah X sebesar 16,54467 mm dan pada arah Y sebesar 27,05030 mm. Dari kedua nilai tersebut, nilai maksimal terdapat pada lantai 4 dan Lantai 2.

#### 4 KESIMPULAN

Setelah penulis melakukan analisis struktur gedung kantor BPKAD Provinsi Sulawesi Tengah dengan analisis dinamik

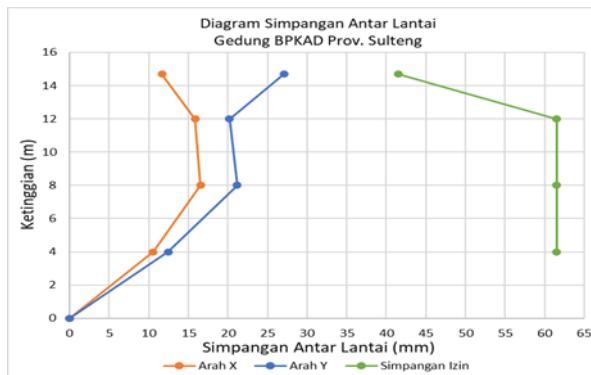
menggunakan metode respon spektrum, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:



Gambar 8 Grafik Gedung A Nilai Maksimum Simpangan

1. Berdasarkan hasil nilai partisipasi massa yang didapat sudah memenuhi

syarat SNI 1726-2019, yaitu paling sedikit 90%. Pada pola ragam getar ke-12 Gedung A jumlah partisipasi massa arah x sebesar 99.987%, pada pola ragam getar ke-8 arah y sebesar 99.933% dan pada pola ragam getar ke-12 Gedung B jumlah partisipasi massa arah x sebesar 99.975%, pada pola ragam getar ke-8 arah y sebesar 95.18%. Ini merepresentasikan bahwa massa struktur Gedung A dan Gedung B dalam analisis ini telah terakomodir dengan baik dan memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap gaya geser dasar, sehingga meminimalisir kerusakan pada struktur.



Gambar 9 Grafik Gedung B Nilai Maksimum Simpangan

2. Berdasarkan hasil analisis ragam respon spektrum pada Gedung A arah X dan Y menghasilkan  $V_{dinamik} \geq 100\% V_{statik}$ , dengan nilai  $V_{dinamik}$  sebesar 795,684 kN dan nilai  $V_{dinamik}$  sebesar 795,761 kN dan Gedung B arah X dan Y menghasilkan  $V_{dinamik} \geq 100\% V_{statik}$ , dengan nilai  $V_{dinamik}$  sebesar 1280,082 kN dan nilai  $V_{dinamik}$  sebesar 1280,235 kN. Maka dapat disimpulkan bahwa nilai akhir respons dinamik struktur Gedung A dan Gedung B terhadap pembebanan gempa nominal akibat pengaruh gempa rencana memenuhi persyaratan SNI 1726-2019.
3. Berdasarkan hasil perpindahan maksimum Gedung A arah X diperoleh nilai 5,94712 mm dan arah Y 5,20026 mm, sedangkan Gedung B arah X

diperoleh nilai 9,93175 mm dan arah Y 14,70163 mm sehingga dapat dinyatakan telah memenuhi syarat batas maksimum.

4. Berdasarkan hasil simpangan antar lantai terbesar pada Gedung A arah X 13,01078 mm pada Story 1 dan arah Y di dapat 16,26136 mm pada story 2 sedangkan Gedung B arah X 15,87206 mm Story 3 dan arah Y di dapat 27,05030 mm pada story 4. Maka dari itu gedung A dan Gedung B simpangan antar tingkat yang terjadi pada struktur gedung lebih kecil dari pada simpangan antar tingkat yang diizinkan.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standarisasi Nasional. (2012). Tata Cara Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. (SNI 1726-2012). Jakarta: BSN.
- [2] Badan Standarisasi Nasional. (2019). Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. (SNI 1726-2019). Jakarta: BSN.
- [3] Badan Standarisasi Nasional. (2019). Persyaratan Beton Struktural Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung. (SNI 2847-2019). Jakarta: BSN.
- [4] Badan Standardisasi Nasional. (2020). Beban Desain Minimum dan Kriteria terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain. SNI (1727:2020). Jakarta: BSN.
- [5] Bahri, Z., & Mungkin, M. (2019). Penggunaan SCR Sebagai Alarm Peringatan Dini Pada Saat Terjadi Gempa Bumi. Journal of Electrical Technology, 4(3).
- [6] Elliza, I. N. (2013). Evaluasi Kinerja Struktur Pada Gedung Bertingkat Dengan Analisis Respon Spektrum Menggunakan Software ETABS V9.50 (Studi Kasus: Gedung Solo Center Point).
- [7] Pangemanan, S., & Mantiri, H. G. (2017). Analisis Pushover Perilaku Seismik Struktur Bangunan Bertingkat (Studi Kasus: Bangunan Ruko).
- [8] Puskim PU. (2021). Desain Spektra Indonesia diakses dari: <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>.
- [9] Rahmad. (2024) Studi Perencanaan Struktur Atas Bangunan Tahan Gempa Menggunakan Sistem Ganda (Studi Kasus: Gedung Pasca Sarjana Universitas Muhammadiyah Palu).
- [10] Wahyuningtyas, W.T., Krisnamurti, K., & Afrida, I. (2020). Analisis Ketahanan Gedung Apartemen Surabaya dengan Menggunakan Metode Respon Spektrum. BERKALA SAINTEK, 8(4), 132-139.
- [11] Zhafira T, Taufiqy I, Purwanto, Mustain, & Anggraini, N. K. (2023). Dynamic Analysis of Spectrum Response and Static Equivalent of The Semarang University College Building. Journal of Civil Engineering, Building, and Transportation, 7(1), 75-79.



## STUDI NORMALISASI SUNGAI PADA SUNGAI PALU

Sulfiati<sup>\*1</sup>, Dewi Ayu Setiawati<sup>1</sup>, Yulfin Tanduk Allo Biyang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palu, Palu, Jalan Hang Tuah No. 114

\*Penulis korespondensi: tekniksulfiati@gmail.com

DISUBMIT 3 Februari 2026 DIREVISI 5 Februari 2026 DITERIMA 7 Februari 2026

**ABSTRAK** Sungai Palu merupakan salah satu sungai di Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah, yang juga mengalami berbagai permasalahan seperti banjir, sedimentasi yang tinggi dan degradasi kualitas air yang mempengaruhi lingkungan sekitar. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan melakukan normalisasi sungai. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar intensitas curah hujan pada Sungai Palu dan berapa besar debit banjir Sungai Palu. Data yang digunakan adalah data sekunder berupa curah hujan harian selama 10 tahun dan data dimensi penampang melintang Sungai Palu. Hasil hitungan hujan rencana kala ulang 100 tahun dengan metode Log Pearson Tipe III yaitu 12,176 mm, dan dari hasil hitungan intensitas hujan terlihat bahwa bahwa hujan deras pada berlangsung dalam jangka waktu singkat, namun hujan tidak deras berlangsung dalam waktu lama. Debit banjir rencana kala ulang 100 tahun dengan menggunakan metode Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu yakni 664,448 m<sup>3</sup>/det. Langkah selanjutnya menggunakan aplikasi HEC-RAS 6.6 untuk mengetahui kapasitas penampang saluran drainase dengan menggunakan debit rencana. Dari hasil analisis aplikasi HEC-RAS, kondisi eksisting Sungai Palu khususnya pada area yang ditinjau yakni di Kelurahan Baru, Kecamatan Palu Barat, dengan debit kala ulang 100 tahun mampu menampung debit yang ada sehingga tidak perlu mendesain ulang saluran.

**KATA KUNCI** Normalisasi Sungai, Debit Rencana, Kapasitas Saluran, HEC-RAS

### 1 PENDAHULUAN

Sungai adalah alur atau wadah air alami dan/atau buatan berupa jaringan pengaliran air beserta air di dalamnya, mulai dari hulu sampai muara, dengan dibatasi kanan dan kiri oleh garis sempadan (Peraturan Pemerintah RI No. 38 Tahun 2011 Tentang Sungai). Seiring dengan perubahan kondisi di wilayah sungai, perubahan tata guna lahan dan pertumbuhan penduduk membuat sungai tidak lagi berfungsi secara optimal, sehingga mengakibatkan banyak dampak kerugian. Banjir tidak hanya menyebabkan kerusakan pada bangunan, lahan pertanian, sarana dan prasarana, lingkungan hidup tetapi juga merusak tata kehidupan masyarakat (Wigati, 2016). Perubahan iklim pada wilayah Indonesia juga ikut mempengaruhi peningkatan suhu permukaan laut sehingga mempengaruhi pola musim hujan dan musim kemarau. Perubahan iklim di Indonesia yang dipengaruhi oleh fenomena global dan regional seperti *El Nino Southern Oscillation* (ENSO), *Indian Ocean Dipole* (IOD), Sirkulasi Angin Monsun Asia-Australia, *Inter-Tropical*

*Convergence* (ITCZ), dan suhu permukaan laut. ENSO positif (*El Nino*) dapat menyebabkan musim kemarau yang lebih panjang dan kekeringan, sedangkan ENSO negatif (*La Nina*) dapat menghasilkan musim hujan lebih basah. Tanpa mitigasi yang baik, ini dapat menyebabkan bencana seperti kekeringan, kebakaran hutan, hingga banjir. Sungai Palu merupakan salah satu sungai yang mengalir di Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah. Sungai ini memiliki peran penting dalam sistem drainase kota serta mendukung kehidupan ekonomi dan sosial masyarakat sekitar. Namun, Sungai Palu juga mengalami berbagai permasalahan, seperti banjir, sedimentasi yang tinggi dan degradasi kualitas air yang mempengaruhi lingkungan sekitar. Salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan melakukan normalisasi sungai. Normalisasi sungai adalah suatu proses rekayasa teknis yang bertujuan untuk mengubah atau memperbaiki kondisi fisik sungai guna mengurangi risiko banjir, memperlancar aliran air, serta menjaga keberlanjutan lingkungan hidup.

Normalisasi Sungai Palu menjadi sangat penting mengingat perubahan kondisi alam, urbanisasi yang pesat, serta pengelolaan sungai yang kurang optimal. Hal-hal tersebut dapat menyebabkan Sungai Palu tidak lagi mampu menampung volume air yang besar saat musim hujan dan menyebabkan banjir yang merendam permukiman dan infrastruktur di sepanjang aliran sungai tersebut. Maka dalam penelitian ini juga dilakukan evaluasi dengan menganalisis penampang sungai menggunakan program HEC-RAS untuk mengetahui kemampuan Sungai Palu, khususnya pada wilayah Kelurahan Baru, dalam menampung volume air yang besar.

**Landasan Teori.** Sungai merupakan jaringan alur-alur pada permukaan bumi yang terbentuk secara alamiah, mulai dari bentuk kecil di bagian hulu sampai besar di bagian hilir. Air hujan yang jatuh di atas permukaan bumi dalam perjalannya sebagian kecil menguap dan sebagian besar mengalir dalam bentuk alur-alur kecil, kemudian menjadi alur-alur sedang seterusnya mengumpul menjadi satu alur besar atau utama. Dengan demikian dapat dikatakan sungai berfungsi menampung curah hujan dan mengalirkannya ke laut (Loebis, 1993). Sungai adalah alur atau wadah air alami dan/atau buatan berupa jaringan pengaliran air beserta air di dalamnya, mulai dari hulu sampai muara, dengan dibatasi kanan dan kiri oleh garis sempadan (Peraturan Pemerintah RI No. 38 Tentang Sungai, 2011).

**Daerah Aliran Sungai (DAS).** Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu kesatuan wilayah tata air yang terbentuk secara alamiah terutama dibatasi oleh punggung-punggung bukit, dimana air meresap dan atau mengalir dalam suatu sistem aliran melalui lahan, anak sungai dan sungai induknya ( SNI 03-2415-1991-Rev-2004). DAS (Daerah Aliran Sungai) dapat dipandang sebagai suatu unit kesatuan wilayah tempat air hujan mengumpul ke sungai menjadi aliran sungai. Garis batas DAS ialah punggung permukaan bumi yang dapat memisahkan dan membagi air hujan sewaktu menyentuh tanah, ke

masing-masing DAS (Loebis, 1993). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa DAS merupakan suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami.

**Debit Banjir Rencana.** Debit air adalah volume air yang melalui penampang basah sungai dalam satuan waktu tertentu yang biasanya dinyatakan dalam satuan meter kubik per detik ( $m^3/detik$ ) atau liter per detik ( $l/detik$ ) (Soewarno, 1995). Debit banjir rencana adalah debit maksimum dari suatu sungai, atau saluran yang besarnya didasarkan kala ulang tertentu (SNI 03-2415-1991). Debit banjir rencana pada setiap profil sungai merupakan data yang paling utama untuk perencanaan, perbaikan, dan pengaturan sungai. Perhitungan debit banjir rencana sudah dilakukan, setelah itu diadakan perhitungan statistik dari data yang tercatat sesuai dengan tingkat pengamanan banjir yang diinginkan (Sosrodarsono dan Tominaga, 1994). Dapat disimpulkan bahwa debit banjir rencana merupakan debit air maksimum atau debit banjir yang dipakai pada dasar perencanaan untuk pengendalian banjir, dan dinyatakan dalam periode ulang tertentu. Saat tahapan perencanaan dilakukan, angka debit banjir rencana yang sesuai untuk suatu sungai harus ditentukan terlebih dahulu. Debit banjir rencana tersebut dapat dihitung dengan penjumlahan kurva debit anak sungai dan sungai utamanya serta kemungkinan adanya pemotongan debit oleh waduk pengendalian banjir.

**Normalisasi Sungai.** Normalisasi adalah suatu tindakan menjadikan kondisi saluran baik dimensi maupun garis sempadan normal kembali yang dilakukan untuk mengembalikan pada kondisi awal sesuai perencanaan (Kementerian Pekerjaan Umum, 2008). Kegiatan normalisasi meliputi

pengeringan alur sungai, pemasangan sheet pile, perkuatan tebing, jalan inspeksi, jembatan orang, dan pintu air (Sumber: Laporan Strategi Penanganan Banjir & Penurunan Muka Tanah Di Jakarta, 2010). Sistem pengeringan alur saluran bertujuan untuk memperbesar kapasitas tampungan sungai dan memperlancar aliran sungai. Pengeringan juga merupakan kegiatan-kegiatan melebarkan sungai, mengarahkan alur sungai dan memperdalam sungai (Kodoatje, 2013). Dapat disimpulkan bahwa normalisasi sungai adalah suatu metode yang digunakan untuk menyediakan alur sungai dengan kapasitas mencukupi untuk menyalurkan air, terutama air yang berlebih saat curah hujan tinggi. Tujuan normalisasi sungai antara lain untuk melindungi tebing sungai karena erosi (kikisan), atau untuk mengembalikan bentuk profil sungai seperti semula sesuai dengan rencana awal sebagai upaya penanggulangan banjir. Untuk mendapatkan data hujan, diperlukan alat untuk mengukur curah hujan. Data curah hujan untuk desain drainase biasanya berdurasi pendek, misal setiap 5 menit, 15 menit dan seterusnya yang didapat dari alat pengukur curah hujan.

**Pemodelan HEC-RAS.** HEC-RAS merupakan program aplikasi untuk memodelkan aliran di sungai, *River Analysis System* (RAS) yang dibuat oleh *Hydrologic Engineering Center* (HEC) yang merupakan satu divisi di dalam *Institute for Water Resource* (IWR), di bawah *US Army Corps of Engineers* (USACE). HEC-RAS merupakan model satu dimensi aliran permanen maupun tak permanen (*steady and unsteady one-dimensional flow model*). HEC-RAS memiliki empat komponen model satu dimensi, yakni hitungan profil muka air aliran permanen, simulasi aliran tak permanen, hitungan transpor sedimen, dan hitungan kualitas air. HEC-RAS merupakan program aplikasi yang mengintegrasikan fitur *graphical user interface*, analisis hidraulik, manajemen dan penyimpanan

data, grafik, serta pelaporan. Data-data yang diperlukan dalam menganalisis penampang sungai dengan menggunakan perangkat lunak HEC-RAS yaitu: a. Penampang memanjang sungai, b. Penampang melintang sungai, c. Data debit yang melalui sungai, d. Angka koefisien kekasaran manning penampang sungai.

## 2 METODOLOGI

**Lokasi Penelitian.** Sungai Palu terbentuk oleh pertemuan Sungai Miu dan Sungai Gumbasa. Sungai Palu secara administratif terletak di Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah dengan luas daerah aliran sungai (DAS)  $3.066 \text{ km}^2$  dan mempunyai panjang 90 km mengalir dari tenggara ke barat laut mengikuti alur lembah panjang Patahan Palu Koro. Sungai ini berhulu di Pegunungan Bulu Torompupu, Kecamatan Kulawi, Kabupaten Sigi dan bermuara di Teluk Palu, Kecamatan Palu Barat, Kota Palu. Penelitian ini dilakukan di Sungai Palu dikhususkan pada wilayah Kelurahan Baru, Kecamatan Palu Barat, Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah (Gambar 1). Lokasi penelitian lebih di pusatkan pada Sungai Palu yang melewati wilayah Kelurahan Baru, Kecamatan Palu Barat, Kota Palu. Guna lahan pada kawasan sekitar sungai dengan panjang  $\pm 427,46 \text{ m}$  ini merupakan kawasan permukiman.

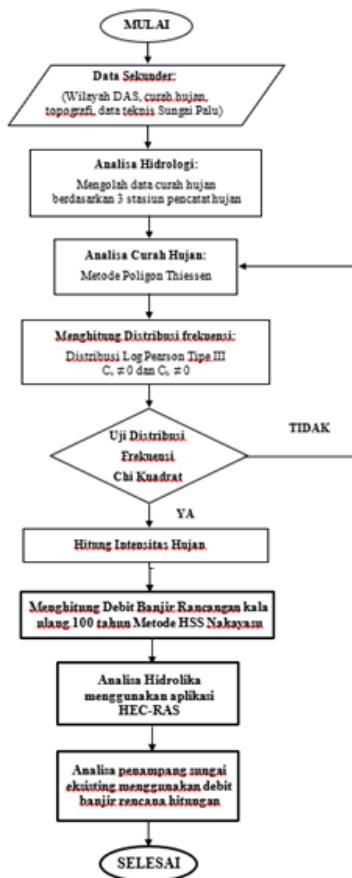


Gambar 1 Peta Lokasi Kelurahan Baru, Kecamatan Palu Barat, Kota Palu, Provinsi Sulawesi Tengah

Dalam pengumpulan data yang diperlukan, penulis mendapatkan data sekunder sebagai input dari kepustakaan serta instansi-instansi terkait seperti Balai Wilayah Sungai Sulawesi III, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

(BMKG), serta hasil survei lapangan atau observasi.

### Bagan Alir



### 3 PEMBAHASAN DAN DISKUSI

**Data.** Secara geografis Daerah Aliran Sungai (DAS) terletak pada koordinat 0055°-1030° Lintang Selatan dan 119045°-120015° Bujur Timur. Sedangkan secara administratif pemerintahan terletak di wilayah Kabupaten Sigi dan sebagian berada di wilayah Kota Palu serta Kabupaten Poso, Provinsi Sulawesi Tengah. Sungai Palu merupakan salah satu sungai yang mengalir dalam wilayah DAS Palu. Karakteristik Sungai Palu dapat dilihat pada **Tabel 1** berikut:

**Tabel 1 Karakteristik Sungai Palu**

Luas DAS	: 3066 km <sup>2</sup>
Panjang Sungai utama	: 90 km
Kemiringan rata-rata	: 0,0016
Hulu Sungai Palu	: Desa Winatu, Kecamatan Kulawi, Kabupaten Sigi
Hiir Sungai Palu	: Teluk Palu

Batas catchment area DAS Palu dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Aliran Sungai Palu juga melewati wilayah Kelurahan Baru, Kecamatan Palu Barat yang merupakan bagian dari Kota Palu. Kelurahan

Baru merupakan dataran rendah dan dekat pesisir pantai dengan luas wilayah sebesar 52,78 Ha dan batas-batas wilayah sebagai berikut: Bagian Utara: Kelurahan Lere, Bagian Selatan: Kelurahan Kamonji, Kelurahan Siraindi, dan Kelurahan Ujuna, Bagian Barat :Kelurahan Lere, Kelurahan Kamonji, dan Kelurahan Donggala Kodi, Bagian Timur :Kelurahan Besusu Barat



**Gambar 2 Peta Catchment DAS Palu**

**Metode Distribusi Normal.** Distribusi normal merupakan sebaran normal atau kurva normal disebut pula sebaran Gauss *Probability Density Function* dari sebaran normal. Hasil perhitungan variabel dispersi distribusi normal dapat dilihat pada **Tabel 2**:

**Tabel 2 Hasil Perhitungan Variabel Dispersi Distribusi Normal**

NO.	TAHUN	CURAH HUJAN MAKS. (Xi) (mm)	(Xi - $\bar{X}$ )	(Xi - $\bar{X}$ ) <sup>2</sup>	(Xi - $\bar{X}$ ) <sup>3</sup>	(Xi - $\bar{X}$ ) <sup>4</sup>
1	2014	10,09	0,95	0,896	0,8479	0,80253
2	2015	8,41	-0,73	0,536	-0,3923	0,28715
3	2016	5,17	-3,97	15,766	-62,6025	248,57384
4	2017	9,06	-0,08	0,007	-0,0006	0,00005
5	2018	9,37	0,22	0,049	0,0108	0,00240
6	2019	9,71	0,57	0,321	0,1818	0,10297
7	2020	12,35	3,21	10,288	33,0000	105,84844
8	2021	6,71	-2,44	5,942	-14,4849	35,30908
9	2022	11,23	2,08	4,347	9,0628	18,89512
10	2023	9,34	0,20	0,039	0,0078	0,00155
		$\Sigma$	91,44	0,0000	38,1916	-34,3692
		$\bar{X}$	9,14			
		S	2,0600			

**Metode Distribusi Log Normal.** Hasil transformasi dari distribusi normal ini disebut sebagai distribusi log normal. Jika variabel acak  $Y = \log X$  terdistribusikan secara normal, maka  $x$  dikatakan mengikuti distribusi log normal. Pada **Tabel 4** dapat

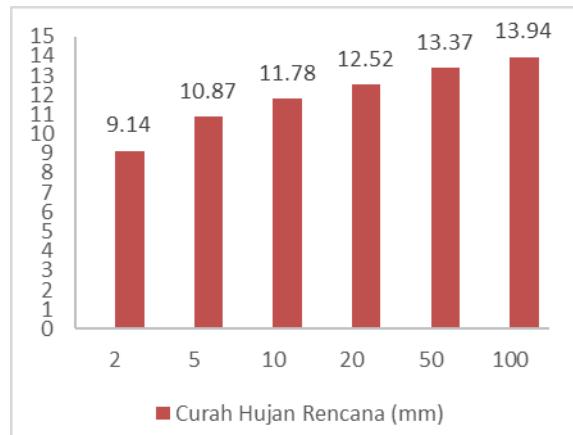
dilihat hasil perhitungan variabel dispersi distribusi log normal.

**Tabel 3 Analisa Curah Hujan Rencana dengan Distribusi**

No.	Periode Ulang (T) (tahun)	K <sub>T</sub>	$\bar{X}$	S	Curah Hujan (X <sub>T</sub> ) (mm)
1	2	0	9,14	2,0600	9,14
2	5	0,84	9,14	2,0600	10,87
3	10	1,28	9,14	2,0600	11,78
4	20	1,64	9,14	2,0600	12,52
5	50	2,05	9,14	2,0600	13,37
6	100	2,33	9,14	2,0600	13,94

**Tabel 4 Hasil Perhitungan Variabel Dispersi Distribusi Log Normal**

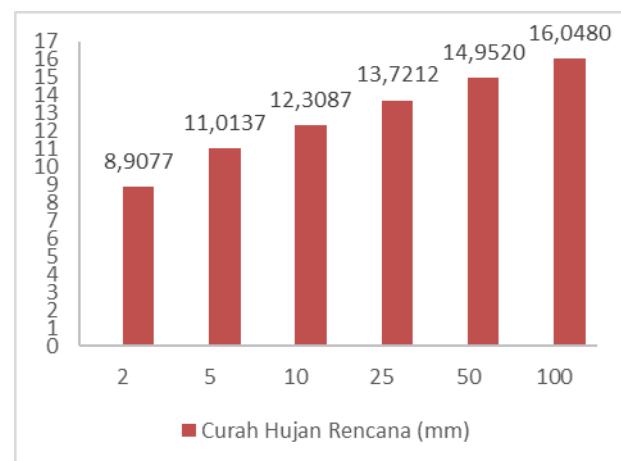
NO TAHUN	CURAH HUJAN MAKS. (X <sub>i</sub> ) (mm)	Log X <sub>i</sub>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ )	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>2</sup>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>3</sup>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>4</sup>
		Log X <sub>i</sub>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ )	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>2</sup>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>3</sup>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>4</sup>
1	2014	10,09	1,0039	0,04	0,00083	0,00008
2	2015	8,41	0,9249	-0,04	-0,00031	-0,00005
3	2016	5,17	0,7138	-0,25	0,06118	-0,01513
4	2017	9,06	0,9571	0,00	0,00002	0,00000
5	2018	9,37	0,9715	0,01	0,00011	0,00000
6	2019	9,71	0,9873	0,03	0,00048	0,00002
7	2020	12,35	1,0917	0,13	0,01705	0,00223
8	2021	6,71	0,8265	-0,13	0,00813	-0,00244
9	2022	11,23	1,0504	0,09	0,00796	0,00071
10	2023	9,34	0,9705	0,01	0,00009	0,00000
$\Sigma$		91,44	9,50	-0,1139	0,1084	-0,0146
$\bar{X}$		9,14	0,95			
S		0,1097				



**Gambar 2 Grafik Distribusi Normal**

**Tabel 5 Analisis Curah Hujan Rencana dengan Distribusi Log Normal**

No.	Periode Ulang (T) (taun)	K <sub>T</sub>	Log $\bar{X}$	S	Log X <sub>T</sub>	Curah Hujan (X <sub>T</sub> ) (mm)
1	2	0	0,95	0,1097	0,9498	8,9077
2	5	0,84	0,95	0,1097	1,0419	11,0137
3	10	1,28	0,95	0,1097	1,0902	12,3087
4	25	1,71	0,95	0,1097	1,1374	13,7212
5	50	2,05	0,95	0,1097	1,1747	14,9520
6	100	2,33	0,95	0,1097	1,2054	16,0480



**Gambar 3 Grafik Distribusi Log Normal**

### Metode Distribusi Log Pearson Tipe III.

Metode Log Pearson Tipe III banyak digunakan dalam analisis hidrologi, terutama analisis data maksimum (banjir) dan minimum (debit minimum) dengan nilai ekstrim. Hasil perhitungan variabel dispersi distribusi Log Pearson Tipe III dapat dilihat pada **Tabel 6**.

**Tabel 6 Hasil Perhitungan Variabel Dispersi Distribusi Log Pearson III**

NO TAHUN	CURAH HUJAN MAKS. (X <sub>i</sub> ) (mm)	Log X <sub>i</sub>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ )	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>2</sup>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>3</sup>	(Log X <sub>i</sub> - Log $\bar{X}$ ) <sup>4</sup>
1	2014	10,09	1,0039	0,04	0,00083	0,00008
2	2015	8,41	0,9249	-0,04	-0,00031	-0,00005
3	2016	5,17	0,7138	-0,25	0,06118	-0,01513
4	2017	9,06	0,9571	0,00	0,00002	0,00000
5	2018	9,37	0,9715	0,01	0,00011	0,00000
6	2019	9,71	0,9873	0,03	0,00068	0,00002
7	2020	12,35	1,0917	0,13	0,01705	0,00223
8	2021	6,71	0,8265	-0,13	0,00813	-0,00244
9	2022	11,23	1,0504	0,09	0,00796	0,00071
10	2023	9,34	0,9705	0,01	0,00009	0,00000
$\Sigma$		91,44	9,50	-0,1139	0,1084	-0,0146
$\bar{X}$		9,14	0,95			
S		0,1097				

**Tabel 7 Nilai K Hasil Distribusi Log Pearson III**

No.	Periode Ulang (T) (taun)	C <sub>s</sub>	K
1	2	-1,5338	0,24440
2	5	-1,5338	0,82197
3	10	-1,5338	1,00955
4	20	-1,5338	1,09863
5	25	-1,5338	1,14316
6	50	-1,5338	1,20048
7	100	-1,5338	1,23709

Perhitungan logaritma hujan atau banjir dengan periode ulang T dengan rumus persamaan:

$$\text{Log } X_T = \text{Log } \bar{X} + K \cdot S$$

Curah hujan untuk  $T = 2$  tahun

$$\text{Log } X_2 = 0,95 + 0,24440 \times 0,1097 = 0,9766$$

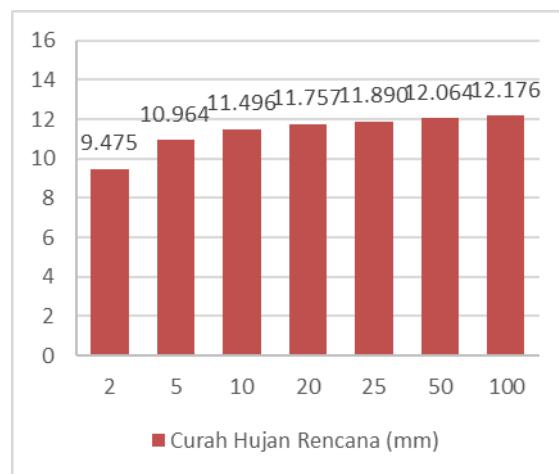
$$\text{mm}$$

$$X_2 = 10^{0,9766} = 9,4751$$

Hasil perhitungan selanjutnya dapat dilihat pada **Tabel 8** di bawah ini:

**Tabel 8 Hasil Analisis Frekuensi Hujan Distribusi Log Pearson III**

No.	Periode Ulang (T) (tahun)	Curah Hujan Rencana (mm)
1	2	9,4751
2	5	10,9637
3	10	11,4958
4	20	11,7574
5	25	11,8904
6	50	12,0639
7	100	12,1760



**Gambar 4 Grafik Distribusi Log Pearson Tipe III**

**Metode Distribusi Gumbel.** Distribusi Gumbel dikenal sebagai distribusi nilai ekstrem umum Tipe-I dan digunakan untuk memodelkan distribusi nilai maksimum (atau minimum) dari beberapa sampel berbagai distribusi. Hasil perhitungan dispersi untuk metode distribusi Gumbel dapat dilihat pada **Tabel 9**.

Perbandingan hasil pengukuran disperdi distribusi Normal dan Gumbel serta distribusi Log Normal dan Log Pearson Type III dapat dilihat pada **Tabel 11**.

Penentuan jenis sebaran yang sesuai dengan data dilakukan dengan

mencocokkan parameter statistik dan logaritma dengan syarat masing-masing sebaran. Adapun hasil uji distribusi dapat dilihat pada **Tabel 12**.

**Tabel 9 Hasil Perhitungan Variabel Dispersi Distribusi Gumbel**

No.	TAHUN	CURAH HUJAN MAKS. (Xi) (mm)	Log Xi	(Log Xi - Log $\bar{X}$ )	(Log Xi - Log $\bar{X}$ ) <sup>2</sup>	(Log Xi - Log $\bar{X}$ ) <sup>3</sup>	(Log Xi - Log $\bar{X}$ ) <sup>4</sup>
1	2014	10,09	1,0059	0,04	0,00183	0,00008	0,00000
2	2015	8,41	0,9249	-0,04	0,00131	-0,00005	0,00000
3	2016	5,17	0,7198	-0,25	0,00118	0,01213	0,00374
4	2017	9,06	0,9571	0,00	0,00003	0,00000	0,00000
5	2018	9,37	0,9715	0,01	0,00011	0,00000	0,00000
6	2019	8,71	0,9873	0,03	0,00068	0,00002	0,00000
7	2020	12,25	1,0947	0,15	0,00705	0,00223	0,00029
8	2021	6,71	0,8265	-0,13	0,01813	-0,00244	0,00033
9	2022	11,23	1,0594	0,09	0,00796	0,00071	0,00006
10	2023	9,34	0,9705	0,01	0,00009	0,00000	0,00000
		$\Sigma$	91,44	9,50	-0,1139	0,1084	-0,0146
		$\bar{X}$	9,14	0,95			0,00443
		$S$	0,1097				

**Tabel 10 Hasil Perhitungan Curah Hujan Rencana Distribusi Gumbel**

No.	Periode Ulang (T) (tahun)	$\bar{X}$	$S$	$Y_{tr}$	$Y_u$	$S_u$	Curah Hujan Rencana
1	2	9,14	2,06	0,3668	0,4952	0,9496	8,87
2	5	9,14	2,06	1,5004	0,4952	0,9496	11,33
3	10	9,14	2,06	2,251	0,4952	0,9496	12,95
4	20	9,14	2,06	2,9709	0,4952	0,9496	14,52
5	25	9,14	2,06	3,1993	0,4952	0,9496	15,01
6	50	9,14	2,06	3,9028	0,4952	0,9496	16,54
7	100	9,14	2,06	4,6012	0,4952	0,9496	18,05



**Gambar 5 Grafik Distribusi Gumbel**

**Tabel 11 Perbandingan Hasil Dispersi**

No.	Dispersi	Hasil Dispersi			
		Normal	Log Normal	Log Pearson III	Gumbel
1	$S$	2,05998	0,10972	0,10972	2,05998
2	$Cv$	0,22527	0,11553	0,11553	0,22527
3	$Cs$	-0,54607	-1,53376	-1,53376	-0,54607
4	$Ck$	4,51560	6,06627	6,06627	4,51560

Dilihat pada **Tabel 12** bahwa metode Log Pearson Type III adalah metode yang paling mendekati parameter yang disyaratkan. Selanjutnya metode Log Pearson Type III akan diuji dengan menggunakan uji

kecocokan distribusi untuk mengetahui apakah memenuhi syarat perencanaan.

Tabel 12 Hasil Uji Distribusi

Jenis Distribusi	Syarat	Hasil Perhitungan	Kesimpulan
Normal	$C_s = 0$ $C_k = 3$	-0,55 4,52	Tidak Memenuhi
Log Normal	$C_s = 3Cv + Cv^2 = 0,087$ $C_k = C_p^8 + 6C_p^6 + 15C_p^4 + 16C_p^2 + 3 = 3,01$	-1,5338 6,0663	Tidak Memenuhi
Log Pearson III	$C_s \neq 0$ $C_k \neq 0$	-1,5338 6,0663	Memenuhi
Gumbel	$C_s = 1,14$ $C_k = 5,4$	-0,546 4,516	Tidak Memenuhi

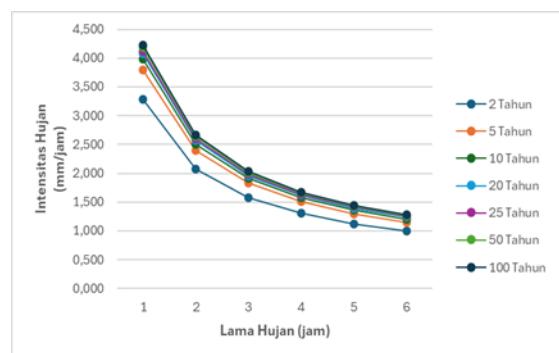
**Distribusi Hujan Jam-jaman.** Menghitung distribusi hujan diperlukan suatu pendekatan yang mungkin terjadi pada selang waktu tertentu. Waktu konsentrasi hujan ( $t$ ) di Indonesia rata-rata 6 jam. Maka pada penelitian ini distribusi hujan ditentukan dengan durasi 6 jam. Hasil perhitungan hujan jam-jaman dengan menggunakan metode Modified Mononobe dengan durasi hujan 6 jam dan hujan rancangan kala ulang 2, 5, 10, 20, 25, 50, dan 100 tahun tahun untuk lebih lengkap dapat dilihat pada **Tabel 13**.

Tabel 13 Perhitungan Intensitas Hujan Jam-jaman Berbagai Periode Ulang

Lama Hujan (t) (jam)	HUJAN JAM-JAMAN (mm)						
	2 Tahun	5 Tahun	10 Tahun	20 Tahun	25 Tahun	50 Tahun	100 Tahun
9,4751	10,9637	11,4958	11,7574	11,8904	12,0639	12,1760	
1	3,285	3,801	3,985	4,076	4,122	4,182	4,221
2	2,069	2,394	2,511	2,568	2,597	2,635	2,659
3	1,579	1,827	1,916	1,960	1,982	2,011	2,029
4	1,304	1,508	1,582	1,618	1,636	1,660	1,675
5	1,123	1,300	1,363	1,394	1,410	1,430	1,444
6	0,995	1,151	1,207	1,234	1,248	1,267	1,278

Hasil analisis berupa intensitas hujan dengan durasi dan periode ulang tertentu dihubungkan kedalam sebuah kurva Intensity Duration Frequency (IDF). Kurva IDF menggambarkan hubungan antar dua parameter penting hujan yakni durasi dan intensitas hujan.

**Gambar 6** terlihat bahwa intensitas hujan yang tertinggi berlangsung dengan durasi pendek. Hal ini menunjukkan bahwa hujan deras pada umumnya berlangsung dalam jangka waktu singkat, namun hujan tidak deras berlangsung dalam waktu lama.



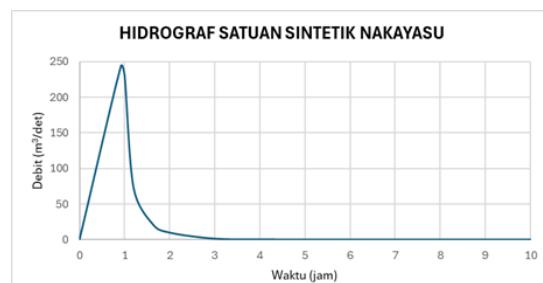
Gambar 6 Grafik Intensitas Hujan

Perhitungan selanjutnya untuk setiap periode ulang dapat dilihat pada **Tabel 14**.

Tabel 14 Hasil Perhitungan Distribusi Hujan Jam-jaman Masing-masing Periode Ulang

Periode Ulang (tahun)	Waktu ke- (jam)					
	1	2	3	4	5	6
2	I(mm/jam)	3,285	2,069	1,579	1,304	1,123
	Rt(mm)	3,285	0,854	0,599	0,477	0,403
5	I(mm/jam)	3,801	2,394	1,827	1,508	1,300
	Rt(mm)	3,801	0,988	0,693	0,552	0,466
10	I(mm/jam)	3,985	2,511	1,916	1,582	1,363
	Rt(mm)	3,985	1,036	0,727	0,578	0,489
20	I(mm/jam)	4,076	2,568	1,960	1,618	1,394
	Rt(mm)	4,076	1,059	0,743	0,592	0,500
25	I(mm/jam)	4,122	2,597	1,982	1,636	1,410
	Rt(mm)	4,122	1,071	0,752	0,598	0,505
50	I(mm/jam)	4,182	2,635	2,011	1,660	1,430
	Rt(mm)	4,182	1,087	0,763	0,607	0,513
100	I(mm/jam)	4,221	2,659	2,029	1,675	1,444
	Rt(mm)	4,221	1,097	0,770	0,613	0,517

**Debit Banjir Rencana.** Perhitungan debit banjir rencana yang dilakukan dengan menggunakan metode Hidrograf Satuan Sintesis Nakayasu untuk membuat suatu hidrograf banjir pada sungai, perlu dicari karakteristik atau parameter daerah pengaliran tersebut.



Gambar 7 Grafik Metode HSS Nakayasu

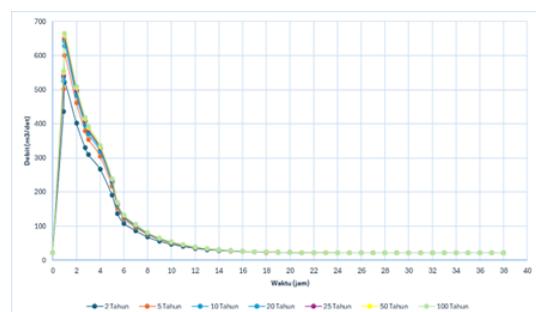
Berdasarkan Gambar di atas dan hasil perhitungan diperoleh titik puncak terjadi pada saat 0,916 jam dengan debit ( $Q$ ) = 243  $m^3/det$ .

Berdasarkan uraian perhitungan di atas maka dapat dilakukan analisa dan perhitungan banjir rencana Sungai Palu

pada setiap periode ulang. Rekapitulasi hasil perhitungan debit banjir puncak pada Sungai Palu untuk periode 2, 5, 10, 20, 25, 50 dan 100 tahun dapat dilihat pada **Tabel 15**.

**Tabel 15 Rekapitulasi Debit Banjir Puncak Sungai Palu**

No.	Periode Ulang (tahun)	Debit Banjir Puncak (m <sup>3</sup> /s)
1	2	521,788
2	5	600,414
3	10	628,520
4	20	642,339
5	25	649,366
6	50	658,527
7	100	664,448



**Gambar 8 Grafik Debit Banjir Rencana Metode**

Berdasarkan hasil analisis perhitungan debit banjir rencana dengan menggunakan metode HSS Nakayasu diperoleh debit banjir rencana dengan periode ulang 2 tahun  $Q = 521,788 \text{ m}^3/\text{det}$ , 5 tahun  $Q = 600,414 \text{ m}^3/\text{det}$ , 10 tahun  $Q = 628,520 \text{ m}^3/\text{det}$ , 20 tahun  $Q = 642,339 \text{ m}^3/\text{det}$ , 25 tahun  $Q = 649,366 \text{ m}^3/\text{det}$ , 50 tahun  $Q = 658,527 \text{ m}^3/\text{det}$ , dan 100 tahun  $Q = 664,448 \text{ m}^3/\text{det}$ . Menentukan Studi Normalisasi Sungai Pada Sungai Palu, maka debit banjir rencana yang digunakan adalah debit banjir rencana periode ulang 100 tahun dengan debit banjir rencana sebesar  $Q = 664,448 \text{ m}^3/\text{det}$ .

#### 4 KESIMPULAN

Dari uraian pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan data curah hujan selama 10 tahun (2014-2023) maka didapat Intensitas curah hujan dengan durasi 1 jam pada kala ulang 100 tahun sebesar

4,211 mm/jam.

2. Debit banjir rencana Sungai Palu dengan kala ulang 100 tahun sebesar 664,448 m<sup>3</sup>/det.
3. Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan program komputer HEC-RAS dengan debit banjir rencana kala ulang 100 tahun, kondisi eksisting Sungai Palu mampu menampung debit rencana apabila dilakukan pengeringan sedalam 5 m.

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka didapat beberapa saran sebagai berikut:

1. Melakukan pemeliharaan secara berkala terhadap saluran Sungai Palu untuk menghindari terjadinya banjir.
2. Perlu adanya penambahan data pada stasiun curah hujan, peta serta data tata guna lahan yang lebih informatif, sehingga hasil mendekati kondisi lapangan.

Penelitian ini masih banyak kekurangan dan kesalahan. Oleh sebab itu kritik dan saran sangat diharapkan dari berbagai pihak. Dengan adanya kritik dan saran tersebut, diharapkan dapat menjadi penyempurnaan Penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standar Nasional. 1991. SNI 03-2415-1991 Metode Perhitungan Debit Banjir. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- [2] Chow, Ven Te. (1992), *Hidrologi Saluran Terbuka*. Jakarta: Erlangga.
- [3] Febryana, A. A., Suprijanto, H., dan Sisinggih, D. Studi Perencanaan Normalisasi Sungai Sebagai Upaya Mereduksi Banjir Sungai Tabanio di Kabupaten Tanah Laut. (Online). *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air*. vol.4. no. 1. p.2024. (<https://doi.org/10.21776/ub.jtresda.2024.004.01.088>. Diakses 20 Oktober 2024).
- [4] Galuh, P. P. 2015. Evaluasi Debit Banjir Rencana Pada Normalisasi Sungai Sunter Di Wilayah Cipinang Melayu, Jakarta. Tugas Akhir. Universitas Negeri Jakarta. Jakarta.
- [5] Gumbel, E. J. 1941. Probability-Interpretation of The Observed Return-Periods of Floods. *Eos, Transactions American Geophysical Union Journal*. Vol.22 No.3:836-850. Wilmington, North Carolina.
- [6] Kementerian Pekerjaan Umum. 2011. *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 38 Tahun 2011 tentang Sungai*, Jakarta: PU.

- [7] Kodoatje, Robert J. 2013. *Rekayasa dan Manajemen Banjir Kota*. Yogyakarta: Penerbit Andi Offset.
- [8] Loebis, Joesron. dkk. 1993. *Hidrologi Sungai*. Jakarta: PU
- [9] Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. 2010. *Laporan Strategi Penanganan Banjir & Penurunan Muka Tanah di Jakarta*. Jakarta
- [10] Pitanggi, G. T., Lestari, I. T., Darsono, S., dan Salamun, S. *Normalisasi Sungai Dolok Semarang-Demak, Jawa Tengah*. (Online). Jurnal Karya Teknik Sipil. vol. 6, no. 4, pp. 367-376. (<https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jkts/article/view/18728>. Diakses 20 Oktober 2024).
- [11] Shahin, M. M. A. 1976. *Statistical Analysis in Hydrology*. Delft: Intern. Courses in Hydraulic and Sanitary Engineering.
- [12] Soewarno. 1995. *Hidrologi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data*. Bandung: Nova.
- [13] Soetopo, Widandi. 1998. *Rekayasa Statistika Untuk Teknik Pengairan*. Malang: UB Press.
- [14] Sosrodarsono, Suyono & Tominaga, Masateru. 1994. *Perbaikan dan Pengaturan Sungai*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [15] Suripin. 2004. *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelaanjutan*. Yogyakarta: Andi Offset.
- [16] Triatmodjo, Bambang. 2008. *Hidrologi Terapan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- [17] Wigati, Restu. (2014), *Step By Step Pemodelan Hidraulik Dengan HEC-RAS Pada Saluran Sederhana*. Cilegon: Bahan Ajar.



## EVALUASI PRODUKTIVITAS ALAT BERAT PADA PEKERJAAN PEMBANGUNAN RUAS JALAN BORA-PANDERE DI KABUPATEN SIGI

Eko Widodo<sup>\*1</sup>, Ahmad Solihin Ansari<sup>1</sup>, Devi Eka Ikhwana<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palu, Palu, Jalan Hang Tuah No. 114

\*Penulis korespondensi: widodoeko1975@gmail.com

DISUBMIT 3 Februari 2026 DIREVISI 5 Februari 2026 DITERIMA 7 Februari 2026

**ABSTRAK** Pelaksanaan pekerjaan jalan, alat berat memegang peranan penting dalam menyelesaikan pekerjaan tersebut. Waktu pelaksanaan berbanding lurus dengan jumlah alat-alat berat yang dimobilisasi pada pekerjaan tersebut bertujuan untuk mengetahui produktivitas alat berat dilapangan peneliti pada proyek pembangunan jalan pada ruas jalan Bora-Pandere. Metode peneliti yang dilakukan adalah membandingkan antara produktivitas sesuai dengan Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Konstruksi Nomor 68/SE/DK/2024. Dengan metode pelaksanaan dilapangan. Hasil penelitian diperoleh bahan pelaksanaan pekerjaan penghamparan aspal yaitu laston lapis Aus AC-WC diselesaikan selama 19 hari, dengan volume aspal sebesar 5678,27 ton. Namun dalam pelaksanaan dilapangan waktu yang dibutuhkan adalah 7 bulan. Hal ini disebabkan pekerjaan pengaspalan tergantung pada pelaksanaan pekerjaan struktur bawah pekerjaan tersebut. Pada pekerjaan Pembangunan Jalan Bora-Pandere yaitu pengaspalan alat-alat berat yang digunakan antara lain: Dump Truck, Asphalt Finisher, Tandem Roller, dan Pneumatic tire roller.

**KATA KUNCI** Alat berat, Produktivitas alat berat, AC-WC

### 1 PENDAHULUAN

Saat ini, Perkembangan disektor konstruksi mengakibatkan meningkatnya kebutuhan dan penggunaan alat berat diberbagai lokasi proyek. Dinamika ini mendorong pemerintah untuk melakukan pembenahan diseluruh sektor Pembangunan. Salah satu fokus utamanya adalah sektor transportasi darat, melalui Pembangunan maupun peningkatan kualitas jalan yang sudah ada. Infrastruktur transportasi, khususnya jaringan jalan memegang peran penting didalam upaya meningkatkan kualitas hidup masyarakat. Jalan berfungsi sebagai sarana prasarana yang mendukung kelancaran distribusi barang dan jasa, mempermudah mobilitas penduduk, memperluas konektivitas antar wilayah, serta turut berkontribusi dalam meningkatkan kesejahteraan dan taraf hidup Masyarakat. Pembangunan jalan tidak hanya berfungsi sebagai penghubung antar wilayah, tetapi juga memiliki peran sangat penting yang strategis didalam mendorong pertumbuhan ekonomi di daerah tersebut. Sebagai contoh proyek Pembangunan jalan baru yang bertujuan memperlancar arus lalu lintas direncanakan akan dibuka mulai dari arah Desa Bora, Kecamatan Sigi Kota hingga

Desa Pandere, Kecamatan Gumbasa. Berdasarkan dengan perjanjian kontrak nomor: 622/108/SP-DIS.BMPR, tanggal 24 Januari 2023, proyek pekerjaan ini dimulai dengan nama: Pembangunan Ruas Jalan Bora-Pandere (MYC)". Proyek pekerjaan ini merupakan proyek *Multi Years Contrat (MYC)* yang sumber dananya berasal dari APBD Provinsi Sulawesi Tengah dan pelaksana pekerjaan proyek ini di tangani oleh PT. Passokorang. Alat berat merupakan faktor yang penting di dalam mendukung pelaksanaan paket pekerjaan proyek tersebut. Pada paket pekerjaan pembangunan jalan diperlukan alat-alat berat, diantaranya: AMP (Asphalt Mix Plant), Dump Truck, Asphalt Finisher, Tandom Roller dan Pneumatic Roller. Alasan penelitian dilakukan untuk mengetahui produktivitas alat berat yang digunakan di lapangan untuk efisiensi waktu yang dikeluarkan, sehingga dapat menyelesaikan pekerjaan konstruksi lebih cepat dan tercapai dengan optimal. Pemilihan alat berat dalam pekerjaan konstruksi harus tepat agar pekerjaan berjalan dengan lancar dan penyelesaian pekerjaan tercapai sesuai

dengan jadwal yang telah ditentukan atau disepakati.

Jalan adalah prasarana transportasi darat yang meliputi segala bagian jalan, termasuk bangunan pelengkap dan perlengkapannya yang diperuntukkan bagi lalu lintas, yang berada pada permukaan tanah, di atas permukaan tanah, di bawah permukaan tanah dan/atau air, serta di atas permukaan air, kecuali jalan kereta api, jalan lori dan jalan kabel. Pernyataan tersebut tertuang dalam Undang-Undang Republik Indonesia No.2 Tahun 2022 pasal 1, tentang perubahan kedua atas Undang-Undang No.38 Tahun 2004 tentang jalan, sebagai landasan hukumnya.

Produktivitas diartikan sebagai kemampuan untuk menghasilkan suatu hal. Dengan demikian, produktivitas alat berat dapat dijelaskan sebagai kemampuan alat berat untuk menghasilkan suatu hasil dalam suatu periode waktu tertentu. (Edi Nurhadi Kulo Dkk 2017). Selanjutnya produktivitas alat berat bergantung pada tiga faktor, yaitu : waktu siklus, material, dan efisiensi.

**Waktu Siklus.** Setiap pekerjaan pemindahan material, alat berat beroperasi menurut pola siklus tertentu: memuat, mengangkut, membuang dan kembali ke tempat pemuatan atau kombinasi dari keempatnya. Waktu siklus adalah jangka waktu yang dibutuhkan alat berat untuk merampungkan serangkaian operasi kerja. Untuk menaksir waktu siklus suatu alat berat yaitu dimulai ketika alat sudah siap untuk beroperasi. Pengukuran waktu siklus dilakukan beberapa kali, kemudian dihitung berapa rata-rata dari waktu siklus tersebut. Waktu siklus dapat digolongkan dalam dua kategori yaitu, waktu tetap dan waktu variabel. Waktu tetap adalah waktu yang digunakan untuk memuat dan membuang.

**Material.** Khususnya untuk pekerjaan alat berat, yang dimaksudkan dengan material disini adalah tanah, yang meliputi: a. Batu yang dalam hal ini sebagai tanah yang berukuran butiran besar atau berbentuk

bongkahan berupa granit, batu kapur, cadas, dll.; b. Tanah dalam hal ini merupakan campuran batu-batu yang berukuran butir kecil; c. Campuran batu dengan tanah.

**Efisiensi.** Efisiensi di definisikan sebagai besar presentasi kerja alat efektif dibandingkan dengan waktu kerja keseluruhan, misalnya beberapa menit efektifnya beroperasi alat berat tersebut dalam waktu satu jam kerja.

Hasil produksi yang sebenarnya dari suatu peralatan yang digunakan tidak akan sama dengan hasil perhitungan berdasarkan data kapasitas yang dituliskan pada brosur, banyaknya faktor-faktor yang mempengaruhi proses produksi. Faktor-faktor tersebut adalah:

- 1 Faktor operator.
- 2 Faktor peralatan.
- 3 Faktor kondisi medan/lapangan.
- 4 Faktor menajemn kerja.

Estimasi besaran pada setiap faktor diatas adalah sulit sehingga untuk mempermudah pengambilan nilai yang digunakan, faktor-faktor tersebut di gabungkan menjadi satu yang merupakan faktor kondisi kerja secara umum. Selanjutnya faktor tersebut digunakan sebagai faktor efisiensi kerja alat.

**Tabel 1 Faktor Efisiensi Alat**

Kondisi Operasi	Pemeliharaan Mesin				
	Baik Sekali	Baik	Sedang	Buruk	Buruk Sekali
Baik Sekali	0,83	0,81	0,76	0,70	0,63
Baik	0,78	0,75	0,71	0,65	0,60
Sedang	0,72	0,69	0,65	0,60	0,54
Buruk	0,63	0,61	0,57	0,52	0,45
Buruk Sekali	0,53	0,50	0,47	0,42	0,32

Sumber : SE DIRJEN BIKON No : 68/SE/Dk/2024, (2025)

Kapasitas produksi alat berat merujuk pada jumlah output atau volume pekerjaan yang dihasilkan oleh alat berat dalam satu unit waktu tertentu. Perhitungan produktivitas alat berat melibatkan faktor standar kinerja yang disediakan oleh produsen alat, efisiensi alat, operator, kondisi lapangan dan material. Metode perhitungan produktivitas alat bervariasi tergantung pada fungsi dan tujuan

penggunaan alat tersebut. (Ronald, dalam jurnal Tekno 2018). Dalam menghitung kapasitas alat berat dapat dilakukan sebagai berikut:

**Dump Truck.** Rochmanhadi (1982), *dump truck* adalah peralatan yang berfungsi untuk mengangkut material dari satu lokasi ke lokasi lain. Pada umumnya, untuk pekerjaan konstruksi sipil, digunakan truck yang dapat secara otomatis melepaskan muatan dari baknya. Truck semacam ini dikenal sebagai *dump truck* atau *tripping truck*.

**Asphalt Finisher.** *Asphalt Finisher*, Rochmanhadi (1982), adalah peralatan yang berperan dalam menyebarkan material yang telah melalui proses di *mixing plant*, yang dikenal sebagai aspal beton dari AMP. Material ini diangkut menggunakan *dump truck* ke lokasi pekerjaan dan kemudian dituangkan ke dalam *asphalt finisher*. Pada *asphalt finisher*, terdapat sebuah alat yang disebut *hopper* (corong tuang), namun tanpa alas, sehingga material yang dituangkan oleh truk langsung jatuh ke bawah. Di bagian belakangnya, terdapat pisau selebar *hopper* yang diatur sedemikian rupa sehingga tingginya di atas permukaan jalan dapat diatur antara 0-14 cm (sebelum padat) sesuai dengan kebutuhan.

**Tandem roller.** Rochmanhadi (1982), *tandem roller* adalah peralatan yang digunakan dalam pekerjaan pemasatan untuk mencapai permukaan yang rata, seperti pada proses penggilasan aspal. *Tandem roller* berperan sebagai alat pemasatan pada tahap awal untuk lapisan Asphalt Beton (Laston) yang dipadatkan pada suhu antara 900 C hingga 1100 C. *Tandem roller* ini beroperasi setelah proses penghamparan aspal oleh *Asphalt Finisher*.

**Pneumatic Tired Roller.** Rochmanhadi (1982) menjelaskan bahwa *pneumatic tired roller* adalah peralatan penggilas yang terdiri dari roda-roda dengan ban karet yang diisi dengan udara (*pneumatic*). *Pneumatic Tired*

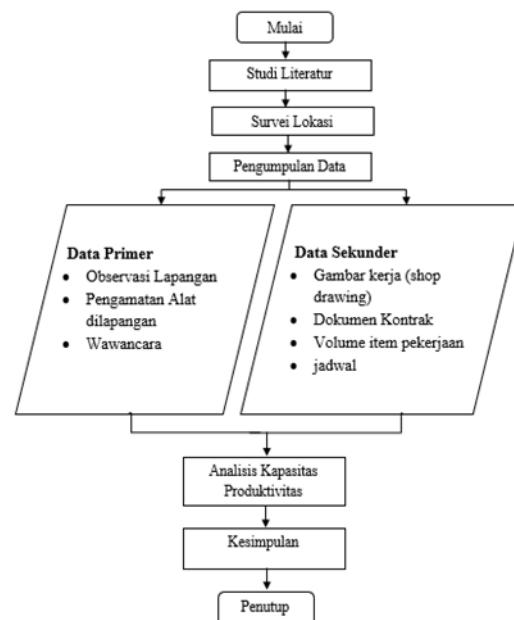
*Roller* berperan sebagai alat pemasatan terakhir ketika melakukan penggilasan pada saat proses penyebaran Asphalt Beton (Laston) yang dipadatkan pada suhu 800 C.

## 2 METODOLOGI

**Lokasi.** Lokasi pekerjaan proyek pembangunan ruas jalan ini berlokasi di jalan poros Bora-Pandere, Kabupaten Sigi.



Gambar 1 Peta Lokasi Penelitian



Gambar 2 Bagan Alir

Salah satu komponen yang penting dalam penelitian adalah proses dengan pengumpulan data. Kesalahan yang dilakukan dalam proses pengumpulan data akan membuat proses analisis menjadi sulit. Selain itu hasil dan kesimpulan yang akan didapatkan akan menjadi kacau susunan kalimatnya apabila pengumpulan data tidak dilakukan dengan benar. Untuk

menghitung besarnya produktivitas aktual alat berat yang dibutuhkan untuk operasional alat berat diperlukan pengumpulan sejumlah data. Pengumpulan data dalam tugas akhir ini menggunakan 3 cara yaitu observasi, wawancara dan studi dokumen.

### 3 PEMBAHASAN DAN DISKUSI

**Data.** Perhitungan volume pekerjaan pada pembangunan ruas Jalan Bora-Pandere ialah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Panjang hampar (P)} &= 11166,706 \text{ m} \\ \text{Lebar badan jalan (L)} &= 4,5 \text{ m (Bervariasi)} \\ \text{Tebal (t)} &= 0,05 \text{ m} \\ \text{Berat jenis aspal (D)} &= 2,26 \text{ ton/m}^3 \\ \text{Volume (V)} &= P \times L \times t \times D \\ &= 11166,706 \times 4,5 \times 0,05 \times 2,26 \\ &= 5678,27 \text{ ton} \end{aligned}$$

#### Produktivitas Alat Berat Pada Pekerjaan Laston Lapis Aus (AC-WC)

**Asphalt Mixing Plant (AMP).** *Asphalt Mixing Plant (AMP)* merupakan alat yang digunakan untuk memproduksi campuran aspal hotmix. Kemampuan AMP untuk berproduksi berupa hasil kerjanya yang aktual per satuan waktu kerja efektif. Kapasitas produksi AMP yang digunakan pada lokasi penelitian yakni 300 ton per hari selama 16 jam dengan efisiensi kerja peralatan 0,78. Maka didapatkan produktivitas AMP per jam adalah:

$$Q = 300/16 = 18,75 \text{ ton/jam}$$

**Dump truck** Material akan diangkut menggunakan *dump truck* dari lokasi AMP ke lokasi penghamparan. Produktivitas kerja dump truck yaitu kemampuan kerja dalam menyelesaikan pekerjaan per satuan kerja efektif. Untuk menghitung jumlah produksi per jam dari dump truck yang melakukan pekerjaan secara terus menerus, digunakan data sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Efisiensi kerja (Fa)} &= 0,80 \\ \text{Jarak angkut (L)} &= 37 \text{ km (dari AMP ke lokasi pekerjaan)} \\ \text{Kapasitas dump truck (V)} &= 10 \text{ ton} \\ \text{Kecepatan rata-rata bermuatan (v1)} &= 30 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

Kecepatan rata-rata kosong (v2) = 40 km/jam

Waktu muat = 78 menit

Waktu kosong = 60 menit

Waktu muat AMP = 15 menit

Waktu hampar = 30 menit

$$\begin{aligned} \text{Waktu siklus (CT)} &= \text{waktu muat} + \text{waktu angkut} + \text{waktu hampar} + \text{waktu kembali} \\ &= 15 + 78 + 30 + 60 = 183 \text{ menit} \end{aligned}$$

$$= 3,05 \text{ jam.}$$

$$\text{Produktivitas per jam (Q)} = V = 10 \text{ ton/jam.}$$

**Asphalt Finisher.** Untuk menghampar campuran aspal hot mix yang di produksi oleh *asphalt mix plant (AMP)* digunakan *asphalt finisher*. Untuk menghitung produktivitas alat berat ini, digunakan data sebagai berikut:

Kapasitas hopper (cp) = 10 ton

Tenaga penggerak (pw) = 72,4 HP

Kapasitas lebar penghamparan (b) = 4,5 m

Kapasitas tebal penghamparan (t) = 0,05 m

Kecepatan menghampar (v) = 5 m/menit

Berat jenis aspal = 2,3 ton/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} \text{Produktivitas alat (Q)} &= v \times b \times 60 \times Fa \times t \times D \\ &= 5 \times 4,5 \times 60 \times 0,75 \times 0,05 \times 2,3 \\ &= 116,44 \text{ ton/jam.} \end{aligned}$$

**Tandem roller.** Untuk memadatkan campuran aspal hot mix yang telah dihampar oleh alat berat *asphalt finisher* digunakan *Tandem Roller*. Campuran aspal tersebut di lindas atau diratakan oleh alat *tandem roller* sehingga menjadi padat. Untuk menghitung produktivitas alat, digunakan data sebagai berikut:

Kecepatan rata-rata (V) = 1,5 km/jam

Lebar efektif pematatan (b) = 2,30 m

Tebal lapis padat AC-WC (t) = 0,05 m

Jumlah lintasan (n) = 3 lintasan

Faktor efisiensi alat (Fa) = 0,75

Berat isi AC-WC (D) = 2,3 ton/m<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} \text{Produktivitas alat (Q)} &= (V \times 1000 \times b \times t \times Fa \times D) / n \\ &= (1,5 \times 1000 \times 2,3 \times 0,05 \times 0,75 \times 2,3) / 3 \\ &= 99,19 \text{ ton/jam} \end{aligned}$$

**Pneumatic Tire Roller.** *Pneumatic tire roller* adalah peralatan penggilas yang terdiri dari roda-roda dengan ban karet yang diisi dengan udara berperan sebagai alat pematatan kedua setelah pematatan

pertama menggunakan *tandem roller*. Untuk menghitung produktivitas kerja alat berat *Pneumatic tire roller*, digunakan data sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Lebar total roda pemadatan (b)} &= 2,43 \text{ m} \\
 \text{Lebar overlap (bo)} &= 0,3 \text{ m} \\
 \text{Lebar efektif pemadat} &= b - b_0 = 2,43 - 0,3 = 2,13 \text{ m} \\
 \text{Kecepatan pemadatan (v)} &= 2,5 \text{ km/jam.} \\
 \text{Faktor efisiensi kerja (FA)} &= 0,75 \\
 \text{Tebal pemadatan (t)} &= 0,05 \text{ m} \\
 \text{Lajur lintasan (N)} &= 2(\text{lajur}) \\
 \text{Jumlah lintasan (n)} &= 14 (\text{lintasan}) \\
 \text{Berat jenis aspal} &= 2,3 \text{ ton/m}^3 \\
 \text{Produktivitas alat (Q)} &= ((V \times 1000)(N(b - b_0) + b_0) Fa \times t \times D) / n \\
 &= ((2,5 \times 1000)(2(2,13) + 0,3) 0,75 \times 0,05 \times 2,3) / 14 \\
 &= 70,23 \text{ ton/jam.}
 \end{aligned}$$

#### **Waktu Pelaksanaan Pada Pekerjaan Laston Lapis Aus (AC-WC)**

##### **Asphalt Mixing Plant (AMP)**

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas produksi per jam (Q)} &= 18,75 \text{ ton/jam} \\
 \text{Volume pekerjaan} &= 5,678,27 \text{ ton} \\
 \text{Waktu (durasi) yang dibutuhkan untuk mengerjakan} &= \text{vol}/Q = 5678,27/18,75 = 302,84 \text{ jam.} \\
 \text{Jam kerja efektif (per hari)} &= 16 \text{ jam} \\
 \text{Jumlah hari yang diperlukan} &= 302,84/16 \\
 &= 18,92 \text{ hari} \rightarrow 19 \text{ hari}
 \end{aligned}$$

##### **Dump Truck**

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas produksi per unit} &= 15 \text{ ton} \\
 \text{Jumlah dump truck yang digunakan} &= 15 \text{ Unit} \\
 \text{Total kapasitas produksi (Qt)} &= 15 \times 10 = 150/8 = 18,75 \text{ ton/jam} \\
 \text{Waktu yang dibutuhkan untuk mengerjakan} &= (\text{vol.})/Qt = 5678,27/18,75 = 144,38 \text{ jam.} \\
 \text{Jam kerja efektif} &= 8 \text{ jam} \\
 \text{Jumlah hari yang dibutuhkan} &= 144,38/8 \\
 &= 20,63 \text{ hari} \rightarrow 21 \text{ hari.} \\
 \text{Karena waktu AMP (Asphalt Mixing Plant)} &\text{ adalah 19 hari, maka untuk dump truck mengikuti hari kerja AMP.}
 \end{aligned}$$

##### **Asphalt Finisher**

$$\text{Kapasitas produksi per jam (Q)} = 116,44 \text{ ton/jam}$$

Jumlah Asphalt Finisher yang digunakan = 1 Unit

$$\text{Waktu yang dibutuhkan untuk mengerjakan} = (\text{vol.})/Q = 5678,27/116,44 = 48,77 \text{ Jam}$$

Jam kerja efektif = 8 jam

$$\text{Jumlah hari yang dibutuhkan} = 48,77/8 = 6,1 \text{ hari} \rightarrow 6 \text{ hari.}$$

##### **Tandem Roller**

$$\text{Kapasitas produksi per jam (Q)} = 99,19 \text{ ton/jam}$$

Jumlah Tandem roller yang digunakan = 1 Unit

$$\text{Waktu yang dibutuhkan untuk mengerjakan} = (\text{vol.})/Qt = 5678,27/99,19 = 57,25 \text{ Jam}$$

Jam kerja efektif = 8 jam

$$\text{Jumlah hari yang dibutuhkan} = 57,25/8 = 7,16 \text{ hari} \rightarrow 7 \text{ hari.}$$

##### **Pneumatic Tire Roller**

$$\text{Kapasitas produksi per jam (Q)} = 70,23 \text{ ton/jam}$$

Jumlah pneumatic tire roller yang digunakan = 1 Unit

$$\text{Total kapasitas produksi (Qt)} = 2 \times 70,23 = 140,46 \text{ ton/jam}$$

$$\text{Waktu yang dibutuhkan untuk mengerjakan} = (\text{vol.})/Qt = 5678,27/140,46 = 40,43 \text{ Jam.}$$

Jam kerja efektif = 8 jam

$$\text{Jumlah hari yang dibutuhkan} = 40,43/8 = 5,05 \text{ hari} \rightarrow 5 \text{ hari.}$$

Berdasarkan dari evaluasi produktivitas alat berat pada pekerjaan Laston Lapis Aus (AC-WC), didapatkan hasil **Tabel 2**.

**Tabel 2 Rekapitulasi Waktu Pelaksanaan Alat Berat**

No	Peralatan	Jumlah Alat Berat	Kapasitas Produksi	Durasi waktu
1	AMP (Asphalt Mixing Plant)	1	18,75 Ton/jam	19 Hari
2	Dump Truck	15	18,75 ton/jam	19 Hari
3	Asphalt Finisher	1	116,44 ton/jam	6 Hari
4	Tandem Roller	1	99,19 ton/jam	7 Hari
5	Pneumatic Tire Roller	1	70,23 ton/jam	5 Hari

Waktu pelaksanaan sesuai schedule yang telah ditetapkan adalah 7 bulan kerja,

Tabel 3 Perbandingan alat digunakan dilapangan dengan perhitungan AHSP

No	Nama Alat yang digunakan	Sesuai Perhitungan AHSP	Pelaksanaan di lapangan	Keterangan
1	AMP (Asphalt Mixing Plant)	AMP Kapasitas 300 ton/jam	AMP Kapasitas 300 ton/jam	Sesuai di lapangan
2	<i>Dump Truck</i>	7 unit	15 Unit	Tidak Sesuai dengan di lapangan
3	<i>Asphalt Finisher</i>	1 Unit	1 Unit	Sesuai di lapangan
4	<i>Tandem Roller</i>	1 Unit	1 Unit	Sesuai di lapangan
5	<i>Pneumatic Tire Roller</i>	1 Unit	1 Unit	Sesuai di lapangan

sedangkan dari hasil perhitungan waktu pelaksanaan Laston Lapis Aus (AC-WC) kurang lebih 19 hari kerja, hal ini disebabkan karena waktu dalam schedule pekerjaan Laston Lapis Aus (AC-WC) dilakukan secara bertahap menyesuaikan pekerjaan struktur bawah jalan tersebut dari pelaksanaan dilapangan diketahui bahwa pekerjaan lapis bawah jalan tidak dilaksanakan secara menyeluruh. Namun dilaksanakan bertahap sesuai dengan jadwal pekerjaan berdasarkan dengan dokumen kontrak.

#### 4 KESIMPULAN

Hasil analisis dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Waktu pelaksanaan sesuai *schedule* yang telah ditetapkan adalah 7 bulan kerja, sedangkan dari hasil perhitungan waktu pelaksanaan Laston Lapis Aus (AC-WC) kurang lebih 19 hari kerja, hal ini disebabkan karena waktu dalam *schedule* pekerjaan Laston Lapis Aus (AC-WC) dilakukan secara bertahap menyesuaikan pekerjaan struktur bawah jalan tersebut dari pelaksanaan dilapangan diketahui bahwa pekerjaan lapis bawah jalan tidak dilaksanakan secara menyeluruh. Namun dilaksanakan bertahap sesuai dengan jadwal pekerjaan berdasarkan dengan dokumen kontrak.
2. Berdasarkan hasil analisis perhitungan antara lain:

- a. Produktivitas AMP (Asphalt Mixing Plant) = 18,75 ton/Jam
  - b. Produktivitas untuk *Dump Truck* adalah 18,75 ton/jam
  - c. Produktivitas untuk alat berat *Asphalt Finisher* adalah 116,44 ton/jam.
  - d. Produktivitas untuk alat berat *Tandem Roller* adalah 99,19 ton/jam
- Produktivitas untuk alat berat *Pneumatic Tire Roller* adalah 70,23 ton/jam.

Setelah penulis melakukan penelitian dan pengamatan langsung dilapangan, maka penulis mengemukakan saran-saran untuk kemajuan pekerjaan kedepannya, antara lain:

1. Karena alat berat memiliki dampak yang berpengaruh besar pada pelaksanaan pekerjaan proyek, maka sangat perlu merencanakan dan mengevaluasi produktivitas alat berat pada pekerjaan.
2. Untuk penelitian selanjutnya agar dapat menambahkan ruang lingkup pekerjaan sehingga alat berat lebih bervairasi

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Edi Nurhadi Kulo, Joice E. Waani, Oscar H. Kaseke. *Analisa Produktivitas Alat Berat Untuk Pekerjaan Pembangunan Jalan (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Jalan Lingkar SKPD Tahap 2 Lokasi Kecamatan Tutuyan Kabupaten Bolaang Mongondow Timur)*. Jurnal Sipil Statik Vol.5 No.7, September 2017 Universitas Sam Ratulangi Manado.
- [2] Juwita Milka Simbolon, *Analisis Produktivitas dan Biaya Penggunaan Alat Berat pada Pelaksanaan Pekerjaan Lapisan Perkerasan Lentur (Studi Proyek Peningkatan*

- Struktur Jalan Sirombu-Afulu), Ujian Sidang Sarjana Teknik Sipil, Universitas Medan Area.*
- [3] Muhammad Haykal, Muhammad Reza Kusman, 2024. *Optimasi Produktivitas dan Biaya Penggunaan Alat Berat pada Pekerjaan Galian untuk Saluran Drainase Proyek Pelebaran Jalan Batu Aji -Kuaao.* Jurnal Teknik Universitas Gadjah Mada.
  - [4] Pekerjaan Preservasi Jalan Batu-Toili-Rata-Baturube. Tugas akhir Jurusan Teknik Sipil Universitas Tadulako Palu.
  - [5] Ronald, Tisano TJ. Arsjad, Grace Malingkas, 2018. *Analisa Perhitungan Produktivitas Alat Berat Gali-Muat (Excavator) Dan Alat Angkut (Dump Truck) Pada Pekerjaan Pematangan Lahan Perumahan Residence Jordan Sea.* Jurnal Tekno, Vol. 16, No. 70, 2018 Sam Ratulangi Manado.
  - [6] Rivelya Ivanka T.V Bannegau, Bahtiar, Helen G. wayangkau 2024. *Analisis Produktivitas Alat Berat Pada Pekerjaan Peningkatan Jalan Batas Kota Pegaf – Batas Kabupaten Manokwari Selatan.* Jurnal Sipil Terapan Universitas Cendrawasih Jl. Kampwolker Perumnas 3 Waena Jayapura, Papua.
  - [7] Suci Indah Sari, Eka Purnamasari, Akhmad Gazali, 2017. *Analisa Biaya Waktu dan Produktivitas Alat Berat Pada Proyek Peningkatan Kapasitas Jalan Anjir Talaran-Tabukan Raya.* Jurnal Teknik Sipil Universitas Islam Kalimantan MAB Banjarmasin.
  - [8] Surat Edaran Direktur Jenderal Bina Konstruksi Nomor 68/SE/Dk/2024 tentang tata cara penyusunan Biaya Pekerjaan Konstruksi Bidang Pekerjaan Umum Perumahan Rakyat.
  - [9] Susy Fatena Rostiyanti, 2008, *Alat-alat Berat untuk Proyek Konstruksi Edisi kedua.* Rineke Cipta, Jakarta.
  - [10] Triyas Afrilia, 2018 *Analisis Produktivitas Alat Berat Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Balikpapan – Samarinda Km 28.* Proposal Tugas Akhir Politeknik Negeri Balikpapan.
  - [11] Wilopo 2009. *Metode konstruksi dan alat-alat berat.* UI-Pres, Jakarta.



## ANALISIS STABILITAS LERENG BERDASARKAN NILAI STANDARD PENETRATION TEST PADA PROYEK JALAN TOL JAKARTA – CIKAMPEK PAKET 2B RUAS SUKARAGAM – SUKABUNGAH STA 30+450

Muhammad Rafi Basyar<sup>1</sup>, Ilham<sup>\*1</sup>, Arzal M. Zain<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Desain, Institut Teknologi Sains Bandung, Cikarang Pusat, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palu, Palu, Jalan Hang Tuah No. 114

\*Penulis korespondensi: ilham@itsb.ac.id

**DISUBMIT** 3 Februari 2026 **DIREVISI** 5 Februari 2026 **DITERIMA** 7 Februari 2026

**ABSTRAK** Studi ini mengevaluasi stabilitas lereng pada Proyek Jalan Tol Jakarta – Cikampek II Selatan, Paket 2B, STA 30+450, menggunakan data Standard Penetration Test (SPT) sebagai dasar parameter tanah. Analisis menggunakan metode Janbu dan Plaxis 2D dengan Metode Elemen Hingga. Hasil menunjukkan bahwa dalam kondisi statis lereng stabil, dengan faktor keamanan di atas standar minimum. Namun, pembebanan seismik berdasarkan SNI 1726:2019 menurunkan faktor keamanan mendekati tingkat kritis, dengan deformasi yang signifikan pada lapisan tanah lunak. Hasil ini menekankan perlunya drainase yang tepat, pengelolaan geometri lereng, dan penguatan tanah untuk menjaga stabilitas. Studi ini memberikan rekomendasi praktis untuk mitigasi risiko tanah longsor pada proyek jalan tol dan memberikan kontribusi akademis dengan menggabungkan interpretasi tanah berbasis SPT dengan analisis numerik.

**KATA KUNCI** Slope stability, Standard Penetration Test, safety factor, Janbu method, Plaxis 2D

### 1 PENDAHULUAN

Tanah merupakan material alami yang terbentuk dari pelapukan batuan dan bahan organik, serta terdiri atas partikel mineral, air, udara, dan unsur hara. Sifat dan karakteristik tanah sangat bervariasi, tergantung pada asal-usulnya, proses pembentukannya, serta kondisi lingkungan tempat tanah tersebut berada. Dalam konteks rekayasa geoteknik, tanah berperan penting sebagai media pendukung struktur dan lereng. Namun, keberadaan tanah pada kemiringan tertentu dapat menimbulkan potensi tidakstabilan, khususnya di daerah yang memiliki kondisi geologis kompleks atau sering terpapar curah hujan tinggi. Pemahaman mengenai komposisi dan karakteristik tanah sangat penting dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek infrastruktur, terutama dalam konteks analisis stabilitas lereng.

Pembangunan infrastruktur jalan tol merupakan strategi penting untuk meningkatkan konektivitas dan mendorong pertumbuhan ekonomi wilayah. Proyek Jalan Tol Jakarta - Cikampek II Selatan, yang memiliki rute utama dari Jatiasih ke Sadang,

terbagi menjadi 3 paket yaitu paket 1 sampai 3, pada paket 2 terbagi menjadi 2 paket lagi yaitu paket 2A dan 2B. Dalam proyek ini, Paket 2B mencakup rute dari Sukaragam ke Sukabungah, yang merupakan bagian penting dari keseluruhan proyek.

Namun demikian, pelaksanaan proyek ini menghadapi tantangan geoteknik yang cukup signifikan, khususnya terkait dengan stabilitas lereng galian. Stabilitas lereng galian sangat penting untuk diperhatikan, karena lereng yang tidak terkelola dengan baik dapat berpotensi menimbulkan bencana, seperti longsor dan kerusakan struktur. Menurut Terzaghi dan Peck (1967), stabilitas lereng adalah kemampuan lereng untuk menahan gaya-gaya yang bekerja padanya tanpa mengalami kegagalan. Oleh karena itu, analisis stabilitas lereng galian perlu dilakukan dengan cermat, mempertimbangkan berbagai faktor seperti karakteristik tanah, kondisi lingkungan, dan beban yang bekerja pada lereng.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai sifat-sifat tanah adalah Standard

Penetration Test (SPT). SPT memberikan data yang diperlukan untuk menentukan parameter geoteknik tanah, seperti kepadatan, kohesi, dan sudut gesek dalam, yang sangat penting dalam analisis stabilitas lereng. Dengan menggunakan data SPT, analisis stabilitas lereng dapat dilakukan untuk mengevaluasi potensi terjadinya longsor dan merumuskan langkah-langkah mitigasi yang tepat.

Dalam konteks proyek Jalan Tol JAKARTA - CIKAMPEK II Selatan, khususnya pada Paket 2B yang mencakup rute Sukaragam ke Sukabungah, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng galian berdasarkan data SPT yang diperoleh dari lokasi proyek. Analisis ini akan dilakukan menggunakan perangkat lunak PLAXIS. Penggunaan PLAXIS sebagai perangkat lunak analisis elemen hingga memungkinkan peneliti untuk melakukan simulasi yang lebih kompleks dan akurat terhadap perilaku lereng dalam kondisi geoteknik yang spesifik.

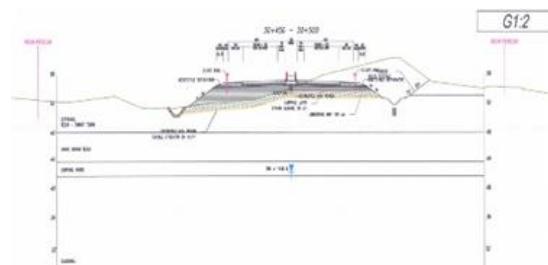
## 2 METODOLOGI

**Lokasi Penelitian.** Penelitian ini dilakukan pada proyek Pembangunan Jalan Tol Jakarta – Cikampek II Selatan Paket 2B STA 30+450. Lokasi penelitian secara spesifik dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Lokasi Penelitian

Selain itu, untuk mendukung analisis stabilitas lereng, potongan melintang lereng pada lokasi juga disajikan yang bersumber dari Rencana Teknik Akhir dari tempat proyek penelitian yang mana gambar ini akan dijadikan oleh penulis sebagai acuan saat membuat pemodelan lereng galian STA 30+450 untuk penelitian stabilitas lereng galian pada proyek jalan tol ini.



## Gambar 2 Potongan Melintang Lereng

**Stabilitas Lereng.** Stabilitas lereng adalah kemampuan suatu lereng tanah atau batuan untuk menahan gaya-gaya yang bekerja padanya tanpa mengalami keruntuhan atau longsor. Lereng dikatakan stabil jika gaya penahanan (resisting forces), seperti kohesi dan gesekan tanah, lebih besar daripada gaya penggerak (driving forces), seperti berat tanah, tekanan air pori, atau beban luar. Analisis stabilitas lereng bertujuan untuk mengevaluasi faktor keamanan lereng, yaitu perbandingan antara kekuatan tanah terhadap gaya yang mendorong tanah tersebut untuk bergerak. Terdapat beberapa faktor utama yang mempengaruhi stabilitas lereng, antara lain:

**Karakteristik Tanah.** Jenis, kepadatan, kohesi, dan sudut gesek dalam tanah sangat mempengaruhi kekuatan geser lereng. Tanah lempung dengan plastisitas tinggi cenderung memiliki kohesi tinggi namun bersifat ekspansif dan sensitif terhadap kadar air, sementara tanah pasir lebih stabil jika tidak jenuh. Terzaghi (1943) menekankan bahwa kekuatan geser tanah merupakan kunci utama dalam mempertahankan stabilitas lereng.

**Kemiringan Lereng.** Semakin curam kemiringan lereng, semakin besar gaya penggerak yang bekerja. Lereng alami biasanya memiliki kemiringan stabil berdasarkan jenis tanah dan vegetasi, sedangkan lereng buatan seringkali perlu diperkuat dengan dinding penahan atau perkuatan geoteknik.

**Kondisi Hidrologi dan Air Pori.** Kehadiran air dalam tanah dapat meningkatkan tekanan air pori dan menurunkan tegangan efektif, sehingga mengurangi kekuatan geser tanah. Air hujan, rembesan, atau muka air

tanah yang tinggi dapat mempercepat kegagalan lereng. Oleh karena itu, sistem drainase sangat penting dalam desain lereng.

**Beban Eksternal.** Beban tambahan seperti kendaraan, struktur bangunan, atau alat berat pada puncak lereng dapat meningkatkan tegangan pada massa tanah dan menyebabkan pergeseran. Getaran akibat aktivitas konstruksi atau gempa juga merupakan beban dinamis yang harus diperhitungkan.

Memahami faktor-faktor tersebut sangat penting dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek konstruksi, terutama pada proyek jalan tol seperti Jalan Tol Jakarta–Cikampek II Selatan, di mana lereng galian perlu dianalisis secara cermat untuk menjamin keselamatan dan keberlanjutan infrastruktur. Analisis stabilitas lereng bertujuan menentukan faktor keamanan bidang longsor yang berpotensi terjadi. Berikut adalah penjelasan tentang angka keamanan (faktor keamanan) pada lereng:

**SF < 1,5:** Lereng tidak stabil. Gaya penggerak melebihi gaya tahanan, sehingga lereng berpotensi mengalami keruntuhan atau longsor.

**SF = 1,5:** Lereng dalam kondisi kritis. Lereng berada pada batas stabilitas, sehingga dengan sedikit tambahan gaya penggerak, lereng dapat menjadi tidak stabil.

**SF > 1,5:** Lereng stabil. Gaya tahanan lebih besar dari gaya penggerak, sehingga lereng dinilai aman dan tidak berisiko mengalami keruntuhan pada kondisi saat ini.

Penentuan faktor keamanan ini sangat penting untuk memastikan stabilitas lereng, terutama dalam perencanaan dan pelaksanaan konstruksi serta mitigasi risiko longsor. Perhitungan umum untuk stabilitas lereng dilakukan dengan membandingkan momen tahanan terhadap momen penggerak, formulanya adalah:

$$SF = \frac{\text{momen tahanan}}{\text{momen penggerak}} = \frac{RC \cdot LAC}{W \cdot y}$$

Keterangan: SF = faktor keamanan, W = berat tanah yang berpotensi longsor (kN), C = kohesi tanah ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ), R = jari-jari bidang longsor (m), y = jarak pusat berat W terhadap titik pusat O (m), LAC = panjang lengkungan (m).

**Pembebatan.** Beban yang digunakan dalam penelitian stabilitas lereng ialah beban lalu lintas dan beban perkerasan. Beban tersebut yang nantinya akan menjadi acuan kestabilan lereng pada penelitian ini.

**Beban Lalu Lintas.** Beban lalu lintas adalah gaya dinamis atau statis yang ditimbulkan oleh kendaraan yang melintas (Das. B. M, 2010). Beban ini dapat memengaruhi stabilitas lereng dengan meningkatkan tegangan geser (*shear stress*) di dalam tanah/batuhan, sehingga berpotensi memicu kelongsoran jika melebihi kekuatan geser material tersebut. Berdasarkan SNI 8460:2017, besar beban lalu lintas ditentukan berdasarkan kelas jalannya. Berikut klasifikasi beban lalu lintas berdasarkan SNI 8460:2017 pada tabel 2. 3 yang akan dijadikan sebagai tinjauan pada beban kali ini.

**Tabel 1 Beban Lalu Lintas**

Kelas Jalan	Beban Lalu Lintas (kPa)
I	15
II	12
III	12

**Beban Perkerasan.** Menurut Pd-T- 5- 005- , beban perkerasan adalah beban yang diterima permukaan jalan dari kendaraan yang melintas dan ditransmisikan ke lapisan-lapisan struktur perkerasan hingga ke tanah dasar. Pada penelitian ini, beban perkerasan dihitung berdasarkan tebal perkerasan trase jalan tol JAKARTA - CIKAMPEK II Selatan Paket 2B STA 30+450 yang dikalikan dengan berat jenis beton dengan total seluruh beban 25 kPa.

**Plaxis 2D.** Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*) yang diimplementasikan melalui perangkat lunak PLAXIS 2D sebagai alat analisis utama PLAXIS memungkinkan pemodelan numerik yang kompleks

terhadap perilaku tanah dan lereng dengan mempertimbangkan karakteristik non-linear material tanah. Adapun alasan pemilihan metode ini adalah: 1) Memodelkan perilaku tanah secara realistik dengan memperhitungkan sifat non-linear dan heterogenitas material; 2) Menganalisis distribusi tegangan dan regangan di dalam massa lereng secara detail untuk memahami potensi kegagalan; 3) Mensimulasikan berbagai kondisi pembebangan, termasuk beban eksternal dan kondisi hidrologi seperti muka air tanah; 4) Menghitung faktor keamanan lereng secara komprehensif dan akurat berdasarkan hasil simulasi.

Plaxis menyediakan antarmuka pengguna yang mudah digunakan secara grafis. Pengguna dapat dengan cepat membangun dan memproses model elemen hingga yang kompleks dengan menggunakan prosedur input yang intuitif. Program ini juga dilengkapi dengan fasilitas output yang memungkinkan pengguna untuk memperoleh hasil perhitungan secara mendetail dan dapat dipresentasikan dengan baik. Plaxis terdiri dari empat sub-program utama yang berfungsi sebagai berikut: 1) *Input*: Sub-program ini digunakan untuk membuat model elemen hingga dengan menggambar geometri, mengatur properti material, dan menentukan kondisi batas dan beban; 2) *Calculation*: Sub-program ini digunakan untuk menjalankan perhitungan numerik berdasarkan model yang telah dibuat. Program ini menggunakan metode elemen hingga untuk memperkirakan deformasi dan stabilitas; 3) *Output*: Sub-program ini menyediakan fasilitas untuk menampilkan hasil perhitungan secara visual dan mendetail. Pengguna dapat menghasilkan grafik, tabel, dan laporan untuk menganalisis dan mempresentasikan hasil analisis; 4) *Curve*: Sub-program ini digunakan untuk mengelola dan memvisualisasikan kurva kekakuan dan deformasi untuk bahan geoteknik yang digunakan dalam model.

**Metode Janbu.** Janbu (1954) membuat suatu metode analisa yang dapat digunakan

pada permukaan longsor yang berbentuk *circular* dan *non circular*. Janbu merumuskan persamaan umum kesetimbangan dengan menyelesaikan secara vertikal dan horizontal pada dasar tiap - tiap irisan dengan memperhitungkan seluruh kesetimbangan gaya. Janbu juga mengembangkan metode yang mirip dengan metode bishop sederhana yang dikenal dengan metode janbu sederhana (Metode Janbu *Simplified*). Metode ini memiliki asumsi sama dengan metode bishop yang mengasumsikan bahwa gaya normal antar irisan diperhitungkan tetapi gaya geser antar irisan diabaikan atau bernilai nol ( $XL-XR = 0$ ). Perbedaan antar metode bishop sederhana dan metode janbu sederhana terletak pada penurunan angka faktor keamanan. Bishop menurunkan angka faktor keamanan dari kesetimbangan vertical sedangkan janbu menurunkan angka faktor keamanan dari kesetimbangan horizontal. Keuntungan menggunakan metode ini yaitu metode ini dapat dicari menggunakan perhitungan manual dan bisa digunakan dengan model keruntuhan yang berbentuk busur lingkaran maupun yang tidak berbentuk busur lingkaran. Metode ini juga memiliki kekurangan seperti faktor amannya cenderung kecil.

**Parameter Tanah Berdasarkan N-SPT.** Analisis parameter mekanika tanah pada lokasi dilakukan berdasarkan hasil Standard Penetration Test (N - SPT). Nilai N - SPT digunakan untuk menurunkan parameter yang diperlukan dalam analisis kestabilan lereng, yaitu kuat geser tak terdrainase ( $S_u$ ), kohesi efektif pendekatan ( $c'$ ), dan modulus elastisitas ( $E$ ). Pendekatan yang dipakai pada penelitian ini adalah korelasi sederhana menurut Terzaghi & Peck, 1978 dan Sowers, 1979 yaitu:

$$Su=6 \times N$$

Juga dengan parameter lain yang dikorelasikan menggunakan N-SPT yaitu kohesi, permeabilitas, berat jenis, dan lainnya seperti yang ditujukan pada **Tabel 2**. Yang mana hasil tersebut akan digunakan sebagai acuan pada penelitian kali ini.

Tabel 2 Korelasi Parameter Tanah Berdasarkan N-SPT

Parameter	Berdasarkan N-SPT		Berdasarkan CPT / CPTu	
	Tanah kohesi	Tanah non-kohesi	Tanah kohesi	Tanah non-kohesi
	$(q_u / \sigma_u) / N_{60} = 0.5(z - z_u / 4.6)$			
N-SPT vs qc	$I_s = (0.47 - \log Q)^2 + (\log F - 1.22)^2/2.3$ $Q = (q_u - \sigma_u) / \sigma'_{vs}$ $F = (I_s / I_s - \sigma_u) \times 100\%$			
Unit Weight ( $\gamma$ )		Tabel 3.1		Tabel 3.1
Kuat Gesek Undrained (Su)	6 N	-	$S_u = \frac{q_u - \sigma_{uv}}{N_k}$ $N_k = 15 - 20$	-
Kuat Gesek Efekif c'	Tabel 3.2	$c' (\text{kPa}) = 0.1cv$	Tabel 3.2	$c' (\text{kPa}) = 0.1cv$ $cv = 17.6 + 1.1 \log \left( (q_u / \sigma_{uv}) / (\sigma'_{vs} / \sigma_{uv})^{0.2} \right)$
$\phi'$	Gambar 3.7	$\phi' = \sqrt{20(N_c \gamma \gamma_{sat})} = 30$		
Kuat Gesek Undrained (Su) Claystole	3.5 N			
Kuat Gesek Efekif c' Claystole	3.5 - 7 (kPa)			-
$\phi'$ Claystole	15.5 - 20 (°)			-
Deformasi, E				Tabel 3.4

Untuk perhitungan lainnya juga disebutkan dalam gambar, yang ada beberapa perbedaan caa mengkorelasikannya sesuai kondisi yang ditentukan dan juga parameter yang diinginkan.

### 3 PEMBAHASAN DAN DISKUSI

**Perhitungan Geoteknik.** Berdasarkan hasil perhitungan dari data SPT, diperoleh parameter *undrained* (total-stress) untuk tiap lapisan pada BH-6 dan BH-7 sebagaimana ditujukan pada gambar **Tabel 3.**

Tabel 3 Hasil Perhitungan Parameter Tanah Pada BH-6

Lapisan	Kedalaman (m)	N-SPT	Su (kPa)	c' (kPa)	E (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Lempung kaku	0,00 - 3,00	20	120	12	7.8	18,0	19,5
Lempung terkonsolidasi	3,00 - 15,00	50	300	30	16.8	19,0	20,5
Lempung Keras	15,00 - 24,45	60	360	36	19.8	19,5	21,0

Tabel 4 Hasil Perhitungan Parameter Tanah Pada BH-7

Lapisan	Kedalaman n (m)	N-SPT	Su (kPa)	c' (kPa)	E (kPa)	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )
Lempung lunak	0,00 - 1,50	3	18	1,8	2.7	17,0	18,5
Lempung lunak-sedang	1,50 - 3,00	4	24	2,4	3	17,5	19,0
Lempung agak kaku	3,00 - 7,50	6	36	3,6	3,6	18,0	19,5
Lempung kaku	7,50 - 12,45	12	72	7,2	5,4	18,5	20,0

Hasil diatas merupakan hasil dari pengolahan data dengan metode korelasi N-

SPT menjadi parameter tanah sebagai acuan pada penelitian kali ini.

**Analisis dengan Metode Janbu.** Perhitungan berdasarkan kondisi tanah yang ditentukan yaitu:

- Kondisi drain
- Tinggi Lereng H = 4 m
- Beban 25 kPa
- Faktor koreksi chart Janbu  $N_0 = 5,6 \mu w = 0,9 \mu t = 1$

Pertama, mencari kohesi rata - rata pada lereng:

$$C_{avg} = \frac{\sum Cihi}{H}$$

$$C_{avg} = \frac{12(3) + 30(12) + 36(9.45)}{24.45}$$

$$= 30.1 \text{ kPa}$$

Berdasarkan perhitungan tersebut didapatkan bahwa nilai kohesi 30.1 kPa. Kemudian mencari berat isi rata - rata pada tanah sekitar lereng:

$$\gamma_{avg} = \frac{\sum \gamma ihi}{H}$$

$$\gamma_{avg} = \frac{18(3) + 19(12) + 19.5(9.45)}{24.45}$$

$$= 19.1 \text{ kN/m}^3$$

dari perhitungan tersebut didapatkan berat isi rata - rata adalah 19.1 kN/m<sup>3</sup>. Setelah didapatkan keduanya cari gaya dorong pada tanah dan masukan beban yang sudah ditentukan yaitu 25 kPa:

$$P_d = \frac{\gamma_{avg} \cdot H + q}{\mu_w \mu_t}$$

$$P_d = \frac{19.1 \cdot 4 + 25}{0.9 \times 1} = 112.7 \text{ kN/m}^2$$

berdasarkan gaya dorong yang ada dan sudah dimasukan beban, gaya dorong memiliki nilai  $\text{kN/m}^2$ . Setelah didapatkan semuanya baru hitung faktor aman terhadap lereng menggunakan formula SF yang telah ditentukan diatas yaitu

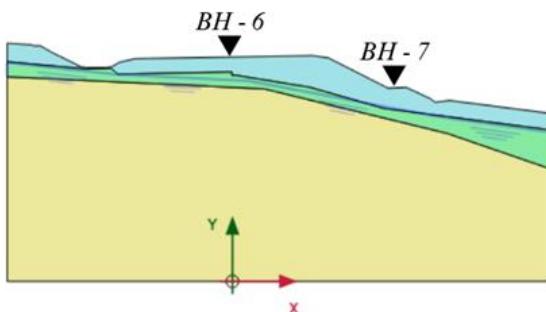
$$\text{SF} = \frac{N_0 \cdot C_{avg}}{P_d}$$

$$\text{SF} = \frac{5.6 \cdot 30.1}{112.7} = 1.50$$

Hasil perhitungan didapatkan nilai faktor aman lereng dengan metode janbu adalah 1.50.

### Analisis Stabilitas Lereng dengan Plaxis.

Pemodelan lereng dibuat berdasarkan potongan melintang STA 30+450.



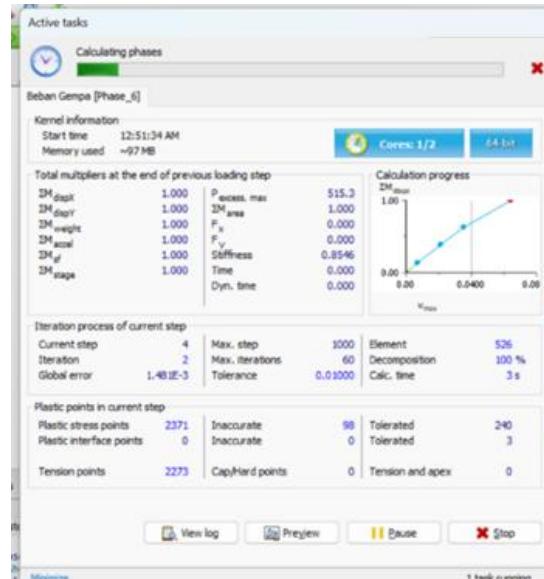
Gambar 2 Pemodelan Lereng

**Program Input.** Tahap pertama pada analisis lereng menggunakan plaxis adalah input, yaitu memasukan seluruh data yang dibutuhkan untuk analisis stabilitas lereng. Mulai dari koordinat lereng, parameter tanah, dan beban lereng.

**Program Calculation.** Tahap kedua setelah input seluruh parameter tanah dan beban adalah calculation, yang mana pada tahap ini plaxis secara otomatis akan mulai menghitung kekuatan lereng. Pada tahap calculation untuk beban, calculation type yang dipilih adalah plastic, karena pada analisis stabilitas lereng ini menggunakan analisis jangka pendek yang mana untuk tipe

perhitungan langsung. Dan pada calculation type ini, keadaan tanah dianggap undrained sesuai dengan parameter yang ditentukan. Setelah itu bisa lanjut ke proses perhitungan.

Setelah proses perhitungan selesai, plaxis akan memberikan hasil nilai safety factor pada lereng yang telah di modelkan diawal untuk bisa dijadikan sebagai acuan dalam analisis lereng dan pekerjaan konstruksi.



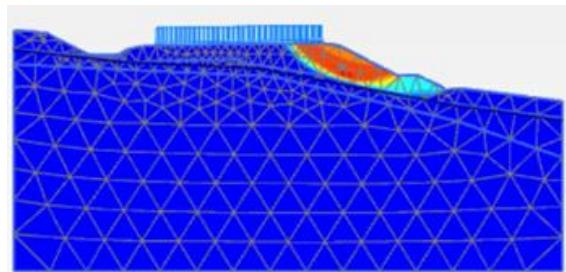
Gambar 3 Proses Perhitungan

**Program Output.** Setelah proses dari calculation selesai, maka tahap selanjutnya yaitu program output. Plaxis akan secara otomatis memperlihatkan hasil safety factor sekaligus deformasi dan bidang gelincir yang terjadi pada lereng akibat beban kendaraan dan beban gempa. Hasil dari output inilah yang akan dijadikan sebagai hasil dari perhitungan secara numerik berbasis komputasi dari perangkat lunak plaxis 2D.

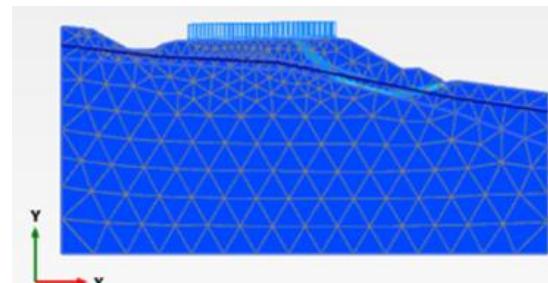
Pada output ini akan menunjukkan hasil berupa bidang deformasi, bidang gelincir, dan safety factor. Selain hasil tersebut plaxis juga bisa menunjukkan hasil lainnya seperti area plastis atau titik dari node yang ditentukan.

**Gambar 4** memperlihatkan bidang keruntuhan (*failure mechanism*) yang teridentifikasi pada lereng yang dapat

dijadikan sebagai acuan untuk memberikan rekomendasi di area tersebut.



Gambar 4 Hasil Output dari Plaxis



Gambar 5 Hasil output Bidang Gelincir

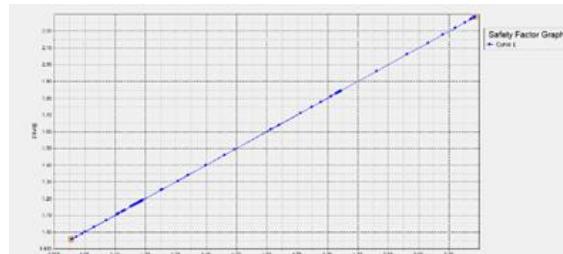
Setelah area deformasi dan bidang gelincir disajikan, plaxis juga mensajikan data hasil dari *safety factor* lereng setelah diberikan beban gempa dan beban jalan, yang mana menyatakan hasil dari seluruh perhitungan beban dan apa saja yang terjadi pada perhitungan lereng tersebut secara otomatis sehingga bisa dijadikan sebagai acuan data untuk pekerjaan konstruksi dan bahan diskusi terkait keamanan lereng tersebut.

Reached values	
Reached total time	0.000 day
CSP - Relative stiffness	0.01271E-15
ForceX - Reached total forc	0.000 kN/m
ForceY - Reached total forc	0.000 kN/m
Pmax - Reached max pp	170.0 kN/m <sup>2</sup>
ΣM <sub>stage</sub> - Reached phase p	0.000
ΣM <sub>weight</sub> - Reached weight	1.000
ΣM <sub>sf</sub> - Reached safety fact	1.841

Gambar 6 Hasil Output Safety Factor

**Program Curve.** Program ini digunakan untuk mengelola dan memvisualisasikan kurva kekakuan dan deformasi untuk bahan geoteknik yang digunakan dalam model, juga mensajikan data tabel perhitungan dari setiap phase yang dibuat dalam plaxis.

Gambar output kurva hasil dari analisis stabilitas lereng dengan plaxis disajikan pada **Gambar 7**.



Gambar 7 Kurva Perhitungan Safety Factor

**Gambar 7** memperlihatkan *Safety Factor Graph* hasil analisis metode *Strength Reduction* pada program Plaxis. Sumbu horizontal (X) menunjukkan faktor pengali ( $\Sigma M_{sf}$ ) yang diterapkan pada parameter kuat geser tanah, sedangkan sumbu vertikal (Y) menunjukkan respon sistem berupa nilai  $\Sigma M_{sf}$  yang dicapai pada setiap tahapan perhitungan.

Pada awal kurva, nilai  $\Sigma M_{sf}$  berada pada angka 1,0 yang berarti belum terjadi reduksi kekuatan tanah. Seiring bertambahnya iterasi, nilai  $\Sigma M_{sf}$  meningkat secara linier dan konvergen hingga mencapai titik maksimum sekitar 2,28. Pola linier ini menunjukkan bahwa proses reduksi kuat geser berjalan stabil tanpa adanya ketidakstabilan numerik selama iterasi berlangsung.

#### 4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil geologi, data penyelidikan tanah, serta analisis stabilitas lereng berdasarkan nilai SPT pada lokasi galian STA 30+450 Proyek Jalan Tol Jakarta – Cikampek II Selatan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kondisi Geologi. Lokasi STA 30+450 didominasi material vulkanik, endapan sungai muda, dan batuan sedimen halus (lempung plastis, napal). Lapisan atas (0 – 3 m) umumnya berupa lempung kaku N-SPT (15 – 20), Lapisan tengah (3 – 15 m) berupa lempung terkonsolidasi dengan N-SPT (20 – 50), pada kealaman >15 m (khusus BH-6) lapisan tanah sudah sangat keras dengan N-SPT >50 yang menunjukkan tanah sangat padat.

2. Analisis stabilitas lereng galian pada STA 30+450 telah berhasil dilakukan menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D dengan parameter tanah hasil interpretasi data SPT.
3. Evaluasi tingkat keamanan lereng, menggunakan metode janbu nilai SF adalah 1.5 yang mana dikondisi kritis. Menggunakan plaxis tanpa beban gempa nilai SF adalah 1.841 yang lereng dalam kondisi aman. Menggunakan plaxis dengan beban gempa nilai SF adalah 1.183 menunjukan bahwa lereng masih tergolong aman dengan kondisi beban gempa.
4. Meskipun lereng secara keseluruhan stabil, dominasi tanah lempung plastis yang rentan terhadap penurunan kuat geser akibat air memerlukan perhatian khusus terutama pada BH-7.

#### Saran

1. Melihat adanya lapisan tanah lempung plastis yang rentan kehilangan kuat geser saat jenuh air, terutama di BH-7, dapat dipertimbangkan dilakukan replacement (penggantian tanah) dengan material yang lebih stabil seperti tanah granular (pasir bergradasi baik) atau material pilihan hasil borrow pit dan dilakukan analisis ulang agar lebih myakinkan.
2. Untuk mengurangi erosi dan memperlambat masuknya air hujan ke tubuh lereng, dapat dipertimbangkan pelapisan dengan shotcrete, geotextile, atau vegetasi berakar kuat yang mampu memperlambat laju air atau Gerak air ke tanah.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Atkinson, J. H., & Bransby, P. L. (1978). *The Mechanics of Soils: An Introduction to Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill.
- [2] Babu, G. L. S., & Reddy, K. R. (2012). *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- [3] Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 – Tata Cara Perhitungan Stabilitas Lereng*. Jakarta: BSN.
- [4] Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 – Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung*. Jakarta: BSN.
- [5] Boulanger, R. W., & Ziotnick, I. (2013). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Elsevier.
- [6] Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- [7] Brady, N. C., & Weil, R. R. (2010). *The Nature and Properties of Soils* (14th ed.). Pearson Education.
- [8] Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swools, W. M. (2020). *PLAXIS 2D Reference Manual*. Bentley Systems.
- [9] Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- [10] Craig, R. F. (2004). *Soil Mechanics* (7th ed.). Spon Press.
- [11] Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide types and processes. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. National Research Council.
- [12] Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- [13] Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- [14] Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique*, 49(3), 387–403.
- [15] Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah 1*. UGM Press.
- [16] Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press.
- [17] Khosravi, M., & Khosravi, M. (2014). *Geotechnical Testing Journal*.
- [18] Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall.
- [19] Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- [20] Meyerhof, G. G. (1956). The Ultimate Bearing Capacity of Foundations.
- [21] Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [22] NAVFAC DM-7.1. *Soil Mechanics*.
- [23] Pd – T – 09 – 2005. *Pedoman Teknis Perencanaan Stabilitas Lereng*.
- [24] Pd – T – 05 – 2005 – B. (Beban perkerasan).
- [25] Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. Thomas Telford.
- [26] PT Jasamarga Japek Selatan & Konsultan Perencana. (2023). *Laporan Hasil Investigasi Tanah Proyek Jalan Tol Jakarta – Cikampek II Selatan Paket 2B*. Dokumen internal proyek.
- [27] Reddy, K. R., & Reddy, G. V. (2013). *International Journal of Engineering Research and Applications*.
- [28] Ranjan, G., & Rao, A. S. R. (2000). *Basic and Applied Soil Mechanics*. New Age International.
- [29] Sarwono. (2003). (Diagram Segitiga Tekstur Tanah).
- [30] Skempton, A. W. (1986). *Soil Mechanics in Engineering Practice*.
- [31] Sowers, G. F. (1979). *Introductory Soil Mechanics and Foundations: Geotechnical Engineering*. Macmillan.
- [32] Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- [33] Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- [34] USCS – Unified Soil Classification System Guidelines.

## ANALISIS KINERJA SEISMIK STRUKTUR GEDUNG TIDAK BERATURAN MENGGUNAKAN METODE *PUSHOVER ANALYSIS*

Elza Zeanti Slamet\*<sup>1</sup>, Euneke Widyaningsih<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Bandung, Jalan PH.H. Mustopa No. 23

Penulis korespondensi: [elzazeanti@gmail.com](mailto:elzazeanti@gmail.com)

**DISUBMIT** 30 Januari 2026 **DIREVISI** 4 Februari 2026 **DITERIMA** 6 Februari 2026

**ABSTRAK** Indonesia merupakan wilayah dengan kegempaan yang tinggi, sehingga risiko kerusakan bangunan akibat gempa sangat besar. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja struktur gedung *Genesis Global Community School* yang memiliki ketidakberaturan struktural, terhadap beban gempa dengan berbagai intensitas. Metode yang digunakan adalah analisis statik nonlinier (*pushover analysis*) dengan bantuan perangkat lunak ETABS. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur gedung memiliki ketidakberaturan H2, H3, V2, dan V4. Analisis elastik awal menunjukkan bahwa respons struktur terhadap beban gempa rencana masih memenuhi kriteria desain, namun evaluasi ketidakberaturan vertikal Tipe 4 mengindikasikan beberapa kolom tidak sepenuhnya memenuhi tuntutan gaya seismik, sehingga diperlukan analisis *pushover*. Berdasarkan hasil *pushover analysis*, kinerja struktur secara global pada keempat arah berada pada tingkat *Immediate Occupancy* (IO). Namun demikian, pada arah X, Y, dan -Y ditemukan beberapa kolom yang langsung melampaui batas *Collapse Prevention* (CP) tanpa melalui kondisi IO hingga *Life Safety* (LS), serta tingkat kerusakan gedung didominasi oleh kategori *extensive damage* dengan probabilitas yang tinggi, yang mengindikasikan adanya potensi kelemahan lokal pada elemen struktural di sekitar zona diskontinuitas vertikal.

**KATA KUNCI** Kurva Kerentanan; *Pushover*; Struktur Tidak Beraturan

### 1 PENGANTAR

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kegempaan tinggi karena berada di pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, sehingga risiko kerusakan bangunan akibat gempa sangat besar. Gedung *Genesis Global Community School* yang berlokasi di Tangerang, Banten, memiliki fungsi vital sebagai sarana pendidikan. Sebagai bangunan publik yang menampung banyak orang dalam satu waktu, keberlangsungan fungsi dan keselamatan gedung sekolah menjadi sangat penting untuk menjamin keamanan penggunanya.

Variasi ketidakberaturan horizontal dan vertikal pada gedung beton bertulang menghasilkan perilaku seismik yang berbeda meskipun dengan kualitas material yang sama, sehingga ketidakberaturan sangat memengaruhi gaya geser, deformasi lateral,kekakuan, *drift ratio*, dan percepatan maksimum bangunan. Kondisi tersebut menimbulkan pertanyaan mengenai sejauh mana kinerja struktur dapat dipertahankan

ketika menghadapi gempa dengan berbagai tingkat intensitas. [1] [2]

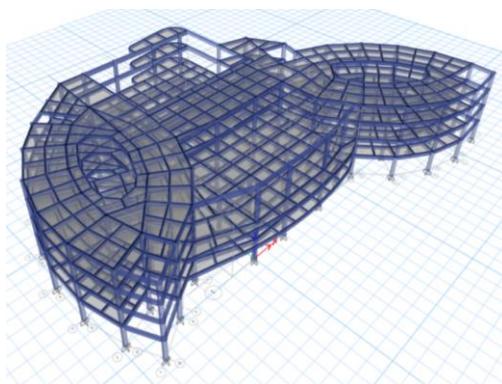
Analisis struktur umumnya dilakukan dengan pendekatan linier melalui metode statik ekivalen atau respons dinamik, yang hanya memberikan informasi mengenai tingkat keamanan bangunan terhadap gempa rencana dengan asumsi perilaku material masih berada pada kondisi elastis. Sebagai alternatif, analisis *pushover* merupakan metode analisis statik nonlinier yang digunakan untuk mengevaluasi respons struktur secara bertahap hingga mencapai kondisi ultimit, menghasilkan kurva kapasitas yang menunjukkan hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan. Berdasarkan kurva tersebut, dapat ditentukan *performance point* sebagai titik keseimbangan antara kapasitas struktur dan tuntutan gempa, sehingga kinerja struktur dapat dievaluasi menurut kriteria ATC-40 atau FEMA 440 pada level *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), dan *Collapse Prevention* (CP). [3] [4] [5]

Dengan mempertimbangkan bentuk Gedung *Genesis Global Community School* yang tidak beraturan, analisis *pushover* menjadi penting untuk mengetahui bagaimana respons struktur dengan ketidakberaturan tersebut terhadap gempa dengan berbagai tingkat intensitas.

Di sisi lain, dalam konteks ketahanan gempa dibutuhkan informasi yang lebih detail mengenai probabilitas terjadinya kerusakan pada berbagai tingkat kerusakan (*damage state*). *damage state* dapat dikategorikan menggunakan metode HAZUS, yang

## 2 METODOLOGI

**Objek dan Pemodelan Struktur.** Struktur gedung yang akan dianalisis berupa gedung 4 lantai dengan fungsi sekolah. Data teknis yang digunakan mengacu pada dokumen *Detail Engineering Design* (DED) dan analisis struktur Pembangunan Gedung *Genesis Global Community School*. Data tersebut selanjutnya disesuaikan melalui proses pemodelan dan analisis struktur secara iteratif. Penyesuaian dilakukan ketika hasil analisis menunjukkan bahwa struktur belum memenuhi kriteria kinerja yang ditetapkan, dengan fokus pada peningkatan kapasitas struktur melalui perubahan dimensi penampang, mutu material, dan detail penulangan, tanpa mengubah konfigurasi geometrik bangunan.



Gambar 1 Struktur Gedung Sekolah yang Ditinjau

membedakan tingkat kerusakan antara *slight*, *moderate*, *extensive*, dan *complete*. Kombinasi pendekatan ini dapat digunakan untuk menyusun kurva kerentanan (*fragility curve*), yaitu kurva yang menggambarkan probabilitas struktur mencapai kondisi kerusakan tertentu terhadap intensitas gempa. Penelitian mengenai *fragility curve* dapat memberikan informasi penting mengenai tingkat kerentanan struktur terhadap gempa. Informasi tersebut dapat menjadi dasar dalam perencanaan retrofit, hingga perhitungan potensi kerugian akibat gempa bumi. [6] [7]

Spesifikasi kuat material dari struktur Kuat tekan beton ( $f'_c$ ) sebesar 35 Mpa dan Kuat leleh tulangan baja sebesar 420 Mpa. Elemen struktur balok dan kolom memiliki dimensi penampang masing-masing dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1 Dimensi Penampang Elemen Struktur

Elemen Struktur	Dimensi Penampang (mm)			
	Lebar	Tinggi	Diameter	Tebal
Balok, B1	400	800		
Balok, B2	300	800		
Balok, B3	300	700		
Balok, B4	300	600		
Balok, B7	300	600		
Balok, B8	250	600		
Balok, B9	250	500		
Kolom, K1				900
Kolom, K2				800
Pelat, S1				150
Pelat, S2				120

**Pembebaan dan Parameter Seismik.** Pembebaan yang diterima pada struktur Gedung yaitu beban gravitasi dan beban gempa, data pembebaan yang digunakan berdasarkan ketentuan SNI 1726-2019. Beban mati pada struktur gedung ini berupa beban mati balok, pelat, dan kolom beton bertulang dengan nilai berat isi sebesar  $24 \text{ kN/m}^3$ . Beban mati tambahan pada pelat disajikan pada Tabel 2 dan beban mati tambahan menurut SNI 1727:2020 Pasal 4.3.1 berdasarkan penggunaannya disajikan pada Tabel 3. [8] [9]

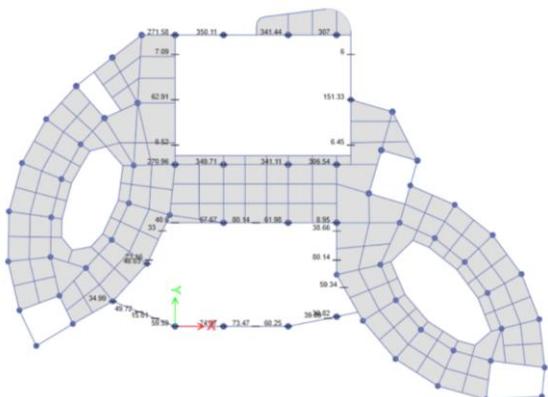
Tabel 2 Beban Mati Tambahan

Lantai	Elemen	Berat (kg/m <sup>2</sup> )	Total (kg/m <sup>2</sup> )
Lantai 2-4	Plesteran keramik	21	
	Lantai keramik	24	
	Plafond dan rangka	18	183
	<i>Mechanical, Electrical and Plumbing</i>	20	
Atap	Dinding bata Hebel	100	
	Plafond dan rangka	18	38
	<i>Mechanical, Electrical and Plumbing</i>	20	

Tabel 3 Beban Hidup

Lantai	Fungsi	Beban Hidup (kN/m <sup>2</sup> )
Lantai 1	Ruang kelompok bermain	1,92
	<i>Lobby</i>	4,79
Lantai 2	Ruang kelas TK dan SD	1,92
	Laboratorium	2,87
Lantai 3	Ruang kelas SMP dan SMA	1,92
	Auditorium	4,79
	Gymnasium	4,79
Lantai 4	Ruang kelas SD dan SMA	1,92
Lantai 5	Taman atap	4,7

Atap rangka pada area gymnasium dan skylight diasumsikan sebagai beban atap (Lr) pada elemen lantai 4. Adapun Beban atap pada struktur ini ditentukan berdasarkan hasil analisis struktur rangka atap yang dimodelkan secara terpisah menggunakan ETABS v.21. Analisis rangka atap pada pemodelan terpisah menghasilkan reaksi tumpuan total yang kemudian digunakan sebagai beban yang bekerja pada elemen struktur utama gedung.



Gambar 2 Beban Atap Gymnasium dan Auditorium

Beban gempa diterjemahkan ke dalam parameter teknis yang ditentukan berdasarkan parameter seismik yang diatur dalam SNI 1726:2019. Data variabel gempa dan respons spektrum desain untuk lokasi Gedung *Genesis Global Community School* dengan koordinat 6.286127° LS, 106.618192° yang diperoleh dari Desain Spektra Indonesia, disajikan pada Tabel 4. Dengan Kombinasi pembebanan merujuk SNI 1726:2019. [8]

**Analisis Struktur.** Tahap analisis struktur dilakukan untuk mengevaluasi kapasitas struktur eksisting terhadap beban rencana yang telah ditetapkan. Parameter yang dianalisis meliputi kapasitas elemen struktur (kolom dan balok) dan analisis gaya lateral berdasarkan SNI 1726:2019. Apabila hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas struktur eksisting tidak memenuhi persyaratan, maka dilakukan modifikasi atau perkuatan struktur untuk mencapai kinerja yang diharapkan.

Tabel 4 Parameter Seismik

Parameter Seismik	
Kategori Resiko Bangunan	IV
Faktor Keutamaan	$I_e = 1,5$
Kelas Situs	SE
Percepatan Respons Spektral MCE Terpetakan:	$S_s = 0,8731$ $S_1 = 0,4211$
Koefisien Situs	$F_a = 1,202$ $F_v = 2,351$
Percepatan Respons Spektral	$S_{DS} = 0,70$ $S_{D1} = 0,66$
Kategori Desain Seismik	D
Sistem Struktur Penahan Gaya Seismik	SRPMK Beton Bertulang
Koefisien Modifikasi Respons	$R = 8$
Faktor Perbesaran Defleksi	$\Omega_0 = 3$
Faktor Kuat Lebih	$C_d = 5,5$
Faktor Redundansi	$\rho = 1,3$

**Identifikasi Ketidakberaturan Struktur.** Pengecekan ketidakberaturan struktur dilakukan untuk memastikan bahwa gedung eksisting memenuhi kriteria regularitas struktur sesuai dengan ketentuan SNI 1726:2019. Pemeriksaan ini mencakup dua aspek utama, yaitu ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal. [8]

**Analisis Pushover.** Pada analisis ini, struktur dibebani oleh beban dorong sesuai dengan distribusi beban gempa CQC hingga mencapai deformasi maksimal. Pembebaan yang dilakukan dibagi menjadi dua tahap yakni pembebanan gravitasi dan pembebanan dorong. Beban gravitasi yang digunakan adalah berat seismik efektif struktur (W) yang diasumsikan hanya terdiri dari beban mati dan beban mati tambahan saja. Pembebaan dorong dilakukan merupakan kontrol perpindahan pada suatu titik acuan pada joint di lantai atap yang paling dekat dengan pusat massa struktur. [10]

Perpindahan maksimum yang diizinkan berdasarkan stabilitas dari SNI 1726:2019 adalah 2% dari tinggi bangunan. [8]

$$\Delta_{maks} = 2\% \times 15900 \text{ mm} = 318 \text{ mm}$$

Digunakan perpindahan maksimum sebesar 320 mm sebagai perpindahan target dalam analisis untuk beban pushover arah X, -X, Y, dan -Y.

Metode yang digunakan dalam menentukan *performance point* pada penelitian ini adalah metode *capacity spectrum*. Metode ini dimulai dengan menghasilkan kurva hubungan gaya perpindahan yang memperhitungkan kondisi inelastis struktur. Kemudian hasilnya diplot-kan dalam format *Acceleration Displacement Response Spectrum* (ADRS). Gerakan tanah gempa juga dikonversi ke format ADRS. Sehingga kurva kapasitas dapat di-plot-kan pada sumbu yang sama sebagai gaya gempa perlu. Tingkat kinerja struktur selanjutnya ditentukan berdasarkan nilai simpangan total maksimum dan simpangan inelastis maksimum yang ditentukan pada ATC-40 dan disajikan pada Tabel 5. Pendefinisan sendi plastis dilakukan pada seluruh elemen balok dan kolom. Sendi plastis merepresentasikan perilaku nonlinier pada elemen-elemen tersebut. Sendi plastis akan terjadi jika kapasitas nominal dari elemen telah terlampaui. Panjang sendi plastis diasumsikan diambil 0,05 dari Panjang elemen yang ditinjau. [3]

Tabel 5 Batasan Level Kinerja Berdasarkan ATC-40

Batasan simpangan antar tingkat	Level Kinerja Struktur			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Live Safety	Structural Stability
Simpangan total maksimum	0,01	0,01-0,02	0,02	$0,03 \frac{v_t}{p_i}$
Simpangan <i>inelastic</i> maksimum	0,005	0,005-0,015	Tidak dibatasi	Tidak dibatasi

**Pengembangan *Fragility Curve*.** Kurva kerapuhan menunjukkan peluang suatu bangunan berada pada atau melampaui tingkat kerusakan tertentu sebagai fungsi dari parameter tuntutan gempa seperti *spectral displacement*. Setiap kurva fragilitas didefinisikan oleh nilai median dari parameter tuntutan gempa yang merepresentasikan ambang batas suatu tingkat kerusakan, serta parameter variabilitas yang mencerminkan ketidakpastian respons struktur. Secara matematis, probabilitas suatu bangunan berada pada atau melampaui tingkat kerusakan tertentu dinyatakan melalui fungsi distribusi kumulatif berbasis lognormal. [6]

$$P[ds|s_d] = \Phi \left[ \frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left( \frac{s_d}{\bar{s}_{d,ds}} \right) \right]$$

Dimana:

$\bar{s}_{d,ds}$  = Nilai median *spectral displacement* pada saat bangunan mencapai ambang batas tingkat kerusakan, ds.

$\beta_{ds}$  = Simpangan baku dari logaritma natural *spectral displacement* untuk tingkat kerusakan, ds.

$\Phi$  = Fungsi distribusi kumulatif normal standar.

HAZUS menyediakan nilai median dan simpangan baku berdasarkan klasifikasi tipe bangunan dan tingkat kode bangunan. Namun, Nilai median tersebut disesuaikan berdasarkan nilai ambang batas kerusakan yang dihitung menggunakan pendekatan Barbat dkk. (2008). [6] [2]

Tabel 6 Nilai Median Menggunakan Pendekatan

Level Kerusakan	Median
Slight	$S_d = 0,7 D_y$
Moderate	$S_d = D_y$
Extensive	$S_d = D_y + 0,25(D_u - D_y)$
Complete	$S_d = D_u$

Dimana,

$S_d$  = median *spectral displacement*

$D_y$  = *spectral displacement* kondisi leleh

$D_u$  = *spectral displacement* kondisi ultimit

Tabel 7 Nilai Standar Deviasi Berdasarkan HAZUS

Damage state	Standar deviasi (Inch)	Standar deviasi (m)
SD	0,68	0,017272
MD	0,67	0,017018
ED	0,68	0,017272
CD	0,81	0,020574

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

**Analisis Struktur.** Pemeriksaan kapasitas elemen dilakukan dengan memeriksa rasio kapasitas kolom dan balok, dimana diperoleh rasio kapasitas kolom maksimum sebesar 0,919 yang berada pada story 1, serta rasio kapasitas minimum sebesar 0,163 pada story 4. Respons struktur terhadap beban gempa rencana secara elastik menunjukkan distribusi gaya, simpangan antar lantai, serta gaya geser dasar yang masih memenuhi ketentuan peraturan yang berlaku. nilai partisipasi massa yang diperoleh telah melampaui batas minimal 90% pada masing – masing arah horizontal dengan ragam getar yang terjadi berturut – turut pada *mode shape* 1, 2, dan 3 adalah translasi arah y, translasi arah x, dan rotasi. Nilai gaya geser dasar statik (V) diperoleh sebesar 8456,042 kN.

Perhitungan simpangan antar tingkat disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8 Simpangan Antar Lantai

Lantai	$h_{sx}$ (mm)	Total Drift		Perpindahan Pusat Massa ( $\delta_{xe}$ )		Story Drift ( $\Delta$ )		Story Drift Izin ( $\Delta_a/\rho$ )	Keterangan $\Delta_a/\rho > \Delta$
		X	Y	X	Y	X	Y		
4	3800	24,53	27,85	5,31	6,53	19,48	23,93	29,23	OKE
3	3800	19,22	21,32	6,82	7,84	25,01	28,73	29,23	OKE
2	3800	12,40	13,48	7,07	7,84	25,93	28,73	29,23	OKE
1	4500	5,32	5,65	5,32	5,65	19,51	20,71	34,62	OKE

**Hasil Identifikasi Ketidakberaturan Struktur.** Kriteria ketidakberaturan horizontal dan ketidakberaturan vertikal yang diidentifikasi berdasarkan SNI 1726:2019 dapat dilihat pada Tabel 9 dan Tabel 10. Struktur Gedung ini memiliki dua ketidakberaturan horizontal yaitu ketidakberaturan sudut dalam (H.2) dan ketidakberaturan diskontinuitas diafragma

(H.3) serta memiliki dua ketidakberaturan vertikal yaitu ketidakberaturan berat (V.2) dan ketidakberaturan Akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral (V.4). Berdasarkan SNI 1726:2019 struktur dengan ketidakberaturan tersebut harus memenuhi pasal referensi yang ditentukan, yaitu pasal 7.3.3.3, 7.3.3.4, dan Tabel 16 pada SNI 1726:2019. [8]

Tabel 9 Ketidak beraturan Horizontal

No.	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	Pasal Referensi	Status
1a.	Ketidakberaturan torsi	7.3.3.4, 7.7.3, 7.8.4.3, 7.12.1, Tabel 16, 11.3.4	Tidak memenuhi
1b.	Ketidakberaturan torsi	7.3.3.1, 7.3.3.4, 7.3.4.2, 7.7.3, 7.8.4.3, 7.12.1, Tabel 16, 11.3.4	Tidak memenuhi
2.	Ketidakberaturan sudut dalam	7.3.3.4, Tabel 16	Memenuhi
3.	Ketidakberaturan diskontinuitas diafragma	7.3.3.4, Tabel 16	Memenuhi
4.	Ketidakberaturan akibat pergeseran tegak lurus terhadap bidang	7.3.3.3, 7.3.3.4, 7.7.3, Tabel 16, 11.3.4	Tidak memenuhi
5.	Ketidakberaturan sistem nonparalel	7.5.3, 7.7.3, Tabel 16, 11.3.4	Tidak memenuhi

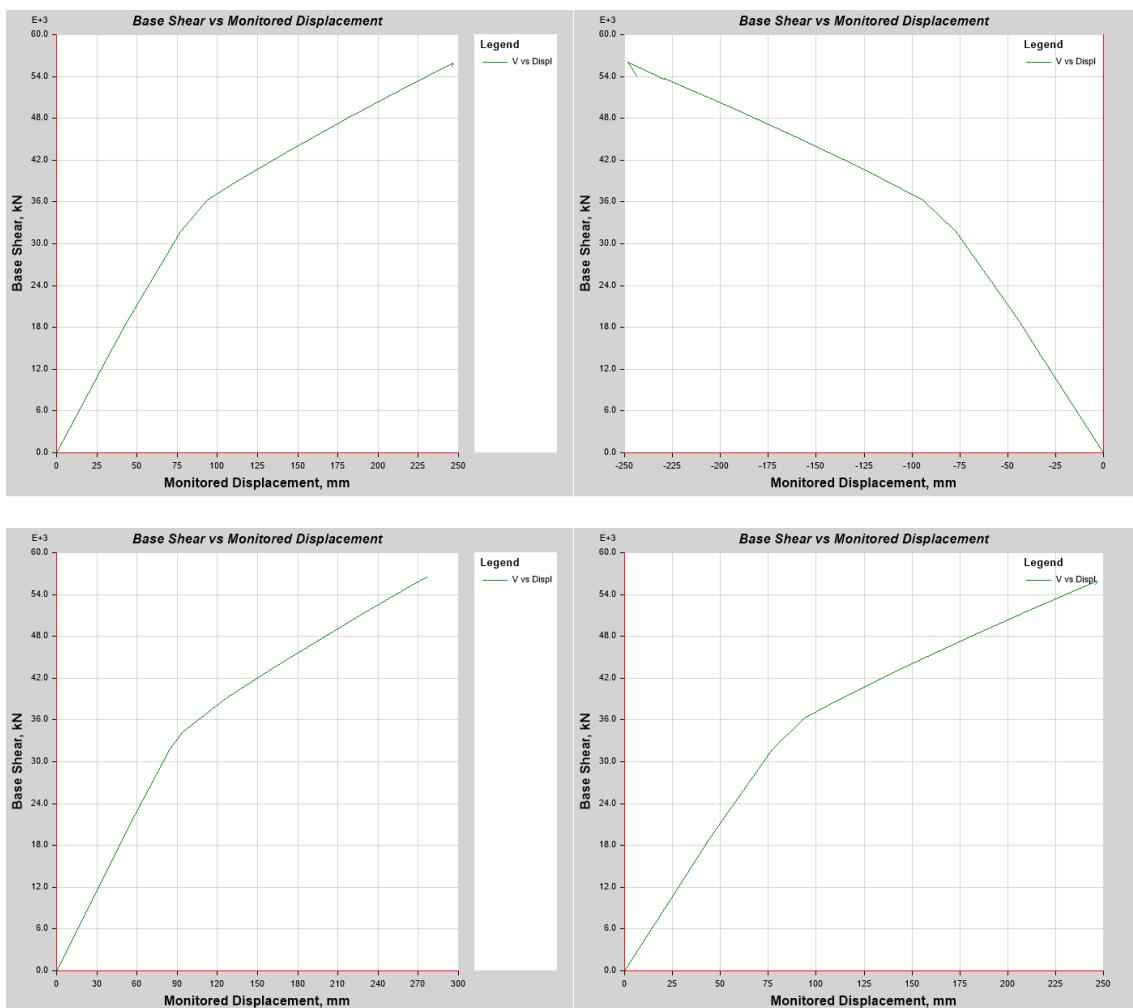
Tabel 10 Ketidak beraturan Vertikal

No.	Tipe dan Penjelasan Ketidakberaturan	Pasal Referensi	Status
1a.	Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak	Tabel 16	Tidak memenuhi
1b.	Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak berlebihan	7.3.3.1, Tabel 16	Tidak memenuhi
2.	Ketidakberaturan berat (massa)	Tabel 16	Memenuhi
3.	Ketidakberaturan geometri vertikal	Tabel 16	Tidak memenuhi
4.	Ketidakberaturan akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral	7.3.3.3, 7.3.3.4, Tabel 16	Memenuhi
5a.	Ketidakberaturan tingkat lemah akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat	7.3.3.1, Tabel 16	Tidak memenuhi
5b.	Ketidakberaturan tingkat lemah berlebihan akibat diskontinuitas pada kekuatan lateral tingkat	7.3.3.1, 7.3.3.2, Tabel 16	Tidak memenuhi

Dalam memenuhi pasal 7.3.3.4 SNI 1726:2019, struktur harus didesain untuk memikul efek gaya seismik termasuk faktor kuat lebih sesuai Pasal 7.4.3 SNI 1726:2019. Berdasarkan tahapan analisis yang dilakukan, elemen kolom tertentu tidak mampu memenuhi tuntutan gaya seismik yang diperbesar dengan faktor kuat lebih. Analisis *pushover* selanjutnya dilakukan

untuk menganalisis mekanisme plastis yang terjadi.

**Kurva Kapasitas.** Analisis Pushover menghasilkan kurva kapasitas berupa hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan. Kurva kapasitas arah X, -X, Y, dan -Y yang didapatkan dari analisis ditunjukkan pada Gambar 3.



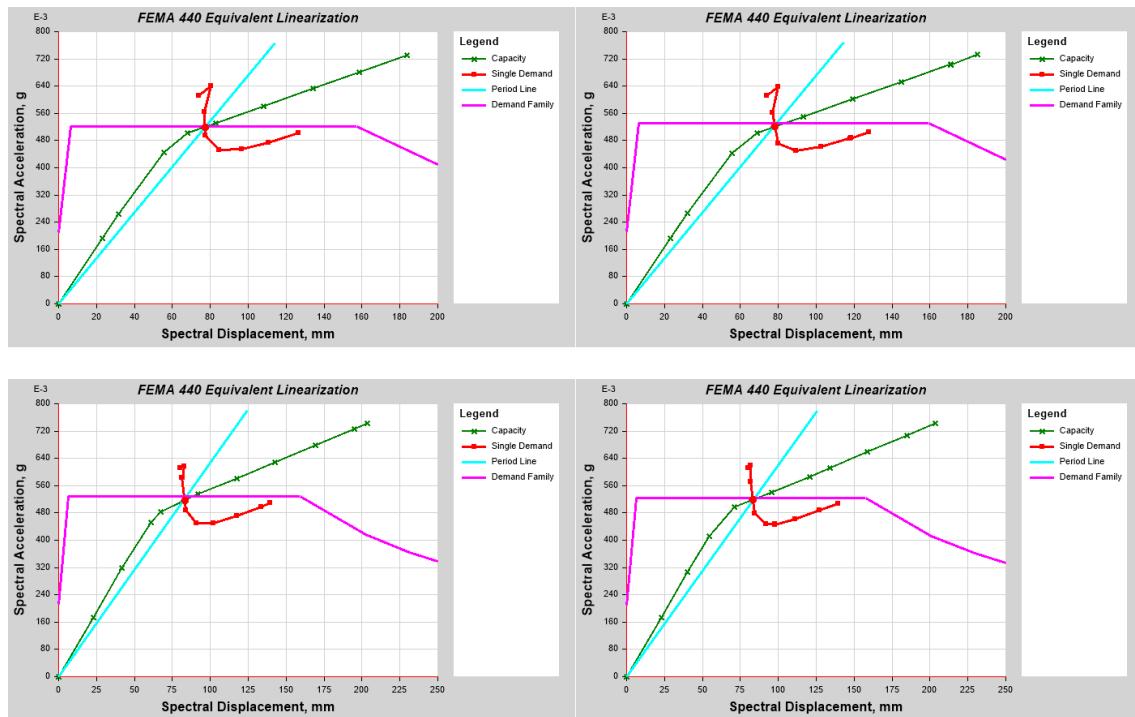
Gambar 3 Kurva Kapasitas Arah X, -X, Y, dan -Y

**Pelelehan pertama.** Pada arah X, -X, Y, dan -Y pelelehan pertama terjadi pada balok pada step kedua saat gaya geser dasar berturut – turut sebesar 18837,9705 kN, 19042,0916 kN, 22449,6397 kN, dan 21588,186 kN dan perindahan berturut – turut sebesar 43,972 mm, 44,449 mm, 58,452mm, dan 56,209 mm. dari mekanisme sendi plastis yang terbentuk, struktur menunjukkan pola *strong column-weak beam*, menandakan bahwa

mekanisme keruntuhan yang terjadi sesuai dengan konsep desain struktur tahan gempa yang ideal. [11]

**Performance Point.** Penentuan *performance point* di keempat arah ditunjukkan pada Gambar 4. *Performance point* didapat pada saat  $S_a$  masing – masing arah X, -X, Y, dan -Y berturut – turut sebesar 0,519 g, 0,521g, 0,516 g, dan 0,519 g serta

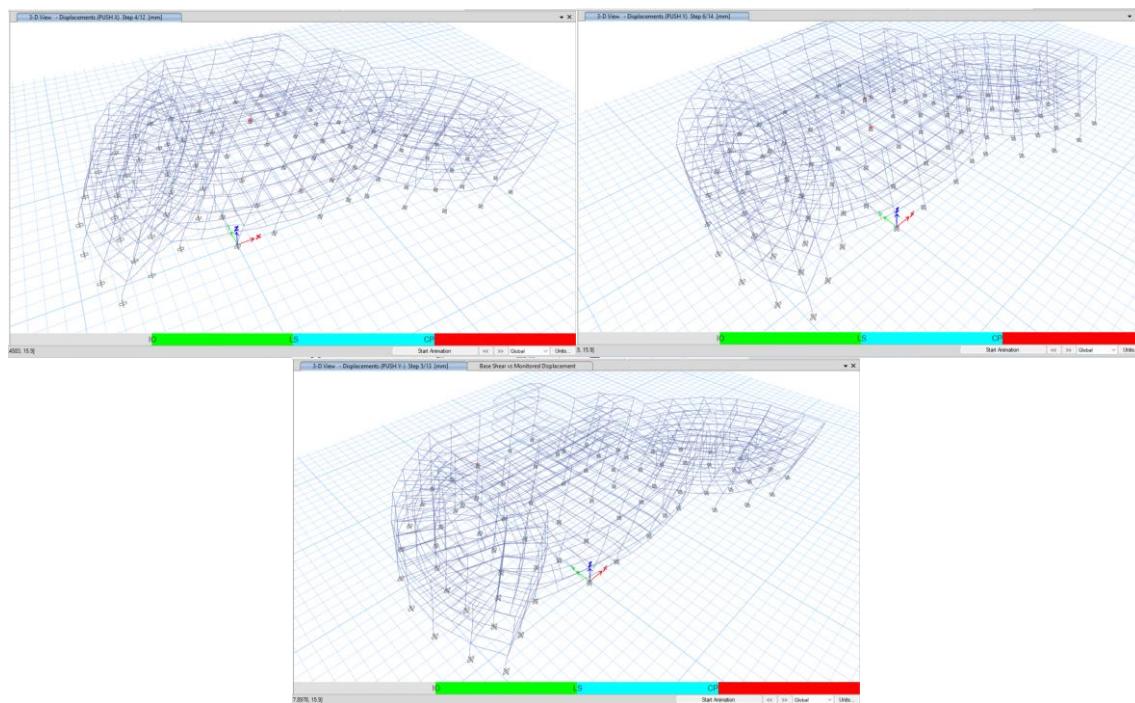
bertuturut – turut  $S_d$  sebesar 77,272 mm, 78,178 mm, 83,171 mm, dan 83,315 mm.



Gambar 4 Performance Point Arah X, -X, Y, dan -Y

**Level Kinerja.** Pada arah X, -X, Y, dan -Y Level kinerja struktur secara global berdasarkan nilai simpangan total maksimum berada pada kategori IO. Namun demikian, pada

tahap *performance point* pada arah X, Y, dan -Y terdapat kolom yang mengalami deformasi plastis dan langsung melampaui batas CP ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Performance Level pada Saat Performnace Point Arah X, Y, dan -Y

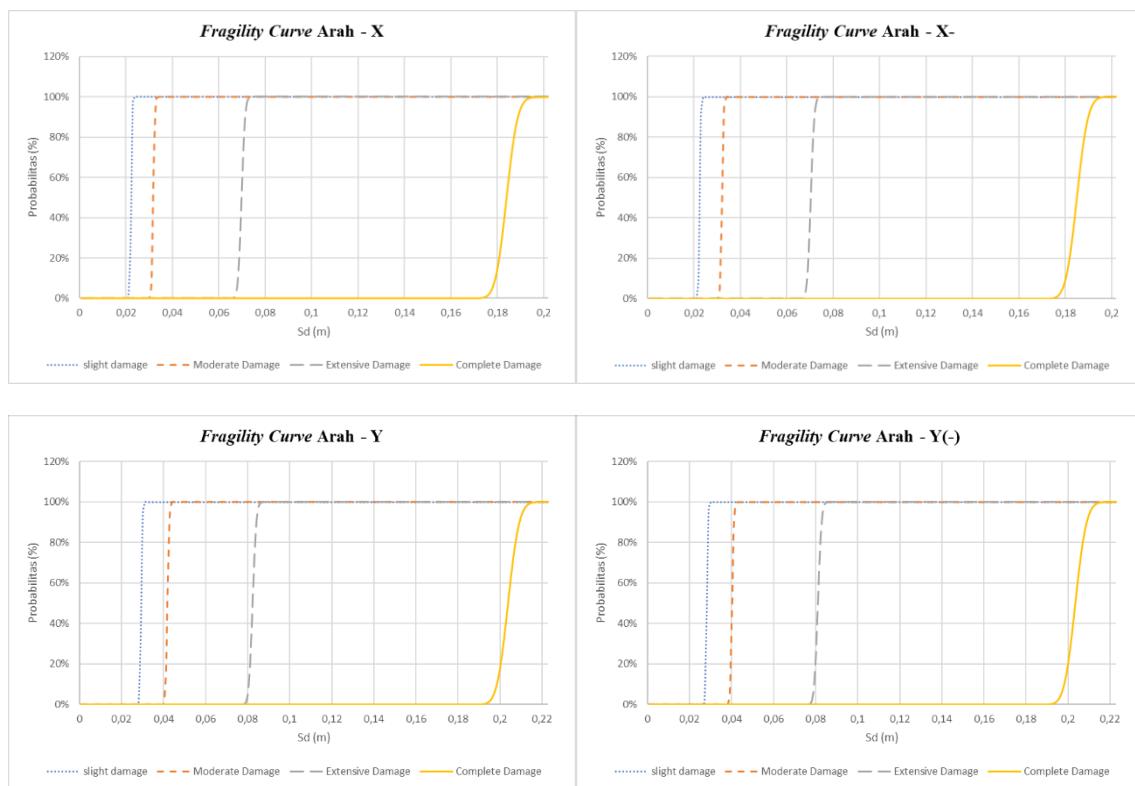
**Fragility Curve.** Nilai ambang batas kerusakan atau median yang diperoleh dari nilai  $D_y$  dan  $D_u$  berdasarkan hasil analisis Pushover disajikan pada Tabel 11.

**Tabel 11 Nilai ambang batas kerusakan**

Damage state	Median (m)			
	X	-X	Y	-Y
Slight	0,0222 43	0,0224 85	0,0292 23	0,0281 02
Moderate	0,0317 76	0,0321 21	0,0417 47	0,0401 45
Extensive	0,0698 19	0,0703 32	0,0822 51	0,0809 66
Complete	0,1839 49	0,1849 63	0,2037 61	0,2034 28

Berdasarkan analisis, kurva kerapuhan seismik dalam keempat arah dengan 4 tipe

kerusakan dapat dilihat pada [Gambar 6](#). Kurva kerapuhan hasil plot antara perpindahan dan probabilitas kerusakan pada performance point pada arah X, -X, Y, dan -Y yang berturut – turut memiliki nilai perpindahan sebesar 0,0773 m, 0,0782 m, 0,0832 m, dan 0,0833 m memiliki probabilitas terjadinya kerusakan slight damage, moderate damage, extensive damage, complete damage berturut – turut sebesar 100%, 100%, 70,028%, dan 0% untuk arah X dan -X, 100%, 100%, 70,028%, dan 0% untuk arah Y, dan 100%, 100%, 92,46%, dan 0% untuk arah -Y



**Gambar 6 Fragility Curve Arah X, -X, Y, dan -Y**

#### 4 KESIMPULAN

Struktur Gedung ini memiliki ketidakberaturan sudut dalam, ketidakberaturan diskontinuitas diafragma, ketidakberaturan berat, dan ketidakberaturan Akibat diskontinuitas bidang pada elemen vertikal pemikul gaya lateral. Berdasarkan hasil analisis struktur sebelum dilakukan analisis *pushover*, struktur dengan ketidakberaturan menunjukkan respons seismik yang masih berada dalam batas kriteria desain yang dipersyaratkan. Namun, Berdasarkan evaluasi ketidakberaturan vertikal Tipe 4, beberapa kolom pendukung rangka tak menerus tidak sepenuhnya memenuhi tuntutan gaya seismik dengan faktor kuat lebih. Maka, Analisis *pushover* dilakukan untuk menganalisis mekanisme plastis yang terjadi.

Namun demikian, Level kinerja struktur secara global pada keempat arah berdasarkan *pushover analysis* berada pada kategori IO. pencapaian level kinerja IO pada gempa dengan tingkat demand 2500 tahunan menunjukkan bahwa struktur secara global masih tergolong *overdesign* terhadap target kinerja minimum yang disyaratkan. Pada *pushover analysis* arah X, Y, dan -Y terdapat kolom yang mengalami deformasi plastis dan langsung melampaui batas CP, tanpa didahului oleh kondisi IO hingga LS. Hal ini mengindikasikan adanya potensi kelemahan lokal yang perlu mendapatkan perhatian khusus.

Tipe kerusakan gedung saat diberikan beban *pushover* arah X dan -X pada performance point adalah *Extensive damage* dengan probabilitas kerusakan yang terjadi sebesar 100%. Selain itu, beban *pushover* arah Y dan -Y menghasilkan tipe kerusakan *Extensive damage* dengan probabilitas terjadi sebesar 70,028% dan 92,46%. Dimana *extensive damage* didefinisikan dalam HAZUS sebagai kerusakan dengan beberapa elemen telah melampaui batas ultimit.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Prayuda, T. I. Maulana dan F. Mahrez, "Pengaruh Ketidakberaturan Bentuk Bangunan Beton Bertulang Bertingkat Tinggi Terhadap Perilaku Seismik," *Jurnal Teknik Sipil ITB* Vol.30 No.2, Agustus 2023, vol. 30, pp. 307-320, 2023.
- [2] W. Hasyim, "Analisis Kerapuhan Seismik Struktur Gedung Tak Beraturan dengan Analisis Pushover," *Jurnal "MITSU" Media Informasi Teknik Sipil UNIJA* Volume 13, No. 1, April 2025, vol. 13, pp. 119-130, 2025.
- [3] ATC-40, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings," Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996.
- [4] FEMA 440, "Improvement of Nonlinier Static Seismic Analysis Procedures," Federal Emergency Management Agency (FEMA), Washington D.C, 2005.
- [5] K. K. Kurnia dan O. K. Kegyes-Brassai, "Nonlinear Static Analysis for Seismic Evaluation of Existing RC Hoapital Building," *Appl. Sci.* 2023, 13, 11626, vol. 13, pp. 1-17, 2023.
- [6] HAZUS, "Hazus Earthquake Model Technical Manual," Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2020.
- [7] W. Sucipto, H. T. Kalangi dan J. Tanijaya, "Analisis Kinerja Seismik Strujtur Beton Bertulang (Studi Kasus: Tower "A" Gedung Ciputra School of Business Makassar)," *JURNAL MEDIA TEKNIK SIPIL VOLUME 1, NO. 1, MEI 2023*, vol. 1, pp. 16-26, 2023.
- [8] Badan Standar Nasional, "SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan NonGedung," Badan Standar Nasional, Jakarta, 2019.
- [9] Badan Standar Nasional, "SNI 1727:2020 Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait Untuk Bangunan Gedung dan Nongeudng," Badan Standar Nasional, Jakarta, 2020.
- [10] B. Budiono, N. T. H. Dewi, M. Kristalya, S. L. C. Manik dan E. H. K. Ong, Contoh Desain Bangunan Tahan Gempa Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus dan Sistem Dinding Struktur Khusus Di Jakarta, Bandung: ITB, 2017.
- [11] E. A. Krisdanti, K. K. D. Sungkono dan G. , "Analisis Kinerja Struktur pada Gedung Bertingkat dengan Analisis Pushover Berdasarkan ATC-40," *Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur* Vol. 29 No. 2 Juli 2024, pp. 7-16, 2024.

## STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER AKIBAT PENGARUH LIMBAH ABU TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI *BINDER*

Erma Desimaliana<sup>\*1</sup>, Muhammad An Dharu<sup>2</sup>, Ratih Dewi Shima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dosen Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Bandung, Jalan PHH Mustofa No. 23

<sup>2</sup>Mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Bandung, Jalan PHH Mustofa No. 23

Penulis korespondensi: [ermadesmaliana@itenas.ac.id](mailto:ermadesmaliana@itenas.ac.id)

**DISUBMIT** 30 Januari 2026 **DIREVISI** 4 Februari 2025 **DITERIMA** 5 Februari 2025

**ABSTRAK** Sebagai salah satu material konstruksi alternatif yang banyak digunakan saat ini, pemanfaatan limbah abu tempurung kelapa (ATK) semakin dioptimalkan. Salah satu upaya yaitu dengan geopolimer, sehingga diperoleh mortar tanpa semen yang diinginkan. Akan tetapi, pemanfaatan limbah ATK sebagai substitusi parsial *fly ash* (FA) dalam campuran mortar geopolimer masih belum diteliti sehingga perlu untuk mencari kadar substitusi limbah ATK yang paling optimum untuk digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mencari kuat tekan mortar geopolimer yang paling maksimum pada umur 7, 14 dan 28 hari dari 3 variasi kadar substitusi parsial limbah ATK terhadap FA. Variasi kadar substitusi limbah ATK terhadap FA meliputi 100%FA:0%ATK, 90%FA:10%ATK dan 80%FA:10%ATK. Hasil penelitian menunjukkan hasil bahwa kadar subsitusi parsial limbah ATK sebesar 10% ternyata mampu menghasilkan kekuatan tekan rata-rata mortar geopolimer yang paling maksimum sebesar 41,62 MPa pada umur 28 hari. Walaupun terdapat penurunan kekuatan tekan mortar geopolimer rata-rata sebesar 22,51% untuk mortar geopolimer 90%FA:10%ATK dan penurunan kekuatan mortar geopolimer rata-rata sebesar 55,30% untuk balok mortar geopolimer 80%FA:20%ATK; tetapi dengan kekuatan tekannya mortar geopolimer dengan substitusi parsial limbah ATK ini dapat dikategorikan sebagai mortar tipe M berdasarkan SNI 6882:2014. Hal ini disebabkan semakin berkurangnya FA sebagai *binder* utama sehingga mortar menjadi lebih berpori dan menurun kekuatan tekannya. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa limbah ATK dapat direkomendasikan sebagai alternatif substitusi *binder* dalam campuran mortar geopolimer karena kekuatan tekan mortar geopolimer rata-ratanya di atas 17,2 MPa.

**KATA KUNCI** Binder, Limbah Abu Tempurung Kelapa; Kuat Tekan Mortar Geopolimer; Substitusi Parsial

### 1 PENGANTAR

Ketika produksi semen sebagai salah satu material penyusun campuran mortar konvensional meningkat, juga meningkatkan efek rumah kaca hampir 40% karena menyumbangkan emisi CO<sub>2</sub> yang sangat besar. Hal ini menimbulkan kekhawatiran akan dampak buruk terhadap lingkungan, baik saat pembuatan maupun penggunaan dalam bidang konstruksi modern, sehingga menyebabkan pencarian solusi alternatif inovasi material konstruksi yang berkelanjutan. Salah satu solusi yang inovatif yaitu memanfaatkan *fly ash* (FA) sebagai pengganti semen, karena bersifat pozzolan dan ramah lingkungan [1].

Mortar konvensional terdiri dari campuran semen, agregat halus dan air; yang berfungsi hanya untuk melekatkan antar elemen konstruksi yang satu dengan yang lainnya.

Sedangkan mortar geopolimer terdiri dari campuran antara material pengikat (FA atau material bersifat pozzolan lainnya [2] [3] [4] [5] [6] [7], larutan alkali aktuator) dan material pengisi (agregat halus atau pasir) dalam reaksi kimia geopolimerisasi. Reaksi geopolimerisasi ini terjadi antara larutan alkali aktuator dengan rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan NaOH terhadap kandungan silika dan alumina dari material mineral pozzolanik. Kuat tekan mortar sangat dipengaruhi oleh rasio antara material penyusunnya, biasanya berkisar antara 3 – 17 MPa dengan berat jenis 1.800 – 2.200 kg/m<sup>3</sup>. Mortar geopolimer memiliki kelebihan yaitu tahan terhadap asam sulfat dan api, rangak dan susut yang kecil, berkurangnya polusi udara. Sementara itu, mortar geopolimer pun memiliki kekurangan yaitu pembuatannya lebih rumit dan belum ada standar *mixed*

*design*-nya. Menurut ASTM C270-14, tipe mortar terdiri dari tipe M (kuat tekan tinggi minimal 17,2 MPa), tipe N (kuat tekan sedang  $\geq 12,2$  MPa), tipe S (kuat tekan sedang  $\geq 5,2$  MPa), tipe O (kuat tekan rendah  $\geq 2,4$  MPa) dan tipe K (kuat tekan minimal 0,5 MPa).

Menurut SNI 06-6867-2002, *fly ash* (FA) berupa produk sampingan hasil limbah pembakaran batu bara dari cerobong asap (debu yang terbawa oleh gas), dan butiran yang lolos saringan no. 325 berwarna abu kehitaman. FA juga memiliki berat jenis antara 2,15 – 2,8. FA juga memiliki beberapa tipe antara lain C dan F. FA dari PLTU Paiton, termasuk salah satu FA tipe F dengan komposisi senyawa kimia 54% silika; 29,12% alumina dan 1,33% kalsium.

Limbah abu tempurung kelapa (ATK) berupa produk sampingan hasil limbah pertanian akibat pembakaran tempurung kelapa, biasanya memiliki komposisi senyawa 45,02% silika; 15,08% alumina dan 0,55% kalsium [8]. Oleh karena itu, limbah ATK berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai material penyusun campuran mortar geopolimer baik *binder* maupun *filler*. Menurut Anisa, et al. (2024) penggunaan ATK sebagai bahan tambah FA pada variasi 7,5% ternyata menghasilkan kuat tekan rata-rata mortar geopolimer tertinggi sebesar 8,13 MPa pada umur 28 hari dengan perawatan suhu ruang sehingga dikategorikan mortar tipe S. Penambahan ATK ternyata mempengaruhi sifat mekanik dan fisik mortar geopolimer, yakni meningkatkan kekuatan tekannya hingga batas tertentu seiring dengan peningkatan persentase ATK dalam campuran [9]. Limbah abu serabut kelapa (ASK) terdiri dari unsur organik berupa serat selulosa dan lignin. Di samping itu, limbah ASK juga mengandung mineral yang terdiri dari 43,90% silika; 2,99% alumina dan 6,72% kalsium [10]. Arang batok kelapa (ABK) merupakan salah satu residu yang dihasilkan dalam pembakaran dan terdiri dari partikel halus sebagai *filler* dalam mortar sehingga dapat mencegah keretakan halus. Komposisi senyawa kimia dari ABK terdiri dari 36,5% silika; 10%

alumina dan 19,2% kalsium [11]. Menurut Sihombing, et al. (2018) penggunaan ABK sebagai bahan tambah semen pada variasi 7,5% juga menghasilkan kuat tekan mortar konvensional tertinggi sebesar 27,00 MPa pada umur 28 hari dengan perendaman selama 27 hari.

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan kadar variasi substitusi parsial limbah ATK yang paling optimal sebagai *binder* dalam campuran mortar geopolimer pada umur 7, 14 dan 28 hari dengan *curing membrane*. Material *binder* yang pozolanik ini menjadi penting untuk mengetahui kekuatan tekan mortar geopolimer, terutama dalam konteks pemanfaatan limbah ATK sebagai material substitusi parsial terhadap FA.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperluas pemahaman kita tentang potensi pemanfaatan limbah ATK dalam konstruksi modern tetapi juga memberikan pandangan yang lebih dalam tentang material binder pozolanik yang paling efektif untuk memastikan kekuatan tekannya sehingga dapat diaplikasikan dalam konstruksi gedung yang keberlanjutan dan ramah lingkungan.

## 2 METODOLOGI

**Persiapan dan Pengujian Karakteristik Material.** Material penyusun campuran mortar geopolimer pada penelitian ini berupa *fly ash* (FA) tipe F dari PLTU Paiton yang telah dikeringkan dalam oven, lolos saringan no. 200, digunakan sebagai *precursor*. Sebagai alternatif material substitusi *precursor* digunakan abu tempurung kelapa (ATK), juga lolos saringan no. 200. Pengujian berat jenis berdasarkan ASTM C618-19 untuk mendapatkan karakteristik material *precursor*. Pasir Garut (PG) digunakan sebagai *filler* dalam campuran mortar geopolimer, lolos saringan no. 4 menerus sampai no. 100. Untuk mengetahui karakteristik material *filler* maka dilakukan pengujian berat isi berdasarkan SNI 03-4804-1998, berat jenis dan penyerapan air berdasarkan SNI 1970:2016, kadar lumpur berdasarkan SNI SNI 2816:2014, dan analisis saringan berdasarkan SNI 03-1968-1990. Material

*binder* didapatkan dari campuran antara *precursor* dan larutan alkali aktivator (AA). Larutan AA ini terdiri dari kombinasi antara NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dengan rasio 1:1 dengan molaritas 12M.

**Mixed Design dan Pengujian Mortar Geopolimer.** Benda uji mortar geopolimer terdiri atas 3 (tiga) variasi dan setiap variasi dibuat 3 benda uji. Variasi ini meliputi 100%FA:0%ATK (Variasi 1), 90%FA:10%ATK (Variasi 2) serta 80%FA:20%ATK (Variasi 3). Ukuran benda uji mortar geopolimer yaitu kubus berdimensi 50 mm x 50 mm x 50 mm dengan *membrane curing* [12] [13] [14] [15] [16]. Jumlah total benda uji mortar geopolimer yaitu 27 buah kubus, rincinya dapat dilihat dalam Tabel 1. *Mixed design* mortar geopolimer menggunakan metode pendekatan rasio volume, hal ini disebabkan tidak terdapat acuan ataupun standar. Maka, kisaran *mix-design* mengacu pada penelitian-penelitian terdahulu dan juga dilakukan *trial mix* untuk mendapatkan *mix-design* dengan *workability* yang baik. *Workability* pada mortar geopolimer sangat dipengaruhi oleh rasio campuran antara NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dalam larutan alkali aktivator. Komposisi campuran mortar geopolimer dapat dilihat pada Gambar 1. Pengujian mortar geopolimer umur 7, 14, dan 28 hari di uji dengan pembebanan statik menggunakan alat CTM berdasarkan SNI 03-6825-2002. Pembebanan ini ditingkatkan terus hingga mortar geopolimer mengalami keruntuhan.

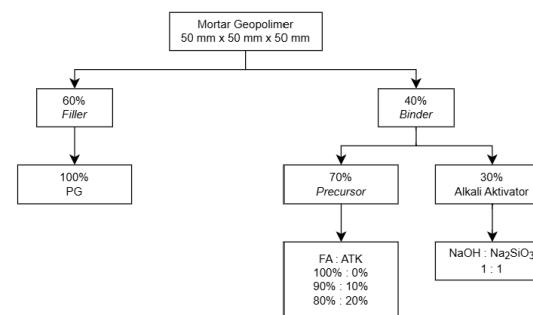
### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

**Karakteristik Material.** Dari hasil pengujian karakteristik material penyusun campuran mortar geopolimer didapatkan berat jenis FA sebesar 2,8 gr/ cm<sup>3</sup>; berat jenis ATK sebesar 2,4 gr/ cm<sup>3</sup>; berat jenis PG sebesar 2,6 gr/ cm<sup>3</sup>. Semua data berat jenis sudah memenuhi spesifikasi karena nilai yang didapatkan berada dalam rentang 2,1 – 2,9 gr/cm<sup>3</sup>. Kadar penyerapan PG sebesar 1,8%, hal ini sudah memenuhi spesifikasi karena nilai yang didapatkan < 5%. Sementara itu; berat isi PG baik berat isi padat sebesar 1,6 gr/cm<sup>3</sup> maupun berat isi gembur sebesar 1,5 gr/cm<sup>3</sup>; juga sudah memenuhi spesifikasi

karena nilai yang didapatkan berada dalam rentang 1,2 – 1,75 gr/cm<sup>3</sup>. Selisih antara berat isi padat dan berat isi gembur yaitu 0,1 gr/cm<sup>3</sup> menunjukkan bahwa PG memiliki gradasi agregat yang baik. Dari uji analisis saringan diperoleh nilai modulus kehalusan sebesar 3,1%; hal ini juga menunjukkan bahwa sudah memenuhi spesifikasi karena nilai yang didapatkan berada dalam rentang 1,5% – 3,8%.

**Tabel 1 Jumlah total benda uji**

Kode Benda Uji	Rasio Precursor (%)		Umur Pengujian Kuat			Jumlah
	FA	ATK	7	14	28	
Variasi 1	100	0	3	3	3	9
Variasi 2	90	10	3	3	3	9
Variasi 3	80	20	3	3	3	9
						27



**Gambar 1 Komposisi campuran mortar geopolimer**

**Mix-Design Mortar Geopolimer.** Kadar maksimal dari limbah ATK yang digunakan sebagai substitusi parsial terhadap FA pada penelitian ini yaitu 20%. Kuat tekan rencana mortar geopolimer didesain berdasarkan SNI 03-6882-2002 ataupun ASTM C270-14 untuk kuat tekan tinggi sebesar 17,2 MPa (mortar tipe M). Proporsi campuran mortar geopolimer terkoreksi dapat dilihat pada **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.**

**Tabel 2 Hasil mix-design mortar geopolimer**

	Material	Variansi Mix-design		
		1	2	3
Precursor	FA (gr)	107,0	101,6	96,3
	ATK (gr)	0	4,6	9,3
Binder	NaOH (gr)	17,6	17,6	17,6
	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (gr)	19,8	19,8	19,8
Filler	PG (gr)	214,2	214,2	214,2

**Waktu Ikat Mortar Geopolimer.** Waktu ikat mortar geopolimer sangat dipengaruhi oleh reaksi kimia polimerisasi pada material binder antara precursor (FA dan/atau ATK) dengan larutan alkali aktivator. Nilai waktu ikat akhir Faktor kekakuan balok laminasi pada **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.** terlihat dengan pemberian sambungan pada balok mengakibatkan reduksi faktor kekakuan balok terhadap balok tanpa sambungan (BLP-B).

**Kuat Tekan Mortar Geopolimer.** Berdasarkan hasil pengujian, kuat tekan mortar geopolimer mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kadar substitusi limbah ATK terhadap FA. Kuat tekan rata-rata maksimum mortar geopolimer tanpa substitusi parsial limbah ATK sebesar 53,7 MPa (Variasi 1) pada umur 28 hari. Untuk kadar 10% limbah ATK, kuat tekan rata-rata maksimum mortar geopolimer sebesar 41,6 MPa (Variasi 2) atau mengalami reduksi sebesar 22,5%. Untuk kadar 20% limbah ATK, kuat tekan rata-rata maksimum mortar geopolimer sebesar 24,0 MPa (Variasi 3) atau mengalami reduksi sebesar 55,3%. Aplikasi sambungan pada balok menyebabkan penurunan kekuatan balok laminasi. Perbandingan kekuatan tiap balok terlihat pada **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan.** Berdasarkan hasil pengujian memperlihatkan mortar geopolimer variasi 2 memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibanding mortar geopolimer variasi 3.

Dari hasil pengujian balok diperoleh grafik hubungan antara beban dan lendutan seperti pada **Kesalahan! Sumber referensi tidak ditemukan..**

**Tabel 3 Kekuatan tekan rata-rata mortar geopolimer umur 7 hari**

No.	Kode mortar geopolimer	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	Reduksi kekuatan (%)
1	Variasi 1-1	34,7		
2	Variasi 1-2	33,8	34,5	0
3	Variasi 1-3	35,0		
4	Variasi 2-1	26,6	24,8	28,1
5	Variasi 2-2	26,8		

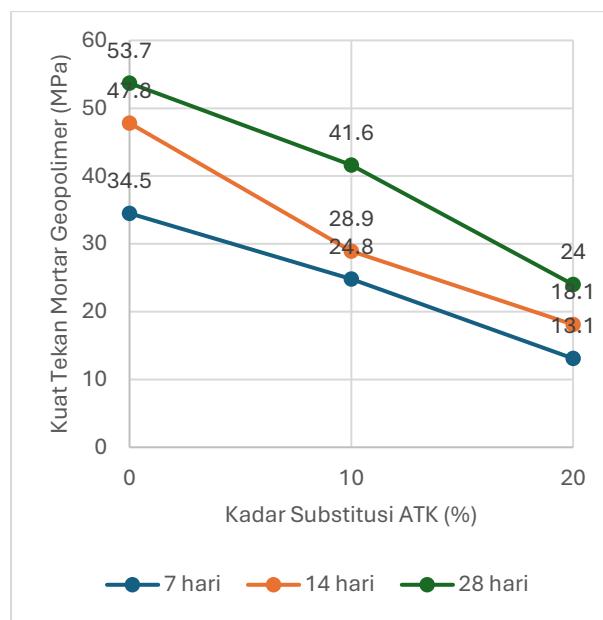
6	Variasi 2-3	20,8		
7	Variasi 3-1	13,1		
8	Variasi 3-2	11,7	13,1	62,0
9	Variasi 3-3	14,6		

**Tabel 4 Kekuatan tekan rata-rata mortar geopolimer umur 14 hari**

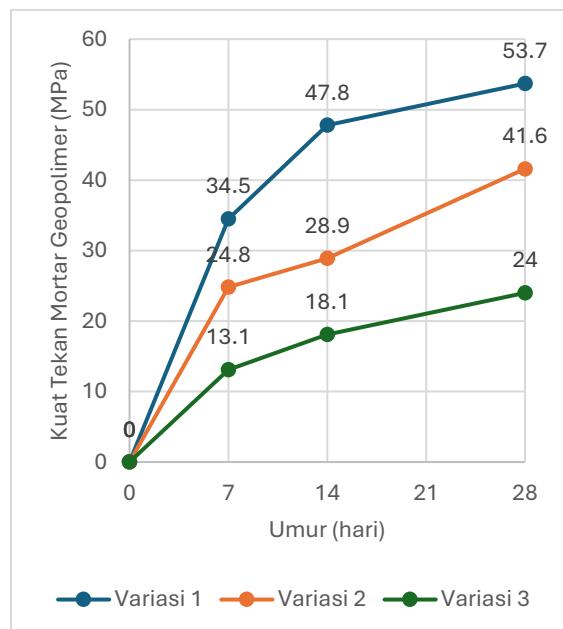
No.	Kode mortar geopolimer	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	Reduksi kekuatan (%)
1	Variasi 1-1	48,9		
2	Variasi 1-2	49,8	47,8	0
3	Variasi 1-3	44,7		
4	Variasi 2-1	31,5		
5	Variasi 2-2	26,3	28,9	39,5
6	Variasi 2-3	28,8		
7	Variasi 3-1	18,4		
8	Variasi 3-2	15,6	18,1	62,1
9	Variasi 3-3	20,4		

**Tabel 5 Kekuatan tekan rata-rata mortar geopolimer umur 28 hari**

No.	Kode mortar geopolimer	Kuat tekan (MPa)	Kuat tekan rata-rata (MPa)	Reduksi kekuatan (%)
1	Variasi 1-1	54,5		
2	Variasi 1-2	53,9	53,7	0
3	Variasi 1-3	52,9		
4	Variasi 2-1	40,3		
5	Variasi 2-2	42,2	41,6	22,5
6	Variasi 2-3	42,9		
7	Variasi 3-1	24,3		
8	Variasi 3-2	25,0	24,0	55,3
9	Variasi 3-3	23,7		



Gambar 2 Keruntuhan balok BLP-B



Gambar 3 Pola peningkatan kekuatan mortar geopolimer

Kuat tekan rata-rata untuk seluruh variasi menunjukkan terjadinya peningkatan seiring dengan pertambahan umur mortar geopolimer. Hal ini berarti proses pengerasan mortar melalui reaksi kimia polimerisasi tetap berlangsung pada semua variasi, meskipun komposisi material penyusun campuran berbeda. Mortar dengan 100%FA:0%ATK (Variasi 1) menunjukkan peningkatan kuat tekan yang paling besar dan stabil pada setiap umur pengujian. Kondisi ini menandakan bahwa

FA berperan aktif sebagai material *binder* utama yang paling efektif dalam pembentukan kekuatan tekan mortar geopolimer. Pada mortar 90%FA:10%ATK (Variasi 2), grafik menunjukkan peningkatan kuat tekan yang lebih baik dibandingkan mortar 80%FA:20% ATK (Variasi 3). Hal ini mengindikasikan bahwa pada kadar tersebut, ATK mulai berperan sebagai material *filler* yang membantu memadatkan struktur mortar, sehingga laju peningkatan kekuatan tekan menjadi lebih baik dibandingkan variasi ATK yang lebih besar. Sebaliknya, pada Variasi 3, peningkatan kuat tekan masih terjadi tetapi dengan laju yang lebih lambat. Kondisi ini disebabkan oleh semakin berkurangnya FA sebagai material *binder* utama dan meningkatnya jumlah ATK yang tidak berkontribusi langsung terhadap pembentukan ikatan polimerisasi kekuatan mortar geopolimer. Akibatnya, meskipun kuat tekan bertambah seiring waktu, nilai yang dicapai tetap lebih rendah dibandingkan variasi lainnya.

#### Pola Keruntuhan Mortar Geopolimer.

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, terlihat bahwa pola keruntuhan mortar geopolimer berbeda pada setiap variasi campuran, Gambar 2. Pada mortar geopolimer Variasi 1, pemasatan tegangan relatif kecil karena matriks geopolimer terbentuk lebih padat dan homogen. Tegangan tekan dapat terdistribusi secara merata, sehingga mortar mampu menahan beban maksimum sebelum mengalami keruntuhan. Pada Variasi 2, pemasatan tegangan menunjukkan kondisi yang paling terkendali di antara variasi substitusi lainnya. Kombinasi FA dan ATK menghasilkan struktur yang lebih rapat sehingga tegangan dapat didistribusikan secara optimal dan kuat tekan meningkat. Pada Variasi 3, pemasatan tegangan terjadi secara dominan dan menjadi faktor utama penyebab penurunan kuat tekan. Tingginya kandungan ATK menyebabkan matriks geopolimer menjadi kurang padat dan tidak mampu mendistribusikan tegangan secara merata. Tegangan terkonsentrasi pada zona-zona lemah, khususnya di sekitar pori dan antar partikel yang tidak terikat sempurna,

sehingga keruntuhan terjadi lebih cepat. Kondisi ini menunjukkan bahwa substitusi ATK yang berlebihan memperbesar pemusatan tegangan dan menurunkan kemampuan mortar dalam menahan beban tekan. Hasil pengujian BLP-B menunjukkan semua balok mengalami keruntuhan geser.



Gambar 2 Pola keruntuhan mortar geopolimer

#### 4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa seluruh variasi campuran mortar geopolimer sudah mencapai kuat tekan mortar rencana yaitu  $> 17,2$  MPa sehingga dapat dikategorikan mortar tipe M. Berdasarkan ASTM C270-14, mortar tipe M ini dapat diaplikasikan untuk dinding bata bertulang, dinding dekat tanah, dinding penahan, jalan dan pasangan fondasi. Variasi 2 dengan kadar substitusi parsial 10% limbah ATK terhadap FA menunjukkan nilai kuat tekan rata-rata paling maksimal sebesar 41,6 MPa pada umur 28 hari. Kuat tekan ini memiliki peningkatan sebesar 58,65% dibandingkan mortar geopolimer tanpa limbah ATK (Variasi 1). Oleh karena itu, pemanfaatan limbah ATK sebagai substitusi parsial FA (*binder*) dalam pembuatan mortar geopolimer ternyata mampu menghasilkan alternatif material konstruksi yang berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. N. Arini, N. Warastuti and M. W. K. Darmawan, "Analisis Kuat Tekan Dengan Aplikasi Ground Granulated Blast Furnace Slag sebagai Pengganti sebagian Semen pada Campuran Beton," *Jurnal Konstruksia*, vol. 10, no. 2, pp. 89-94, 2019.
- [2] S. K. Angelika, E. Desimaliana and M. Khanza, "Pengaruh Substitusi Parsial Variasi Tepung Kaca Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 9, no. 2, p. 157, 2023.
- [3] E. Desimaliana, A. R. Ma'ruf and R. D. Shima, "Pemanfaatan Serbuk Cangkang Kerang sebagai Substitusi Binder pada Campuran Mortar Geopolimer," *JoSC (Journal of Sustainable Construction)*, vol. 4, no. 2, pp. 48-53, 2025.
- [4] E. Desimaliana, R. D. Shima and F. Musyaffa, "Analisis Biaya terhadap Pengaruh Penggunaan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi pada Beton Geopolimer," *JoSC (Journal of Sustainable Construction)*, vol. 3, no. 2, pp. 45-53, 2024.
- [5] M. F. Mualim, E. Desimaliana and R. D. Shima, "Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu Sebagai Substitusi Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer," *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Padang*, vol. 12, no. 2, pp. 186-193, 2025.
- [6] N. A. Pratama and E. Desimaliana, "Pengaruh Substitusi Parsial Limbah Bata Ringan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 10, no. 1, p. 51, 2024.
- [7] F. G. Sandika, E. Desimaliana and R. D. Shima, "Pemanfaatan Limbah Kaca Sebagai Substitusi Filler Dalam Campuran Mortar Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 11, no. 1, p. 52, 2025.
- [8] A. J. Adeala, J. O. Olaoye and A. A. Adeniji, "Potential Of Coconut Shell Ash As Partial Replacement Of Ordinary Portland Cement In Concrete Production," *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, vol. 9, no. 1, pp. 47-53, 2020.
- [9] A. Anisa, Z. Zainuri and S. W. Megasari, "Kekuatan Tekan dan Penyerapan Mortar Geopolimer dengan Bahan Tambahan Limbah Abu Tempurung Kelapa," *Jurnal Konstruksia*, vol. 16, no. 1, pp. 34-40, 2024.
- [10] A. Setiawan, A. B. Risman, J. Juliyatna, R. Faturachman, S. Octaviani S. and H. K. Buwono, "Beton Geopolimer Abu Serabut Kelapa," *Jurnal Konstruksia*, vol. 6, no. 2, pp. 91-97, 2015.
- [11] A. P. Sihombing, Y. Afrizal and A. Gunawan, "Pengaruh Penambahan Arang Batok Kelapa Terhadap Kuat Tekan Mortar," *Jurnal Inersia*, vol. 10, no. 1, pp. 31-38, 2018.
- [12] Z. Zhafirin, Pengaruh Penambahan Abu Terbang Kelapa Terhadap Kuat Tekan Mortar Sebagai Bahan Dasar Paving Block. Tugas Akhir, Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, 2012.
- [13] E. Desimaliana, E. Widyaningsih, A. Q. N. Kaltsum and T. I. Setiana, "Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Metode Curing Pembasahan," *Jurnal Proyek Teknik Sipil (POTENSI)*, vol. 8, no. 1, pp. 1-8, 2025.
- [14] E. Desimaliana, E. Widyaningsih and A. Q. N. Kaltsum, "The effect of curing method on geopolymers concrete compressive strength," in *International Conference on Green Technology and Design (ICGTD) 2024*, Bandung, 2025.
- [15] N. V. Diredja, E. Desimaliana and Y. A. Pranata, "Performance evaluation of steam and membrane curing on geopolymers mortar with fly ash and carbide waste," in *The 2nd International Conference on Sustainable Environment, Development, and Energy (CONSER 2025)*, Yogyakarta, 2026.
- [16] T. Hidayattullah and E. Desimaliana, "Pengaruh Oven Curing Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan Substitusi Limbah Karbit," *JUMATISI: Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil*, vol. 6, no. 1, pp. 470-476, 2025.
- [17] A. Q. N. Kaltsum and E. Desimaliana, "Studi Eksperimental Kuat Tekan Mortar Geopolimer Substitusi Limbah Kaca sebagai Filler dengan Metode

Perawatan Membran," *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, vol. 10, no. 2, pp. 159-170, 2025.