



RESPON STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG SEKOLAH MODULAR DENGAN ANALISIS PUSHOVER <i>Afsa Luxij Nurdiansyah, Erma Desimaliana, Ratih Dewi Shima</i>	1
DETAILING SAMBUNGAN STRUKTUR BAJA GEDUNG REST AREA JALAN TOL RUAS PALEMBANG–BETUNG STA 71+000 <i>Daffa Putra Ramdani, Nessa Valiantine Diredja, Erma Desimaliana</i>	11
ANALISIS KAPASITAS LENTUR DAN GESER PELAT LANTAI BETON BERTULANG CFRP DIMENSI 4.900 X 3.150 MM <i>Nandini Octaviani, Euneke Widyaningsih</i>	19
ANALISIS POTENSI EROSI AKIBAT PERUBAHAN TATA GUNA LAHAN PADA DAERAH LIRAN SUNGAI SAMBO KABUPATEN SIGI PROVINSI SULAWESI TENGAH <i>Cindy Nurmaulidah Sari, Vera Wim Andiesse, Rudi Herman, Sri Warliawati, Altim Setawan, Alamsyah Prawirabakti</i>	25
PERBANDINGAN PERENCANAAN TEBAL PERKERASAN LENTUR MENGGUNAKAN MDPJ 2024 DAN ANALISA KOMPONEN (STUDI KASUS RUAS JALAN GURU TUA KABUPATEN SIGI) <i>Wahiduddin Basry, Ahmad Solihin Ansari, Sindiwahyuni W. Noya</i>	37
STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TARIK LENTUR BETON GEOPOLIMER DENGAN SUBSTITUSI PARSIAL LIMBAH KARBIT <i>Muhammad Daffa Fahrezi, Erma Desimaliana, Altie Santika Arifin</i>	43
ANALISIS JALUR EVAKUASI MELALUI TANGGA UTAMA GEDUNG KAMPUS ITS B DENGAN PENDEKATAN SIMULASI <i>Rizky Febriansyah, Ilham</i>	55
PENGEMBANGAN ArzaSTR: MESIN DESAIN OTOMATIS SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS BERBASIS OPENSEES DAN SNI 2847:2019 <i>Arzal M. Zain</i>	63
EVALUASI RESIKO PENERAPAN SISTEM MANAJEMEN K3 PADA PEKERJAAN PENINGKATAN JALAN DALAM KOTA DONGGALA <i>Hasanuddin, Eko Widodo, I Putu Bayu Anggara</i>	71



Jurnal Surya Teknika

Volume 3 Nomor 1 (Juni 2026)

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

Erma Desimaliana, S.T., M.T.

Institut Teknologi Nasional Bandung

Dr. Ir. Widi Nugraha, S.T., M.T.

Balai Keamanan Jembatan dan Terowongan Khusus,
Kementerian Pekerjaan Umum

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



RESPON STRUKTUR BANGUNAN GEDUNG SEKOLAH MODULAR DENGAN ANALISIS PUSHOVER

Afsa Luxij Nurdiansyah^{*1}, Erma Desimaliana¹, Ratih Dewi Shima¹

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

*Penulis korespondensi: afsa.luxij@mhs.itenas.ac.id

DISUBMIT 13 Maret 2026 DIREVISI 6 Agustus 2026 DITERIMA 7 Agustus 2026

ABSTRAK Indonesia berada pada wilayah dengan aktivitas seismik tinggi, sehingga bangunan publik seperti gedung sekolah rentan terhadap kerusakan akibat gempa bumi. Sistem bangunan modular Rumah Instan Sederhana Sehat (RISHA) menjadi alternatif untuk percepatan proses rehabilitasi dan rekonstruksi pasca gempa bumi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja seismik gedung sekolah ketidakberaturan dengan sistem modular RISHA. Metode yang digunakan adalah analisis statis nonlinier (*pushover analysis*) dengan bantuan perangkat lunak SAP2000. Hasil analisis gaya dalam menunjukkan bahwa elemen struktur mampu menahan beban gravitasi dan lateral dengan rasio kapasitas di bawah batas izin. Analisis simpangan antar lantai menunjukkan bahwa lantai 1 memenuhi batas izin, sedangkan lantai 2 tidak memenuhi batas simpangan, hal ini disebabkan karena distribusi kekakuan yang tidak merata dan sambungan antar modul yang bersifat semi-rigid. Berdasarkan analisis pushover dengan batas simpangan 2% tinggi bangunan (120 mm), kinerja struktur berada pada tingkat *Immediate Occupancy* (IO) pada kondisi maksimum simpangan total dan *Damage Control* pada kondisi maksimum simpangan in elastis. Hal ini menunjukkan bahwa deformasi dan kerusakan struktural masih bersifat terbatas, sehingga sistem modular RISHA berpotensi diterapkan sebagai gedung sekolah di wilayah rawan gempa dengan peningkatan kekakuan struktur pada lantai atas

KATA KUNCI Gedung Sekolah; Bangunan Modular; RISHA; Analisis Pushover

1 LATAR BELAKANG

Indonesia merupakan salah satu negara dengan aktivitas seismik tinggi karena berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, Kondisi ini menyebabkan Indonesia menjadi rawan terhadap resiko terjadinya gempa [1][2]. Hal ini berdampak pada kerusakan bangunan publik, termasuk sekolah. Proses rehabilitasi dan rekonstruksi pascabencana masih menghadapi kendala seperti lamanya waktu pembangunan, keterbatasan material, serta tuntutan keamanan terhadap gempa susulan. Metode konstruksi konvensional dinilai kurang efisien, sehingga diperlukan inovasi yang mampu mempercepat pembangunan tanpa mengurangi aspek keselamatan struktur, salah satunya melalui sistem bangunan modular.

Modular merupakan sebuah konsep pembangunan objek rancangan berdasarkan modul tertentu [3]. Sistem modular fokus pada unit yang ditambah maupun dikurangi dengan mempertimbangkan mobilitas modul dari

tempat produksi ke lahan rancangan sehingga mempermudah dan mengurangi biaya produksi [4][5]. Salah satu jenis sistem modular yang dikembangkan kementerian PUPR salah satunya adalah rumah instan sederhana sehat (RISHA) [6].

Rumah instan sederhana sehat (RISHA) merupakan teknologi konstruksi bangunan rumah tinggal dengan komponen modular pracetak dengan sistem bongkar pasang /*Knock down* [7]. Keunggulan teknologi RISHA adalah kesederhanaannya, kekuatan, ketahanan, fleksibilitas, kecepatan dalam pembangunan, dan kualitasnya [8]. Keunggulan tersebut menjadikan RISHA pilihan strategis untuk penyediaan ruang belajar di daerah pasca-bencana.

Namun demikian, penggunaan RISHA sebagai struktur gedung sekolah menuntut penilaian yang cermat terhadap aspek keselamatan, terutama terhadap beban gempa, mengingat Indonesia terletak pada zona seismik aktif. Untuk memastikan keamanan tersebut, dilakukan analisis statik nonlinier pushover guna mengetahui

kapasitas struktur, pola pembentukan sendi plastis, serta tingkat kinerja seismik bangunan. Melalui evaluasi ini, diharapkan sistem modular RISHA tidak hanya mempercepat proses konstruksi, tetapi juga mampu memberikan perlindungan yang andal terhadap bahaya gempa.

2 METODE PENELITIAN

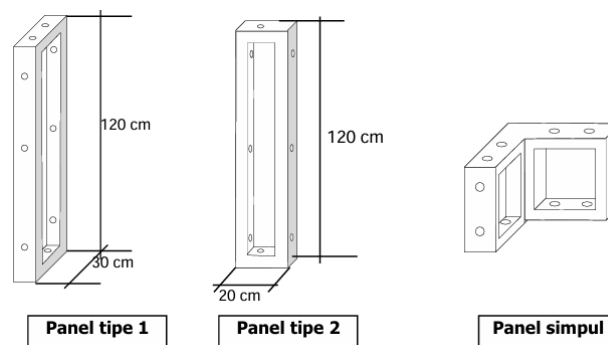
Penelitian ini mengevaluasi kinerja seismik struktur bangunan modular melalui analisis statik nonlinier (*pushover analysis*) dengan bantuan perangkat lunak SAP2000. Tahapan

penelitian disusun secara sistematis sebagaimana ditunjukkan sebagai berikut:

1. Objek Penelitian dan Data Perencanaan. Lokasi yang ditinjau berada pada daerah dengan tingkat kegempaan tinggi di Jawa Barat, yaitu Kota Sukabumi yang merupakan salah satu wilayah yang paling sering mengalami gempa akibat pengaruh aktivitas sesar lokal di Selatan Jawa. Berikut data yang akan digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini.

Tabel 1 Data Struktur Perencanaan

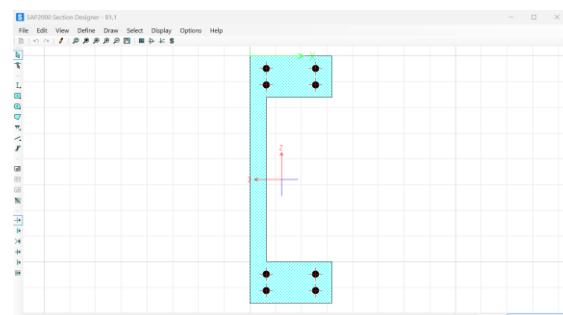
Data Struktur	Keterangan
Sistem Struktur	SRPMK
Jumlah lantai	2 Lantai
Tipe panel	P1, P2, dan P3 (simpul).
Tipe Kolom	Gabungan panel P1 dengan P2
Tipe balok	Panel P1
Tipe Pelat	Precast
Tipe Dinding	Precast
Mutu Beton	F'c 25 Mpa
Mutu baja tulangan	BjTP 280, D8 mm



Gambar 1 Komponen struktural utama panel RISHA

Berdasarkan hasil pendekatan profil panel RISHA ke dalam program SAP2000, ditetapkan beberapa dimensi kolom yang digunakan dalam analisis struktur.

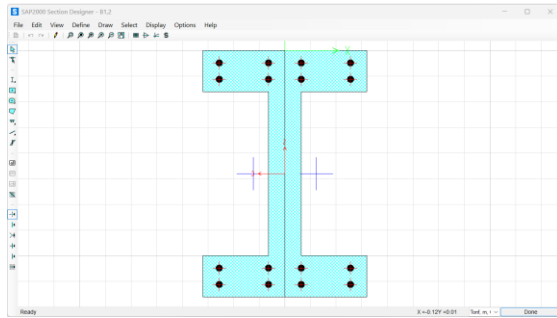
Balok Tipe B1.1, merupakan balok yang disusun dari dua panel risha tipe 1 yang disambung ke arah longitudinal. Balok ini terletak pada tepi lantai bawah dan atas.



Gambar 2 Penampang Balok Tipe B1.1

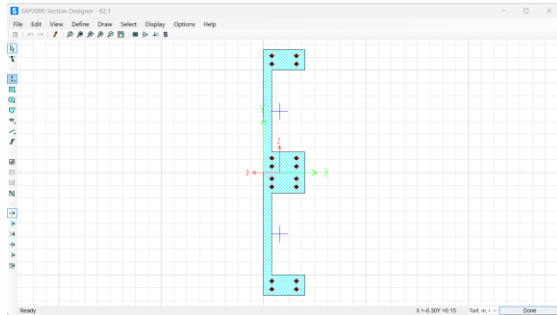
Balok Tipe B1.2, merupakan balok yang disusun dari empat panel risha tipe 1 sehingga membentuk "I" yang disambung ke

arah longitudinal. Balok ini terletak pada bagian tengah lantai bawah dan atas.



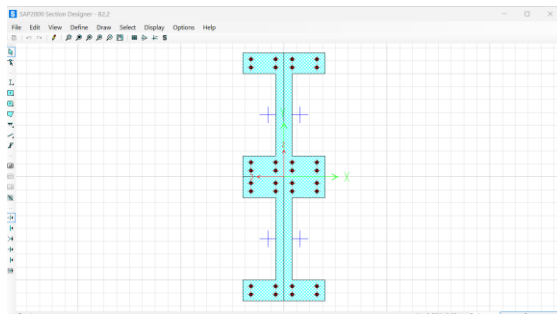
Gambar 3 Penampang Balok Tipe B1.2

Balok Tipe B2.1, merupakan balok yang disusun dari empat panel risha tipe 1 sehingga membentuk “E” yang disambung ke arah longitudinal. Balok ini terletak pada bagian tepi lantai bagian tengah.



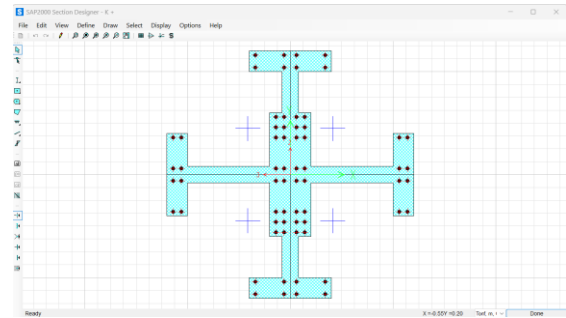
Gambar 4 Penampang Balok Tipe B2.1

Balok Tipe B2.2, merupakan balok yang disusun dari delapan panel risha tipe 1 yang disambung ke arah longitudinal. Balok ini terletak pada tengah lantai bagian tengah.



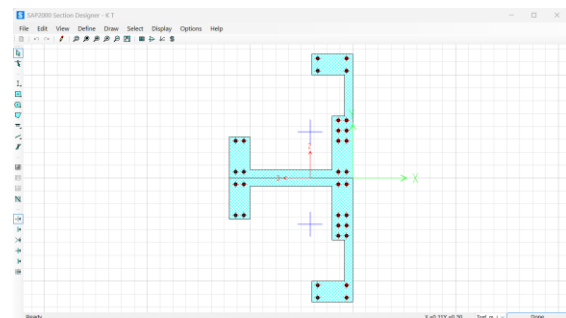
Gambar 5 Penampang Balok Tipe B2.2

Kolom K1 dengan Type +, merupakan kolom dalam (internal) gabungan dari 2 panel tipe-1 dengan 2 panel tipe-2.



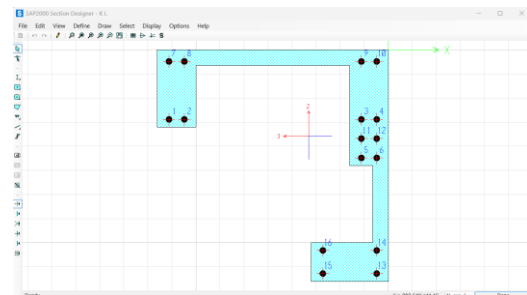
Gambar 6 Penampang Kolom Tipe +

Kolom K2 dengan tipe T, merupakan kolom pinggir gabungan dari 2 tipe panel, yaitu panel tipe-1 dengan panel tipe-2.



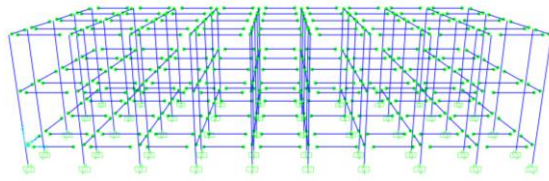
Gambar 7 Penampang Kolom Tipe T

Kolom K3 dengan tipe L, merupakan kolom sudut gabungan panel tipe-1 dengan panel tipe-2



Gambar 8 Penampang Kolom Tipe L

Pemodelan struktur RISHA dimodelkan dengan menerapkan *release* pada elemen struktur, khususnya balok, untuk menggambarkan kondisi sambungan modular yang tidak sepenuhnya kaku, sehingga perilaku rotasi dan distribusi momen dapat dianalisis secara lebih realistis [9].



Gambar 9 Tampilan 3D Releases antar join

2. Pembebanan dan Parameter Seismik.

Pembebanan yang diterapkan meliputi beban gravitasi dan beban lateral (gempa). Penentuan besar masing-masing beban mengacu pada standar pembebanan bangunan gedung di Indonesia, yaitu (SNI 1727:2020). Beban Mati berupa beban yang berasal dari berat sendirinya dengan nilai sebesar 24 kN/m^3 . Beban mati tambahan pada pelat disajikan pada Tabel 2 dan beban hidup menurut SNI 1727:2020 berdasarkan fungsi bangunannya disajikan pada Tabel 3 [10][11].

Tabel 2 Beban Mati Tambahan

Material	Beban (kN/m^2)
Dinding Precast	0,87
Keramik	0,22
Spesi tebal 1 cm	0,16
Plafon dan rangka	0,2
MEP	0,25
Pagar Railing	0,86

Tabel 3 Beban Hidup

Fungsi Hunian	Beban (kN/m^2)
Sekolah	
Ruang Kelas	1,92
Koridor di atas lantai pertama	3,83
Koridor lantai pertama	4,79
Atap datar, berbubung, dan lengkung	0,96

Parameter Seismik mengacu pada SNI 1726:2019. Data variabel gempa dan respons spektrum desain diperoleh dari Desain Spektra Indonesia, disajikan pada Tabel 4. Dengan Kombinasi pembebanan merujuk SNI 1726:2019. [11]

Tabel 4 Faktor keutamaan gempa

Data Struktur	Keterangan
Fungsi Bangunan	Sekolah
Jumlah Lantai	2 Lantai
Lokasi	Sukabumi
Kondisi Tanah	Tanah lunak
Kategori Risiko Bangunan	IV
Faktor Keutamaan	(Ie) =1.5
Kelas Situs	Tanah lunak (SE)
Percepatan Respons Spektral MCE	SS(g) =1,3314
Terpetakan	S1 (g) =0,5650
Koefisien Situs	Fa =0,867
	Fv =2,13
Percepatan Respons Spektral MCE	(SMS) =1,1636
	(SM1) =1,203
Percepatan Respons Spektral	SDS (g) =0.776
	SD1 (g) =0,802
Kategori Desain Seismik	E
Sistem Struktur Penahan Gaya Seismik	SRPMK Beton Bertulang
Koefisien Modifikasi Respons	(R) =8,0
Faktor Perbesaran Defleksi	(Cd) =5,5
Faktor Kuat Lebih	(Ω0) =3,0
Faktor Redundansi	(ρ) =1,3

3. Analisis Statik Pushover, Analisis statik nonlinier (pushover) digunakan untuk mengevaluasi perilaku dan kinerja struktur bangunan akibat beban gempa rencana berdasarkan tingkat kinerja (performance level), sehingga struktur dapat direncanakan tahan gempa [12][17].

Analisis ini menghasilkan kurva kapasitas yang menggambarkan hubungan antara gaya geser (*base shear*) dengan perpindahan (*displacement*) yang terjadi akibat gempa pada struktur. Saat beban-beban terus ditingkatkan secara bertahap, maka gedung akan mengalami perubahan bentuk pasca elastis yang besar hingga

mencapai kondisi plastis [13]. Ketika kurva kapasitas (*capacity curve*) mencapai target *displacement*, maka pada titik tersebut dapat dievaluasi terbentuknya sendi plastis, tingkat kerusakan struktur, level kinerja dan keamanan struktur terhadap gempa. Metode yang digunakan adalah metode spektrum kapasitas yang mengacu pada ATC-40 mencakup hunian langsung (IO), pengendalian kerusakan (DO), keselamatan jiwa (LS), keselamatan terbatas, dan stabilitas struktural (SS) [14].

Tingkat kerusakan struktur dapat ditentukan berdasarkan tingkat kinerja struktur. Evaluasi kinerja struktur bangunan dengan

metode spektrum kapasitas menurut ATC-40 dilakukan dengan meninjau batas deformasi yang terjadi. Nilai drift digunakan sebagai indikator untuk menilai kinerja struktur, yang dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Maximum total drift} = \frac{D_t}{H}$$

$$\text{Maximum inelastic drift} = \frac{D_t - D_1}{H_{\text{total}}}$$

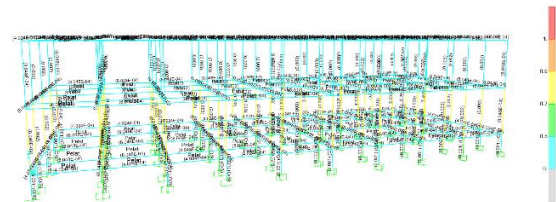
Batasan drift untuk berbagai kategori tingkat kinerja terdapat pada Tabel 5.

Tabel 5 Tingkat Kinerja Struktur Bangunan Berdasarkan Deformasi [15]

Performance Level				
Interstory drift limit	Immediate occupancy	Damage control	Life safety	Structural stability
Maximum total drift	0,01	0,01–0,02	0,02	0,33 V/P ₁
Maximum inelastic drift	0,005	0,005–0,015	No limit	No limit

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Perilaku Struktur, Analisis struktur dilakukan untuk memastikan bahwa pemodelan struktur telah memenuhi persyaratan perencanaan yang ditetapkan. Hasil analisis struktur meliputi parameter respons dinamik dan statik, antara lain partisipasi massa modal, periode alami struktur, gaya geser dasar (*base shear*), simpangan antar tingkat (*story drift*), serta kapasitas struktur. Jumlah partisipasi massa pada model 1 dan model 2 telah mencapai minimum 90%. Hasil analisis partisi massa menunjukan bahwa pada mode satu terjadi translasi arah x, mode 2 terjadi rotasi dan gambar mode 3 terjadi translasi arah y. Hasil evaluasi akhir dari respon dinamik struktur yang terjadi menghasilkan nilai gaya geser dasar statik ekuivalen sebesar 753,507 kN. Kapasitas struktur dievaluasi berdasarkan hasil analisis menggunakan SAP2000. Peninjauan difokuskan pada kebutuhan setiap elemen struktur mampu menahan beban rencana.



Gambar 10 Kapasitas Struktur

Hasil analisis evaluasi kapasitas memperlihatkan bahwa seluruh elemen struktur memiliki kapasitas yang mencukupi dalam menahan beban rencana, ditandai dengan nilai rasio kapasitas yang tidak melampaui batas maksimum yang diizinkan. Hal ini menandakan bahwa konfigurasi modul, dimensi elemen yang digunakan telah bekerja secara optimal dalam menahan beban gravitasi maupun lateral. Hasil analisis simpangan antar lantai diperoleh bahwa perilaku deformasi struktur menunjukkan perbedaan kinerja antara lantai 1 dan lantai 2 disajikan pada Tabel 6

Tabel 6 Simpangan Antar Lantai

Story	height (mm)	Perpindahan		Perpindahan Elastik		Story Drift		Drift Limit (mm)	Cek
		ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔeX (mm)	ΔeY (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)		
2	3000	25,588	15,243	16,427	9,251	60,232	33,920	34,615	Tidak Memenuhi
1	3000	9,161	5,992	9,034	5,894	33,125	21,611	34,615	Memenuhi

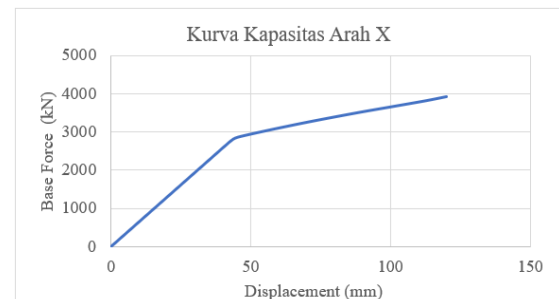
Hasil analisis simpangan antar lantai diketahui bahwa pada lantai 1 masih memenuhi batas simpangan izin, baik pada arah X maupun arah Y. Nilai batas simpangan antar lantai yang digunakan sebesar 34,615 mm, yang ditentukan berdasarkan ketentuan SNI 1726 dengan memperhitungkan simpangan elastik struktur yang telah dikalikan faktor reduksi (C_d). Pada Model 1, nilai *story drift* lantai 1 sebesar 33,125 mm (arah X) dan 21,611 mm (arah Y) sehingga masih berada di bawah batas simpangan izin tersebut. Sebaliknya, pada lantai 2 tidak memenuhi persyaratan simpangan antar lantai dimana nilai *story drift* lantai 2 mencapai 60,232 mm (arah X) dan 33,920 mm (arah Y), yang melampaui batas izin 34,615 mm.

Kondisi tersebut menunjukkan bahwa secara global struktur modular RISHA ini masih mampu menahan beban lateral pada tingkat bawah, namun kekakuan struktur pada tingkat atas belum mencukupi untuk mengendalikan deformasi akibat beban gempa atau beban lateral lainnya. Tidak terpenuhinya simpangan antar lantai pada lantai 2 mengindikasikan bahwa kontribusi elemen penahan gaya lateral pada lantai tersebut relatif lebih kecil dibandingkan gaya lateral yang bekerja. Hal ini dapat disebabkan oleh distribusi kekakuan yang tidak merata, perilaku sambungan antar modul yang masih bersifat semi *rigid*.

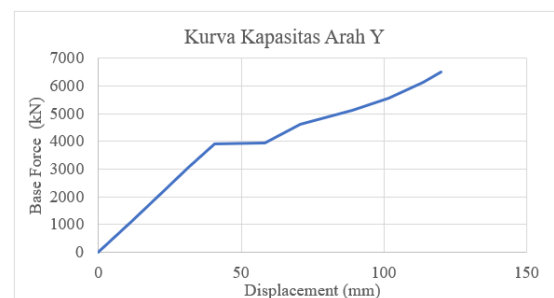
Sebagai solusi terhadap tidak terpenuhinya simpangan antar lantai pada lantai 2, diperlukan peningkatan kekakuan struktur secara lokal maupun global tanpa mengubah konsep dasar bangunan modular RISHA. Peningkatan tersebut dapat dilakukan dengan menambahkan elemen penahan gaya lateral, yaitu dapat digunakan *bracing* pada area perimeter untuk menambah kekakuan, dan selanjutnya

dicek ulang dengan sistem struktur baru yang terbentuk akibat *bracing* [16]. Selain itu, kekakuan sambungan antar modul perlu ditingkatkan dari kondisi semi-rigid menjadi rigid sehingga rotasi elemen struktur dapat dikurangi dan respons deformasi menjadi lebih terkendali.

Analisis Statik Nonlinier (*Pushover Analysis*), Hasil dari analisis pushover menghasilkan kurva kapasitas berupa hubungan antara gaya geser dasar dan perpindahan. Kurva kapasitas arah X, dan Y yang didapatkan dari analisis ditunjukkan pada Gambar 11 dan Gambar 12.



Gambar 11 Kurva Kapasitas Pushover Arah X



Gambar 12 Kurva Kapasitas Pushover Arah Y

Hasil analisis kurva kapasitas yang dikeluarkan oleh SAP2000 disajikan pada Tabel 7 untuk arah x-x dengan didapatkan 12 step pola beban dorong dan arah y-y didapatkan 10 step pola beban dorong yang disajikan pada Tabel 8.

Tabel 7 Tahapan Keruntuhan Berdasarkan Sendi Plastis Arah-X

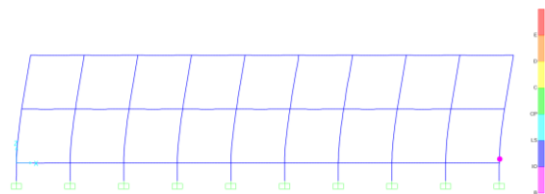
LoadCase	Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	Total
Text	Unitless	mm	KN	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
PUSH X	0	-0,002	0,000	710	0	0	0	710
PUSH X	1	11,998	773,405	710	0	0	0	710
PUSH X	2	23,998	1546,808	710	0	0	0	710

PUSH X	3	35,998	2320,207	710	0	0	0	710
PUSH X	4	40,211	2591,757	709	1	0	0	710
PUSH X	5	43,879	2812,928	684	26	0	0	710
PUSH X	6	46,580	2881,444	666	44	0	0	710
PUSH X	7	59,484	3089,571	664	46	0	0	710
PUSH X	8	72,744	3286,277	663	23	24	0	710
PUSH X	9	88,440	3501,325	660	5	45	0	710
PUSH X	10	100,440	3654,280	660	3	47	0	710
PUSH X	11	112,440	3807,723	660	0	50	0	710
PUSH X	12	119,998	3916,906	660	0	50	0	710

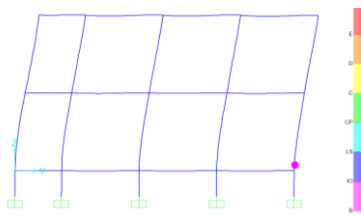
Tabel 8 Tahapan Keruntuhan Berdasarkan Sendi Plastis Arah-Y

LoadCase	Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	Total
Text	Unitless	mm	KN	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
PUSH Y	0	0,036	0,000	710	0	0	0	710
PUSH Y	1	12,036	1161,137	710	0	0	0	710
PUSH Y	2	24,036	2322,286	710	0	0	0	710
PUSH Y	3	31,180	3031,757	709	1	0	0	710
PUSH Y	4	40,583	3923,655	680	30	0	0	710
PUSH Y	5	58,175	3949,321	669	41	0	0	710
PUSH Y	6	70,762	4623,217	664	46	0	0	710
PUSH Y	7	89,104	5131,478	644	26	40	0	710
PUSH Y	8	101,819	5573,475	642	18	50	0	710
PUSH Y	9	113,819	6145,302	641	10	59	0	710
PUSH Y	10	120,036	6502,600	641	2	67	0	710

Tabel di atas menunjukkan bahwa pelelehan pertama sendi plastis pada arah X terjadi pada step ke-4, sedangkan pada arah Y terjadi lebih awal, yaitu pada step ke-3. Lokasi pembentukan sendi plastis tersebut dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13 Pembentukan Sendi Plastis Arah X

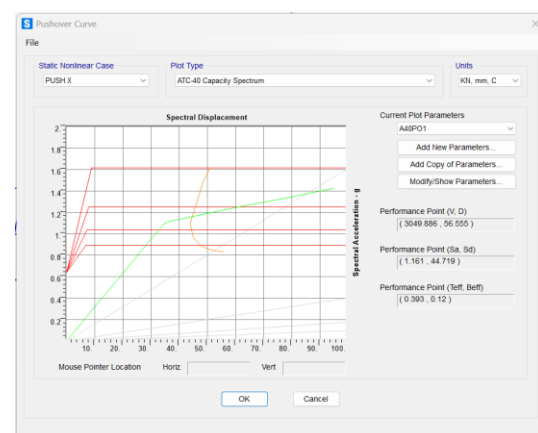


Gambar 14 Pembentukan Sendi Plastis Arah Y

Sendi plastis pertama pada kolom menunjukkan bahwa kolom mengalami pelelehan lebih awal dibandingkan balok,

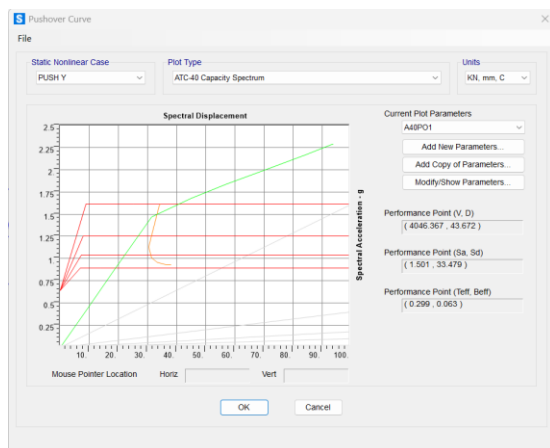
sehingga tidak memenuhi konsep *strong column-weak beam* pada perencanaan struktur tahan gempa.

Level Kinerja Struktur, Level kinerja struktur secara global dapat ditentukan berdasarkan rasio nilai perpindahan atas saat *performance point* dengan tinggi total bangunan. *Performance point* dapat diketahui berdasarkan hasil analisis pada program SAP2000, yang selanjutnya ditampilkan pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 15 Spektrum Kapasitas Arah X

Hasil analisis pushover arah X menggunakan metode ATC-40 pada program SAP2000, diperoleh titik kinerja (*performance point*) dengan gaya geser dasar sebesar 3049,886 kN dan simpangan maksimum 56,555 mm. Pada kurva spektrum kapasitas, titik tersebut berada pada nilai percepatan spektral (S_a) 1,161 g dan perpindahan spektral (S_d) 44,719 cm. Selain itu, periode efektif struktur (T_{eff}) tercatat 0,393 detik dengan redaman efektif (B_{eff}) sebesar 0,12.



Gambar 16 Spektrum Kapasitas Arah Y

Hasil analisis pushover arah Y diperoleh titik kinerja (*performance point*) dengan gaya geser dasar sebesar 4046,57 kN dan simpangan maksimum 43,672 mm. Pada kurva spektrum kapasitas, titik tersebut berada pada nilai percepatan spektral (S_a) 1,051 g dan perpindahan spektral (S_d) 33,478 cm. Selain itu, periode efektif struktur (T_{eff}) tercatat 0,299 detik dengan redaman efektif (B_{eff}) sebesar 0,063.

Berdasarkan nilai *performance point* gaya geser dan *displacement* di atas dapat ditentukan tingkat kinerja struktur sebagai berikut:

Maximum total drift

$$\text{Arah X} - X = \frac{D_t}{H_{total}} = \frac{56,555}{6000} = 0,0094$$

$$\text{Arah Y} - Y = \frac{D_t}{H_{total}} = \frac{43,672}{6000} = 0,0073$$

Maximum inelastic drift

$$\text{Arah X} - X = \frac{D_t - D_1}{H_{total}} = \frac{56,555 - 12}{6000} = 0,00743$$

$$\text{Arah Y} - Y = \frac{D_t - D_1}{H_{total}} = \frac{43,672 - 12,03}{6000} = 0,00527$$

Berdasarkan hasil analisis tersebut, kinerja struktur bangunan sekolah modular RISHA menunjukkan tingkat *Immediate Occupancy* (IO) pada kondisi *maximum total drift* dan berada dalam kategori *Damage Control* pada kondisi *maximum inelastic drift*. Kondisi *Immediate Occupancy* (IO) mengindikasikan bahwa setelah terjadinya gempa rencana, struktur masih mampu mempertahankan kekuatan dan kekakuannya dengan tingkat kerusakan yang sangat terbatas. Sementara itu, pada kondisi *Damage Control*, respons *nonlinear* struktur masih berada dalam batas yang dapat diterima, di mana perilaku plastis hanya terjadi secara terbatas pada elemen-elemen struktural tertentu tanpa mengganggu stabilitas global bangunan.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan analisa pembahasan teori dan perhitungan maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil analisis simpangan antar lantai diketahui bahwa pada lantai 1 masih memenuhi batas simpangan izin sebesar 34,615 mm, baik pada arah X maupun arah Y. Sebaliknya, pada lantai 2 kedua tidak memenuhi persyaratan simpangan antar lantai. Hal ini dipengaruhi oleh kekakuan lateral yang bersifat semi-rigid, sehingga struktur menjadi lebih fleksibel terhadap beban gempa.
- Hasil analisis gaya dalam menunjukkan bahwa elemen struktur utama pada sistem modular RISHA mampu menahan beban gravitasi dan beban lateral dimana rasio kapasitas masih berada di bawah nilai izin
- Gaya geser terbesar yang dihasilkan dari kurva kapasitas gaya geser dasar pada arah X sebesar 3916,906 kN dengan perpindahan atap sebesar 119,998 mm dan pada arah Y sebesar 6502,600 kN dengan perpindahan atap sebesar 120,036 mm.
- Berdasarkan nilai drift actual yang diperoleh pada struktur sesuai ATC-40 berada pada tingkat kinerja antara

Immediate Occupancy (IO) dan (Damage control), hal tersebut menunjukkan struktur tidak mengalami kerusakan signifikan. Bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, resiko korban jiwa manusia sangat kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. A. Simanjuntak and O. Meilawaty, "Analisis Perilaku Struktur Bangunan Rumah Metode RISHA dan RIKO Ditinjau Terhadap Gempa Linier Dinamik Respon Spektrum di Kabupaten Minahasa Selatan," *J. Serambi Eng.*, vol. IX, no. 3, pp. 10106–10114, 2024, [Online]. Available: <https://jse.serambimekkah.id/index.php/jse/article/view/394>
- [2] G. F. Waworuntu, M. D. J. Sumanouw, and R. S. Windah, "Evaluasi Kemampuan Struktur Rumah Tinggal Sederhana Akibat Gempa," *J. Sipil Statik*, vol. 2, no. 4, pp. 191–200, 2014.
- [3] A. P. Rani, D. DS, and K. Lahji, "Penerapan Konsep Modular Arsitektur Dalam Perancangan Apartemen Low Rise," *Pros. Semin. Intelekt. Muda*, vol. 3, no. 1, pp. 314–321, 2021, doi: 10.25105/psia.v3i1.13058.
- [4] Budi Setiawan, Richardus Eko Indrajit, and Erick Dazki, "Bangunan Modular Low-Rise Untuk Rumah Tinggal Di Kawasan Kabupaten Tangerang," *Padur. J. Tek. Sipil Univ. Warmadewa*, vol. 11, no. 2, pp. 147–156, 2022, doi: 10.22225/pd.11.2.4563.147-156.
- [5] F. Dyastari, A. S. Ekomadyo, and B. Tyaghita, "Penerapan Konsep Modular dalam Perancangan Rumah Susun Berdasarkan Right Conservation Method," pp. D037–D042, 2017, doi: 10.32315/ti.6.d037.
- [6] F. Sulthan, "Rekonstruksi Fasilitas Pendidikan Pasca Bencana Gempa Bumi Tahun 2018 di Kabupaten Sumbawa Provinsi NTB Menggunakan Konstruksi RISHA," *Cantilever*, vol. 8, no. 2, pp. 37–43, 2020, doi: 10.35139/cantilever.v8i2.11.
- [7] A. Sabaruddin and N. P. Sukmana, *Rumah Instan Sederhana Sehat (RISHA)*. Bandung: Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, 2015.
- [8] E. Irawanto, V. H. Rahmawati, and B. H. Widayanti, "Efektivitas Pembangunan Rumah RISHA, Rika dan Riko (3R) Bagi Masyarakat Terdampak Gempa," *J. Planoeearth*, vol. 5, no. 1, pp. 20–24, 2020.
- [9] P. Mueller, "Seismic Behavior of Precast Walls.," vol. 2, no. 10, pp. 1239–1249, 1986.
- [10] B. S. Nasional, "Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain," BSN, Jakarta, 2020.
- [11] B. S. Nasional, "Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung," BSN, Jakarta, 2019.
- [12] Y. Oktopianto and R. Andayani, "Evaluasi Kinerja Struktur Beton Bertulang dengan Pushover Analysis," 2013, Indonesia.
- [13] E. Desmaliana and T. Arifin, "Analisis Pushover terhadap Variasi Penempatan High Damping Rubber Bearing (HDRB) pada Struktur Gedung Bertingkat," *J. Sustain. Constr.*, vol. 1, no. 1, pp. 11–20, 2021, doi: 10.26593/josc.v1i1.5239.
- [14] R. M. Fathoni and E. Desimaliana, "Evaluasi Kinerja Struktur Tribun Barat Stadion RAA Adiwijaya Kabupaten Garut dengan Analisis Pushover Metode ATC-40," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 10, no. 2, p. 133, 2024, doi: 10.26760/rekaracana.v10i2.133.
- [15] A. T. Council, "Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings (ATC-40)," 1996.
- [16] F. S. Siadari, E. Desimaliana, and A. S. Arifin, "Evaluasi Kinerja Struktur Bangunan Café di Kabupaten Bandung dengan Time History Berdasarkan FEMA 356," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 10, no. 3, p. 211, 2025, doi: 10.26760/rekaracana.v10i3.211.
- [17] A. M. Zain, "Desain Kinerja Struktur dengan Menggunakan Analisis Pushover pada Bangunan Gedung di Kota Palu," *Siimo Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 9-16.



DETAILING SAMBUNGAN STRUKTUR BAJA GEDUNG REST AREA JALAN TOL RUAS PALEMBANG–BETUNG STA 71+000

Daffa Putra Ramdani^{*1}, Nessa Valiantine Diredja¹, Erma Desimaliana¹

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

Penulis korespondensi: daffa.putra@mhs.itenas.ac.id

DISUBMIT 12 April 2026

DIREVISI 6 Agustus 2026

DITERIMA 7 Agustus 2026

ABSTRAK Detailing sambungan memegang peran penting pada struktur baja bangunan rest area karena menentukan kontinuitas aliran gaya, kemudahan ereksi, dan keandalan perilaku saat menerima beban gravitasi serta gempa. Penelitian ini bertujuan merumuskan detailing sambungan balok–kolom, sambungan antar kolom, dan pelat dasar pada gedung rest area Jalan Tol Palembang–Betung STA 71+000. Metode yang digunakan adalah kajian deskriptif-analitis berbasis dokumen perencanaan awal, meliputi data geometri, mutu material, gaya hasil analisis, dan detail elemen, yang kemudian dievaluasi menurut SNI 1729:2020 tentang spesifikasi bangunan gedung baja struktural dan SNI 7860:2020 tentang ketentuan seismik untuk bangunan gedung struktur baja. Hasil kajian menunjukkan bahwa sambungan balok–kolom paling sesuai menggunakan end-plate baut dengan baut A325 berdiameter 27 milimeter, jarak tepi 70 milimeter, dan jarak antar baut 125 milimeter agar transfer momen dan geser berlangsung memadai. Sambungan antar kolom direncanakan menggunakan splice plate dengan delapan baut berdiameter 20 milimeter dan pelat sambung tebal 10 milimeter, sedangkan pelat dasar menggunakan pelat tebal 25 milimeter dengan empat baut angkur berdiameter 24 milimeter. Detail tersebut menunjukkan kesesuaian antara kebutuhan kekuatan, daktilitas, dan konstruktabilitas. Dengan demikian, detailing sambungan yang konsisten terhadap SNI 1729:2020 dan SNI 7860:2020 dapat meningkatkan keandalan struktur baja gedung rest area serta menjadi acuan praktis bagi perencanaan sambungan sejenis lainnya.

KATA KUNCI detailing sambungan baja, gedung rest area, end-plate, splice plate, base plate

1 PENGANTAR

Pembangunan rest area pada ruas jalan tol menuntut bangunan yang fungsional, aman, dan efisien untuk dibangun. Dalam konteks tersebut, struktur baja banyak dipilih karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, mutu fabrikasi yang lebih terkontrol, serta kecepatan ereksi yang mendukung target pelaksanaan proyek. Namun, keunggulan struktur baja tidak hanya ditentukan oleh kecukupan profil balok dan kolom. Kinerja sistem justru sangat dipengaruhi oleh kualitas sambungan, karena pada titik inilah aliran gaya diteruskan, kekakuan rangka dibentuk, dan perilaku struktur saat menerima beban gravitasi maupun gempa mulai ditentukan.

Secara mekanis, sambungan balok–kolom, sambungan antar kolom, dan sambungan kolom–fondasi berfungsi menyalurkan gaya aksial, geser, dan momen antar elemen. Oleh karena itu, keputusan mengenai tipe

sambungan, tebal pelat, jumlah dan diameter baut, jarak tepi, jarak antar baut, serta konfigurasi baut angkur tidak dapat dipandang sebagai detail sekunder. Kesalahan pada tahap *detailing* dapat memicu konsentrasi tegangan, *prying action*, slip berlebih, penurunan kekakuan, hingga kegagalan lokal yang berdampak pada perilaku sistem secara keseluruhan. Dalam praktik nasional, perancangan tersebut harus dibaca secara konsisten terhadap SNI 1729:2020 sebagai acuan utama spesifikasi bangunan gedung baja struktural dan SNI 7860:2020 sebagai dasar ketentuan seismik untuk struktur baja [1],[2].

Urgensi kajian detailing sambungan semakin jelas ketika desain berpindah dari tahap analisis ke tahap fabrikasi dan ereksi. Pada banyak dokumen perencanaan, pembahasan sering berhenti pada model global struktur, sementara sambungan

hanya ditampilkan secara ringkas. Padahal, persoalan teknis di lapangan justru banyak muncul pada node sambungan, misalnya keterbatasan ruang pemasangan baut, toleransi fabrikasi yang tidak sinkron, kesulitan inspeksi, atau detail yang secara teoritis kuat tetapi kurang praktis untuk dirakit. Pada bangunan publik seperti rest area, kelemahan tersebut tidak hanya menurunkan efisiensi pelaksanaan, tetapi juga berpotensi meningkatkan risiko kerusakan lokal ketika struktur menerima pembebanan berulang atau pembebanan ekstrem.

Penelitian ini ditempatkan pada konteks Gedung Rest Area Jalan Tol Ruas Palembang–Betung STA 71+000, yaitu bangunan dua lantai yang telah memiliki data geometri, mutu material, dimensi elemen, serta rancangan sambungan pada dokumen sumber. Dengan ketersediaan data tersebut, penelitian diarahkan bukan untuk mengulang analisis global struktur, melainkan untuk menelaah bagaimana sambungan dirinci agar selaras dengan kebutuhan transfer gaya dan tuntutan konstruktabilitas. Batasan masalah difokuskan pada tiga sambungan utama yang paling menentukan lintasan gaya bangunan, yaitu sambungan balok–kolom tipe end-plate, sambungan antar kolom tipe splice plate, dan sambungan pelat dasar atau base plate. Penelitian ini tidak membahas ulang optimasi profil elemen utama dan tidak mencakup pengujian eksperimental baru.

Dari sisi keilmuan dan praktik, penelitian mengenai detailing sambungan memiliki dampak yang luas. Detail yang tepat akan meningkatkan keterbacaan desain, mempermudah fabrikasi, menekan kebutuhan perubahan lapangan, dan membantu menjaga mutu ereksi. Sebaliknya, detail yang kurang matang sering menimbulkan pemborosan material, keterlambatan pekerjaan, dan potensi salah interpretasi antara perencana, *drafter*, *workshop*, dan pelaksana lapangan. Bagi dunia akademik, kajian ini memperkuat jembatan antara teori perilaku sambungan

dengan penerapannya pada kasus bangunan nyata. Bagi praktisi, hasil penelitian dapat menjadi rujukan awal untuk menyusun detail sambungan yang tidak hanya memenuhi syarat kapasitas, tetapi juga realistis untuk diproduksi, dipasang, dan diawasi mutunya.

Kajian pustaka menunjukkan bahwa penelitian sambungan baja dalam sepuluh tahun terakhir berkembang ke arah yang semakin spesifik dan aplikatif. Di tingkat nasional, Riyanto dkk. menegaskan pentingnya pengendalian deformasi lokal pada sambungan balok–kolom di bawah pembebanan siklik [3]. Tayu dkk. menunjukkan bahwa perilaku *flush end-plate* sangat dipengaruhi oleh konfigurasi baut dan kondisi batas sambungan [4], sedangkan Pangau dkk. menekankan bahwa perencanaan *base plate* tidak dapat dilepaskan dari pengaruh *prying* terhadap dimensi pelat dan posisi baut angkur [5]. Perkembangan berikutnya memperlihatkan perluasan kajian ke sambungan *rigid extended end plate*, sambungan *semi-rigid*, *bolted flange plate*, hingga *reduced beam section*, dengan kesimpulan umum bahwa geometri detail sangat menentukan distribusi tegangan, kekakuan, dan lokasi terbentuknya sendi plastis [6]–[12].

Pada tingkat internasional, fokus penelitian berkembang dari isu kekuatan dan kekakuan menuju aspek yang lebih lanjut, seperti daktilitas, *robustnes*, perilaku siklik, kemudahan bongkar-pasang, dan optimasi sambungan. Eom dkk. memperlihatkan bahwa *bolted end-plate angle splice* memengaruhi kesinambungan transfer gaya pada kolom komposit [13]. Behrooz dan Erfani serta Guo dkk. menunjukkan sensitivitas *extended end-plate* terhadap variasi geometri dan mekanisme lokal pada respons siklik [14],[15]. Pada *base plate*, Hassan dkk., Nawar dkk., dan Zhao dkk. menekankan bahwa interaksi pelat dasar, baut angkur, tumpuan beton, serta kombinasi momen dan gaya tarik menentukan kekakuan rotasi dan mode keruntuhan [16]–[18]. Sementara itu, Shaheen dkk., Kukla dkk., Yang dkk., dan

Zhang dkk. mengarahkan riset pada peningkatan *robustnes*, perilaku pada beban nonkonvensional, sambungan yang dapat dibongkar-pasang, dan optimasi *splice joint* untuk konstruksi prefabrikasi [19]–[22].

Meskipun literatur tersebut telah memberikan dasar teoritis yang kuat, masih terdapat ruang kajian yang belum banyak dibahas. Sebagian besar penelitian terdahulu menelaah satu jenis sambungan secara terpisah melalui pengujian laboratorium atau simulasi elemen hingga pada kondisi yang terkontrol. Pendekatan tersebut penting untuk memahami mekanisme komponen, tetapi belum selalu menjawab kebutuhan perancang ketika harus merumuskan beberapa jenis sambungan sekaligus pada satu bangunan nyata. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan kajian detailing secara terpadu untuk sambungan balok–kolom, *splice* kolom, dan *base plate* dalam satu kasus gedung publik, dengan pembacaan yang langsung dikaitkan dengan aliran gaya, tuntutan seismik, dan aspek konstruktabilitas berdasarkan SNI 1729:2020 dan SNI 7860:2020.

Penelitian ini bertujuan merumuskan detailing sambungan balok–kolom, sambungan antar kolom, dan *base plate* pada struktur baja Gedung *Rest Area* Jalan Tol Ruas Palembang–Betung STA 71+000 berdasarkan data perencanaan yang tersedia. Selanjutnya, penelitian ini menilai kesesuaian detail tersebut terhadap kebutuhan transfer gaya, ketentuan seismik, dan kemudahan pelaksanaan sebagai dasar rekomendasi desain yang aplikatif.

2 METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitis berbasis data perencanaan struktur dan kajian pustaka. Ruang lingkup penelitian dibatasi pada detailing tiga jenis sambungan utama, yaitu sambungan balok–kolom tipe *end-plate*, sambungan antar kolom tipe *splice plate*, dan pelat dasar (*base plate*) pada struktur baja Gedung *Rest Area* Jalan Tol Ruas Palembang–Betung STA 71+000.

Tahap penelitian dimulai dengan inventarisasi data teknis bangunan, meliputi fungsi bangunan, jumlah lantai, dimensi elemen, mutu material, serta konfigurasi sistem struktur. Data tersebut kemudian ditelaah menggunakan ketentuan SNI 1729:2020, SNI 7860:2020, SNI 1727:2020, dan SNI 1726:2019 [1],[2],[23],[24] untuk mengidentifikasi persyaratan detailing, mekanisme aliran gaya, kebutuhan daktilitas, dan batasan konstruktabilitas pada masing-masing jenis sambungan.

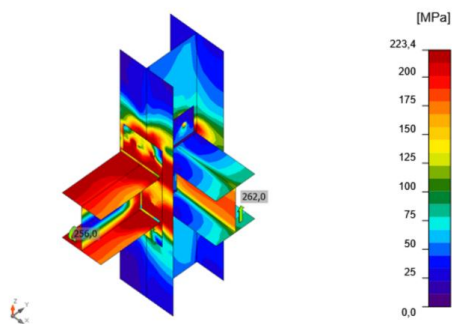
Tahap berikutnya adalah evaluasi parameter desain sambungan dari data perencanaan yang tersedia, seperti tipe sambungan, diameter dan jumlah baut, tebal pelat, jarak tepi, dan jarak antar baut. Seluruh parameter tersebut dianalisis secara komparatif terhadap hasil penelitian terdahulu untuk menilai kesesuaian teknisnya, kemudian disintesis menjadi uraian detailing sambungan yang menekankan aspek kekuatan, kekakuan, daktilitas, dan kemudahan pelaksanaan.

Data pokok yang digunakan meliputi bangunan dua lantai dengan tinggi tiap lantai 3 m dan luas 1.548 m², mutu beton 25 MPa, baja tulangan 420 MPa, serta baja struktural BJ41 dengan profil utama kolom H-Beam 250×250×8×12 dan balok IWF 300×250×6×12. Data ini menjadi dasar dalam pembahasan detailing ketiga jenis sambungan yang ditinjau.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Detailing sambungan balok–kolom (end-plate). Pada simpul balok–kolom, sambungan direncanakan berupa *end-plate* dengan baut. Pemilihan sistem ini relevan untuk bangunan *rest area* bertingkat rendah karena mampu menyediakan kekakuan yang memadai, memudahkan fabrikasi di *workshop*, serta mempercepat pemasangan di lapangan. Sejumlah penelitian juga menunjukkan bahwa *end-plate* tetap menjadi salah satu alternatif sambungan momen yang sering kali digunakan pada gedung baja karena kapasitas, kemudahan produksi, dan efisiensi *erection* menjadi pertimbangan utama [6],[12],[14],[20].

Detail sambungan pada penelitian ini menggunakan baut mutu A325 berdiameter 27 mm, jarak tepi 70 mm, dan jarak antarbaut 125 mm. Visualisasi hasil analisis kapasitas pada **Gambar 1** memperlihatkan konsentrasi tegangan pada zona pelat ujung, sayap balok, dan muka kolom, dengan skala tegangan model mencapai 223,4 MPa. Nilai ini masih berada di bawah tegangan leleh baja BJ41 sebesar 250 MPa, sehingga secara umum menunjukkan bahwa detail sambungan masih berada dalam rentang yang dapat diterima. Label aksi pada model berada pada kisaran 256,0 dan 262,0, yang menegaskan bahwa transfer gaya dari balok menuju kolom terkonsentrasi pada area sambungan yang paling kritis.



Gambar 1 Desain kapasitas sambungan end-plate

Secara mekanis, kondisi tersebut memperlihatkan bahwa sambungan end-plate tidak dapat dipahami hanya sebagai titik pertemuan elemen, melainkan sebagai bagian dari sistem pemikul gaya yang harus menjaga kesinambungan aliran momen, geser, dan rotasi. Dalam struktur baja tahan gempa, sambungan perlu mendukung terbentuknya mekanisme inelastik yang terkendali pada elemen yang direncanakan, sehingga kegagalan prematur pada kolom atau panel zone dapat dihindari. Temuan pada studi mengenai reduced beam section dan sambungan momen terpraktualifikasi menegaskan pentingnya pengendalian kapasitas rotasi, kekuatan panel zone, dan urutan keruntuhan [10],[11]. Dengan demikian, detail end-plate pada gedung rest area ini dapat dipandang sebagai instrumen untuk menjaga kesinambungan aliran gaya sekaligus stabilitas perilaku struktur saat menerima beban kerja dan beban gempa.

Detailing sambungan antar kolom (splice). Pada sambungan antar kolom, sistem yang digunakan adalah splice plate dengan baut. Data detail menunjukkan penggunaan delapan baut A325M-N berdiameter 20 mm, pelat sambung setebal 10 mm, jarak antarbaut searah batang 150 mm, dan jarak transversal 60 mm. Konfigurasi tersebut lazim diterapkan pada bangunan bertingkat rendah karena relatif mudah diproduksi, mendukung proses alignment kolom saat erection, dan memungkinkan pekerjaan lapangan berlangsung lebih terkendali.

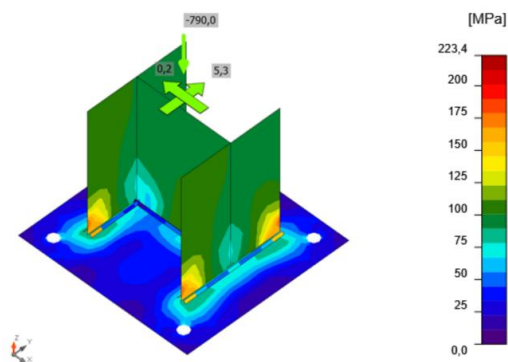
Fungsi splice pada penelitian ini tidak berhenti pada penyambungan dua segmen kolom secara geometrik. Sambungan ini juga berperan dalam menjaga kesinambungan lintasan gaya aksial dan momen, serta mempengaruhi kekakuan lokal pada zona sambungan. Sejalan dengan temuan studi terdahulu, kualitas detailing splice akan menentukan seberapa baik gaya dapat diteruskan tanpa menimbulkan konsentrasi tegangan berlebih akibat eksentrisitas, ketidakpresisian lubang, atau deviasi fabrikasi [13],[22]. Oleh karena itu, penempatannya perlu mempertimbangkan akses pemasangan sekaligus keamanan terhadap gangguan mekanisme struktur.

Dari perspektif konstruktabilitas, susunan baut yang tidak terlalu rapat memberikan keuntungan karena memudahkan pemasangan alat, pengencangan baut, dan inspeksi visual. Namun, kemudahan ini tetap harus diimbangi dengan pengendalian mutu pada ketepatan lubang, kesikuan bidang sambungan, kecocokan permukaan kontak, dan prosedur pretension apabila disyaratkan dalam spesifikasi. Tanpa kontrol tersebut, kapasitas desain yang telah direncanakan berpotensi tidak sepenuhnya tercapai pada kondisi aktual.

Detailing pelat dasar (base plate). Pada kaki kolom, base plate menjadi komponen kunci karena berfungsi meneruskan interaksi tekan, tarik, geser, dan momen dari kolom baja ke pile cap. Detail yang digunakan pada studi ini berupa pelat dasar setebal 25 mm dengan empat baut angkur

A325M berdiameter 24 mm, jarak tepi vertikal dan horizontal 40 mm, serta jarak antarbaut 330 mm. Susunan ini menunjukkan pendekatan detailing yang relatif sederhana, tetapi masih diarahkan untuk menyediakan jalur transfer gaya yang jelas dan stabil.

Visualisasi hasil analisis kapasitas pada **Gambar 2** memperlihatkan bahwa konsentrasi tegangan terutama berkembang di sekitar kaki kolom dan area yang berdekatan dengan baut angkur, dengan skala tegangan model mencapai 223,4 MPa. Label aksi pada model menunjukkan komponen vertikal dominan sebesar -790,0, sedangkan komponen arah lain relatif kecil, yakni sekitar 0,2 dan 5,3. Kondisi ini mengindikasikan bahwa respons base plate terutama dikendalikan oleh transfer gaya tekan dan momen pada kaki kolom. Jika dikaitkan dengan mutu baja BJ41 sebesar 250 MPa, distribusi tegangan tersebut masih berada dalam rentang yang dapat diterima untuk detail yang ditinjau.



Gambar 2 Desain kapasitas sambungan base plate

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa respons *base connection* sangat dipengaruhi oleh interaksi antara pelat dasar, baut angkur, tumpuan beton, distribusi tekanan kontak, dan kemungkinan terjadinya *prying action* [5],[16]–[18]. Atas dasar itu, evaluasi *base plate* tidak cukup hanya berhenti pada tebal pelat atau jumlah angkur. Yang lebih penting adalah memastikan bahwa luas bidang tekan memadai, posisi angkur mendukung keseimbangan momen, dan panjang

penyaluran elemen angkur mampu mengembangkan kapasitas yang dipersyaratkan.

Dalam konteks bangunan *rest area* bertingkat rendah, pemilihan *base plate* dengan geometri yang ringkas memberikan keuntungan pada tahap *erection* karena memudahkan *setting out*, *leveling kolom*, dan pekerjaan *grouting*. Meski demikian, performa sambungan di lapangan sangat dipengaruhi oleh ketepatan posisi angkur, kualitas *grout*, kontrol elevasi, dan prosedur pengencangan awal. Dengan kata lain, keberhasilan detailing *base plate* bukan hanya ditentukan oleh gambar rencana, tetapi juga oleh konsistensi pelaksanaan di lapangan.

Secara keseluruhan, hasil *detailing* pada penelitian ini menunjukkan tiga kelompok sambungan utama, yaitu sambungan balok–kolom tipe *end-plate* dengan baut A325M-N berdiameter 27 mm, sambungan *splice* kolom dengan delapan baut A325M-N berdiameter 20 mm dan pelat sambung setebal 10 mm, serta *base plate* setebal 25 mm dengan empat baut angkur A325M-N berdiameter 24 mm. Ketiga detail tersebut memperlihatkan upaya perancangan yang menyeimbangkan kebutuhan kapasitas, kesinambungan aliran gaya, dan kemudahan pelaksanaan.

Sintesis pembahasan. Jika dibaca bersama dua puluh studi terdahulu, rancangan sambungan pada gedung *rest area* ini memperlihatkan kecenderungan desain yang pragmatis namun tetap rasional. Pemilihan *end-plate* pada simpul balok–kolom mencerminkan kebutuhan akan kekakuan yang memadai dan kemudahan fabrikasi; penggunaan *splice* pada kolom mendukung efisiensi pengangkutan serta *erection*; sedangkan *base plate* dengan geometri sederhana menunjukkan orientasi pada kemudahan pelaksanaan tanpa mengabaikan kebutuhan transfer gaya utama. Karakter ini sejalan dengan tipologi bangunan yang ditinjau, yaitu bangunan baja bertingkat rendah yang menuntut efisiensi konstruksi sekaligus keandalan sambungan.

Dengan demikian, nilai utama pembahasan ini tidak hanya terletak pada penyajian ukuran baut, pelat, dan jarak detail, tetapi pada penjelasan hubungan antara konfigurasi sambungan, mekanisme aliran gaya, dan aspek konstruktabilitas. Pembacaan seperti ini penting karena menunjukkan bahwa *detailing* merupakan tahap yang menjembatani analisis struktur dengan realitas fabrikasi dan *erection*. Dalam konteks penelitian ini, sambungan yang direncanakan dapat dinilai representatif untuk bangunan rest area baja bertingkat rendah, sekaligus memberikan dasar argumentatif bagi pengembangan desain sambungan yang lebih adaptif pada studi berikutnya.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa *detailing* sambungan merupakan bagian yang menentukan kualitas kinerja struktur baja pada Gedung Rest Area Jalan Tol Ruas Palembang–Betung STA 71+000. Pada bangunan ini, keandalan sistem tidak hanya bergantung pada dimensi elemen utama, tetapi juga pada ketepatan rincian sambungan yang mengatur transfer gaya, kekakuan lokal, urutan mekanisme perilaku, dan kemudahan pelaksanaan di lapangan.

Untuk sambungan balok–kolom, detail tipe *end-plate* dengan baut A325M-N berdiameter 27 mm, jarak tepi 70 mm, dan jarak antar baut 125 mm dinilai sesuai dengan kebutuhan transfer momen dan geser pada simpul utama. Konfigurasi tersebut juga sejalan dengan prinsip perilaku daktil, yaitu menjaga agar mekanisme inelastik lebih terarah pada elemen yang diinginkan dan tidak berpindah secara prematur ke komponen sambungan.

Pada elemen vertikal, sambungan antar kolom berupa *splice plate* dengan 8 baut A325M-N berdiameter 20 mm dan pelat sambung setebal 10 mm memberikan detail yang memadai untuk meneruskan gaya antar segmen kolom. Sementara itu, sambungan kolom–fondasi melalui *base plate* setebal 25 mm dengan 4 baut angkur berdiameter 24 mm menunjukkan konfigurasi yang aplikatif untuk menyalurkan

tekan, tarik, geser, dan momen ke *pile cap*, sekaligus tetap mempertimbangkan kemudahan ereksi dan pengendalian mutu pemasangan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menegaskan bahwa *detailing* sambungan yang disusun secara konsisten terhadap aliran gaya, ketentuan SNI 1729:2020 dan SNI 7860:2020 [1],[2], serta kebutuhan konstruktabilitas akan menghasilkan rancangan yang lebih realistis dan dapat diterapkan. Dengan demikian, kajian ini dapat digunakan sebagai rujukan awal dalam penyusunan detail sambungan struktur baja pada bangunan sejenis, terutama ketika perencana memerlukan integrasi antara aspek kapasitas, daktilitas, dan kemudahan pelaksanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standardisasi Nasional. SNI 1729:2020 Spesifikasi untuk bangunan gedung baja struktural. Jakarta: BSN; 2020.
- [2] Badan Standardisasi Nasional. SNI 7860:2020 Ketentuan seismik untuk bangunan gedung struktur baja. Jakarta: BSN; 2020.
- [3] Riyanto E, Muslikh, Supriyadi B. Perilaku sambungan sayap menerus balok profil I dengan kolom tabung baja akibat beban siklik. *INERSIA*. 2017;13(2):76-88.
<https://doi.org/10.21831/inersia.v13i2.17172>.
- [4] Tayu B, Handono BD, Pandaleke R. Perilaku sambungan baut flush end-plate balok kolom baja pada kondisi batas. *Jurnal Sipil Statik*. 2017;5(5):237-247.
- [5] Pangau GYD, Pandaleke R, Handono BD. Analisis dimensi pelat dasar (base plate) pada kolom struktur baja yang mampu tahan terhadap efek prying. *Jurnal Sipil Statik*. 2016;4(6):375-382.
- [6] Silalahi OUA, Suswanto B, Piscesa B. Studi analisis perilaku sambungan kaku (rigid connection) balok-kolom baja tipe extended end plate dengan metode elemen hingga. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*. 2020;18(1):23-32.
<https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v18i1.5346>.

- [7] Asmoro SH, Suswanto B. Studi analisis sambungan semi rigid balok-kolom baja dengan modifikasi friction damper dengan metode elemen hingga. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*. 2020;18(1):61-72.
<https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v18i1.5446>.
- [8] Pratama MFW, Hidayatullah EFN. Perancangan ulang struktur atas gedung kantor Otoritas Jasa Keuangan Surakarta menggunakan baja konvensional. *INERSIA*. 2021;17(2):141-152.
<https://doi.org/10.21831/inersia.v17i2.34187>.
- [9] Ghifari F, Suswanto B, Tajunnisa Y. Analisis numerik sambungan bolted flange plate (BFP) dengan menggunakan program ANSYS. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*. 2022;20(1):49-58.
<https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v20i1.11553>.
- [10] Sulandari N, Kristianto A, Pranata YA. Prequalified connections analysis for moment frames: bolted flange plate (BFP) and double-tee connection. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*. 2023;21(4):345-354.
<https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v21i4.15731>.
- [11] Diputra AT, Suswanto B, Tajunnisa Y, Masiran HS. Analisis numerik sambungan baja reduced beam section pada sumbu lemah kolom menggunakan program bantu ANSYS. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*. 2024;22(3):295-306.
<https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v22i3.20643>.
- [12] Hariadi DA. Analisis numerik sambungan bolted extended end plate (BEEP) menggunakan program bantu ANSYS. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*. 2025;23(3):237-242.
<https://doi.org/10.12962/j2579-891X.v23i3.20640>.
- [13] Eom TS, Yang JM, Kim DK, Lim JJ, Lee SH. Experimental investigation of bolted end-plate angle splice in encased composite columns. *Engineering Structures*. 2019;195:302-314.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.094>.
- [14] Behrooz SM, Erfani S. Parametric study of stub-beam bolted extended end-plate connection to box-columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;171:106155.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106155>.
- [15] Guo L, Wang J, Wang W, Wang C. Cyclic tests and analyses of extended endplate composite connections to CFDST columns. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;167:105937.
<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.105937>.
- [16] Hassan AS, Torres-Rodas P, Giulietti L, Kanvinde A. Strength characterization of exposed column base plates subjected to axial force and biaxial bending. *Engineering Structures*. 2021;237:112165.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112165>.
- [17] Nawar MT, Matar E, El-Zohairy A, Alaaser A, Maaly H. Experimental and FE analysis of the behavior of steel column base connections under tension and bending moment. *Structures*. 2024;62:106164.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106164>.



ANALISIS KAPASITAS LENTUR DAN GESER PELAT LANTAI BETON BERTULANG CFRP DIMENSI 4.900 X 3.150 MM

Nandini Octaviani^{*1}, Euneke Widyaningsih¹

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

*Penulis korespondensi: nandinioktaviani422@gmail.com

DISUBMIT 9 April 2026

DIREVISI 6 Agustus 2026

DITERIMA 8 Agustus 2026

ABSTRAK Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) merupakan alternatif tulangan nonlogam yang memiliki kekuatan tarik tinggi, berat jenis ringan, serta ketahanan korosi yang sangat baik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas lentur dan geser pelat lantai beton bertulang CFRP dengan dimensi 4.900 × 3.150 mm. Analisis dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak SAP2000. Hasil analisis berupa momen terfaktor (M_u) dan gaya geser terfaktor (V_u) dibandingkan dengan kapasitas lentur (ϕM_n) dan kapasitas geser (ϕV_n) berdasarkan ACI 440.1R-15. Hasil menunjukkan bahwa pelat lantai beton bertulang CFRP memenuhi persyaratan kapasitas lentur dan geser. Dengan demikian, CFRP dapat digunakan sebagai alternatif tulangan pada pelat lantai beton.

KATA KUNCI Pelat Lantai Beton; CFRP; Kapasitas Lentur; Kapasitas Geser; SAP2000.

1 PENGANTAR

Pelat lantai merupakan elemen struktur horizontal yang berfungsi menyalurkan beban gravitasi ke elemen struktur pendukung seperti balok dan kolom. Pada struktur beton bertulang, pelat lantai harus dirancang agar mampu menahan gaya lentur dan geser akibat kombinasi beban mati dan beban hidup. Tulangan baja konvensional yang umum digunakan memiliki kelemahan terhadap korosi, sehingga diperlukan alternatif material yang lebih tahan terhadap lingkungan agresif.

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) merupakan material komposit berbasis serat karbon yang memiliki kekuatan tarik tinggi, berat ringan, serta ketahanan korosi yang sangat baik. Penelitian ini difokuskan pada analisis kapasitas lentur dan geser pelat lantai beton bertulang CFRP dengan dimensi 4.900 × 3.150 mm sebagai representasi pelat dua arah pada bangunan gedung.

2 METODE PENELITIAN

Beton Bertulang. Beton bertulang (*reinforced concrete*) adalah material komposit yang terbentuk dari beton dan tulangan yang secara bersama-sama menahan beban struktur. Beton menahan gaya tekan, sedangkan tulangan menahan

gaya tarik yang terjadi akibat beban lentur atau geser. Dengan kombinasi ini, elemen struktur seperti balok, kolom, dan pelat lantai dapat dibuat lebih efisien dan tahan lama. [1]

Data Struktur Pelat. Data struktur pelat yang akan digunakan diambil dari data suatu gedung, sebagai berikut:

- Material : Beton Bertulang
- Kuat tekan beton (f'_c) : 25 MPa
- Tipe dan tebal pelat : S1 tebal 150 mm
- Dimensi pelat : 4.900 x 3.150 mm



Gambar 1 Jenis-Jenis Tulangan FRP

Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). CFRP merupakan salah satu jenis *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) yang menggunakan serat karbon sebagai penguat

utama dan resin polimer sebagai bahan pengikat. Material ini memiliki kekuatan tarik tinggi serta berat yang ringan, sehingga menghasilkan rasio kekuatan terhadap berat yang sangat baik. Dalam konstruksi beton bertulang, CFRP digunakan sebagai tulangan pengganti baja. Tulangan CFRP berfungsi menahan gaya tarik pada elemen struktur, namun memiliki keunggulan utama yaitu tahan terhadap korosi dan tidak mudah terpengaruh oleh kondisi lingkungan. CFRP umumnya tersedia dalam bentuk batang tulangan (*rebar*) untuk digunakan di dalam

beton, serta lembaran atau plat yang dipasang di permukaan elemen beton sebagai bahan perkuatan eksternal. [2]

Data Tulangan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Data tulangan CFRP berdasarkan SNI 8970: 2021 dapat dilihat pada Tabel 1 sebagai berikut: [5]

- f_{tu}^* : 2.070 MPa
- Modulus elastisitas : 152.000 MPa
- Diameter tulangan : 10 mm
- Jarak antar tulangan : 300 mm

Tabel 1 Nilai Umum untuk Rasio Tulangan (SNI 8970:2021)

Tipe batang	Kuat leleh f_y atau kekuatan tarik f_{tar} (MPa)	Modulus Elastisitas (GPa)	ρ_b atau ρ_{fb}
Baja	414	200	0,0335
GFRP	552	41,4	0,0078
AFRP	1.172	82,7	0,0035
CFRP	2.070	152	0,0020

Beban Mati. Beban mati adalah beban tetap yang berasal dari berat sendiri struktur dan seluruh material bangunan yang terpasang secara permanen. Nilainya ditentukan berdasarkan dimensi elemen struktur dan berat jenis material, misalnya untuk beton sebesar 2.400 kg/m^3 (24 kN/m^3).

Beban Mati Tambahan. Beban mati tambahan adalah beban tetap non-struktural yang bekerja pada elemen struktur, tetapi tidak termasuk berat sendiri bangunan. Contohnya yaitu lapisan penutup lantai, *screed*, plafon, instalasi MEP (Mekanikal, Elektrikal, *Plumbing*), serta partisi ringan yang bersifat permanen. Beban mati tambahan yang digunakan berdasarkan PBI-1983 Peraturan Pembebanan Indonesia untuk Gedung untuk pembebanan pelat dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Total Beban Mati Tambahan (PBI:1983)

Material	Beban (kN/m^2)
Spesi	0,21
Keramik	0,24
Plafond dan Rangka	0,2
MEP	0,25

Total SIDL	0,9
-------------------	------------

Beban Hidup. Beban hidup merupakan beban sementara yang timbul akibat penggunaan dan aktivitas penghuni di dalam bangunan. Contohnya meliputi berat manusia, perabot, dan barang yang dipindahkan. Beban hidup tidak termasuk dalam beban konstruksi permanen maupun beban lingkungan seperti angin, hujan, gempa, atau banjir, dan nilainya disesuaikan dengan fungsi ruang serta jenis bangunan sesuai (SNI 1727:2020). Beban hidup minimum yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3. [3]

Tabel 3 Total Beban Hidup (SNI 1727:2020)

Penggunaan Hunian	Beban (kN/m^2)
Kantor	2,4
Atap datar, berbubung, dan lengkung	0,96
Total	3,36

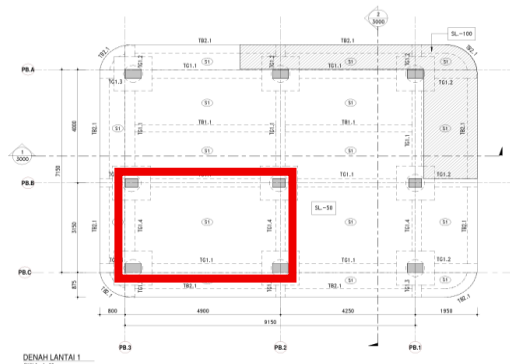
Kombinasi Pembebanan. Kombinasi pembebanan digunakan untuk mengetahui kondisi terberat yang mungkin dialami bangunan akibat pengaruh beberapa jenis beban yang bekerja secara bersamaan. Kombinasi yang digunakan menurut (SNI 2847:2019) dapat dilihat pada Tabel 4. [4]

Tabel 4 Kombinasi Pembebanan (SNI 2847:2019)

No.	Kombinasi Pembebanan
1	1,4 DL
2	1,2 DL + 1,6 LL + 0,5 (Lr/ S/ R)
3	1,2 DL + 1,6 (Lr/ S/ R) + 1,0 (LL/ 0,5 WL)
4	1,2 DL + 1,0 WL + 1,0 LL + 0,5 (Lr/ S/ R)
5	1,2 DL + 1,0 E + 1,0 LL + 0,2 S
6	0,9 DL + 1,0 WL
7	0,9 DL + 1,0 E

Pemodelan Elemen Struktur Pelat.

Pemodelan dilakukan satu kali menggunakan data kondisi eksisting dengan dimensi 4.900 x 3.150 mm dari potongan pelat pada denah bangunan. Pemodelan tersebut mencakup pendefinisian properti material beton, dimensi pelat, serta penerapan pembebanan yang sesuai dengan standar perancangan. Hasil analisis dari pemodelan ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan perhitungan tulangan CFRP. Selain itu, output analisis SAP2000 juga dimanfaatkan untuk mengevaluasi kapasitas struktur pelat. Bagian pelat yang dianalisis dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Elemen Pelat yang Ditinjau

Perhitungan Kapasitas Pelat. Kapasitas adalah kemampuan maksimum elemen pelat dalam menahan gaya internal yang timbul akibat beban. Pada pelat beton bertulang, kapasitas utama yang akan dianalisis yaitu kapasitas lentur dan kapasitas geser. Perhitungan kapasitas pelat lantai menggunakan tulangan CFRP ini akan dibandingkan dengan data M_u dan V_u output terbesar dari hasil analisis model struktur menggunakan perangkat lunak SAP2000. Berikut ini merupakan perhitungan kapasitas pelat lantai menggunakan

tulangan CFRP berdasarkan ACI 440.1R-15: [6]

a. Kapasitas Lentur

Momen nominal beton bertulang (M_n) dihitung menggunakan rumus:

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

dimana:

M_n = Kapasitas momen nominal (N.mm)

A_f = Luas tulangan FRP (mm²)

f_f = Tegangan tarik pada tulangan FRP (MPa)

d = Jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik (mm)

a = Tinggi blok tegangan tekan persegi ekuivalen (mm)

Kapasitas lentur dihitung menggunakan rumus:

$$\phi M_n = 0,65 \times M_n$$

$$\phi M_n \geq M_u$$

dimana:

ϕM_n = Kapasitas lentur (N.mm)

M_n = Kapasitas momen nominal (N.mm)

M_u = Momen terfaktor pada penampang (N.mm)

b. Kapasitas Geser

Kuat geser beton (V_c) dihitung menggunakan rumus:

$$V_c = \frac{4}{5} \sqrt{f'_c} b (k \times d)$$

dimana:

V_c = Kuat geser nominal oleh beton (N)

f'_c = Kuat tekan beton (MPa)

b = Lebar penampang persegi panjang (mm)

k = Rasio kedalaman sumbu netral terhadap kedalaman tulangan

d = Jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan tarik (mm)

Kapasitas geser dihitung menggunakan rumus:

$$\phi V_c = 0,75 \times V_c$$

$$\phi V_c \geq V_u$$

dimana:

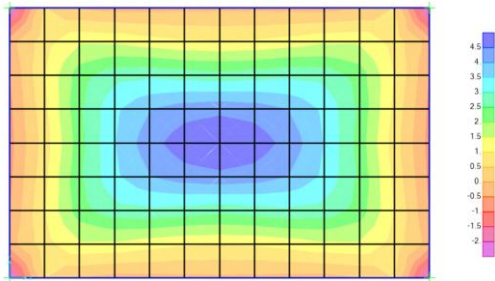
ϕV_c = Kapasitas geser (N)

V_c = Kuat geser nominal oleh beton (N)

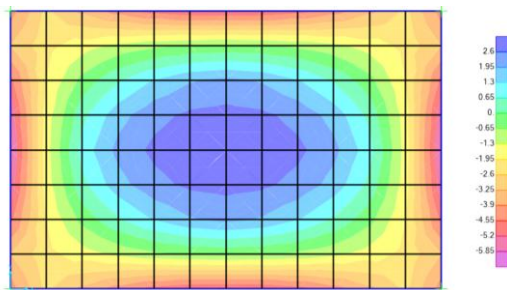
V_u = Gaya geser terfaktor pada penampang (N)

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

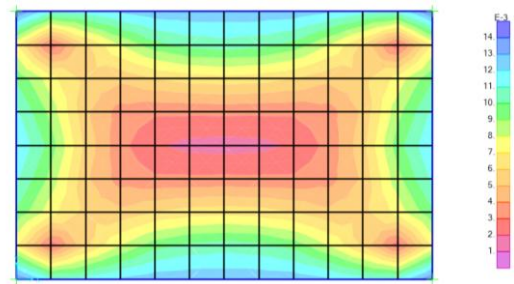
Hasil Analisis Momen dan Geser. Pola distribusi momen dan geser pada pelat lantai dimensi 4.900 x 3.150 mm dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5 serta nilai momen dan geser hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 5.



Gambar 3 Momen Maksimum



Gambar 4 Momen Minimum



Gambar 5 Geser Maksimum

Tabel 5 Elemen Forces Pelat

Momen Max Arah X (M11)	3,0756	kN.m
Momen Min Arah X (M11)	-6,0887	kN.m
Momen Max Arah Y (M22)	4,9578	kN.m
Momen Min Arah Y (M22)	-5,2547	kN.m

Hasil Perhitungan Kapasitas Momen dan Geser. Untuk mengetahui kapasitas dan kinerja pelat lantai beton bertulang dengan tulangan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), dilakukan analisis terhadap berbagai parameter struktur. Hasil kapasitas lentur, kapasitas geser dan rasio gaya dalam untuk pelat berukuran 4.900 x 3.150 mm

Tabel 6 Nilai Kapasitas Pelat Lantai Menggunakan CFRP

Pelat Lantai Beton Bertulang CFRP 4.900 x 3.150 mm	
Keterangan	Pelat Tulangan CFRP
Berat Jenis (kN/m ³)	24
Momen Rencana (Mu) (kN.m)	6,0887
Geser Rencana (Vu) (kN)	14,3
Kapasitas Lentur (ØMn) (kN.m)	32,91
Kapasitas Geser (ØVn) (kN)	52,5
Rasio Lentur $\frac{M_u}{\phi M_n}$	0,185
Rasio Geser $\frac{V_u}{\phi V_n}$	0,272

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pelat lantai beton bertulang CFRP berukuran 4.900 × 3.150 mm, diperoleh bahwa kapasitas lentur dan kapasitas geser pelat berada jauh di atas kebutuhan desain. Nilai momen rencana sebesar 6,0887 kN·m dan gaya geser rencana sebesar 14,3 kN masih lebih kecil dibandingkan kapasitas lentur ($\phi M_n = 32,91$ kN·m) dan kapasitas geser ($\phi V_n = 52,5$ kN). Hal ini ditunjukkan oleh rasio lentur sebesar 0,185 dan rasio geser sebesar 0,272, yang keduanya lebih kecil dari satu. Dengan demikian, pelat dengan tulangan CFRP dinyatakan aman terhadap kegagalan lentur maupun geser, serta memenuhi persyaratan kekuatan struktural sesuai kriteria perencanaan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wight, J. K., *Reinforced Concrete: Mechanics and Design*, Pearson Education, 2016.
- [2] Jahami, A. dan Issa, C. A., "An updated review on the effect of CFRP on flexural performance of reinforced concrete beams," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 18, no. 1, 2024, <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00651-y>.
- [3] M Standar Nasional Indonesia, *SNi 1727:2020 – Beban desain minimum dan kriteria terkait untuk bangunan dan struktur lain*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2020.
- [4] Standar Nasional Indonesia, *SNi 2847:2019 – Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2019.
- [5] Standar Nasional Indonesia, *SNi 8970:2021 – Panduan perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulang dengan serat berpolimer*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta, 2021.
- [6] American Concrete Institute, *ACI 440.1R-15: Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars*, American Concrete Institute, Farmington Hills, 2015.



ANALISIS POTENSI EROSI AKIBAT PERUBAHAN TATA GUNA LAHAN PADA DAERAH ALIRAN SUNGAI SAMBO KABUPATEN SIGI PROVINSI SULAWESI TENGAH

Cindy Nurmaulidah Sari¹, Vera Wim Andiesse*¹, Rudi Herman¹, Sri Warliawati¹, Altim Setiawan²,
Alamsyah Prawirabakti¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu

²Jurusan Teknik Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu

Penulis korespondensi: verawimandiese@gmail.com

DISUBMIT 29 Maret 2026 **DIREVISI** 6 Agustus 2026 **DITERIMA** 7 Agustus 2026

ABSTRAK Penurunan kondisi sumber daya alam, terutama tanah dan air di daerah aliran sungai telah terjadi akibat perubahan tata guna lahan. Lokasi penelitian berada di wilayah DAS Sambo Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah dengan luas sebesar 4787,947 hektar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui klasifikasi tingkat bahaya erosi yang terjadi dan hasil analisis potensi erosi akibat perubahan penggunaan lahan. Data yang diperoleh dari BWSS III, BPKHTL, dan Dinas Kehutanan merupakan data sekunder yang mencakup peta digitasi dan data curah hujan. Data tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel dan ArcGIS. Hasil penelitian ini mencakup data 10 tahun terakhir dengan menggunakan metode Modifikasi USLE menunjukkan erosi aktual terbesar pada tahun 2023 sebesar 102640,911 ton/tahun dan terkecil pada tahun 2016 sebesar 7932,115 ton/tahun. Erosi potensial terbesar pada tahun 2023 sebesar 9943358,497 ton/tahun dan terendah pada tahun 2016 sebesar 1307137,605 ton/tahun. Hasil dari penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa Potensi erosi akibat perubahan penggunaan lahan di DAS Sambo selama 10 tahun terakhir menunjukkan bahwa tingkat erosi tertinggi terjadi pada tahun 2023 sedangkan tingkat erosi terendah terjadi pada tahun 2016. Perbedaan signifikan ini disebabkan oleh perubahan drastis dalam penggunaan lahan, dimana tutupan vegetasi mengalami penurunan yang cukup besar. Penurunan tutupan ini menyebabkan banyak area yang sebelumnya terlindungi oleh vegetasi menjadi rentan terhadap erosi. Kondisi ini diperburuk oleh faktor-faktor seperti iklim, topografi, dan aktivitas manusia yang semakin intensif.

KATA KUNCI Erosi; Sungai; Modifikasi USLE; Curah Hujan; Tata Guna Lahan

1 LATAR BELAKANG

Penurunan kondisi sumber daya alam di daerah aliran sungai dapat terjadi akibat perubahan tata guna lahan yang mempengaruhi kondisi fisik sungai dan meningkatkan potensi kerusakan. Vegetasi memiliki peran penting dalam menjaga stabilitas sungai melalui upaya konservasi seperti renaturalisasi [1]. Perubahan penggunaan lahan di daerah tangkapan air mempunyai dampak yang signifikan terhadap laju erosi dan sedimen di sungai utama serta anak-anak sungainya. Perubahan penggunaan lahan tersebut tidak disertai dengan praktik konservasi lahan dan perencanaan yang baik, dapat mengakibatkan kerusakan lahan maupun peningkatan erosi pada daerah aliran sungai, limpasan sungai, kolam, dan lahan lainnya [2]. Peningkatan erosi yang signifikan telah tercatat diseluruh dunia dalam tiga dekade terakhir terutama daerah yang sering mengalami peningkatan erosi yaitu daerah

tropis, penyebab utama erosi yaitu perubahan iklim, perubahan penggunaan lahan, dan kegiatan antropogenik lainnya. Kegiatan antropogenik yang paling umum adalah pembangunan perkotaan, penutupan sebagian atau seluruh tepian sungai, pembendungan saluran air, pembangunan jembatan pada daerah yang tidak seharusnya, penggundulan hutan sehingga berdampak erosi, konstruksi untuk meruntuhkan jalan atau bangunan lainnya disepanjang saluran air, penurunan permukaan tanah akibat kegiatan antropogenik sehingga menyebabkan kerusakan lahan di wilayah DAS yang semakin memperhatikan dan semakin meningkatkan risiko terjadinya erosi [3]. Daerah aliran sungai (DAS) Sambo sering mengalami erosi maupun banjir yang berlebihan diakibatkan oleh tingginya intensitas curah hujan yang menimbulkan endapan sedimentasi sehingga terjadinya luapan pada daerah aliran sungai. Penyebab

lainnya sering terjadi erosi dan banjir pada DAS Sambo yaitu banyak yang beralih fungsi penggunaan lahan sesuai dengan kebutuhan pemilik lahan, salah satu kerugiannya seperti tata guna lahan yang tidak tepat maupun tidak seimbang cenderung mengalami penurunan diakibatkan oleh kegiatan masyarakat itu sendiri dimulai dari melakukan aktivitas bertani tanpa menerapkan prinsip-prinsip konservasi lahan [4].

2 METODE PENELITIAN

Erosi merupakan salah satu faktor utama yang menyebabkan kerusakan tanah. Proses erosi terjadi ketika tanah atau bagiannya berpindah dari satu tempat ke tempat lain oleh media alami. Dalam proses ini tanah disuatu wilayah yang terkikis dan terangkut, lalu diendapkan ditempat yang berbeda. Pengikisan dan pemindahan tanah ini disebabkan oleh media alami seperti air, angin, dan akibat aktivitas manusia [5]. Proses terjadi erosi adalah proses alami yang dimana pelapukan batuan atau tanah yang terkikis secara geologis dan alamiah. Erosi alami merupakan bagian dari proses keseimbangan alam yang dimana laju kerusakan tanah masih lebih rendah dari pada proses pembentukan tanah.

Metode Modifikasi USLE yang memperhitungkan erosi dan pergerakan sedimen pada DAS berdasarkan satu kejadian hujan. Dengan demikian metode MUSLE memungkinkan untuk memperkirakan tingkat erosi tanah dan jumlah sedimen yang terangkut dengan lebih akurat, yang dapat membantu dalam merancang strategis manajemen lahan yang lebih efektif.

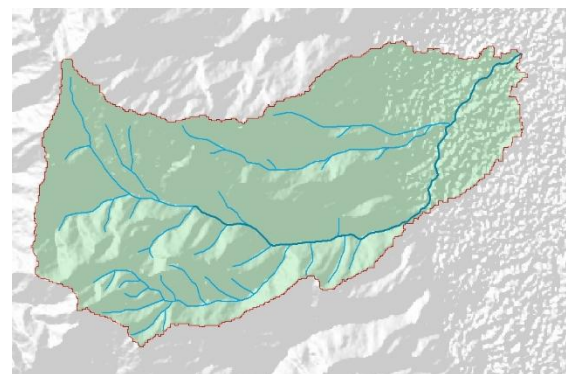
$$A = R \times K \times LS \times VM$$

Di mana: A = Erosi rata-rata tahunan (ton/ha); R = Indeks erosivitas; K = Indeks erodibilitas; LS = Faktor topografi; VM = faktor konservasi tanah dan sistem pertanian ditentukan berdasarkan kondisi lapangan.

Sistem Informasi Geografis (SIG) atau *Geographic Information System* (GIS) yaitu

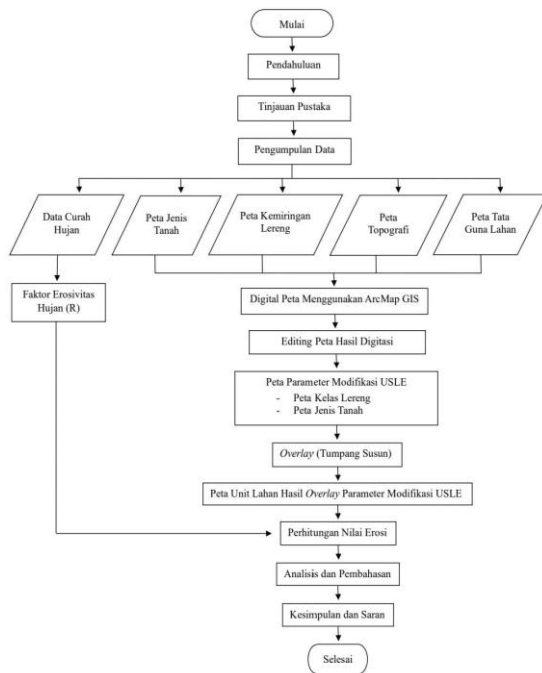
merupakan sistem yang berbasis komputer yang berfungsi untuk memasukkan, menyimpan, mengambil kembali, mengolah, menganalisis, dan menghasilkan data yang memiliki referensi geografis atau geospasial. Sistem ini mendukung pengambilan keputusan dalam berbagai bidang seperti perencanaan dan pengelolaan penggunaan lahan, sumber daya alam, lingkungan, transportasi, fasilitas kota, dan layanan umum lainnya. GIS adalah sistem informasi khusus yang menangani data dengan informasi spesial atau referensi keruangan. Sistem ini menyajikan informasi dalam bentuk grafis dengan menggunakan peta [6].

1. Lokasi Penelitian. Lokasi penelitian terletak di antara Desa Sambo dan Desa Sidondo II Kecamatan Dolo Kabupaten Sigi Sulawesi Tengah. Sungai Sambo termasuk dalam Wilayah Sungai Palu – Lariang yang secara geografis terletak di 01° 6' 53.27" LS dan 119° 50' 43.19" BT. DAS Sambo merupakan salah satu sub-DAS dari DAS palu dengan luas daerah aliran sekitar 4787, 94740 hektar.



Gambar 1 Peta Lokasi Daerah Aliran Sungai (DAS) Sambo

2. Bagan Alir Penelitian.



Gambar 2 Bagan Alir Penelitian

3. Pengumpulan Data.

Dalam proses pengumpulan data untuk penelitian ini, digunakan data sekunder berupa peta hasil digitasi dan data curah hujan. Data tersebut diperoleh dari berbagai instansi pemerintahan yang memiliki relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan. Data – data yang diperlukan antara lain: a) Data curah hujan yaitu data dasar yang digunakan menghitung erosivitas hujan di DAS Sambo seperti data hujan bulanan, hujan maksimum, dan jumlah hari hujan. Data ini didapatkan dari Kantor Balai Wilayah Sungai Sulawesi (BWSS III). DAS Sambo tidak memiliki pos hujan harian, maka analisis ini menggunakan data dari pos hujan harian gabungan DAS Bangga untuk menghitung rata-rata curah hujan di wilayah DAS Sambo. b) Peta topografi yaitu gambaran visual dari permukaan bumi yang menampilkan elevasi atau ketinggian suatu area. Peta topografi menunjukkan kontur, sungai, dan berbagai fitur topografi lainnya. Informasi dari peta topografi dapat digunakan untuk memahami struktur dan kondisi topografi DAS. Peta topografi ini memperlihatkan sistem sungai yang dapat digunakan untuk menetapkan batas-batas Daerah Aliran Sungai (DAS) dari Sungai Sambo. Data ini didapatkan dari Kantor Balai

Wilayah Sungai Sulawesi (BWSS III). c) Peta jenis tanah yaitu gambaran visual dari sebaran berbagai jenis tanah dalam suatu area. Peta jenis tanah ini menunjukkan posisi serta ciri – ciri tanah seperti tekstur, struktur dan kandungan bahan organik. Pemetaan jenis tanah di DAS Sambo dapat memberikan wawasan tentang potensi erosi yang dapat terjadi berdasarkan sifat – sifat fisik tanahnya. Data ini didapatkan dari Kantor Dinas Kehutanan Provinsi Sulawesi Tengah. d) Peta kemiringan lereng yaitu gambaran visual yang menunjukkan derajat kecuraman permukaan lereng di suatu area. Peta ini menggunakan perbedaan warna atau garis kontur untuk mengilustrasikan variasi kemiringan lereng, bermanfaat dalam hal perencanaan penggunaan lahan, pengelolaan sumber daya alam, dan upaya mitigasi bencana seperti terjadinya erosi. Peta kemiringan lereng berguna untuk mengidentifikasi area dengan kemiringan yang berbeda – beda di DAS Sambo. Data ini didapatkan dari Kantor Balai Wilayah Sungai Sulawesi (BWSS III). e) Peta tata guna lahan yaitu gambaran visual yang menunjukkan cara tentang bagaimana lahan digunakan dan tersebar di suatu area. Peta ini menunjukkan berbagai jenis penggunaan lahan seperti pemukiman, pertanian, hutan, industri, kawasan konservasi, dan lain-lainnya. Peta tata guna lahan bermanfaat bagaimana pentingnya untuk memahami lahan serta memahami dampak terhadap lingkungan. Data ini didapatkan dari Kantor Balai Pemantapan Kawasan Hutan Wilayah XVI Palu (BPKHTL).

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengumpulan Data. Proses penelitian ini diperoleh dari pengumpulan data sekunder melalui instansi-instansi. Bertujuan untuk mendukung proses analisis perhitungan erosi yang terjadi pada DAS Sambo, serta melibatkan kerja sama berbagai pihak baik internal maupun eksternal.

Perhitungan Erosivitas Hujan (R). Untuk menghitung nilai erosivitas hujan secara akurat diperlukan beberapa jenis data, yang meliputi jumlah curah hujan yang dicatat

setiap bulan, jumlah hujan maksimum yang terjadi dalam satu bulan yang menunjukkan intensitas hujan tertinggi pada periode tersebut dan jumlah hari hujan dalam bulan yang terkait yang menunjukkan frekuensi hari dimana hujan terjadi. Untuk menghitung nilai erosivitas hujan digunakan rumus sebagai berikut:

$$R = \sum EI_{30}$$

Dimana : EI_{30} bulanan = $6,119 (R_b)^{1,211} \times (N)^{-0,474} \times (R_{max})^{0,526}$

Berikut contoh perhitungan faktor erosivitas hujan (R) data curah hujan yang akan digunakan oleh peneliti pada bulan januari tahun 2013 Diketahui : Curah hujan perbulan (R_b) = 6,060 cm; Jumlah hari terjadi hujan dalam sebulan (N) = 20 hari; Curah hujan maksimum harian dalam sebulan (R_{max}) = 1,515 cm Maka, EI_{30} bulanan = $6,119 (6,060)^{1,211} \times (20)^{-0,474} \times (1,515)^{0,526} = 16,524$ Kj/ha. Untuk mendapatkan nilai faktor erosivitas hujan (R) selama satu tahun ditahun 2013 diuraikan dalam Tabel 1 sebagai berikut :

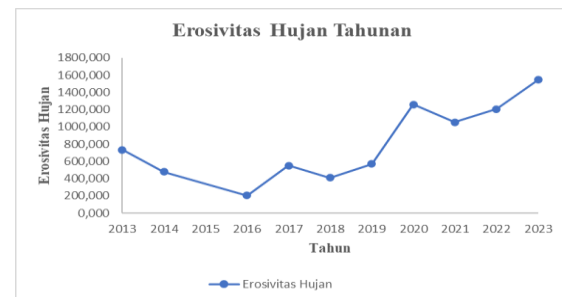
Tabel 1 Perhitungan faktor erosivitas hujan (R)

Bulan	R_b	N	R_{max}	$(R_b)^{1,211}$	$(N)^{-0,474}$	$(R_{max})^{0,526}$	EI_{30}
Januari	6,060	20	1,515	8,863	0,242	1,244	16,524
Februari	10,785	16	3,335	17,813	0,269	1,884	55,907
Maret	9,205	18	3,165	14,704	0,254	1,833	42,457
April	11,980	21	3,420	20,231	0,236	1,909	56,559
Mei	11,890	23	3,050	20,047	0,226	1,798	50,542
Juni	11,885	16	3,900	20,037	0,269	2,046	68,280
Juli	17,770	21	2,960	32,612	0,236	1,770	84,501
Agustus	8,970	20	2,750	14,251	0,242	1,703	36,354
Septemb	17,425	15	4,055	31,846	0,277	2,088	114,214
Oktober	10,240	20	3,060	16,729	0,242	1,802	45,182
Novemb	11,880	17	5,055	20,026	0,261	2,345	76,006
Desemb	12,925	17	5,570	22,179	0,261	2,468	88,583
						$\sum EI_{30}$	735,108

Berikut Tabel 2 rekapitulasi perhitungan analisis indeks erosivitas hujan tahunan 2013 hingga 2023 sebagai berikut :

Tabel 2 Rekapitulasi perhitungan analisis indeks erosivitas hujan tahunan

Bulan	2013	2014	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Januari	16,524	17,812	0,000	25,858	4,361	25,809	56,307	36,769	59,872	47,901
Februari	55,907	11,857	0,000	17,184	31,183	12,087	84,846	66,554	137,697	38,213
Maret	42,457	36,774	19,591	18,675	23,297	22,471	30,484	97,072	76,539	180,017
April	56,559	13,896	92,643	54,210	28,921	56,702	216,624	47,008	43,410	35,909
Mei	50,542	244,097	9,977	23,438	43,496	18,242	276,655	118,079	140,756	360,101
Juni	68,280	14,169	30,775	15,078	41,860	31,348	129,112	118,117	126,605	339,276
Juli	84,501	64,661	50,068	128,693	83,944	71,362	97,568	99,336	89,354	87,254
Agustus	36,354	26,383	0,000	22,912	44,962	12,650	31,794	144,899	84,942	77,804
September	114,214	2,115	0,000	57,033	27,287	9,282	188,036	178,342	171,386	78,505
Oktober	45,182	4,495	0,000	118,573	28,406	84,824	127,663	50,906	216,011	91,812
November	76,006	13,468	0,000	58,131	24,495	174,829	18,551	92,661	38,708	142,265
Desember	88,583	27,393	0,000	11,508	27,422	51,858	2,126	6,030	21,693	66,567
R	735,108	477,120	203,055	551,293	409,635	571,263	1256,566	1055,572	1206,973	1545,423



Gambar 3 Total Erosivitas hujan selama 10 tahun

Berdasarkan Gambar 3 dapat diketahui selama periode 10 tahun, nilai erosivitas hujan tertinggi terjadi pada tahun 2023 yaitu sebesar 1545,423 yang menunjukkan adanya intensitas hujan yang sangat tinggi pada tahun tersebut yang berpotensi meningkatkan proses erosi secara signifikan, sedangkan erosivitas hujan terendah terjadi pada tahun 2016 yaitu sebesar 203,055 yang menunjukkan adanya periode hujan yang lebih rendah dan dampak erosi yang lebih rendah dibandingkan dengan tahun-tahun lainnya serta memberikan kesempatan bagi vegetasi untuk melindungi permukaan tanah dari pengikisan yang merusak.

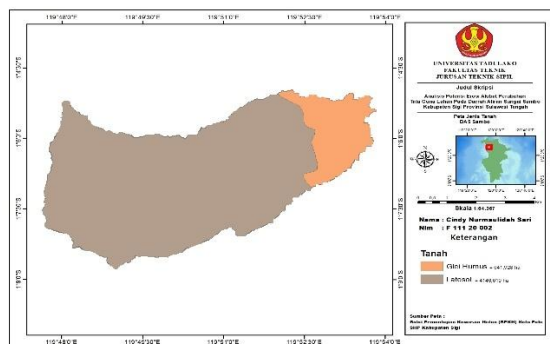
Penentuan Erodibilitas Tanah (K). Nilai erodibilitas tanah yang dilambangkan dengan faktor K untuk berbagai jenis tanah di Indonesia dapat dilihat dalam tabel nilai K yang telah disusun oleh Dinas Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah (RLKT) sebagai panduan untuk merencanakan upaya konservasi tanah yang lebih tepat sasaran. Nilai erodibilitas tanah DAS Sambo yang diperoleh dari instansi Kantor Dinas Kehutanan Provinsi Sulawesi Tengah

terdapat 2 jenis tanah yaitu latosol dan gley humic atau glei humus [7].

Tabel 3 Jenis tanah dan faktor erodibilitas tanah (K)

No	Jenis Tanah	Nilai K
1	Latosol Merah	0,12
2	Latosol Merah Kuning	0,26
3	Latosol Coklat	0,23
4	Latosol	0,31
5	Regosol	0,29
6	Gley Humic	0,26
7	Lithosol	0,16
8	Lithosol	0,29
9	Grumosol	0,21
10	Hydromorf abu-abu	0,20

Sumber: (Asdak 2023)



Gambar 4 Peta Jenis Tanah DAS Sambo

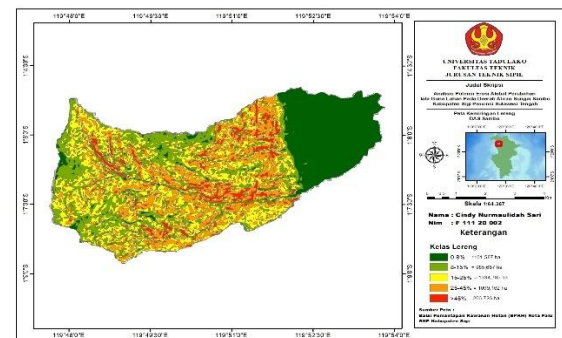
Penentuan Faktor Kemiringan Lereng (LS) Daerah Aliran Sungai Sambo memiliki topografi yang cukup beragam yang mencakup bentang alam secara alamiah maupun buatan yang bervariasi dari daerah berbukit hingga daerah bergunung. Karakteristik topografi ini membuat DAS Sambo memiliki berbagai jenis kelas lereng atau sering disebut dengan kemiringan lereng (LS) mulai dari lereng landai yang relatif datar hingga lereng yang agak curam. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) menetapkan nilai faktor kemiringan lereng (LS) disesuaikan dengan kelas lereng yang bervariasi seperti yang tercantum pada Tabel 4 [8] yang mengklasifikasikan lereng dari landai hingga sangat curam berdasarkan ketinggian,

kemiringan, serta risiko potensialnya terhadap aliran air dan stabilitas tanah

Tabel 4 Penilaian kelas kelereng (faktor LS)

Kemiringan Lereng (%)	Nilai LS
0 – 8	0,25
8 – 15	1,20
15 – 25	4,25
25 – 45	9,50
> 45	12,00

Sumber : (Saida dkk 2017)



Gambar 5 Peta Kemiringan Lereng

Penentuan Nilai VM. Kawasan DAS Sambo menunjukkan keragaman yang signifikan dalam penggunaan lahan, dimana berbagai jenis aktivitas ekonomi, sosial maupun lingkungan yang berkontribusi pada dinamika pengelolaan sumber daya alam sehingga dapat memberikan manfaat yang berkelanjutan bagi generasi mendatang. Perubahan dalam penggunaan lahan yang terjadi akibat kegiatan rehabilitasi diharapkan dapat secara signifikan mengurangi tingkat erosi di kawasan tersebut. Untuk memprediksikan perubahan tingkat erosi yang diharapkan dapat digunakan faktor konservasi tanah tabel Vegetasi dan Material (VM).

Tabel 5 Penggunaan tata guna lahan dan luasan pada DAS Sambo 2013 hingga 2023

No	Tata Guna Lahan	2013	2014	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
		Luasan	Luasan	Luasan	Luasan	Luasan	Luasan	Luasan	Luasan	Luasan	Luasan
1	Hutan Lahan Kering Primer	-	-	2164,097	2173,472	2173,472	2242,922	2231,166	2231,153	2231,153	2231,153
2	Hutan Lahan Kering Sekunder	2723,842	2723,842	1067,263	550,370	550,370	480,920	480,920	480,933	784,725	784,725
3	Lahan Terbuka	-	-	-	-	-	-	11,756	-	-	-
4	Pemukiman	-	-	-	9,864	9,864	9,864	42,969	42,969	42,969	42,969
5	Pertanian Lahan Kering	426,875	270,914	426,875	417,011	417,011	417,011	416,984	416,984	407,591	407,591
6	Pertanian Lahan Kering Campur Semak	205,439	361,400	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Savana/Padang Rumput	-	-	205,439	205,439	205,439	205,439	205,419	205,419	52,035	52,035
8	Sawah	630,632	630,632	630,632	630,632	630,632	630,632	597,527	597,527	597,527	597,527
9	Semak Belukar	799,513	799,513	292,035	799,513	799,513	799,513	799,532	811,288	670,274	670,274
10	Tubuh Air	1,646	1,646	1,646	1,646	1,646	1,646	1,674	1,674	1,674	1,674
Total keseluruhan		4787,947	4787,947	4787,947	4787,947	4787,947	4787,947	4787,947	4787,947	4787,947	4787,947



Gambar 6 Peta Jenis Tanah DAS Sambo

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa selama periode 10 tahun terakhir, terjadi berbagai perubahan signifikan dalam pola penutupan lahan yang berpotensi memberikan dampak buruk terhadap lingkungan, seperti kurangnya area yang terlindungi oleh vegetasi alami sehingga meningkatkan kerentanannya terhadap proses erosi, yang pada akhirnya dapat merusak kualitas tanah dan membahayakan keberlanjutan ekosistem di area tersebut.



Gambar 7 Tata Guna Lahan Pada DAS Sambo

Data penggunaan tata guna lahan yang diasumsikan sebagai berikut : 1) Hutan lahan kering primer menggunakan tajuk efektif sebesar 100% dan serasah hutan sebesar 90% maka nilai $VM = 0.001$; 2) Hutan lahan kering sekunder menggunakan tajuk efektif sebesar 75% dan serasah hutan

sebesar 85% maka nilai $VM = 0.002$; 3) Lahan terbuka menggunakan tajuk efektif sebesar 75% dan serasah hutan sebesar 75% maka nilai $VM = 0.004$; 4) Pemukiman menggunakan tipe semak atau tanaman bawah lainnya (2 meter dari tanah) dan tajuk penutup 50% Tipe W 20% maka nilai $VM = 0,19$; 5) Lahan pertanian kering menggunakan tipe semak-belukar rendah (0,5 meter dari tanah) dan tajuk penutup 50% Tipe G 40% maka nilai $VM = 0,07$; 6) Lahan pertanian kering campur semak menggunakan tipe semak-belukar rendah (0,5 meter dari tanah) dan tajuk penutup 60% Tipe G 60% maka nilai $VM = 0,035$; 7) Savana/Padang rumput menggunakan tipe semak-belukar rendah (0,5 meter dari tanah) dan tajuk penutup 75% Tipe G 95% maka nilai $VM = 0,003$; 8) Sawah menggunakan tipe semak belukar rendah (0,5 meter dari tanah) dan tajuk penutup 75% Tipe G 80% maka nilai $VM = 0,011$; 9) Semak belukar menggunakan tipe semak-belukar rendah (0,5 meter dari tanah) dan tajuk penutup 75% Tipe W 80% maka nilai $VM = 0,038$ 10. Tubuh air menggunakan tipe kondisi tanpa tajuk dan tajuk penutup 0% Tipe G 0% maka nilai $VM = 0,45$.

Perhitungan Erosi Aktual. Perkiraan tingkat aktual erosi di DAS Sambo dapat diperkirakan dengan mengumpulkan data seperti faktor curah hujan, faktor konservasi tanah (VM) selama 10 tahun terakhir, kemudian data faktor erabilitas tanah dan faktor kemiringan lereng. Dengan faktor – faktor ini untuk prediksi laju erosi aktual DAS Sambo dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut : $A = R \times K \times LS \times VM$

Setelah memasukkan parameter Modifikasi USLE berdasarkan peta unit lahan yang diperoleh dari hasil tumpang tindih lapisan (Overlay) peta menggunakan ArcMap GIS maka dapat memperhitungkan nilai besarnya erosi (A) dan laju erosi (Ea) sebagai berikut :

Contoh perhitungan erosi aktual (A) yang akan digunakan oleh peneliti pada tahun 2013 pada unit lahan 1

- Luas lahan = 93,318 ha

- Erosivitas hujan (R) tahun 2013 = 735,108 (pada Tabel 1)
- Jenis tanah latosol, nilai faktor erodibilitas tanah (K) = 0,31 (pada Tabel 3)
- Kemiringan lereng kelas I (0% - 8%), nilai LS = 0,25 (pada Tabel 4)
- Penggunaan lahan yang diasumsikan menurut Modifikasi USLE (VM) = 0,002

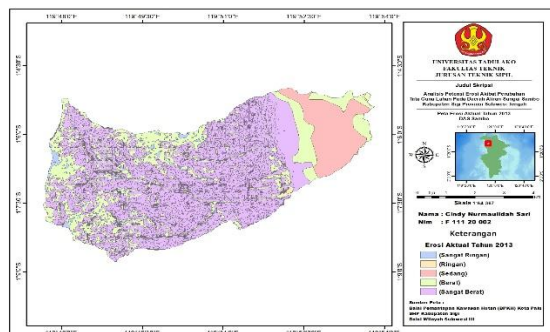
Perhitungan erosi aktual, = $735,108 \times 0,31 \times 0,25 \times 0,002 = 0,114$ ton/ha/tahun

Perhitungan laju erosi, $E_a = A \times \text{Luas unit lahan} = 0,114 \times 93,318 = 10,633$ ton/tahun

Agar mempermudah perhitungan selanjutnya, disajikan dalam bentuk Tabel 6.

Tabel 6 Perhitungan Erosi Aktual DAS Sambo Tahun 2013

No	Tata Guna Lahan	Luas (Ha)	Faktor Erosivitas (R)	Faktor Erodibilitas (K)	Kemiringan Lereng (%)	Faktor Kelengkapan (LS)	Faktor VM	Erosi Aktual $A = R \cdot K \cdot LS \cdot VM$ (ton/ha/tahun)	Laju Erosi $E_a = A \cdot \text{Luas}$ (ton/tahun)	Tingkat Erosi
1		93,318	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	0,002	0,114	10,633	(Sangat Ringan)
2	Hutan Lahan	778,336	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	0,002	0,547	425,688	(Berat)
3	Kering	973,597	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	0,002	1,937	1883,367	(Sangat Berat)
4	Sekunder	712,423	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	0,002	4,330	3084,639	(Sangat Berat)
5		166,167	735,108	0,31	> 45 %	12,00	0,002	5,469	908,802	(Berat)
6		129,497	735,108	0,26	0 - 8 %	0,25	0,070	3,345	433,134	(Berat)
7		221,337	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	0,070	3,388	516,428	(Sangat Berat)
8	Pertanian Lahan Kering	35,030	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	0,070	19,142	670,671	(Sangat Berat)
9		19,612	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	0,070	67,795	1329,621	(Sangat Berat)
10		17,697	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	0,070	151,542	2681,840	(Sangat Berat)
11		1,696	735,108	0,31	> 45 %	12,00	0,070	191,422	326,518	(Sangat Berat)
12		12,613	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	0,035	1,294	25,130	(Ringan)
13	Pertanian Lahan Kering	47,378	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	0,035	9,571	453,457	(Berat)
14		65,016	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	0,035	33,898	2203,887	(Sangat Berat)
15	Gunung Semak	67,987	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	0,035	75,771	5149,039	(Sangat Berat)
16		12,465	735,108	0,31	> 45 %	12,00	0,035	95,711	1193,040	(Sangat Berat)
17		137,458	735,108	0,26	0 - 8 %	0,25	0,011	0,526	72,248	(Sedang)
18	Sawah	403,078	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	0,011	0,627	309,042	(Berat)
19		0,097	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	0,011	1,008	0,291	(Sangat Ringan)
20		11,427	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	0,038	2,145	24,738	(Ringan)
21		124,133	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	0,038	10,391	1289,928	(Sangat Berat)
22	Semak Belukar	278,586	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	0,038	36,800	10252,348	(Sangat Berat)
23		300,985	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	0,038	82,566	24760,781	(Sangat Berat)
24		84,382	735,108	0,31	> 45 %	12,00	0,038	103,915	8768,561	(Sangat Berat)
25	Tebal Air	1,466	735,108	0,26	0 - 8 %	0,25	0,450	21,540	31,467	(Ringan)
Total Keseluruhan		4787,9474						927,779	67194,112	



Gambar 8 Peta Erosi Aktual DAS Sambo Tahun 2013

Setelah menghitung dan menganalisis tingkat bahaya erosi aktual, dapat diketahui lokasi dimana saja terjadi sebaran erosi. Untuk mengetahui tebal lapisan tanah yang tererosi yaitu dapat diperoleh dengan perhitungan dengan membagi erosi pertahun dengan luas total uni lahan kemudian mengalikannya dengan volume tanah yang setara dengan $\gamma = 1,80$ ton / m³

Contoh perhitungan tebal lapisan tanah yang tererosi pada tahun 2013

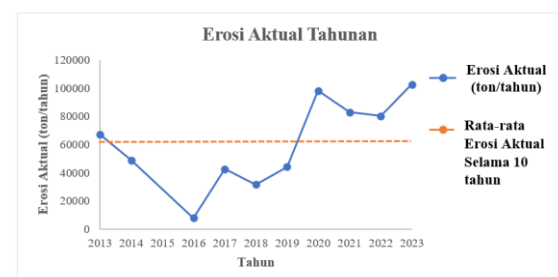
- Luas unit lahan = 4787,94740 ha
- Laju erosi pertahun, $E_a = 67194,11247$ ton/tahun

Laju erosi pertahun perluasan (ha) = $E_a / \text{Luas Lahan} = 67194,11247 / 4787,94740 = 14,03401$ ton/ha/tahun = 0,00140 ton/m²/tahun

Tebal lapisan tanah tererosi = Laju erosi pertahun perluasan/Y tanah = $0,00140 / 1,80 = 0,00078$ m/tahun = 0,77967 mm/tahun

Tabel 7 Total Erosi Aktual DAS Sambo Selama 10 Tahun

No	Tahun	Luas Unit Lahan (ha)	Laju Erosi Pertahun (E_a) (ton/tahun)	Laju Erosi Pertahun Perluasan (ton/ha/thn)	Tebal Lapisan Tanah Tererosi (mm/tahun)
1	2013	4787,947	67194,112	14,034	0,780
2	2014	4787,947	48952,548	10,224	0,568
3	2016	4787,947	7932,115	1,657	0,092
4	2017	4787,947	42685,630	8,915	0,495
5	2018	4787,947	31717,307	6,624	0,368
6	2019	4787,947	44214,933	9,235	0,513
7	2020	4787,947	98097,222	20,488	1,138
8	2021	4787,947	82964,657	17,459	0,970
9	2022	4787,947	80162,361	16,743	0,930
10	2023	4787,947	102640,911	21,437	1,191
Total			606561,797	126,816	7,045
Rata-rata			60656,180	12,682	0,705



Gambar 9 Total Erosi Aktual DAS Sambo Selama 10 Tahun

Berdasarkan Gambar 9 menunjukkan bahwa erosi aktual tertinggi terjadi pada tahun 2023

dengan jumlah total erosi mencapai 102640,911 ton/tahun, setara dengan 21,437 ton/hektar/tahun dengan ketebalan lapisan tanah yang tererosi yaitu 1,191 mm/tahun. Sementara itu erosi aktual terendah terjadi pada tahun 2016 dengan jumlah total erosi mencapai 7932,115 ton/tahun, setara dengan 1,657 ton/hektar/tahun dengan ketebalan lapisan tanah yang tererosi yaitu 0,092 mm/tahun. Tingginya lajur erosi pada tahun 2023 dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya mengalami peningkatan curah hujan sebesar 1545,423 serta perubahan tata guna lahannya pada tahun 2023 yang mengakibatkan berkurangnya penutupan vegetasi banyaknya peralihan tata guna lahan, hal itu dapat meningkatnya kerentanan terhadap erosi. Selain itu faktor kemiringan lereng dan jenis tanah juga turut berkontribusi dalam memperburuk kondisi erosi.

Perhitungan Erosi Potensial. Perkiraan tingkat erosi potensial di DAS Sambo dapat diperkirakan dengan mengumpulkan data seperti faktor curah hujan selama 10 tahun terakhir, kemudian data faktor erabilitas tanah dan faktor kemiringan lereng. Erosi Potensial tidak memerlukan faktor VM dalam menentukan perkiraan tingkat erosinya Dengan faktor – faktor ini untuk prediksi laju erosi potensial DAS Sambo dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut : $A = R \times K \times LS$.

Setelah memasukkan parameter Modifikasi USLE berdasarkan peta unit lahan yang diperoleh dari hasil tumpang tindih lapisan (Overlay) peta menggunakan ArcMap GIS maka dapat memperhitungkan nilai besarnya erosi (A) dan laju erosi (Ea) sebagai berikut : Contoh perhitungan erosi potensial (A) yang akan digunakan oleh peneliti pada tahun 2013 pada unit lahan 1 Agar mempermudah perhitungan selanjutnya, disajikan dalam bentuk Tabel 5.

- Luas lahan = 93,318 ha
- Erosivitas hujan (R) tahun 2013 = 735,108 (pada Tabel 1)
- Jenis tanah latosol, nilai faktor erabilitas tanah (K) = 0,31 (pada Tabel 3)

- Kemiringan lereng kelas I (0% - 8%), nilai LS = 0,25 (pada Tabel 4)

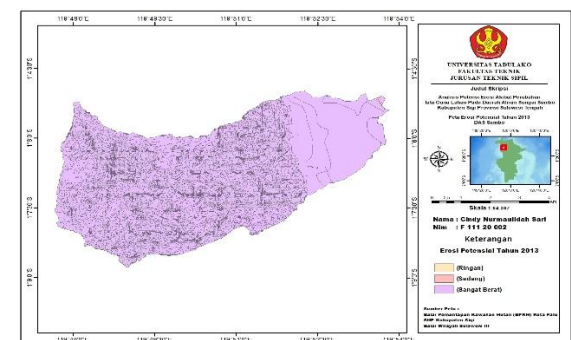
Perhitungan erosi aktual, = $735,108 \times 0,31 \times 0,25 = 56,971 \text{ ton/ha/tahun}$

Perhitungan laju erosi, $Ea = A \times \text{Luas unit lahan} = 56,971 \times 93,318 = 5316,423 \text{ ton/tahun}$

Agar mempermudah perhitungan selanjutnya, disajikan dalam bentuk Tabel 8.

Tabel 8 Perhitungan Erosi Potensial DAS Sambo Tahun 2013

No	Tata Guna Lahan	Luas (Ha)	Faktor Erosivitas (R)	Faktor Erabilitas (K)	Kemiringan Lereng (%)	Faktor Kelembutan (LS)	Erosi Aktual $A = R \times K \times LS$ (ton/ha/tahun)	Laju Erosi $Ea = A \times \text{Luas}$ (ton/tahun)	Tingkat Erosi
1		93,318	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	56,971	5316,423	(Sangat Berat)
2	Hutan Lahan	778,336	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	273,460	212843,830	(Sangat Berat)
3	Kering Sekunder	973,597	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	968,504	968253,482	(Sangat Berat)
4		712,423	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	2164,892	1542319,385	(Sangat Berat)
5		166,167	735,108	0,31	> 45 %	12,00	2734,601	454401,007	(Sangat Berat)
6		129,897	735,108	0,26	0 - 8 %	0,25	47,782	6187,622	(Sangat Berat)
7		221,337	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	56,971	7177,550	(Sangat Berat)
8	Pertanian Lahan Kering	35,036	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	273,460	9581,000	(Sangat Berat)
9		19,612	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	968,504	18994,590	(Sangat Berat)
10		17,697	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	2164,892	38311,996	(Sangat Berat)
11		3,696	735,108	0,31	> 45 %	12,00	2734,601	10107,407	(Sangat Berat)
12		12,613	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	56,971	718,565	(Sangat Berat)
13	Pertanian Lahan Kering	47,378	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	273,460	12955,926	(Sangat Berat)
14		65,016	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	968,504	62968,213	(Sangat Berat)
15	Pertanian Lahan Kering	67,967	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	2164,892	147141,116	(Sangat Berat)
16		12,465	735,108	0,31	> 45 %	12,00	2734,601	34086,853	(Sangat Berat)
17		137,458	735,108	0,26	0 - 8 %	0,25	47,782	6508,002	(Sangat Berat)
18		493,078	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	56,971	28091,059	(Sangat Berat)
19		0,097	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	273,460	26,449	(Ringan)
20		11,427	735,108	0,31	0 - 8 %	0,25	56,971	650,993	(Sangat Berat)
21		124,133	735,108	0,31	8 - 15 %	1,20	273,460	33945,463	(Sangat Berat)
22	Semak Belukar	278,586	735,108	0,31	15 - 25 %	4,25	968,504	268811,789	(Sangat Berat)
23		300,985	735,108	0,31	25 - 45 %	9,50	2164,892	651599,497	(Sangat Berat)
24		84,382	735,108	0,31	> 45 %	12,00	2734,601	230751,601	(Sangat Berat)
25	Tanah Air	1,446	735,108	0,26	0 - 8 %	0,25	47,782	78,673	(Sedang)
Total Keseluruhan		4787,947					25267,490	4727768,500	



Gambar 10 Peta Erosi Potensial DAS Sambo Tahun 2013

Setelah menghitung dan menganalisis tingkat bahaya erosi aktual, dapat diketahui lokasi dimana saja terjadi sebaran erosi. Untuk mengetahui tebal lapisan tanah yang tererosi yaitu dapat diperoleh dengan perhitungan dengan membagi erosi pertahun dengan luas total uni lahan kemudian mengalikannya dengan volume tanah yang setara dengan $\gamma = 1,80 \text{ ton / m}^3$ Contoh perhitungan tebal lapisan tanah yang tererosi pada tahun 2013.

- Luas unit lahan = 4787,94740 ha

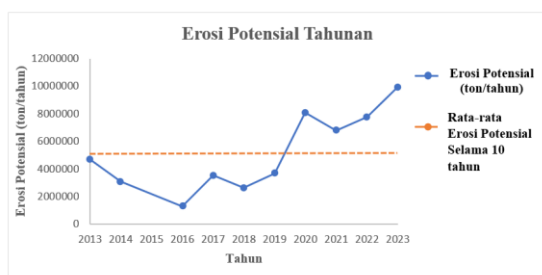
- Laju erosi pertahun, $E_a = 4727768,500$ ton/tahun

Laju erosi pertahun perluasan (ha) = $E_a / \text{Luas Lahan} = 4727768,500 / 4787,94740 = 987,431$ ton/ha/tahun = $0,09478 \text{ ton/m}^2/\text{tahun}$

Tebal lapisan tanah tererosi = Laju erosi pertahun perluasan/Y tanah = $0,09478 / 1,80 = 0,054857 \text{ m/tahun} = 54,857 \text{ mm/tahun}$

Tabel 9 Total Erosi Aktual DAS Sambo Selama 10 Tahun

No	Tahun	Luas Unit Lahan (ha)	Laju Erosi Pertahun (E_a) (ton/tahun)	Laju Erosi Pertahun Perluasan ton/ha/thn	Tebal Lapisan Tanah Tererosi mm/tahun
1	2013	4787,947	4727768,500	987,431	54,857
2	2014	4787,947	3071321,768	641,469	35,637
3	2016	4787,947	1307137,605	273,006	15,167
4	2017	4787,947	3547057,824	740,831	41,157
5	2018	4787,947	2635620,618	550,470	30,582
6	2019	4787,947	3675547,084	767,667	42,648
7	2020	4787,947	8104131,842	1692,611	94,034
8	2021	4787,947	6789154,165	1428,710	79,373
9	2022	4787,94740	7765744,597	1621,936	90,108
10	2023	4787,94740	9943358,497	2076,748	115,375
Total			51566842,501	10780,878	598,938
Rata-rata			5156684,250	1078,088	59,894



Gambar 11 Total erosi potensial DAS Sambo selama 10 tahun

Berdasarkan Gambar 11 menunjukkan bahwa erosi aktual tertinggi terjadi pada tahun 2023 dengan jumlah total erosi mencapai 9943358,497 ton/tahun, setara dengan 2076,748 ton/hektar/tahun dengan

ketebalan lapisan tanah yang tererosi yaitu 115,375 mm/tahun. Sementara itu erosi aktual terendah terjadi pada tahun 2016 dengan jumlah total erosi mencapai 1307137,605 ton/tahun, setara dengan 273,006 ton/hektar/tahun dengan ketebalan lapisan tanah yang tererosi yaitu 15,167 mm/tahun. Tingginya lajur erosi pada tahun 2023 dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya mengalami peningkatan curah hujan sebesar 1545,423 serta perubahan tata guna lahannya pada tahun 2023 yang mengakibatkan berkurangnya penutupan vegetasi banyaknya peralihan tata guna lahan, hal itu dapat meningkatnya kerentanan terhadap erosi. Selain itu faktor kemiringan lereng dan jenis tanah juga turut berkontribusi dalam memperburuk kondisi erosi.

Menentukan Indeks Bahaya Erosi. Indeks Bahaya Erosi (IBE) yaitu menentukan risiko erosi pada suatu lahan dengan membandingkan nilai erosi aktual dengan Tolerable Soil Loss (TSL) atau kehilangan tanah yang dapat diterima. Nilai TSL menggunakan hasil dari pendugaan erosi yaitu sebesar 38,7 [9]. Berikut klasifikasi indeks bahaya erosi [10].

Tabel 10 Indeks Bahaya Erosi

<1,00	Rendah
1,01 – 4,00	Sedang
4,00 – 10,00	Tinggi
>10,00	Sangat Tinggi

Sumber: (Cahyani 2023)

Rumus : $IBE = \text{Laju erosi tanah aktual} / \text{TSL}$

Dimana : Nilai TSL pendugaan yaitu 38,7 ton/ha/tahun; Nilai rata-rata laju erosi tanah aktual yaitu 11,160 ton/ha/tahun; $IBE = \text{Laju erosi tanah aktual} / \text{TSL} = 12,682 / 38,7 = 0,328$

Berdasarkan hasil perhitungan diatas, maka dapat disimpulkan DAS Sambo termasuk dalam kategori klasifikasi indeks bahaya erosi yaitu erosi rendah.

Analisis Faktor Dominan Penyebab Terjadinya Erosi. Berdasarkan hasil perhitungan analisis erosi dapat diketahui

beberapa faktor dominan yang menyebabkan terjadinya erosi sebagai berikut :

- Pengaruh langsung dari energi kinetik air hujan, terutama pada intensitas curah hujan yang berperan signifikan terhadap terjadinya erosi. Semakin tinggi intensitas curah hujannya maka dapat meningkatkan besarnya erosi yang akan terjadi.
- Jenis tanah dengan nilai erodibilitas yang tinggi memiliki kererentan lebih besar terhadap terjadinya erosi dibandingkan dengan jenis tanah yang nilai erodibilitas yang rendah. Kondisi ini semakin diperburuk apabila lahan memiliki penutupan vegetasi yang minim atau terbuka, karena hal tersebut memungkinkan proses erosi berlangsung dengan lebih cepat akibat berkurangnya perlindungan terhadap permukaan tanah.
- Kemiringan lereng merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi terjadinya erosi karena faktor ini menentukan seberapa cepat air hujan dapat mengalir hingga permukaan tanah. Semakin curam kemiringan lereng dengan besar potensi air untuk mengalir dengan kecepatan tinggi dalam mengikis permukaan tanah dan terbukanya penutup lahan tanpa adanya vegetasi yang dapat menahan maka erosi yang akan terjadi lebih cepat.
- Penutupan lahan yang beragam secara signifikan sangat mempengaruhi tingkat terjadinya erosi. Dimana lahan dengan penutupan yang kurang terlindungi cenderung lebih rentan terhadap proses erosi dikarenakan dampak dari curah hujan dapat mempengaruhi permukaan tanah dibandingkan dengan lahan yang memiliki penutupan vegetasi yang baik maupun stabil.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan perhitungan erosi yang dilakukan pada daerah aliran sungai (DAS) Sambo, dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Hasil perhitungan klasifikasi tingkat bahaya erosi selama 10 tahun menggunakan metode Modifikasi USLE menunjukan bahwa erosi aktual terbesar terjadi pada tahun 2023 dengan total erosi sebesar 102.640,911 ton/tahun, dan terkecil pada tahun 2016 dengan total erosi sebesar 7.932,115 ton/tahun. Erosi potensial terbesar terjadi pada tahun 2023 dengan total erosi mencapai 9.943.358,497 ton/tahun, dan terkecil pada tahun 2016 dengan total erosi mencapai 1.307.137,605 ton/tahun.
- Potensi erosi akibat perubahan penggunaan lahan di DAS Sambo selama 10 tahun terakhir menunjukkan bahwa tingkat erosi tertinggi terjadi pada tahun 2023 sedangkan tingkat erosi terendah terjadi pada tahun 2016. Perbedaan signifikan ini disebabkan oleh perubahan drastis dalam penggunaan lahan, dimana

tutupan vegetasi mengalami penurunan yang cukup besar. Penurunan tutupan ini menyebabkan banyak area yang sebelumnya terlindungi oleh vegetasi menjadi rentan terhadap erosi. Kondisi ini diperburuk oleh faktor-faktor seperti iklim, topografi, dan aktivitas manusia yang semakin intensif.

Saran Berikut yaitu beberapa saran yang dapat disampaikan terkait dengan hasil penelitian ini :

- Penelitian ini mengharapkan ketersediaan data curah hujan yang lengkap, serta diperlukan keberadaan pos hujan harian di wilayah DAS Sambo untuk memperoleh hasil yang lebih akurat.
- Penelitian ini mengusulkan pemberian edukasi kepada masyarakat terkait upaya penanggulangan erosi di sekitar DAS Sambo, seperti melalui program penghijauan, penanaman kembali, dan penerapan teknik konservasi tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. W. Andiese and A. Setiawan, "Normalisasi Sungai Lariang berdasarkan aspek guna lahan," *Jurnal Teknik Sipil dan Infrastruktur*, 2017.
- [2] M. Achmad, S. Samsuar and H. Mubarak, "Predicting the impact of land-use change on soil erosion rate in Ussu sub-catchment area and sedimentation yield in Malili River," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020.
- [3] N. D. Umar and A. I. Abdullahi, "Application of remote sensing and geoinformatics techniques in erosion mapping and groundwater management in the River Amba watershed, central Nigeria," *Journal of the Nigerian Society of Physical Science*, vol. 3, no. 2, 2021.
- [4] C. B. Sukatja, B. W.R and P. Bahri, "Mitigasi Dan Penanggulangan Bencana Banjir Debris Pasca Gempa Palu 2018," *Jurnal Teknik Hidraulik*, vol. 12, no. 2, 2021.
- [5] I. Andriyani, S. Wahyuningsih and S. Suryaningtias, "Perubahan Tata Guna Lahan di Sub DAS Rembangan - Jember dan Dampaknya Terhadap Laju Erosi," *AgriTECH*, vol. 39, no. 2, 2019.
- [6] I. Rozak, "Analisis Dan Perancangan Sistem Informasi Geografis Pemetaan Hama Tanaman Padi," *Jurnal Informatika Dan Rekayasa Perangkat Lunak*, vol. 2, no. 3, 2021.
- [7] C. Asdak, *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada Press, 2023.
- [8] S. Saida, A. Abdullah and M. Ilsan, "Erosi Dan Tingkat Bahaya Erosi Pada Pertanaman Kentang," *AGROTEK: Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian*, vol. 1, no. 2, 2017.
- [9] S. M. Hudi, S. B. Yuwono and A. Darmawan, "Pendugaaan Erosi DAS Sekampung Hulu Guna Perencanaan Rehabilitasi Hutan dan Lahan," in *Prosiding Seminar Nasional Silvikultur Ke-VIII*, 2022.
- [10] E. Cahyani, A. Suriadikusumah and A. Sandrawati, "Pemetaan Tingkat Bahaya Erosi dengan Pemanfaatan Teknologi Drone di DTA Cipaheut Sub DAS Cikapundung Hulu," *Media Agribisnis*, vol. 7, no. 1, 2023.



PERBANDINGAN PERENCANAAN TEBAL PERKERASAN LENTUR MENGGUNAKAN MDPJ 2024 DAN ANALISA KOMPONEN (STUDI KASUS RUAS JALAN GURU TUA KABUPATEN SIGI)

Wahiduddin Basry¹, Ahmad Solihin Ansari¹, Sindiwahyuni W. Noya^{*1}

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

Penulis korespondensi: sindiwahyuni010@gmail.com.

DISUBMIT 23 Juli 2026

DIREVISI 11 Agustus 2026

DITERIMA 12 Agustus 2026

ABSTRAK Jalan adalah jalur darat yang dibuat untuk memudahkan pejalan kaki, kendaraan, dan hewan dalam bergerak dari satu tempat ke tempat lain. Jalan Guru tua di Kabupaten Sigi merupakan salah satu jalur strategis yang menghubungkan berbagai kawasan di wilayah, saat ini kondisi jalan di ruas tersebut mengalami kerusakan yang signifikan, karena itu merancang tebal perkerasan lentur, banyak metode perencanaan telah dikembangkan, termasuk Metode Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 yang merupakan metode terbaru di Indonesia, dan metode Analisa komponen yang telah lama digunakan secara luas di Indonesia. Penelitian bertujuan menganalisis tebal perkerasan lentur, di ruas Jalan Guru tua mulai STA 02+700 sampai STA 3+800. Berdasarkan hasil analisis Kondisi tanah dasar nilai CBR segmen sebesar 17%, yang menunjukkan daya dukung tanah dasar berada dalam kategori baik untuk mendukung beban lalu lintas tanpa adanya perbaikan tanah dasar, Pada metode MDPJ 2024, perencanaan dilakukan berdasarkan nilai CESA dan bagan desain perkerasan sehingga diperoleh struktur perkerasan berupa AC-WC 6 cm, lapis fondasi atas kelas A 20 cm, dan lapis fondasi bawah kelas B 15 cm sedangkan metode Analisa Komponen, perencanaan dilakukan berdasarkan nilai LER, DDT, faktor regional, indeks permukaan, serta nomogram sehingga diperoleh struktur perkerasan berupa Laston 5 cm, lapis pondasi atas 20 cm, dan lapis pondasi bawah 20 cm.

KATA KUNCI Perkerasan lentur, MDPJ 2024, Analisa Komponen.

LATAR BELAKANG

Jalan adalah jalur darat yang dibuat untuk memudahkan pejalan kaki, kendaraan, dan hewan dalam bergerak dari satu tempat ke tempat lain. Jalan dapat bervariasi dalam ukuran, bahan, dan desain, tergantung pada penggunaan dan lokasinya. Dalam perkembangan infrastruktur jalan yang ada di Indonesia saat ini sudah sangat baik. Pemerintah sudah mulai peduli dengan perkembangan infrastruktur, terbukti dengan mulai bertambahnya proyek pembangunan jalan tol maupun jalan lintas daerah yang memudahkan mobilisasi warga untuk berpergian ke tempat yang mereka inginkan. Kualitas jalan yang baik menjadi faktor utama untuk memastikan kelancaran arus transportasi. Pemilihan metode yang tepat untuk perencanaan jalan sangat penting untuk menentukan tebal perkerasan menjadi aspek krusial, karena berkaitan dengan efisiensi biaya, daya tahan jalan, dan kenyamanan pengguna.

Ruas Jalan Guru Tua di Kabupaten Sigi merupakan salah satu jalur strategis yang

menghubungkan berbagai kawasan di wilayah sekitar. Namun, saat ini kondisi jalan di ruas tersebut mengalami kerusakan yang signifikan, ditandai dengan banyaknya lubang yang tersebar di beberapa titik jalan tersebut. Lubang-lubang tersebut sangat mengganggu kenyamanan pengguna jalan, dan dapat meningkatkan risiko kecelakaan. Dalam kondisi ini struktur perkerasan jalan memerlukan perencanaan ulang yang komprehensif.

Merancang tebal perkerasan lentur, banyak metode perencanaan telah dikembangkan, termasuk Metode Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 yang merupakan metode terbaru di Indonesia, dan metode Analisa komponen yang telah lama digunakan secara luas di Indonesia. Kedua metode ini memiliki pendekatan berbeda dalam mempertimbangkan faktor lalu lintas, kondisi lingkungan, karakteristik material, dan umur rencana jalan.

Perbandingan antara metode MDPJ 2024 dan Analisa komponen dalam

perencanaan tebal perkerasan lentur, sangat penting dilakukan untuk memahami kelebihan, kekurangan, serta kesesuaian dari masing-masing metode terhadap kondisi jalan yang akan di perbaiki, termasuk pada Ruas Jalan Guru tua yang berada di kabupaten sigi .

Pengenalan Metode MDPJ 2024

Perencanaan tebal perkerasan lentur menggunakan Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 dan Metode Analisa Komponen pada suatu ruas jalan. Perbandingan dilakukan untuk mengetahui perbedaan ketebalan setiap lapisan perkerasan, efektivitas penggunaan material, serta kesesuaian kedua metode terhadap kondisi lalu lintas dan daya dukung tanah dasar.

Data yang digunakan meliputi data Lalu Lintas Harian Rata-rata (LHR), nilai CBR tanah dasar, umur rencana, pertumbuhan lalu lintas, dan jenis kendaraan. Nilai CBR segmen dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{CBR Segmen} = \text{CBR Rata-rata} - (\text{CBR Maksimum} - \text{CBR Minimum})/R$$

Pada metode MDPJ 2024, pertumbuhan lalu lintas dihitung dengan faktor pertumbuhan:

$$R = \frac{(1 + 0,01 i)^{UR} - 1}{0,01 i}$$

Selanjutnya dihitung Cumulative Equivalent Standard Axle Load (CESAL) sebagai dasar penentuan tebal perkerasan menggunakan persamaan:

$$ESATH-1 = (\sum LHRJK \times VDFJK) \times 365 \times DD \times DL \times R$$

Nilai CESAL yang diperoleh kemudian digunakan untuk menentukan struktur dan ketebalan lapisan perkerasan berdasarkan bagan desain pada MDPJ 2024, sehingga diperoleh ketebalan lapis permukaan (AC-WC, AC-BC, AC-Base), lapis

pondasi (CTB atau agregat), dan lapis pondasi bawah sesuai kelas lalu lintas.

Pengenalan Metode Analisa Komponen

Sementara itu, pada Metode Analisa Komponen, perencanaan dilakukan dengan menentukan Indeks Tebal Perkerasan (ITP) berdasarkan beban lalu lintas, daya dukung tanah, dan umur rencana. Hubungan ketebalan lapisan dinyatakan sebagai:

$$ITP = a_1 D_1 + a_2 D_2 + a_3 D_3$$

Berdasarkan hasil perbandingan, metode MDPJ 2024 menghasilkan desain yang lebih mengikuti kondisi lalu lintas aktual karena menggunakan pendekatan mekanistik-empirik dan beban kumulatif kendaraan (CESAL), sedangkan Metode Analisa Komponen menggunakan pendekatan empiris melalui nilai ITP sehingga pada beberapa kondisi menghasilkan ketebalan lapisan yang lebih besar. Oleh karena itu, MDPJ 2024 dinilai lebih efisien dalam penggunaan material dan lebih sesuai sebagai pedoman perencanaan perkerasan jalan di Indonesia saat ini, sedangkan Metode Analisa Komponen masih dapat digunakan sebagai metode pembanding atau pada perencanaan yang mengacu pada standar lama.

METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian dilakukan di ruas Jalan Guru Tua mulai STA 02+700 sampai STA 3+800 berada di Kabupaten Sigi, Provinsi Sulawesi Tengah. Kabupaten Sigi merupakan hasil pemekaran dari Kabupaten Donggala.



Gambar 1. Lokasi Penelitian
Sumber: Peta Google Earth 2026

Identifikasi Data

Dalam Perencanaan Tebal Perkerasan Jalan memerlukan data pendukung, baik data Primer maupun data Sekunder. Dalam hal ini data yang diperlukan adalah:

Data Primer

Data Primer merupakan data yang dikumpulkan secara langsung oleh peneliti untuk keperluan riset yang sedang berlangsung. Data Primer adalah data lalulintas harian rata-rata (LHR).

Data Sekunder

Data Sekunder merupakan data yang diperoleh secara tidak langsung melalui media perantara. Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

Data *CBR* atau data daya dukung tanah (DDT) yang didapatkan dari Dinas Bina Marga Propinsi Sulawesi Tengah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis data primer dan data sekunder pada ruas Jalan Guru Tua Kabupaten Sigi, diperoleh hasil perencanaan tebal perkerasan lentur menggunakan dua metode yaitu Metode Manual Desain Perkerasan Jalan (MDPJ) 2024 dan Metode Analisa Komponen berikut Tabel 4.14 yang menunjukkan perbandingan untuk tebal perkerasan.

Tabel 1 Perbandingan Tebal Perkerasan

Perkerasan	Tebal Perkerasan		
	Fondasi Permukaan	Fondasi Atas	Fondasi Bawah
MDPJ 2024	6 cm	20 cm	15 cm
Analisa komponen	5 cm	20 cm	20 cm

Sumber: Hasil Analisis

Perbandingan hasil perencanaan dapat dilihat pada Tabel 4.14, dimana metode MDPJ 2024 menghasilkan lapisan permukaan sebesar 6 cm, lapisan fondasi

atas 20 cm, dan lapisan fondasi bawah 15 cm. Sedangkan metode Analisa Komponen menghasilkan lapisan permukaan sebesar 5 cm, lapisan fondasi atas 20 cm, dan lapisan fondasi bawah 20 cm.

Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut:

1. Perhitungan Lalu Lintas

Pada metode MDPJ 2024, analisis lalu lintas menggunakan pendekatan CESA (*Cumulative Equivalent Standard Axle*). Perhitungan dilakukan berdasarkan data LHR kendaraan niaga, faktor pertumbuhan lalu lintas, *Vehicle Damage Factor* (VDF), faktor distribusi arah (DD), dan faktor distribusi lajur (DL).

Rumus yang digunakan yaitu

$$CESA = (\sum LHRJK \times VDFJK) \times 365 \times DD \times DLX$$

R

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai:

- CESA4 = 1.015.727,192 ESA
- CESA5 = 837.507,265 ESA

Nilai tersebut menunjukkan bahwa beban lalu lintas kendaraan berat selama umur rencana cukup besar sehingga diperlukan struktur perkerasan yang mampu menahan repetisi beban kendaraan.

Metode Analisa Komponen, perhitungan lalu lintas menggunakan pendekatan lintas ekuivalen yang terdiri dari LEP, LEA, LET, dan LER. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan angka ekuivalen masing-masing kendaraan berdasarkan beban sumbu kendaraan, Dari hasil analisis diperoleh:

- LEP = 502,22
- LEA = 999,22
- LET = 750,72
- LER = 1501,44

Metode Analisa Komponen menggunakan pendekatan empiris berdasarkan angka ekivalen kendaraan sehingga perhitungan lebih sederhana dibandingkan metode MDPJ 2024.

2. Pendekatan Parameter Struktur

Metode MDPJ 2024 menggunakan parameter utama berupa nilai CESA dan nilai CBR tanah dasar. Nilai CBR sebesar 17% menunjukkan bahwa kondisi tanah dasar cukup baik untuk mendukung struktur perkerasan lentur. Selain itu, metode ini mempertimbangkan pengaruh kerusakan akibat kendaraan berat melalui nilai VDF sehingga ketahanan struktur terhadap retak lelah lebih diperhatikan.

Metode Analisa Komponen menggunakan parameter berupa:

- Daya Dukung Tanah (DDT)
- Faktor Regional (FR)
- Indeks Permukaan (IP)
- Indeks Tebal Perkerasan (ITP)

Nilai DDT diperoleh dari hubungan nilai CBR terhadap kemampuan tanah dasar. Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh nilai DDT sebesar 7. Selanjutnya nilai LER dan DDT digunakan dalam Nomogram 3 untuk memperoleh nilai ITP sebesar 7. Pendekatan metode Analisa Komponen lebih menitikberatkan pada hubungan empiris antara kekuatan tanah dasar dan ketebalan lapisan perkerasan.

3. Kriteria Perencanaan

Metode MDPJ 2024, kriteria perencanaan didasarkan pada kemampuan struktur perkerasan dalam menahan beban sumbu kendaraan selama umur rencana 20 tahun. Metode ini mempertimbangkan pertumbuhan lalu lintas sebesar 3,5% per tahun dan pengaruh kelelahan aspal akibat repetisi kendaraan berat. Selain itu, pemilihan struktur perkerasan juga mempertimbangkan nilai CESA4 dan CESA5 sehingga desain yang dihasilkan lebih sesuai dengan kondisi lalu lintas aktual.

Metode Analisa Komponen, kriteria perencanaan didasarkan pada nilai LER dan ITP. Penentuan tebal perkerasan dilakukan menggunakan nomogram berdasarkan hubungan antara lalu lintas rencana, daya dukung tanah dasar, dan indeks permukaan. Metode ini lebih sederhana karena menggunakan pendekatan empiris dan belum mempertimbangkan kerusakan akibat repetisi beban kendaraan secara detail seperti pada metode MDPJ 2024.

4. Pemilihan Struktur Perkerasan

Metode MDPJ 2024, pemilihan struktur perkerasan dilakukan berdasarkan nilai CESA4 sebesar 1.015.727,192 ESA. Berdasarkan bagan desain MDPJ 2024, nilai tersebut berada pada rentang 1–4 juta ESA sehingga dipilih jenis perkerasan lentur AC dengan lapis fondasi agregat, Struktur perkerasan yang diperoleh yaitu:

- AC-WC = 60 mm
- Lapis Fondasi Atas = 200 mm
- Lapis Fondasi Bawah = 150 mm

Lapisan permukaan dibuat lebih tebal karena metode MDPJ lebih memperhatikan ketahanan terhadap retak lelah akibat beban kendaraan berat.

Metode Analisa Komponen, pemilihan struktur dilakukan berdasarkan nilai ITP sebesar 7 dengan menggunakan koefisien kekuatan relatif masing-masing material, Struktur perkerasan yang diperoleh yaitu:

- Laston = 5 cm
- Lapis Fondasi Atas = 20 cm
- Lapis Fondasi Bawah = 20 cm

Metode Analisa Komponen menghasilkan lapisan pondasi bawah yang lebih tebal karena distribusi beban lebih difokuskan pada perlindungan tanah.

KESIMPULAN

Setelah penulis melakukan penelitian dan menghitung perencanaan yang di gunakan

untuk kedua metode dapat di simpulkan sebagai berikut :

- Kondisi tanah dasar pada Ruas Jalan Guru Tua memiliki nilai **CBR segmen sebesar 17%**, yang menunjukkan daya dukung tanah dasar berada dalam kategori baik untuk mendukung beban lalu lintas tanpa adanya perbaikan tanah dasar.
- Pada metode MDPJ 2024, perencanaan dilakukan berdasarkan nilai CESA dan bagan desain perkerasan sehingga diperoleh struktur perkerasan berupa AC-WC 6 cm, lapis fondasi atas kelas A 20 cm, dan lapis fondasi bawah kelas B 15 cm. Metode ini lebih menekankan pada pengaruh beban lalu lintas kumulatif dan kondisi tanah dasar terhadap pemilihan jenis struktur perkerasan.
- Sedangkan pada metode Analisa Komponen, perencanaan dilakukan berdasarkan nilai LER, DDT, faktor regional, indeks permukaan, serta nomogram sehingga diperoleh struktur perkerasan berupa Laston 5 cm, lapis pondasi atas 20 cm, dan lapis pondasi bawah 20 cm. Pada metode ini nilai CBR digunakan untuk menghitung daya

dukung tanah dasar (DDT) yang kemudian dipakai dalam penentuan indeks tebal perkerasan (ITP).

- perbandingan menunjukkan bahwa metode MDPJ 2024 menghasilkan lapisan permukaan yang lebih tebal dibanding metode Analisa Komponen, sedangkan metode Analisa Komponen menghasilkan lapisan pondasi bawah yang lebih tebal. Perbedaan tersebut disebabkan oleh
- perbedaan konsep dasar perencanaan pada masing-masing metode.
- Metode MDPJ 2024 lebih berorientasi pada beban lalu lintas dan kinerja struktural modern, sedangkan metode Analisa Komponen lebih menitik beratkan pada daya dukung tanah dasar dan nilai indeks tebal perkerasan. Berdasarkan hasil analisis, kedua metode masih memenuhi standar perencanaan perkerasan lentur untuk kondisi ruas jalan penelitian.
- Metode MDPJ 2024 dinilai lebih sesuai digunakan pada perencanaan jalan saat ini karena telah mengikuti perkembangan standar desain perkerasan terbaru dan mempertimbangkan beban lalu lintas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Direktorat Jenderal Bina Marga. (2017). Manual Desain Perkerasan Jalan. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- [2] Direktorat Jenderal Bina Marga. (2024). Manual Desain Perkerasan Jalan (MDP) Revisi 2024 Nomor 15/SE/Db/2024. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- [3] HardiyHarditmo, H. C. (2019). Perancangan Perkerasan Jalan dan Penyelidikan Tanah. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- [4] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2024). Manual Desain Perkerasan Jalan 2024. Jakarta: Direktorat Jenderal Bina Marga.
- [5] Nicko Pratama. (2024). Analisa Komparatif Perencanaan Perkerasan Lentur Jalan Kabupaten antara Manual Desain Perkerasan Jalan 2024 dan Metode Analisa Komponen (Studi Kasus Jalan Sindang-Sekitarnya Kabupaten Pesisir Selatan).
- [6] Orvala, P. D. T. (2022). Perencanaan Tebal Perkerasan Lentur Menggunakan Metode Analisa Komponen (Studi Kasus: Jalan Sunset Road).
- [7] PdT-10-2006-B. Pedoman Konstruksi dan Bangunan PUPR tentang Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan.
- [8] PdT-11-2004-B. Pedoman Konstruksi dan Bangunan PUPR tentang Penanganan Tanah Ekspansif dengan Geomembran sebagai Penghalang Kelembaban Vertikal.

- [9] Pedoman Survei Pencacahan Lalu Lintas
Pd T19-2004-B



STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TARIK LENTUR BETON GEOPOLIMER DENGAN SUBSTITUSI PARSIAL LIMBAH KARBIT

Muhammad Daffa Fahrezi^{*1}, Erma Desimaliana¹, Altie Santika Arifin²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jalan PHH Mustofa No. 23, Bandung 40124, Indonesia

²PT Dian Widya Enjiniring, Jl. Asia Afrika 133-137 Wisma Monex Lt. 9, Bandung 40112, Indonesia

*Penulis korespondensi: muhammad.daffa22@mhs.itenas.ac.id

DISUBMIT 17 Desember 2023

DIREVISI 15 Juni 2024

DITERIMA 19 Juni 2024

ABSTRAK Beton geopolimer berbasis limbah industri berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland, tetapi kapasitas tarik lenturnya harus dipastikan karena retak awal pada elemen balok berkembang dari zona tarik. Penelitian ini mengevaluasi kuat tarik lentur beton geopolimer dengan prekursor 50% *fly ash* kelas F dan 50% limbah karbit. Proporsi agregat:binder adalah 60%:40%, prekursor:alkali aktivator 70%:30%, NaOH 10 M, dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3\text{:NaOH}$ 1:1. Tiga balok 150 mm × 150 mm × 600 mm dirawat dengan metode membran dan diuji pada umur 28 hari. Kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 23,67 MPa digunakan secara terbatas sebagai parameter pendamping untuk mengevaluasi persamaan empiris kuat tarik lentur. Hasil pengujian balok mencapai 2,40–2,67 MPa dengan rata-rata 2,53 MPa, simpangan baku 0,14 MPa, dan koefisien variasi 5,33%. Persamaan SNI 2847:2019, $0,62\sqrt{f'_c}$, memprediksi 3,02 MPa atau 19,07% lebih tinggi daripada hasil eksperimen. Koefisien berbasis dataset yang diperoleh adalah $0,521\sqrt{f'_c}$. Retak berkembang relatif vertikal dari serat tarik bawah dan menunjukkan keruntuhan dominan lentur. Hasil ini merupakan benchmark kelayakan awal campuran, bukan bukti kausal peningkatan akibat limbah karbit karena tidak tersedia campuran kontrol.

KATA KUNCI beton geopolimer; limbah karbit; kuat tarik lentur; *modulus of rupture*; pola retak

1 LATAR BELAKANG

Dekarbonisasi material konstruksi mendorong pengembangan *binder* tanpa klinker yang memanfaatkan residu industri. Beton geopolimer terbentuk melalui aktivasi alkali terhadap prekursor kaya silika dan alumina, sehingga produk reaksi yang terbentuk dapat mengikat agregat tanpa menggunakan semen Portland sebagai pengikat utama [1]. Di Indonesia, *fly ash* kelas F banyak diteliti sebagai prekursor karena ketersediaan dan sifat pozolaniknya. Meskipun demikian, reaktivitas *fly ash* pada suhu ruang cenderung lambat dan sangat dipengaruhi oleh komposisi aktivator, kadar kalsium, metode perawatan, serta karakter fisik prekursor [2], [3], [4].

Limbah karbit atau *calcium carbide residue* merupakan residu proses pembentukan gas asetilena yang didominasi oleh senyawa berbasis kalsium. Dalam sistem *alkali-activated*, sumber kalsium dapat berinteraksi dengan aluminosilikat *fly ash* dan mendorong terbentuknya produk ikat kaya kalsium bersama gel aluminosilikat.

Literatur mutakhir menunjukkan bahwa penambahan residu karbit pada kadar yang sesuai dapat memodifikasi struktur gel, mempercepat pengerasan, dan meningkatkan kerapatan matriks; namun, kadar yang terlalu tinggi juga berpotensi mengganggu keseimbangan silika–alumina–kalsium dan menghasilkan heterogenitas [5], [6]. Dengan demikian, limbah karbit tidak dapat diperlakukan hanya sebagai bahan pengisi, tetapi sebagai prekursor sekunder yang pengaruhnya ditentukan oleh proporsi dan kondisi aktivasi.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa performa beton atau mortar geopolimer tidak hanya ditentukan oleh jenis limbah, tetapi juga oleh metode *curing*, rasio aktivator, serta posisi material substitusi sebagai *binder* atau *filler* [2], [3], [4], [7], [8], [9]. Perawatan membran dipilih untuk membatasi kehilangan kelembapan dan mempertahankan lingkungan reaksi pada suhu ruang. Pendekatan ini relevan untuk aplikasi lapangan karena tidak memerlukan energi pemanasan, walaupun peningkatan

kekuatan awalnya umumnya lebih lambat daripada *curing* termal [3], [4], [10], [11], [12].

Kuat tarik lentur merupakan parameter yang merepresentasikan tegangan nominal pada serat tarik ekstrem ketika balok mencapai beban puncak. Parameter ini lazim disebut *modulus of rupture* dan digunakan untuk menilai kecenderungan retak awal, mengevaluasi kinerja material pada pelat atau perkerasan, serta menyediakan parameter pendukung dalam perancangan elemen yang responsnya dipengaruhi oleh lentur [13], [14]. Berbeda dari kuat tekan yang diperoleh pada kondisi tegangan dominan tekan, kuat tarik lentur dipengaruhi oleh gradien tegangan sepanjang tinggi penampang, ukuran benda uji, posisi retak, konfigurasi pembebanan, dan cacat lokal pada zona tarik. Oleh sebab itu, nilai kuat tekan yang tinggi tidak selalu diikuti oleh peningkatan kuat tarik lentur secara proporsional [15], [16].

Pada beton geopolimer, kapasitas tarik lentur ditentukan oleh kemampuan matriks hasil aktivasi alkali untuk menahan inisiasi dan perambatan retak. Gel aluminosilikat yang terbentuk harus cukup homogen untuk mentransfer tegangan menuju agregat, sedangkan pori terperangkap, partikel *fly ash* yang belum bereaksi, retak susut mikro, dan zona transisi antarmuka yang lemah dapat menjadi lokasi konsentrasi tegangan. Tinjauan data mekanis geopolimer menunjukkan bahwa hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik lentur memiliki sebaran yang lebih luas dibandingkan dengan beton semen Portland karena variasi prekursor, aktivator, metode *curing*, dan kondisi pengujian [15], [16]. Dengan demikian, penerapan persamaan empiris beton normal pada geopolimer perlu diperiksa menggunakan data eksperimen dari sistem *binder* yang sama.

Komposisi alkali aktivator berperan ganda terhadap respons lentur. Konsentrasi NaOH dan ketersediaan silikat menentukan tingkat pelarutan Si dan Al, sedangkan rasio cairan terhadap padatan mengendalikan viskositas dan porositas akhir. Aktivator yang terlalu

rendah dapat menyisakan prekursor yang tidak bereaksi, tetapi aktivator atau air berlebih dapat meningkatkan pori kapiler setelah pengerasan. Optimasi *fly ash geopolimer* memperlihatkan bahwa kecepatan dan lama pencampuran, molaritas NaOH, temperatur, serta durasi *curing* secara signifikan memengaruhi kuat tarik lentur [17]. Penelitian lain pada sistem *fly ash-slag* juga menunjukkan bahwa perubahan kandungan material kaya kalsium, modulus aktivator, dan rasio campuran dapat mengubah kuat tekan dan kuat lentur melalui perubahan densitas gel dan struktur pori [18].

Limbah karbit memasok kalsium dalam jumlah tinggi sehingga berpotensi membentuk produk reaksi kaya kalsium bersama jaringan aluminosilikat. Mekanisme tersebut dapat mempercepat pengerasan dan memperbaiki ikatan matriks-agregat, tetapi penambahan kalsium tidak selalu meningkatkan ketahanan retak. Matriks yang menjadi lebih padat dan kaku dapat tetap menunjukkan keruntuhan getas apabila terdapat ketidakseragaman reaksi atau retak mikro. Shi et al. [5] melaporkan kuat lentur 1,79 MPa dan kuat tekan 15,1 MPa pada geopolimer berbasis *fly ash*, *red mud*, dan *carbide slag*; koefisien sederhananya sekitar $0,461\sqrt{f'_c}$. Nilai tersebut memberi konteks bahwa sistem yang mengandung residu karbit dapat memiliki koefisien lentur lebih rendah daripada $0,62\sqrt{f'_c}$, walaupun perbedaan bahan, geometri, dan prosedur pengujian tidak memungkinkan perbandingan langsung.

Penelitian lainnya tentang beton geopolimer masih lebih banyak menilai kuat tekan dan *workability*, sedangkan data kuat tarik lentur, variasi antarbenda uji, serta dokumentasi bidang patahan relatif terbatas. Lie dan Rachmansyah [19] memperoleh hubungan $0,62\sqrt{f'_c}$ pada beton geopolimer *fly ash* dengan *superplasticizer*, yang menunjukkan bahwa kesetaraan terhadap persamaan beton normal mungkin dicapai pada komposisi tertentu. Sebaliknya, kompilasi 726 observasi oleh Malkawi [15]

menegaskan bahwa model empiris beton semen Portland tidak secara konsisten mewakili seluruh variasi beton geopolimer. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa koefisien kuat tarik lentur perlu dipahami sebagai fungsi sistem binder, tingkat reaksi, dan kualitas pemadatan, bukan sebagai konstanta universal.

Perawatan membran pada suhu ruang dipilih karena lebih realistis untuk aplikasi lapangan dibandingkan dengan curing termal. Namun, metode ini membuat perkembangan gel sangat bergantung pada kelembapan internal dan reaktivitas prekursor. Pada campuran yang kental, keberhasilan pemadatan juga menjadi penting karena rongga pada zona tarik balok dapat menurunkan beban retak secara tajam. Oleh karena itu, pembacaan kuat tarik lentur harus mencakup bukan hanya nilai rata-rata, tetapi juga dispersi data, posisi retak, dan kondisi permukaan patahan agar penyebab keterbatasan kapasitas dapat ditafsirkan secara hati-hati.

Berdasarkan kondisi tersebut, kesenjangan ilmiah penelitian terletak pada belum tersedianya data terfokus mengenai kuat tarik lentur beton geopolimer dengan precursor 50% *fly ash*–50% limbah karbit yang dirawat secara membran, berikut evaluasi kesesuaian persamaan empiris beton normal. Analisis kuat tekan dalam artikel ini dibatasi pada umur 28 hari dan hanya dipakai sebagai variabel pendamping pada hubungan $f_r - \sqrt{f'_c}$. Pembatasan ini menjaga fokus artikel pada respons lentur serta menghindari pengulangan pembahasan sifat mekanik lain yang tidak diperlukan untuk tujuan penelitian.

Artikel ini secara khusus memusatkan analisis pada kuat tarik lentur, dengan kuat tekan umur 28 hari hanya digunakan untuk melengkapi evaluasi persamaan empiris.

Kontribusi ilmiahnya meliputi: (1) penyediaan benchmark kuat tarik lentur campuran *hybrid fly ash*–limbah karbit yang dirawat secara membran; (2) evaluasi variabilitas tiga balok tanpa menghilangkan data yang menyimpang dari rerata; (3) dokumentasi lokasi retak, orientasi bidang patahan, dan kecenderungan agregat pecah atau tercabut; serta (4) derivasi koefisien $f_r = k\sqrt{f'_c}$ yang secara eksplisit dibatasi untuk dataset penelitian. Karena hanya satu komposisi prekursor yang diuji tanpa campuran kontrol 100% *fly ash*, penelitian tidak menyimpulkan bahwa substitusi 50% limbah karbit meningkatkan kuat tarik lentur. Hasilnya diposisikan sebagai verifikasi kelayakan awal dan dasar penyusunan eksperimen komparatif berikutnya.

2 METODE PENELITIAN

Material dan Proporsi Campuran. Material pengikat terdiri atas *fly ash* kelas F dari PLTU Paiton dan limbah karbit dari bengkel las karbit di Kota Bandung. Limbah karbit dikeringkan, dihancurkan, dan diayak hingga lolos saringan No. 200 sebelum digunakan sebagai prekursor. Berat jenis *fly ash* dan limbah karbit masing-masing tercatat 2,584 dan 2,353. Agregat halus dan agregat kasar digunakan sebagai pengisi campuran, sedangkan larutan alkali tersusun atas natrium hidroksida (NaOH) 10 M dan natrium silikat (Na_2SiO_3).

Proporsi agregat terhadap binder ditetapkan 60%:40% berdasarkan volume. Di dalam binder, prekursor dan alkali aktivator diproporsikan 70%:30%. Prekursor terdiri atas 50% *fly ash* dan 50% limbah karbit. Rasio massa Na_2SiO_3 :NaOH yang digunakan dalam pelaksanaan campuran adalah 1:1, yang dipilih melalui uji pasta pendahuluan untuk memperoleh konsistensi dan waktu ikat yang dapat dikerjakan. Proporsi bahan untuk satu balok ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Proporsi material untuk satu benda uji balok

Material	Massa (kg)	Peran
Agregat kasar	12,637	Pengisi
Agregat halus	8,314	Pengisi
Fly ash	5,372	Prekursor
Limbah karbit	4,885	Prekursor
NaOH 10 M	3,742	Aktivator
Na ₂ SiO ₃	4,276	Aktivator

Pencampuran dilakukan dengan menghomogenkan agregat dan prekursor kering terlebih dahulu. Larutan alkali kemudian ditambahkan secara bertahap hingga terbentuk campuran yang seragam. Karakter beton segar dievaluasi melalui diameter sebar; nilai rata-rata yang diperoleh sebesar 555 mm. Walaupun sebarannya relatif besar, pengamatan saat pengecoran menunjukkan campuran tetap kental dan lengket, karakter yang umum dijumpai pada geopolimer berkadar padat tinggi.

Benda Uji dan Perawatan. Benda uji utama berupa tiga balok berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm. Setelah pengecoran dan pemadatan, benda uji dibiarkan selama sekitar 24 jam sebelum dilepas dari cetakan. Selanjutnya, balok dibungkus dengan plastik kedap dan dirawat dengan metode membran hingga umur 28 hari. Pembungkusan dimaksudkan untuk membatasi penguapan larutan dan mempertahankan kelembapan internal selama reaksi geopolimerisasi. Sebagai data pendamping untuk persamaan empiris, digunakan kuat tekan rata-rata silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm pada umur 28 hari.

Pengujian dan Analisis Data. Pengujian kuat tarik lentur dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* dengan pembebanan dua titik sesuai prinsip SNI 4431:2011 [13]. Balok diletakkan pada dua tumpuan dan beban diberikan secara monoton hingga terbentuk retak utama dan kapasitas puncak tercapai. Konfigurasi alat dan posisi benda uji ditunjukkan pada Gambar 1.

Apabila retak terjadi di dalam sepertiga tengah bentang, kuat tarik lentur dihitung

menggunakan Persamaan (1). Untuk retak di luar sepertiga tengah tetapi jaraknya dari garis tengah tidak melebihi 5% panjang bentang, digunakan Persamaan (2) [20].

$$f_r = \frac{PL}{bh^2} \quad (1)$$

$$f_r = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (2)$$

dengan f_r adalah kuat tarik lentur (MPa), P beban maksimum (N), L bentang tumpuan (mm), b lebar balok (mm), h tinggi balok (mm), dan a jarak rata-rata antara garis retak dan tumpuan terdekat (mm). Hasil tiga benda uji dianalisis menggunakan rata-rata, simpangan baku sampel, dan koefisien variasi. Nilai eksperimen juga dibandingkan dengan persamaan *modulus of rupture* untuk beton normal pada SNI 2847:2019 [14]:

$$f_{r,SNI} = 0,62\lambda\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

Pada Persamaan (3), $\lambda = 1,0$ digunakan karena benda uji memakai agregat normal. Evaluasi ulang dalam artikel ini mengikuti koefisien 0,62 pada Pasal 19.2.3.1 SNI 2847:2019 [21].

Perbandingan tersebut tidak dimaksudkan untuk memvalidasi ulang SNI, melainkan untuk mengevaluasi apakah persamaan yang dikalibrasi bagi beton normal memberikan estimasi konservatif atau nonkonservatif terhadap campuran geopolimer yang diuji. Pola retak dan permukaan patahan dievaluasi secara visual dari arah perambatan retak, posisi bidang patahan, serta kecenderungan agregat pecah atau tercabut. Interpretasi mikrostruktur dibatasi sebagai dugaan berbasis literatur karena penelitian tidak melakukan XRD, SEM, atau analisis kimia produk reaksi.



Gambar 1 Konfigurasi pengujian kuat tarik lentur

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat Tekan Umur 28 Hari sebagai Parameter Empiris. Kuat tekan rata-rata silinder pada umur 28 hari sebesar 23,67 MPa. Nilai ini tidak dibahas sebagai perkembangan kekuatan terhadap umur, tetapi digunakan sebagai parameter pendamping pada bentuk hubungan $f_r = k\sqrt{f_c}$. Penggunaan umur yang sama dengan

pengujian balok menghindari pencampuran respons material dari tingkat kematangan yang berbeda. Data 28 hari juga sesuai dengan umur acuan yang umum dipakai untuk membandingkan sifat mekanik beton. Rekapitulasi parameter yang digunakan dalam analisis empiris ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Rekapitulasi sifat mekanik campuran

Parameter	Umur (hari)	Rata-rata (MPa)
Kuat tekan	28	23,67
Kuat tarik lentur	28	2,53

Pada umur yang sama, kuat tarik lentur rata-rata 2,53 MPa setara dengan 10,70% dari kuat tekan 23,67 MPa. Rasio linear tersebut hanya memberikan gambaran skala relatif kedua parameter; evaluasi persamaan empiris dilakukan menggunakan bentuk akar kuadrat kuat tekan karena bentuk ini digunakan pada SNI 2847:2019. Dengan demikian, kuat tekan dalam artikel tidak diperlakukan sebagai hasil utama, melainkan sebagai variabel pembanding untuk menilai apakah persamaan beton normal memberikan estimasi yang aman bagi campuran geopolimer yang diuji.

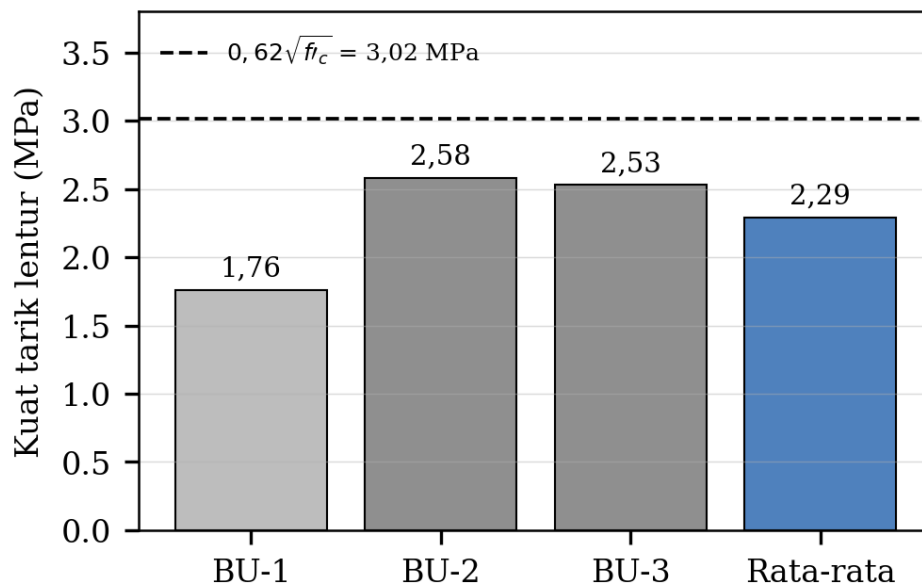
Kuat Tarik Lentur dan Variabilitas. Beban maksimum ketiga balok berada pada

rentang 18–20 kN. Berdasarkan koreksi data pengujian, kuat tarik lentur BU-1, BU-2, dan BU-3 masing-masing sebesar 2,40 MPa, 2,67 MPa, dan 2,53 MPa. Urutan nilai kuat lentur tidak sepenuhnya mengikuti urutan beban maksimum karena perhitungan mempertimbangkan lokasi retak terhadap tumpuan. Pada balok dengan bidang retak di luar sepertiga tengah yang masih memenuhi batas SNI 4431:2011 [13], jarak a pada Persamaan (2) memengaruhi nilai akhir. Nilai rata-rata 2,53 MPa disertai simpangan baku 0,14 MPa dan koefisien variasi 5,33%. Rekapitulasi hasil disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Tabel 3 Hasil pengujian kuat tarik lentur umur 28 hari

Benda uji	P maks. (kN)	f_r (MPa)	Deviasi dari rerata
BU-1	18	2,40	-5,26%
BU-2	20	2,67	+5,39%
BU-3	19	2,53	-0,13%

Rata-rata	19	2,53	—
-----------	----	------	---



Gambar 2 Kuat tarik lentur eksperimen dan prediksi SNI

Koefisien variasi 5,33% menunjukkan bahwa respons lentur ketiga benda uji relatif seragam. BU-1 berada 5,26% di bawah rerata, BU-2 berada 5,39% di atas rerata, sedangkan BU-3 hanya 0,13% di bawah rerata. Selisih maksimum–minimum sebesar 0,27 MPa atau 10,66% dari nilai rata-rata. Tidak terdapat satu benda uji yang menyimpang tajam dari kelompok data. Meskipun demikian, keseragaman pada tiga replikasi belum cukup untuk mewakili variasi produksi dalam skala yang lebih luas, sehingga interpretasi statistik tetap dibatasi pada batch penelitian ini.

Dengan tiga replikasi, interval kepercayaan 95% untuk rata-rata berdasarkan distribusi t berada pada kisaran 2,20–2,87 MPa. Rentang tersebut tidak dimaksudkan sebagai nilai karakteristik desain, melainkan menunjukkan ketidakpastian rata-rata akibat jumlah sampel yang terbatas. Untuk tujuan perumusan persamaan desain, jumlah sampel perlu ditambah dan pengujian harus dilakukan pada beberapa batch agar variasi pencampuran, pemadatan, serta *curing* dapat dipisahkan dari variasi material.

Dispersi yang relatif rendah memberikan indikasi bahwa proses pencampuran, pemadatan, dan pengujian pada ketiga balok berlangsung cukup konsisten. Namun, kuat tarik lentur tetap dikendalikan oleh cacat kritis pada serat tarik; rongga, aglomerasi prekursor, atau zona pasta yang kurang padat dapat memicu retak sebelum kapasitas matriks termobilisasi. Campuran segar memiliki diameter sebar 555 mm, tetapi dilaporkan kental dan lengket. Nilai sebar yang besar tidak selalu menjamin pelepasan udara yang efektif; karena itu, kontrol energi pemadatan dan pemeriksaan densitas setiap balok tetap diperlukan pada penelitian berikutnya.

Dari sudut pandang desain eksperimen, tiga balok cukup untuk memperoleh indikasi awal dan mendokumentasikan mode retak, tetapi belum memadai untuk menghasilkan nilai karakteristik atau persamaan umum. Penelitian komparatif antarkadar limbah karbit sebaiknya menggunakan sedikitnya lima sampai enam replikasi per variasi, berasal dari lebih dari satu *batch*, dan menerapkan prosedur penerimaan data yang ditetapkan sebelum pengujian. Kurva beban–lendutan atau beban–*crack mouth opening displacement* juga diperlukan agar

perubahan kuat puncak dapat dibedakan dari perubahan toughness dan ketahanan pascaretak.

Evaluasi Persamaan Empiris. Dengan kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 23,67 MPa dan $\lambda = 1,0$, Persamaan (3) menghasilkan $f_{r,SNI} = 3,02$ MPa. Nilai ini 0,48 MPa lebih tinggi atau 19,07% daripada rata-rata eksperimen. Rasio $f_{r,eksperimen}/f_{r,SNI}$ adalah 0,840. Jika hubungan berbentuk $k\sqrt{f'_c}$ dipaksakan pada satu titik data, diperoleh $k = 0,521$. Koefisien individual ketiga balok berada pada kisaran 0,493–0,549; rentang yang relatif sempit ini konsisten dengan koefisien variasi hasil pengujian. Representasi empiris khusus campuran yang diuji dapat ditulis:

$$f_r = 0,521\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

Persamaan (4) tidak boleh langsung digunakan sebagai persamaan desain karena diturunkan dari satu komposisi, satu umur, satu nilai kuat tekan rata-rata, dan tiga hasil balok. Nilainya hanya berfungsi sebagai deskriptor dataset. Walaupun demikian, selisih terhadap SNI memiliki implikasi penting: penggunaan langsung $0,62\sqrt{f'_c}$ pada campuran ini menghasilkan prediksi yang tidak konservatif terhadap nilai rata-rata eksperimen. Temuan tersebut sejalan dengan kajian berbasis 726 observasi yang menunjukkan bahwa persamaan beton semen Portland tidak selalu merepresentasikan sifat mekanik beton geopolimer secara konsisten [15].

Perbandingan dengan penelitian terdahulu memperlihatkan bahwa koefisien k sangat bergantung pada sistem material. Lie dan Rachmansyah [19] melaporkan hubungan sekitar $0,62\sqrt{f'_c}$ pada beton geopolimer *fly ash* dengan tambahan superplasticizer. Sementara itu, data Shi et al. [5] pada geopolimer *fly ash-red mud-carbide slag* menghasilkan koefisien kontekstual sekitar 0,461, lebih rendah daripada koefisien 0,521 pada penelitian ini. Perbedaan tersebut tidak dapat ditafsirkan sebagai pengaruh tunggal limbah kaya kalsium karena komposisi, ukuran spesimen, dan kondisi

curing berbeda, tetapi menegaskan bahwa hubungan kuat lentur tidak bersifat universal untuk seluruh beton geopolimer.

Malkawi [15] menekankan perlunya model khusus geopolimer berdasarkan kompilasi data besar, sedangkan Mohammed et al. [16] menunjukkan bahwa sifat mekanik geopolimer memiliki rentang luas akibat banyaknya kombinasi prekursor dan aktivator. Pada level campuran, penelitian optimasi juga memperlihatkan bahwa molaritas NaOH, temperatur dan waktu *curing*, serta kondisi pencampuran dapat mengubah kuat tarik lentur secara signifikan [17]. Oleh karena itu, persamaan empiris yang kuat perlu dibangun dari beberapa kadar limbah karbit, beberapa tingkat kuat tekan, dan jumlah sampel yang cukup untuk mengestimasi ketidakpastian model.

Secara mekanistik, kuat tekan merepresentasikan respons matriks pada keadaan tegangan dominan tekan, sedangkan kuat tarik lentur sangat sensitif terhadap cacat terbesar di serat tarik. Sumber kalsium dari limbah karbit dapat mendukung pembentukan gel C-(A)-S-H atau produk kaya kalsium yang berdampingan dengan jaringan aluminosilikat [5], [6]. Produk tersebut dapat meningkatkan densitas dan kekakuan, tetapi tidak otomatis meningkatkan kapasitas retak apabila reaksi tidak homogen. Matriks yang lebih kaku namun getas dapat mempertahankan kuat tekan menengah sambil menunjukkan kuat lentur yang lebih rendah daripada prediksi beton normal. Karena itu, evaluasi material geopolimer untuk elemen lentur tidak dapat dihentikan pada kuat tekan saja.

Korelasi kuat tekan–kuat lentur juga perlu dibedakan dari mekanisme pascaretak. Pada beton tanpa serat, setelah retak utama terbentuk, kapasitas turun cepat karena tidak tersedia mekanisme *crack bridging* yang berarti. Studi geopolimer berserat menunjukkan bahwa serat baja atau polimer dapat meningkatkan kuat lentur, defleksi ultimit, dan energi fraktur melalui penyaluran tegangan melintasi retak [13]–[18]. Campuran penelitian ini tidak

menggunakan serat; oleh sebab itu, nilai yang diperoleh merepresentasikan kontribusi matriks, agregat, dan antarmuka secara langsung. Hal ini membuat data relevan sebagai *baseline* sebelum strategi peningkatan *toughness* diterapkan.

Pola Retak dan Permukaan Patahan.

Gambar 3 menunjukkan bahwa retak utama pada ketiga balok tidak seluruhnya berada tepat di tengah bentang. Retak bermula dari permukaan bawah sebagai zona tarik dan merambat relatif vertikal menuju zona tekan. Orientasi yang hampir tegak lurus terhadap sumbu balok serta tidak adanya bidang diagonal dominan menunjukkan bahwa keruntuhan dikendalikan oleh lentur, bukan geser. Posisi retak yang bergeser mendekati salah satu titik pembebanan telah diperhitungkan melalui jarak a pada

Persamaan (2), sehingga hasil tidak semata-mata ditentukan oleh beban maksimum.

Inisiasi dari serat bawah sesuai dengan distribusi tegangan pada pembebanan dua titik: daerah di antara dua titik beban mengalami momen relatif konstan dan gaya geser rendah. Retak dapat muncul pada lokasi cacat paling kritis di wilayah tersebut, tidak harus tepat pada garis tengah. Perbedaan lokasi retak antarbenda uji memperkuat indikasi bahwa heterogenitas lokal berperan terhadap variasi nilai. Dokumentasi yang lebih kuat pada penelitian berikutnya dapat dilakukan dengan *digital image correlation* atau pengukuran *crack mouth opening displacement* untuk merekam evolusi retak sebelum dan sesudah beban puncak.



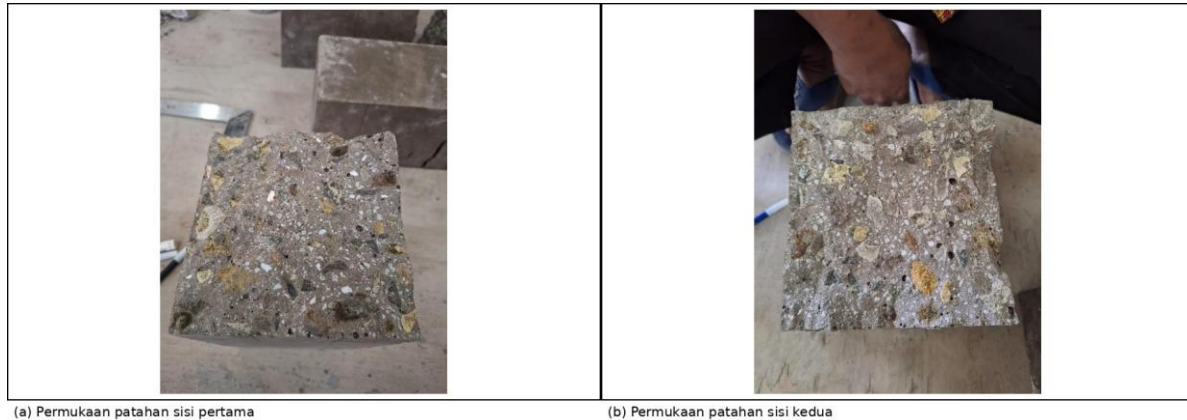
(a) Lokasi retak tiga benda uji

(b) Orientasi bidang patahan

Gambar 3 Lokasi dan orientasi bidang retak balok

Pada permukaan patahan (Gambar 4), sebagian agregat kasar tampak terbelah bersama matriks dan tidak seluruhnya tercabut dari pasta. Secara visual, kondisi ini mengindikasikan bahwa *interfacial transition zone* (ITZ) bukan satu-satunya bidang lemah. Patahan yang melewati agregat dapat terjadi ketika ikatan pasta-agregat cukup kuat atau ketika agregat memiliki bidang lemah internal. Namun, pengamatan makro tidak dapat menentukan proporsi pasti antara patahan kohesif dalam matriks, patahan pada ITZ, dan pecahnya agregat.

Permukaan patahan juga tampak tidak seragam, dengan area pasta yang relatif padat berdampingan dengan rongga dan partikel yang belum sepenuhnya menyatu. Kondisi tersebut konsisten dengan karakter campuran geopolimer yang kental, tetapi tidak cukup untuk menyimpulkan tingkat porositas. Pengujian absorpsi, densitas lokal, *ultrasonic pulse velocity*, atau analisis citra penampang akan membantu menguji apakah balok dengan kuat lentur terendah memiliki volume rongga lebih besar pada zona tarik.



Gambar 4 Tekstur permukaan patahan setelah pengujian

Literatur melaporkan bahwa sistem *fly ash* dengan residu karbit dapat menghasilkan kombinasi gel aluminosilikat dan gel kaya kalsium, yang berpotensi memperbaiki densitas matriks serta ikatan agregat [5], [6]. Hasil visual pada penelitian ini konsisten dengan kemungkinan tersebut, tetapi tidak membuktikannya. Verifikasi mekanisme memerlukan XRF untuk komposisi prekursor, XRD/FTIR untuk produk reaksi, SEM-EDS untuk morfologi dan rasio unsur, serta pengujian porositas. Pemisahan yang tegas antara hasil observasi dan mekanisme literatur penting agar interpretasi tidak melampaui bukti eksperimen.

Kontribusi, Keterbatasan, dan Implikasi.

Kontribusi utama penelitian bukan penentuan kadar optimum, melainkan penyediaan data dasar *flexural performance* untuk campuran geopolimer *hybrid fly ash*–limbah karbit yang belum banyak dilaporkan pada penelitian nasional. Kuat tekan umur 28 hari digunakan secara terbatas untuk menguji hubungan empiris, sedangkan hasil utama mencakup kuat tarik lentur tiap balok, ukuran dispersi, posisi retak, dan kondisi permukaan patahan. Kombinasi data kuantitatif dan observasi visual memberikan dasar yang lebih lengkap dibandingkan pelaporan nilai rata-rata saja.

Dari sisi penerapan, hasil rata-rata 2,53 MPa menunjukkan bahwa campuran mampu memikul tegangan lentur awal, tetapi penggunaannya pada elemen struktural belum dapat direkomendasikan hanya dari dataset ini. Nilai desain membutuhkan

faktor reduksi yang mempertimbangkan variabilitas, pengaruh ukuran, kondisi lingkungan, dan konsistensi produksi. Prediksi SNI yang 19,07% lebih tinggi daripada hasil eksperimen menegaskan bahwa spesifikasi berbasis kuat tekan saja berpotensi melebihi kapasitas retak apabila tidak disertai pengujian lentur langsung.

Keterbatasan penelitian meliputi lima hal. Pertama, tidak terdapat campuran kontrol 100% *fly ash* sehingga efek kausal substitusi limbah karbit tidak dapat dihitung. Kedua, hanya satu kadar substitusi 50% dan tiga replikasi balok yang diuji. Ketiga, kuat tekan pendamping hanya tersedia sebagai nilai rata-rata sehingga variasi silinder tidak dapat dipropagasikan ke ketidakpastian koefisien k . Keempat, tidak tersedia kurva beban–lendutan sehingga kekakuan pascaretak, *toughness*, dan energi fraktur tidak dapat dianalisis. Kelima, tidak dilakukan karakterisasi kimia dan mikrostruktur sehingga penjelasan produk gel hanya bersandar pada literatur.

Penelitian lanjutan disarankan memakai seri limbah karbit 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dengan rasio aktivator yang dikontrol; setiap variasi perlu dibuat pada lebih dari satu batch dengan replikasi yang memadai. Pengukuran beban–CMOD atau beban–lendutan perlu ditambahkan untuk memperoleh energi fraktur, sedangkan densitas dan porositas tiap balok digunakan untuk menjelaskan dispersi. Analisis XRF, XRD, FTIR, SEM–EDS, dan komposisi produk

reaksi dapat menghubungkan kadar kalsium dengan perubahan ITZ dan mode patahan. Dengan desain tersebut, kadar optimum dapat ditetapkan berdasarkan keseimbangan *workability*, kuat tekan 28 hari, kuat tarik lentur, ketahanan retak, dan konsistensi hasil.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan analisis pembahasan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Beton geopolimer dengan prekursor 50% *fly ash* dan 50% limbah karbit, NaOH 10 M, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 1:1, serta *curing membrane* menghasilkan kuat tarik lentur umur 28 hari sebesar 2,40–2,67 MPa. Nilai rata-rata 2,53 MPa memiliki simpangan baku 0,14 MPa dan koefisien variasi 5,33%, yang menunjukkan respons relatif seragam pada tiga benda uji, meskipun jumlah sampel masih terbatas.
- Kuat tekan umur 28 hari sebesar 23,67 MPa digunakan hanya sebagai parameter pendamping persamaan empiris. Persamaan SNI 2847:2019, $0,62\lambda\sqrt{f'_c}$ dengan $\lambda = 1,0$, memprediksi kuat tarik lentur 3,02 MPa atau 19,07% lebih tinggi daripada hasil eksperimen. Koefisien $0,521\sqrt{f'_c}$ hanya berlaku sebagai deskriptor campuran dan dataset penelitian ini.
- Retak berawal dari serat tarik bawah dan merambat relatif vertikal sehingga mode keruntuhan didominasi lentur. Agregat yang tampak terbelah pada permukaan patahan memberi indikasi visual bahwa ITZ bukan satu-satunya bidang lemah, tetapi mekanismenya belum dapat dipastikan tanpa pengujian mikrostruktur dan porositas.
- Campuran 50%:50% menunjukkan kelayakan awal untuk dikembangkan, tetapi penelitian belum dapat menyimpulkan bahwa limbah karbit meningkatkan kuat tarik lentur karena tidak terdapat campuran kontrol. Validasi memerlukan variasi kadar substitusi, jumlah sampel lebih besar, kurva beban–

lendutan, serta karakterisasi kimia dan mikrostruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. L. Provis, "Alkali-activated materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, pp. 40–48, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2017.02.009.
- [2] E. Desimaliana, "Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Metode Curing Pembasahan," *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 2025, [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/potensi/article/view/25933>
- [3] N. V. Diredja, E. Desimaliana, and Y. A. Pranata, "Performance evaluation of steam and membrane curing on geopolimer mortar with fly ash and carbide waste," *E3S Web of Conferences*, vol. 688, p. 03001, 2026, doi: 10.1051/e3sconf/202668803001.
- [4] E. Desimaliana, E. Widyaningsih, and A. Q. N. Kaltsum, "The effect of curing method on geopolimer concrete compressive strength," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, Nov. 2025. doi: 10.1063/5.0299754.
- [5] Y. Shi, Z. Zhang, Z. Sang, and Q. Zhao, "Microstructure and Composition of Red Mud-Fly Ash-Based Geopolymers Incorporating Carbide Slag," *Front. Mater.*, vol. Volume 7-2020, 2020, doi: 10.3389/fmats.2020.563233.
- [6] T. O. Mohammed, D. Singh, and E. O. Fanijo, "Calcium Carbide Residue as a Supplementary Precursor is Geopolymer Binders," *Front. Mater.*, vol. Volume 12-2025, 2025, doi: 10.3389/fmats.2025.1718575.
- [7] E. Desimaliana, A. R. Ma'aruf, and ..., "Analisis Serbuk Cangkrang Kerang Sebagai Substitusi Binder Terhadap Campuran Mortar Geopolimer," *Journal of Sustainable ...*, 2025, [Online]. Available: <https://journal.unpar.ac.id/index.php/josc/article/view/9258>

- [8] 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. 70, 2023, doi: 10.26760/rekaracana.v9i2.70.
- [9] N. A. Pratama and E. Desimaliana, "Pengaruh Substitusi Parsial Limbah Bata Ringan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 2024, [Online]. Available: <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/11370>
- [10] E. Hanani, I. Satyarno, and D. Sulisty, "Mix Design of Ambient Cured Geopolymer Concrete with Fly Ash, GGBFS, and Borax," *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 20, no. 2, pp. 265–276, Dec. 2024, doi: 10.21831/inersia.v20i2.74464.
- [11] J. Hartono, L. L. F. H., A. B. U., and H. T. S., "Komparasi Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Metode Curing Oven dan Suhu Ruang," *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 12, no. 2, pp. 383–394, Oct. 2022, doi: 10.29103/tj.v12i2.714.
- [12] B. R. Indriyantho, P. Purwanto, and R. Riko, "Mechanical Performance Analysis of Geopolymer Concrete using Fly Ash Tanjung Jati B for Sustainable Construction Materials," *TEKNIK*, vol. 44, no. 1, pp. 39–45, May 2023, doi: 10.14710/teknik.v44i1.52958.
- [13] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 4431:2011 Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan," Jakarta, 2011. [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [14] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD)," Jakarta, 2019.
- [15] A. B. Malkawi, "Assessing Engineering Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Empirical Modeling," *Infrastructures (Basel)*, vol. 10, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.3390/infrastructures10070168.
- [16] A. A. Mohammed, H. U. Ahmed, and A. Mosavi, "Survey of mechanical properties of geopolymer concrete: A comprehensive review and data analysis," *Materials*, vol. 14, no. 16, pp. 1–29, Aug. 2021, doi: 10.3390/ma14164690.
- [17] A. A. Siyal, R. M. Hamidi, R. M. Shamsuddin, R. M. S. R. Mohamed, and S. U. Ilyas, "Optimization of flexural strength in fly ash-based geopolymers through response surface methodology," *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, vol. 16, no. 4, pp. 1706–1718, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43995-025-00205-1.
- [18] Z. Zhang et al., "The Influence of Fly Ash and Slag on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete," *Buildings*, vol. 14, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.3390/buildings14092720.
- [19] E. S. Lie and R. Rachmansyah, "Rasio Nilai Kuat Lentur pada Beton Geopolimer dengan Penambahan Superplasticizer," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 19, no. 2, pp. 265–77, Oct. 2023, doi: 10.28932/jts.v19i2.6205.



ANALISIS JALUR EVAKUASI MELALUI TANGGA UTAMA GEDUNG KAMPUS ITSB DENGAN PENDEKATAN SIMULASI

Rizky Febriansyah¹, Ilham^{*1}

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Desain, Institut Teknologi dan Sains Bandung, Cikarang Pusat, Jalan Ganesha Boulevard No. 1

*Penulis korespondensi: ilham.chaniago@gmail.com

DISUBMIT 11 Agustus 2026

DIREVISI 12 Agustus 2026

DITERIMA 13 Agustus 2026

ABSTRAK Gedung utama kampus Institut Teknologi Sains Bandung (ITSB) merupakan bangunan pendidikan bertingkat empat yang pada kondisi eksisting hanya memiliki satu jalur evakuasi vertikal berupa tangga utama sebagai akses turun menuju lantai dasar. Tidak tersedianya tangga darurat atau jalur evakuasi vertikal alternatif menyebabkan seluruh penghuni bergantung pada satu jalur yang sama, sehingga berpotensi menimbulkan kepadatan dan kemacetan pada area tangga serta bordes saat terjadi kondisi darurat seperti gempa bumi. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja jalur evakuasi melalui tangga utama gedung ITSB menggunakan simulasi *Thunderhead Pathfinder* v2023.2.0816, dengan fokus pada evaluasi waktu evakuasi total, tingkat kepadatan penghuni, serta identifikasi titik kemacetan (*bottleneck*) pada jalur evakuasi vertikal. Selain kondisi eksisting, penelitian ini juga menguji rekomendasi penyesuaian geometri pada area bordes/titik masuk tangga sebagai upaya mengurangi konflik arus pergerakan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting terjadi peningkatan kepadatan dan antrean pada area transisi menuju tangga serta peralihan antar lantai, terutama pada skenario dengan jumlah penghuni tinggi. Setelah dilakukan simulasi penyesuaian geometri pada area bordes pada perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder*, pola pergerakan agen menjadi lebih terdistribusi sehingga potensi *bottleneck* berkurang dan aliran evakuasi lebih stabil dibandingkan kondisi eksisting. Berdasarkan perbandingan terhadap acuan standar, skenario tertentu masih berada dalam rentang waktu evakuasi standar nasional (SNI 03-1746-2000), sedangkan pada kondisi terpadat kinerja evakuasi dipengaruhi oleh keterbatasan kapasitas jalur tangga tunggal.

KATA KUNCI Evakuasi; Gempa Bumi; Pathfinder; Tangga Utama

1 PENDAHULUAN

Indonesia merupakan wilayah dengan tingkat kerentanan gempa bumi yang tinggi sehingga bangunan publik seperti gedung kampus harus memiliki sistem jalur evakuasi yang efektif. Gedung utama kampus ITSB merupakan bangunan bertingkat empat dengan luas total sekitar $\pm 4.000 \text{ m}^2$ dan difungsikan sejak tahun 2011. Berdasarkan kondisi eksisting, bangunan ini hanya memiliki satu jalur evakuasi vertikal berupa tangga utama tanpa adanya tangga darurat atau jalur alternatif. Kondisi tersebut menimbulkan potensi kemacetan yang signifikan apabila terjadi evakuasi darurat akibat gempa bumi, karena seluruh penghuni terpusat pada satu jalur keluar vertikal [1] [2] [3].

2 METODOLOGI

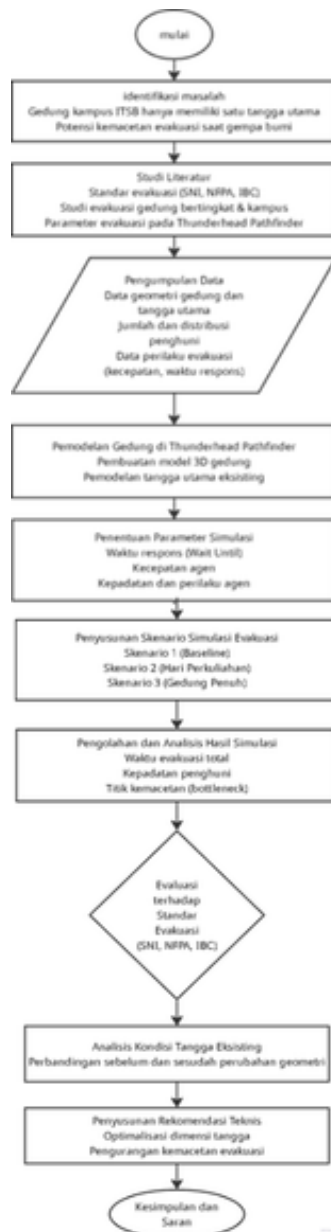
Evaluasi performa jalur evakuasi dapat dilakukan melalui pendekatan simulasi. *Thunderhead Pathfinder* merupakan perangkat lunak simulasi evakuasi berbasis

agen yang mampu memodelkan perilaku penghuni dan interaksi kepadatan secara dinamis. Skenario gempa bumi dipilih karena relevan terhadap bangunan bertingkat, di mana evakuasi vertikal menjadi krusial dan penggunaan lift tidak diperbolehkan [4] [5].

Penelitian ini berfokus pada analisis jalur evakuasi eksisting gedung ITSB melalui simulasi Pathfinder, dengan parameter utama berupa waktu evakuasi, kepadatan penghuni, dan identifikasi titik *bottleneck* pada tangga utama [6].

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi komputer dengan perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder* v2023.2.0816. Objek penelitian adalah jalur evakuasi eksisting Gedung Utama Kampus ITSB, dengan fokus pada tangga utama sebagai satu-satunya jalur evakuasi vertikal. Simulasi dilakukan untuk merepresentasikan proses evakuasi

penghuni pada kondisi gempa bumi dengan variasi skenario okupansi dan parameter perilaku agen.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Evaluasi kinerja evakuasi dilakukan menggunakan indikator waktu evakuasi total, kepadatan pada jalur evakuasi vertikal, serta kecepatan minimum pergerakan penghuni. Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan acuan standar nasional dan internasional. Standar Nasional Indonesia (SNI 03-1746-2000) digunakan sebagai referensi waktu evakuasi bangunan menengah, sedangkan standar internasional seperti National Fire

Protection Association (NFPA 101) dan International Building Code (IBC) digunakan sebagai *benchmark* kinerja evakuasi manusia (*human evacuation performance*), khususnya terkait konsep *time-to-safety* dan kapasitas jalur evakuasi vertikal. Penggunaan NFPA dan IBC dalam penelitian ini tidak ditujukan sebagai standar proteksi kebakaran, melainkan sebagai referensi internasional untuk mengevaluasi performa pelepasan massa manusia pada bangunan bertingkat.

Data dan Parameter Simulasi. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer meliputi observasi kondisi jalur evakuasi, geometri tangga dan bordes, serta estimasi jumlah dan distribusi penghuni per lantai berdasarkan kondisi operasional Gedung Utama Kampus ITSb Tahun Akademik 2024/2025.



Gambar 2 Gedung ITSb Tampak Citra Satelit

Data penghuni mencakup akumulasi mahasiswa, dosen, dan staf, yang dimodelkan dalam beberapa skenario okupansi untuk merepresentasikan kondisi maksimum dan hari perkuliahan normal. Perbedaan karakteristik penghuni, seperti variasi usia dan kemampuan mobilitas, tidak dimodelkan secara kategorikal, tetapi direpresentasikan melalui variasi parameter perilaku agen. Data sekunder berupa standar evakuasi nasional dan internasional serta literatur terkait digunakan sebagai acuan evaluasi hasil simulasi. Simulasi evakuasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder* dengan memasukkan parameter perilaku agen pada menu *Edit Profiles*, yang meliputi waktu respons awal

1) (*Wait Until*), waktu percepatan dari kondisi diam ke kecepatan berjalan normal; 2) (*Acceleration Time* dengan distribusi uniform), durasi agen mempertahankan arah gerak sebelum mengalah saat interaksi; 3) (*Persist Time*), waktu reaksi agen terhadap potensi tabrakan; 4) (*Collision Response Time*), serta faktor perlambatan kecepatan akibat peningkatan kepadatan; 5) (*Slow Factor*). Output simulasi dianalisis untuk memperoleh waktu evakuasi total, kepadatan pada area tangga dan bordes, titik kemacetan dominan, serta perubahan kecepatan agen selama proses evakuasi [7].

Skenario Simulasi. Simulasi dilakukan dalam tiga skenario utama: 1) Skenario 1 (*Baseline*): okupansi maksimum (± 755 agen) dengan parameter *default*. 2) Skenario 2 (Hari perkuliahan): okupansi harian kampus dengan variasi waktu respons dan kecepatan agen. 3) Skenario 3 (*Worst-case*): okupansi maksimum dengan variasi perilaku agen realistis (kecepatan dan waktu respons) [8].

Konversi Data Kuesioner ke Parameter Simulasi Evakuasi. Data kuesioner yang diperoleh dalam penelitian ini merepresentasikan persepsi dan kecenderungan perilaku penghuni saat menghadapi kondisi gempa bumi dan evakuasi. Meskipun bersifat persepsional, data tersebut dikonversi ke dalam bentuk numerik agar dapat digunakan sebagai dasar penentuan parameter perilaku agen pada simulasi evakuasi menggunakan perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder* [9].

Setiap butir pertanyaan kuesioner menggunakan skala Likert 1–5, yang kemudian diolah secara statistik untuk memperoleh nilai rerata (*mean*) dan distribusi respons. Nilai numerik ini tidak digunakan secara langsung sebagai input tunggal, melainkan sebagai acuan logis dan empiris dalam pemilihan rentang parameter perilaku agen, seperti waktu respons awal, kecenderungan mengikuti arus mayoritas, serta kepatuhan terhadap jalur evakuasi [10].

Tabel 1 Skenario Simulasi

Skenario	Parameter yang Diubah	Tujuan
Skenario 1	Jumlah penghuni maksimum (755 agen), tanpa waktu respons, kecepatan default	Sebagai kondisi baseline untuk melihat performa jalur evakuasi pada kapasitas maksimum bangunan tanpa faktor perilaku manusia.
	Jumlah penghuni pada hari aktif perkuliahan (Senin–Jumat), kecepatan gerak dimodelkan berdasarkan perbedaan fisiologis antar kelompok, yang mencerminkan rentang usia waktu respons 2–12 detik	Mengukur dampak perilaku penghuni nyata (kecepatan & response delay) terhadap waktu evakuasi dan pembentukan titik hambatan evakuasi saat kondisi harian kampus.
Skenario 2	Jumlah penghuni 755 (seperti Skenario 1), namun menggunakan kecepatan gerak dan waktu respons realistis (seperti Skenario 2)	Menguji kondisi terburuk (<i>worst-case</i>) ketika populasi penuh dikombinasikan dengan perilaku manusia dan variasi kapasitas mobilitas antar kelompok usia.
	dimodelkan berdasarkan perbedaan fisiologis antar kelompok, yang mencerminkan rentang usia.	

Proses konversi dilakukan dengan memetakan hasil kuesioner ke dalam parameter yang tersedia pada menu *Edit Profiles* di *Thunderhead Pathfinder*, baik parameter *default* maupun *advanced behavior*. Sebagai contoh, kecenderungan mengikuti arus mayoritas yang memiliki nilai rerata tinggi diterjemahkan ke dalam pengaturan preferensi rute dan interaksi antar agen, sementara hasil kuesioner terkait waktu respons digunakan untuk menentukan rentang waktu respons acak (*wait until*) yang diterapkan pada agen simulasi. Pendekatan ini memungkinkan perilaku agen dalam simulasi merepresentasikan kondisi penghuni secara lebih realistis tanpa mengabaikan batasan dan struktur parameter yang disediakan oleh perangkat lunak.

Dengan demikian, penggunaan data kuesioner dalam penelitian ini tidak dimaksudkan untuk menggantikan model perilaku bawaan *Pathfinder*, melainkan untuk mengkalibrasi dan memvalidasi parameter simulasi agar selaras dengan

karakteristik penghuni Gedung Utama Kampus ITS. Pendekatan ini memastikan bahwa hasil simulasi tidak hanya bersifat teoretis, tetapi juga memiliki dasar empiris yang berasal dari persepsi dan kecenderungan perilaku pengguna gedung yang menjadi objek penelitian.

Tabel 2 Pemetaan P4–P8 terhadap Parameter Profil Agen Thunderhead Pathfinder v2023.2.0816

Kode	Indikator Perilaku	Parameter Pathfinder (v2024)	Nilai yang Digunakan	Fungsi dalam Simulasi
P4	Reaksi awal terhadap gempa	<i>Wait Until</i>	2 – 12 s	Pendekatan teknis untuk merepresentasikan variasi waktu mulai evakuasi akibat keterbatasan parameter pra-gerak di Pathfinder
P5	Keterlambatan mulai evakuasi	<i>Acceleration Time (uniform)</i>	1.5 – 3,0 s	Mewakili fase fisik awal agen dalam mencapai kecepatan berjalan normal
P6	Kesiapan menuju tangga utama	<i>Persist Time</i>	0,8 – 2,5 s	Agen tidak mudah berhenti atau ragu
P7	Mengikuti arah evakuasi	<i>Collision Response Time</i>	0,5 – 2,0 s	Agen menyesuaikan arah tanpa konflik
P8	Kepatuhan terhadap jalur evakuasi	<i>Slow Factor</i>	0,2 – 0,6	Agen melambat saat padat, tidak memaksa

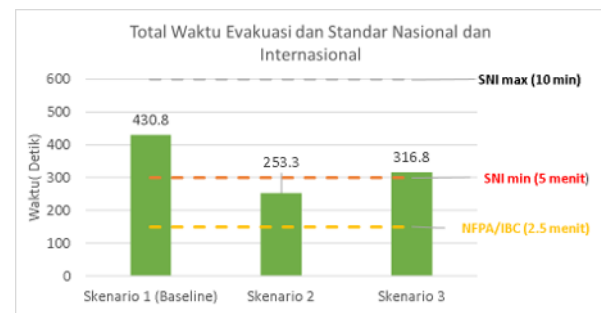
Prosedur Simulasi. Prosedur simulasi diawali dengan pemodelan tiga dimensi (3D) gedung utama kampus ITS berdasarkan kondisi geometri eksisting, meliputi tata letak lantai, koridor, tangga utama, dan area keluar. Model 3D ini disusun sedemikian rupa agar merepresentasikan kondisi aktual bangunan yang menjadi objek penelitian. Selanjutnya, simulasi evakuasi dijalankan menggunakan *Steering Mode* pada perangkat lunak *Thunderhead Pathfinder*, yang memungkinkan agen bergerak secara adaptif dengan mempertimbangkan interaksi antar individu, kepadatan lokal, serta hambatan geometrik pada jalur evakuasi.

Setiap agen diberikan parameter perilaku yang telah ditetapkan sebelumnya, seperti kecepatan berjalan, waktu respons awal,

dan karakteristik interaksi, sesuai dengan skenario simulasi yang diuji. Simulasi dilakukan untuk beberapa skenario dengan variasi jumlah penghuni dan pola respons, sementara parameter geometrik bangunan dipertahankan tetap untuk menjaga keterbandingan hasil.

Output simulasi dianalisis secara kuantitatif untuk memperoleh waktu evakuasi total, distribusi waktu evakuasi per lantai, pola kepadatan selama proses evakuasi, serta identifikasi lokasi bottleneck dominan pada jalur evakuasi, khususnya di area tangga utama. Hasil analisis ini kemudian digunakan sebagai dasar evaluasi kinerja jalur evakuasi eksisting dan untuk menilai efektivitas rekomendasi perbaikan yang diusulkan.

3 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN



Gambar 3 Grafik Total Waktu Hasil Simulasi Evakuasi Dengan Standar Nasional Indonesia Dan Standar Internasional

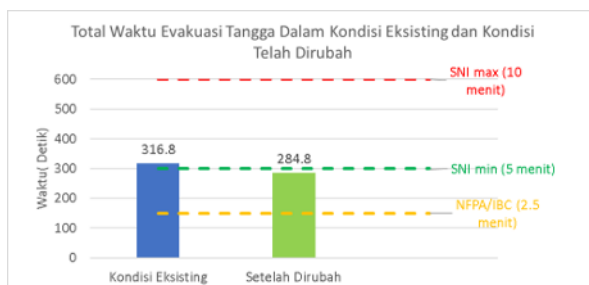
Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi eksisting, seluruh penghuni bergantung pada satu jalur tangga utama sebagai satu-satunya jalur evakuasi vertikal. Kondisi ini menyebabkan konsentrasi arus yang tinggi pada area tangga dan bordes, sehingga terbentuk titik hambatan evakuasi (*bottleneck*) pada zona transisi antar lantai.

Pada skenario okupansi maksimum (Skenario 1: 755 agen), kepadatan meningkat hingga berada pada tingkat padat-sangat padat, yang berdampak langsung pada penurunan kecepatan pergerakan agen serta munculnya pola pergerakan berhenti-jalan (*stop-and-go*). Total waktu evakuasi pada skenario ini mencapai 430,8 detik (± 7 menit 10 detik). Pada skenario hari perkuliahan (Skenario 2:

360 agen), variasi waktu respons menghasilkan arus evakuasi yang tidak seragam, sehingga penumpukan tetap terjadi pada fase tertentu ketika gelombang evakuasi dari beberapa lantai bertemu di area tangga, meskipun total waktu evakuasi lebih singkat, yaitu 253,3 detik (± 4 menit 13 detik).

Skenario terburuk (Skenario 3: 755 agen dengan parameter perilaku realistis) menunjukkan bahwa keterbatasan jalur tunggal menjadi faktor dominan yang menurunkan kinerja evakuasi. Meskipun waktu evakuasi total pada kondisi eksisting tercatat sebesar 316,8 detik (± 5 menit 16 detik), nilai ini berada pada batas bawah rentang waktu evakuasi menurut SNI 03-1746-2000. Namun, hasil simulasi juga menunjukkan bahwa proses evakuasi berlangsung dalam kondisi kepadatan tinggi dan *bottleneck* yang signifikan, yang tidak sejalan dengan prinsip jalur evakuasi yang aman, lancar, dan bebas hambatan sebagaimana ditekankan dalam regulasi nasional.

Dengan demikian, meskipun secara numerik waktu evakuasi masih berada dalam rentang waktu yang direkomendasikan oleh SNI, kinerja evakuasi gedung utama ITSB belum dapat dinyatakan memenuhi standar keselamatan evakuasi secara memadai, karena hanya mengandalkan satu jalur evakuasi vertikal tanpa redundansi. Kondisi ini menyebabkan tingginya ketergantungan terhadap satu elemen kritis dan meningkatkan risiko kegagalan evakuasi apabila terjadi gangguan pada jalur tersebut saat gempa bumi.



Gambar 4 Total Evakuasi Tangga Dalam Kondisi Eksisting dan Kondisi Telah Dirubah

Simulasi penyesuaian geometri tangga menunjukkan adanya peningkatan kinerja, ditandai dengan penurunan waktu evakuasi dari 316,8 detik menjadi 284,8 detik (± 4 menit 47 detik) serta aliran pergerakan yang lebih stabil. Namun demikian, hasil ini belum menghilangkan titik hambatan evakuasi pada kondisi okupansi penuh, karena seluruh arus evakuasi tetap terfokus pada satu jalur vertikal. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan geometri tangga bersifat parsial dan tidak dapat menggantikan kebutuhan akan jalur evakuasi alternatif berupa tangga darurat tambahan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa gedung utama kampus ITSB masih memerlukan penambahan jalur evakuasi vertikal untuk memenuhi prinsip keselamatan evakuasi sebagaimana diatur dalam standar nasional, serta untuk mengurangi risiko kemacetan dan kegagalan evakuasi pada kondisi gempa bumi dengan okupansi tinggi.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi pada tiga skenario evakuasi, diperoleh waktu evakuasi total sebesar 430,8 detik (± 7 menit 10 detik) pada Skenario 1, 253,3 detik (± 4 menit 13 detik) pada Skenario 2, dan 316,8 detik (± 5 menit 16 detik) pada Skenario 3 pada kondisi eksisting. Rata-rata waktu evakuasi dari seluruh skenario adalah 333,6 detik (± 5 menit 34 detik). Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan satu jalur evakuasi vertikal berupa tangga utama menyebabkan konsentrasi arus yang tinggi dan memicu terbentuknya *bottleneck* pada area bordes dan tangga, terutama pada kondisi okupansi tinggi.

Meskipun secara numerik sebagian hasil simulasi masih berada dalam rentang waktu evakuasi yang direkomendasikan oleh SNI 03-1746-2000 (5–10 menit) untuk bangunan menengah, proses evakuasi berlangsung dalam kondisi kepadatan tinggi dan aliran yang tidak stabil akibat ketergantungan pada jalur tunggal. Oleh karena itu, jalur evakuasi vertikal eksisting belum dapat dinyatakan

memenuhi ketentuan keselamatan evakuasi secara memadai menurut SNI, karena tidak menyediakan redundansi jalur evakuasi dan masih berpotensi menimbulkan kemacetan signifikan pada kondisi darurat gempa bumi.

Perbandingan dengan pendekatan kinerja standar internasional seperti NFPA 101 dan International *Building Code* (IBC) menunjukkan bahwa seluruh skenario simulasi belum memenuhi *benchmark time-to-safety* sekitar $\pm 2,5$ menit. Hal ini menegaskan bahwa keterbatasan utama sistem evakuasi bukan terletak pada perilaku penghuni semata, melainkan pada kapasitas dan konfigurasi jalur evakuasi vertikal.

Simulasi penyesuaian geometri tangga dan bordes dilakukan sebagai eksperimen analitis untuk mengevaluasi sensitivitas kinerja evakuasi terhadap perubahan dimensi jalur. Hasil simulasi menunjukkan penurunan waktu evakuasi dari 316,8 detik (± 5 menit 16 detik) menjadi 284,8 detik (± 4 menit 47 detik) serta aliran pergerakan yang lebih stabil. Namun demikian, perubahan geometri tersebut tidak bersifat realistis untuk diterapkan pada bangunan eksisting karena keterbatasan struktural, tata ruang, dan fungsi bangunan. Dengan demikian, hasil simulasi ini tidak dimaksudkan sebagai rekomendasi implementatif, melainkan sebagai pembanding untuk menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas jalur secara fisik dapat memperbaiki kinerja evakuasi, tetapi tetap tidak menghilangkan *bottleneck* selama hanya tersedia satu jalur evakuasi vertikal.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa peningkatan keselamatan evakuasi gedung utama kampus ITSB tidak dapat dicapai hanya melalui optimasi geometri tangga, melainkan memerlukan penambahan jalur evakuasi vertikal alternatif berupa tangga darurat sebagai solusi struktural jangka panjang, serta strategi manajerial dan non-struktural sebagai mitigasi jangka pendek.

5 REKOMENDASI

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis kinerja evakuasi, penambahan jalur evakuasi vertikal berupa tangga darurat baru direkomendasikan sebagai solusi jangka panjang yang paling efektif untuk meningkatkan redundansi jalur keluar dan mendekati pemenuhan standar keselamatan evakuasi, khususnya jika mengacu pada pendekatan kinerja standar internasional. Keberadaan lebih dari satu jalur evakuasi vertikal diperlukan untuk mendistribusikan arus penghuni dan mengurangi ketergantungan pada satu tangga utama yang terbukti menjadi sumber utama *bottleneck* pada kondisi okupansi tinggi.

Namun demikian, pada bangunan eksisting, perubahan fisik berskala besar seperti pembongkaran atau pelebaran tangga utama tidak selalu memungkinkan untuk diterapkan karena keterbatasan teknis, tata ruang, dan biaya. Oleh karena itu, strategi peningkatan keselamatan jangka pendek diarahkan pada pendekatan manajerial dan non-struktural, dengan mempertimbangkan bahwa respons penghuni pada kondisi gempa bumi bersifat spontan dan sulit dikendalikan secara penuh.

Strategi jangka pendek tersebut meliputi peningkatan kejelasan rambu dan denah evakuasi, pengaturan prosedur evakuasi bertahap untuk menghindari pelepasan arus secara simultan dari seluruh lantai, serta pengarahan arus pada titik-titik transisi menuju tangga utama. Selain itu, diperlukan perhatian khusus bagi penghuni dengan keterbatasan mobilitas atau kondisi kesehatan tertentu melalui mekanisme pendampingan, serta pengosongan area transisi sebelum tangga dari elemen-elemen yang dapat mempersempit lebar jalur efektif. Sosialisasi dan pelaksanaan simulasi evakuasi secara berkala juga direkomendasikan untuk meningkatkan kesiapsiagaan dan membentuk pola pergerakan yang lebih tertib saat terjadi gempa bumi.

Hasil simulasi penyesuaian geometri pada area tangga dan bordes menunjukkan adanya peningkatan kinerja evakuasi berupa aliran pergerakan yang lebih stabil dan penurunan waktu evakuasi dibandingkan kondisi eksisting. Namun, penyesuaian tersebut diposisikan sebagai kajian analitis untuk memahami sensitivitas kinerja evakuasi terhadap kapasitas jalur, bukan sebagai rekomendasi implementatif pada bangunan eksisting. Dengan demikian, keterbatasan kapasitas jalur evakuasi vertikal tunggal tetap menjadi faktor pembatas utama, sehingga penambahan jalur evakuasi alternatif berupa tangga darurat tetap dipandang sebagai prioritas utama dalam upaya peningkatan keselamatan penghuni, khususnya pada kondisi okupansi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Y. Chen, X. Liu dan H. Zhou, "Agent-based simulation of evacuation in university buildings," *Journal of Building Performance*, vol. 8, no. 1, pp. 12-20, 2020.
- [2] K. Fridolf, E. Ronchi dan D. Nilsson, "Modeling movement speed reduction in smoke," *Fire Safety Journal*, vol. 112, 2020.
- [3] R. Gupta dan A. Sharma, "Simulation-based analysis of emergency evacuation from educational buildings using agent-based modeling," *Safety Science*, 2021.
- [4] A. Ismail dan M. Kurniawan, "Evaluasi jalur evakuasi vertikal gedung pendidikan menggunakan pemodelan simulasi," *Jurnal Teknologi Bangunan*, vol. 9, no. 1, pp. 37-45, 2023.
- [5] A. P. Kusuma dan S. Hadi, "Evaluasi performa tangga darurat pada gedung bertingkat dengan simulasi Pathfinder," *Jurnal Riset Teknik Sipil*, vol. 15, no. 1, pp. 22-30, 2023.
- [6] D. Nugroho dan A. Setyawan, "Simulasi jalur evakuasi kampus menggunakan Thunderhead Pathfinder," *Jurnal Teknik Sipil Terapan*, vol. 10, no. 2, pp. 55-63, 2022.
- [7] H. R. Permana dan D. Wirawan, "Kajian evakuasi saat gempa pada gedung bertingkat menggunakan simulasi agen," *Jurnal Keteknik Sipil*, vol. 7, no. 3, pp. 64-70, 2021.
- [8] R. D. Putra dan F. R. Nasution, "Simulasi evakuasi menggunakan software pathfinder pada gedung bertingkat sekolah," *Jurnal Konstruksi*, vol. 10, no. 1, pp. 18-25, 2022.
- [9] T. Rahman dan W. Sutopo, "Simulasi evakuasi gedung kampus menggunakan Thunderhead Pathfinder: Studi kasus pada gedung F," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan*, vol. 7, no. 2, pp. 84-91, 2021.
- [10] J. Zhang, Q. Cheng dan Y. Luo, "Study on evacuation time in high-density buildings using Pathfinder," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2020.



PENGEMBANGAN ArzaISTR: MESIN DESAIN OTOMATIS SISTEM RANGKA PEMIKUL MOMEN KHUSUS BERBASIS OPENSEES DAN SNI 2847:2019

Arzal M. Zain^{1*}

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

*Penulis korespondensi: achal1808@gmail.com

DISUBMIT 13 Agustus 2026

DIREVISI 14 Agustus 2026

DITERIMA 15 Agustus 2026

ABSTRAK Analisis struktur tingkat lanjut menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga seperti OpenSees sangat esensial dalam evaluasi kinerja bangunan tahan gempa. Namun, kompleksitas pemindahan data matriks gaya dalam (*internal forces*) dari *solver* non-linear numerik ke tahapan pendetailan dan desain penampang sering kali menjadi hambatan komputasional yang rentan terhadap *human error* dan memakan waktu. Penelitian ini mengusulkan pengembangan ArzaISTR, sebuah kerangka komputasi analitik berbasis Python yang dirancang untuk mengatasi kesenjangan tersebut. Metodologi yang diusulkan mencakup otomatisasi ekstraksi gaya dalam dari OpenSees dan pemrosesan desain elemen struktural secara komprehensif (balok, kolom, dan pelat lantai) yang sepenuhnya patuh pada standar SNI 2847:2019 dan SNI 1726:2019. Hasil pengujian pada model Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) menunjukkan bahwa program ini tidak hanya berfungsi sebagai mesin desain penampang, tetapi secara terintegrasi berhasil memvalidasi kontrol simpangan antar lantai (*story drift*) dan mengevaluasi stabilitas efek P-Delta. Lebih lanjut, algoritma ArzaISTR mampu melakukan optimasi iterasi sengkang pengekangan secara otomatis dan dinamis dengan tetap mempertahankan kontrol kemudahan pelaksanaan (*constructability check*). Keseluruhan siklus ekstraksi dan pendetailan ini diselesaikan dengan waktu komputasi yang sangat efisien, yakni kurang dari satu menit. Inovasi perangkat lunak berbasis *white-box* ini menawarkan solusi yang transparan, akurat, dan menjanjikan lompatan efisiensi yang signifikan bagi praktisi rekayasa kegempaan maupun pengembangan riset akademis lebih lanjut.

KATA KUNCI OpenSees; Python; Otomatisasi Desain; SRPMK; *Story Drift*; P-Delta

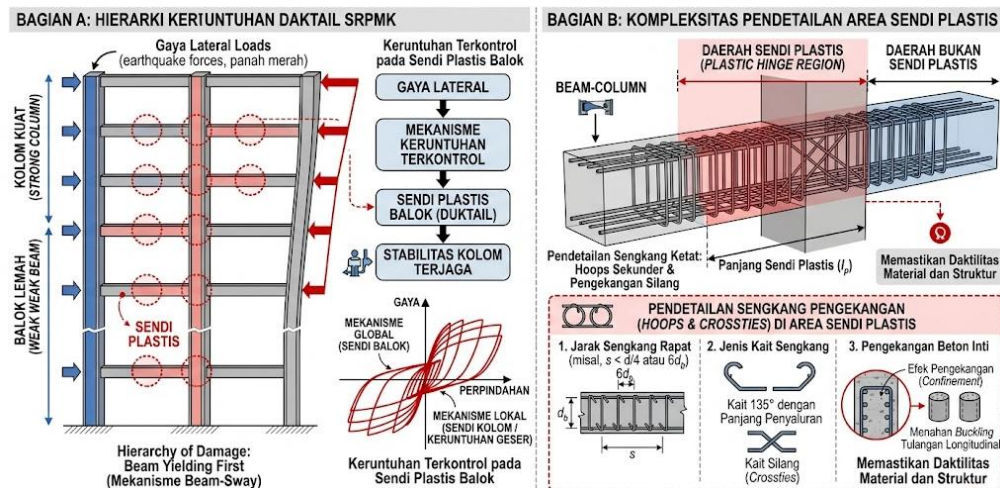
1 PENDAHULUAN

Tingkat kerentanan seismik yang sangat tinggi di wilayah Indonesia menuntut penerapan standar rekayasa struktur yang ketat, terutama pada infrastruktur kritis dan gedung bertingkat. Evaluasi pasca-bencana dari berbagai kejadian gempa bumi destruktif, seperti peristiwa sesar geser Palu-Koro pada tahun 2018, menunjukkan bahwa sebagian besar keruntuhan struktur beton bertulang dipicu oleh kegagalan sistem pendetailan penampang yang tidak memadai pada area sendi plastis [1, 2]. Merespons hal tersebut, standar perencanaan ketahanan gempa SNI 1726:2019 dan standar beton struktural SNI 2847:2019 memandatkan penggunaan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) untuk bangunan di wilayah dengan kategori risiko seismik tinggi.

Filosofi desain SRPMK bertumpu pada konsep *strong column-weak beam* dan

tingkat kedaktailan tinggi, yang dicapai melalui kontrol ketat terhadap rasio penulangan lentur maksimum serta konfigurasi sengkang pengekangan tertutup pada daerah ujung elemen [3]. Namun, dalam praktiknya, pemenuhan seluruh parameter analitik ini membutuhkan iterasi numerik yang masif.

Dalam dekade terakhir, praktik rekayasa struktur sangat bergantung pada perangkat lunak komersial berarsitektur *black-box*. Meskipun aplikatif untuk industri, program-program ini sering kali menyembunyikan algoritma iteratif desain tulangan dari penggunaannya, sehingga membatasi transparansi riset, validasi mekanika dasar, dan fleksibilitas modifikasi oleh peneliti [4]. Di sisi spektrum yang lain, kerangka kerja komputasi *open-source* seperti *Open System for Earthquake Engineering Simulation* (OpenSees) telah diakui sebagai



Gambar 1 Skema konseptual hierarki keruntuhan daktil pada SRPMK dan kompleksitas pendetailan sengkang pengekangan di area sendi plastis

standar emas dalam simulasi non-linear tingkat lanjut di dunia akademis [5]. OpenSees memiliki solver C++ yang sangat presisi dalam menangkap perilaku inelastis struktur, parameter *story drift*, dan efek stabilitas P-Delta. Walau demikian, kelemahan mendasar dari OpenSees adalah ketiadaan modul *post-processing* untuk melakukan desain dan pendetailan penampang beton bertulang secara terotomatisasi sesuai standar lokal.

Kesenjangan teknologi antara transparansi analisis numerik dan kepraktisan desain struktural inilah yang melatarbelakangi penelitian ini. Insinyur dan peneliti sering kali dihadapkan pada alur kerja (*workflow*) manual yang rentan terhadap kesalahan (*human error*) saat mengekstrak matriks gaya dalam (momen, geser, aksial) dari OpenSees menuju tahap desain penampang akhir.

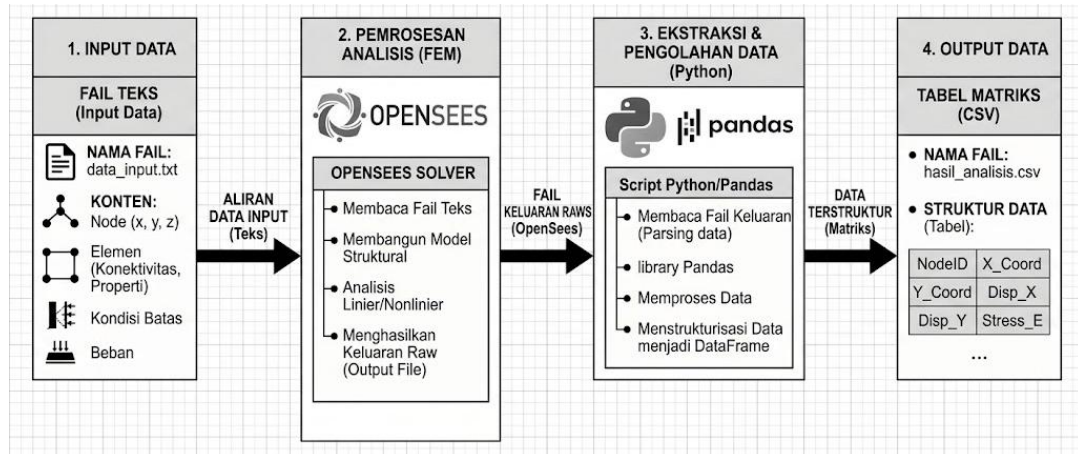
Untuk memecahkan masalah komputasional tersebut, penelitian ini memperkenalkan ArzalSTR, sebuah kerangka analitik berbasis Python yang secara mulus menjembatani solver OpenSees dengan modul desain pakar (*expert system*) berbasis SNI 2847:2019. Kebaruan (*novelty*) utama dari algoritma ArzalSTR tidak terbatas pada komputasi analitis kebutuhan luas tulangan lentur (A_s), melainkan pada kemampuannya mengeksekusi dua logika pendetailan cerdas secara dinamis. Pertama, algoritma

ini dilengkapi dengan *Constructability Check*, yang memastikan spasi bersih antar agregat tidak kurang dari 40 mm guna menghindari segregasi beton saat pengecoran. Kedua, program ini memiliki modul optimasi sengkang pengekangan yang secara otomatis akan meningkatkan jumlah kaki sengkang (dari 2 kaki menjadi 3 atau 4 kaki) apabila spasi vertikal sengkang menyalahi batasan ketat kedaktailan SRPMK.

Dengan mengotomatisasi keseluruhan proses dari analisis matriks hingga iterasi desain penampang secara *white-box*, ArzalSTR diproyeksikan dapat mendefinisikan ulang efisiensi alur kerja rekayasa kegempaan, memberikan keandalan matematis bagi praktisi, sekaligus menyediakan landasan *open-architecture* untuk eksplorasi riset numerik di masa depan.

2 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik dan rekayasa perangkat lunak untuk mengembangkan ArzalSTR, sebuah mesin komputasi desain struktural berbasis Python. Kerangka kerja penelitian ini dieksekusi melalui tiga tahapan utama: arsitektur ekstraksi data, pemodelan analisis struktur seismik, dan formulasi



Gambar 2 Diagram Alir Arsitektur Perangkat Lunak

algoritma desain penampang dinamis berbasis SNI.

Arsitektur Ekstraksi dan Pemrosesan Data (ArzalSTR). Kelemahan utama dalam pemodelan numerik konvensional adalah fragmentasi antara proses analisis dan desain. ArzalSTR mengintegrasikan siklus tersebut ke dalam satu lingkungan kerja (*environment*) berbasis Python. Alur informasi dalam sistem ini dirancang dengan arsitektur berikut:

1) Modul Pra-Pemrosesan (*Pre-processing*): Geometri struktur, properti material, dan kondisi batas diinput melalui fail teks mentah (.txt). Pendekatan ini mengeleminasi ketergantungan pada *Graphical User Interface* (GUI) komersial dan memungkinkan modifikasi parametrik secara cepat. 2) Mesin Analisis (*Solver*): Modul *openseespy* memanggil *solver* berbasis C++ dari OpenSees [5] di belakang layar untuk merakit matriks kekakuan global, mengaplikasikan transformasi geometri, dan menyelesaikan persamaan keseimbangan elastis. 3) Modul Pasca-Pemrosesan (*Post-processing*): ArzalSTR menggunakan pustaka data *science* bawaan Python, yaitu Pandas [6], untuk mengekstrak ribuan titik data deformasi dan gaya dalam (*internal forces*) dari memori OpenSees. Data mentah ini kemudian distrukturisasi menjadi bentuk *Dataframe* dan diekspor ke format *Comma Separated Values* (CSV) sebagai basis data untuk tahap iterasi penulangan.

Pemodelan Analisis Struktur dan Beban Seismik. Evaluasi kinerja struktur dilakukan dengan merujuk pada parameter Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa SNI 1726:2019 [7]. Bangunan dimodelkan sebagai struktur rangka ruang 3D dengan asumsi diafragma kaku (*rigid diaphragm*) pada setiap elevasi lantai. Modul beban seismik pada ArzalSTR secara otomatis mengevaluasi massa efektif seismik (W) dan mengkalkulasi periode getar alami (T) hasil ekstraksi nilai eigen matriks.

Distribusi gaya geser dasar seismik ekuivalen (V) pada setiap tingkat diaplikasikan berdasarkan persamaan distribusi vertikal:

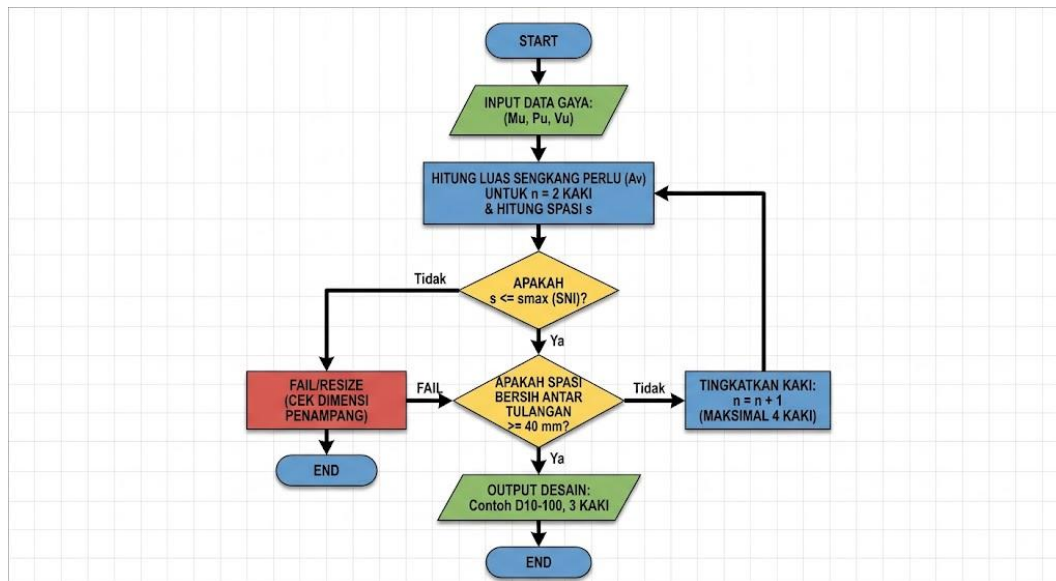
$$F_x = C_{vx}V$$

dengan faktor distribusi vertikal (C_{vx}) didefinisikan sebagai:

$$C_{vx} = \frac{w_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n w_i h_i^k}$$

di mana w_i dan w_x adalah bagian dari berat seismik efektif total struktur pada tingkat i atau x , h_i dan h_x adalah tinggi dari dasar ke tingkat i atau x , dan eksponen k adalah parameter yang terkait dengan periode struktur. Hasil dari gaya lateral ini kemudian disuperposisikan untuk mengevaluasi parameter stabilitas, termasuk amplifikasi momen akibat efek P-Delta dan kontrol batas simpangan antar lantai (*story drift*).

Algoritma Desain Penampang dan Iterasi Senggang Dinamis. Komponen paling



Gambar 3 Flowchart

krusial dari ArzalSTR adalah mesin kecerdasan buatan deduktif untuk desain komponen Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) sesuai dengan SNI 2847:2019 [8]. Untuk mengakomodasi tingkat kedaktailan yang tinggi tanpa mengorbankan kemudahan pelaksanaan di lapangan (*constructability*), algoritma kontrol kolom dirancang dengan logika iterasi dinamis pada sengkang pengekanan (area l_0).

Algoritma mengevaluasi kebutuhan gaya geser terfaktor (V_u) yang diperoleh dari kombinasi probabilistik momen terkuat (*probable moment*). Jika spasi sengkang (s) yang dihitung secara analitis menyalahi batasan minimum spasi bersih agregat (diatur secara ketat pada angka 40 mm), algoritma tidak akan menghentikan proses dengan *error*. Alih-alih, sistem akan memicu *loop* iterasi penambahan jumlah kaki sengkang (n) secara bertahap dari 2 kaki, menuju 3 kaki, hingga maksimum 4 kaki, sembari mengevaluasi kembali parameter spasi (s) hingga kriteria kekakuan dan kemudahan pengecoran terpenuhi secara simultan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengevaluasi keandalan algoritma ArzalSTR dalam mengekstrak dan memproses perilaku non-linear struktur,

penelitian ini melakukan pengujian numerik pada sebuah model studi kasus gedung beton bertulang Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK). Kinerja program dievaluasi berdasarkan dua metrik utama: (1) akurasi penangkapan respons global (simpangan antar lantai dan stabilitas P-Delta), dan (2) presisi pendetailan penampang lokal berbasis aturan kedaktailan SNI 2847:2019.

Deskripsi Model Studi Kasus. Model referensi yang digunakan adalah struktur gedung perkantoran 2 lantai beraturan dengan tinggi antar lantai 4.0 m (total elevasi 8.0 m) dan bentang antar kolom sejauh 5.0 m. Dimensi elemen struktural ditetapkan sebesar 300x500 mm untuk balok, 400x400 mm untuk kolom, dan ketebalan pelat lantai 120 mm. Properti material diasumsikan menggunakan beton mutu $f'_c = 25$ MPa dan baja tulangan ulir $f_y = 420$ MPa. Spektrum respons desain mengacu pada SNI 1726:2019 untuk wilayah dengan Kategori Desain Seismik (KDS) D, dengan parameter modifikasi respons $R = 8$ dan faktor pembesaran defleksi $C_d = 5.5$.

Evaluasi Kinerja Analisis: Kontrol Simpangan (*Drift*) dan P-Delta. Prosedur pertama yang divalidasi adalah kapabilitas ekstraksi nilai simpangan elastis (δ_{xe}) langsung dari *solver* C++ OpenSees. ArzalSTR berhasil menangkap matriks

Tabel 1 Rekapitulasi Otomatis Kontrol Drift dan P-Delta oleh ArzalSTR (Arah X)

Lantai	Elevasi (mm)	δ_{xe} (mm)	δ_x (mm)	Δ (mm)	Δ_a (mm)	Rasio θ	Status
2	8000	20.21	111.16	49.5	80	0.0088	AMAN
1	4000	11.21	61.66	61.66	80	0.0131	AMAN

Tabel 2 Hasil keluaran desain kolom SRPMK ArzalSTR

Elemen	Pu Max (kN)	Mu Max (kNm)	Vu Geser (kN)	Rasio Tul Long (%)	Tul Utama (Total)	Spasi Bersih Tul (mm)	Sengkang Sendi Plastis	Sengkang Luar Sendi	Cek Torsi	Status
1.0	217.5	269.7	107.9	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
2.0	26.5	254.7	96.7	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
3.0	217.5	269.7	107.9	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
4.0	26.5	254.7	96.7	2.13	12 D19	74.7	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
5.0	62.0	101.4	83.4	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
6.0	14.5	82.4	70.6	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
7.0	62.0	101.4	83.4	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK
8.0	14.5	82.4	70.6	1.42	8 D19	121.5	5 Kaki D10 - 100	2 Kaki D10 - 150	Aman	OK

perpindahan ini dan secara otomatis mengamplifikasinya menggunakan persamaan:

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I_e}$$

Hasil komputasi pada **Tabel 1** menunjukkan bahwa program mampu memetakan simpangan inelastik antar lantai (Δ) maksimum sebesar 61.66 mm pada Lantai 1, yang masih berada di bawah batas izin aman $\Delta_a = 0.020h_{sx}$ (atau 80.0 mm). Selain itu, modul secara simultan menghitung koefisien stabilitas orde kedua P-Delta (θ). Nilai θ maksimum tercatat sebesar 0.0131, jauh di bawah ambang batas stabilitas kritis $\theta_{max} = 0.090$, sehingga amplifikasi gaya elemen sekunder dapat diabaikan.

Kinerja Desain Penampang Balok dan Pelat Lantai. Pada tahap pasca-pemrosesan, ArzalSTR memetakan koordinat spasial 3D ke dalam model amplop momen 2D. Untuk pelat lantai 120 mm, pendekatan koefisien momen proporsional menghasilkan kebutuhan penulangan ortogonal tipikal D10-200.

Kebaruan fungsional algoritma ini menonjol pada kontrol proporsi tulangan SRPMK. SNI 2847:2019 mengamanatkan luas tulangan lentur bawah pada muka tumpuan minimal harus mencapai 50% luas tulangan atas ($A_{s,bot} \geq 0.5A_{s,top}$). Ketika *solver* analitik pada suatu elemen balok mendeteksi luasan tulangan positif yang sangat rendah

(misalnya hanya setara 2 D19) sedangkan area tarik atas terpasang 5 D19, fungsi *override* pada skrip Python memotong hasil mekanika murni dan memaksakan pemasangan "3 D19" pada penampang bawah guna mengamankan perilaku disipasi energi inelastis (*plastic hinging*).

Kinerja Desain Kolom dan Otomatisasi Sengkang Dinamis (*Constructability Check*). Kontribusi komputasional yang paling signifikan dari ArzalSTR terletak pada penyelesaian isu kemudahan pelaksanaan (*constructability*) di daerah pengekanan kolom (l_0). Insinyur sering menemui kebuntuan desain ketika jarak sengkang yang dibutuhkan untuk meredam geser SRPMK sangat rapat hingga menutup spasi agregat minimum (40 mm).

Algoritma iterasi sengkang dinamis pada ArzalSTR berhasil menangani persoalan ini secara rekursif (**Tabel 2**). Berdasarkan gaya geser terfaktor (V_u), pemakaian sengkang standar 2 kaki pada kolom menghasilkan spasi teoretis < 40 mm. Alih-alih menghasilkan pesan kegagalan struktural, skrip secara otonom meningkatkan jumlah kaki pengekanan ke formasi 5 kaki ($A_v = 3925 \text{ mm}^2$). Ekspansi luasan tahanan geser ini memungkinkan jarak vertikal diregangkan menjadi perhitungan matematis $s = 100.08 \text{ mm}$, yang oleh fungsi `math.floor()` dibulatkan ke dimensi aman untuk pelaksanaan lapangan menjadi **100 mm** (5 Kaki D10 - 100).

Tabel 3 Rekapitulasi Validasi Numerik ArzalSTR vs. Perhitungan Analitis Eksak

Parameter Desain	Simbol	Solusi Analitik (Eksak)	Keluaran ArzalSTR (Python)	Deviasi (%)
Momen Lentur Ultimate	M_u	209.30 kNm	209.30 kNm	0.00%
Luas Tulangan Lentur Perlu	A_s	1404.49 mm ²	1404.49 mm ²	0.00%
Kebutuhan Tulangan Tarik	n	5 D19	5 D19	0.00%
Gaya Geser Ultimate	V_u	112.30 kN	112.30 kN	0.00%
Spasi Sengkang (Sendi Plastis)	S_{10}	110 mm	110 mm	0.00%

Validasi Numerik ArzalSTR terhadap Metode Analitik Eksak. Validasi kode mutlak diperlukan untuk membuktikan tidak ada degenerasi matriks selama transisi dari *solver* C++ ke ekstraktor Pandas Python. Proses ini dikalibrasi secara manual pada Balok Elemen 9 (Tumpuan Kiri) dengan penampang efektif $d = 440.5$ mm, dengan masukan gaya ekstraksi momen ultimate $M_u = 209.3$ kNm dan gaya geser $V_u = 112.3$ kN untuk properti $f'_c = 25$ MPa.

Tinjauan kapasitas momen lentur tereduksi ($\phi = 0.9$) membutuhkan momen nominal R_n :

$$R_n = \frac{M_u}{\phi \cdot b \cdot d^2} = \frac{209.3 \times 10^6}{0.9 \cdot 300 \cdot (440.5)^2} = 3.995 \text{ MPa}$$

Respons kebutuhan rasio tulangan (ρ) terhadap penggunaan beton mutu medium (25 MPa) diselesaikan secara eksak melalui diskriminan tegangan Whitney:

$$\rho = \frac{0.85f'_c}{f_y} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0.85f'_c}} \right)$$

$$\rho = \frac{0.85 \cdot 25}{420} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot 3.995}{0.85 \cdot 25}} \right) = 0.01063$$

Luasan tulangan murni (A_s) dihitung sebesar $0.01063 \cdot 300 \cdot 440.5 = 1404.49$ mm².

Ekivalensi kebutuhan tulangan ini adalah $1404.49/283.5 = 4.954$ batang baja D19. ArzalSTR berhasil menjalankan algoritma kuantisasi *ceiling* menjadi **5 D19**.

Untuk desain transversal daerah sendi plastis SRPMK, skrip mematikan kontribusi beton ($V_c = 0$). Sengkang 2 kaki D10 dievaluasi memikul $V_s = V_u/0.75 = 149.73$ kN, yang menuntut spasi teoretis $s_{perlu} =$

129.4 mm. Namun, program mendeteksi batasan daktilitas geometri $s_{max} = d/4 = 110.125$ mm sebagai parameter penentu, dan menghasilkan pendetailan akhir sengkang tertutup pada spasi **110 mm**.

Tingkat kesalahan (*error rate*) sebesar 0.00% memastikan bahwa skrip Python terbukti mampu bertindak sebagai *expert system* yang merajut hukum konstitutif dasar dan limitasi daktilitas SNI ke dalam satu lingkungan komputasi yang mulus.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil memformulasikan, mengembangkan, dan memvalidasi **ArzalSTR**, sebuah kerangka kerja rekayasa komputasi inovatif yang secara mulus menjembatani ketangguhan analisis elemen hingga non-linear dengan kepatuhan mutlak terhadap standar desain struktural lokal. Berdasarkan hasil pengujian analitik dan numerik pada studi kasus Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), beberapa kesimpulan fundamental dapat ditarik sebagai berikut:

1. **Integrasi Analisis dan Desain Terotomatisasi:** ArzalSTR terbukti secara efektif mengekstraksi matriks gaya dalam dan perpindahan elastis dari *solver* C++ OpenSees untuk mengevaluasi parameter global struktur. Algoritma program berhasil mengamplifikasi perpindahan tersebut menjadi simpangan inelastis antar lantai (*story drift*) dan mengalkulasi koefisien stabilitas P-Delta yang sepenuhnya sejalan dengan regulasi SNI 1726:2019.
2. **Transparansi Algoritma (White-Box System):** Berbeda dengan perangkat lunak komersial konvensional yang beroperasi sebagai *black-box*, skrip

pemrograman berbasis Python ini menyajikan transparansi analitik secara penuh. Validasi numerik terhadap perhitungan analitis eksak (berdasarkan SNI 2847:2019) menghasilkan tingkat deviasi sebesar 0.00%, membuktikan keandalan translasi hukum mekanika ke dalam logika kode.

3. Kecerdasan Pendetailan Dinamis:

Kontribusi paling krusial dari program ini terletak pada otomasi desain penampang yang merangkum iterasi sengkang pengekangan dinamis. Mesin desain tidak hanya menghitung luasan baja tulangan perlu, tetapi bertindak sebagai sistem pakar yang mampu mengevaluasi *constructability check*. Program berhasil memodifikasi konfigurasi pengekangan sendi plastis kolom (dari 2 kaki menjadi 3 atau 4 kaki) secara otonom saat mendeteksi spasi agregat bersih yang kurang dari 40 mm, serta menerapkan syarat tulangan minimum 50% pada area tumpuan balok.

4. Efisiensi Komputasional Tinggi:

Keseluruhan alur kerja (*workflow*)—mulai dari pembacaan geometri struktur, perakitan elemen matriks, ekstraksi beban gempa ekuivalen, hingga pendetailan tulangan berdasar hierarki daktilitas—sukses diselesaikan hanya dalam hitungan detik.

Sebagai saran dan arah pengembangan riset di masa mendatang, arsitektur dasar ArzalSTR yang bersifat terbuka (*open-source architecture*) sangat potensial untuk diekspansi. Pengembangan versi selanjutnya direkomendasikan untuk mengintegrasikan modul evaluasi kinerja seismik berbasis perpindahan (*performance-based earthquake engineering*), seperti Analisis Beban Dorong Statik Non-Linear (*Pushover Analysis*) dan Analisis Riwayat Waktu Non-Linear (*Non-Linear Time History Analysis / NLTHA*). Integrasi tersebut, dikombinasikan dengan pembacaan pra-pemrosesan grafis otomatis (misalnya *parser* format DXF), akan

memposisikan ArzalSTR sebagai instrumen numerik yang komprehensif bagi praktisi rekayasa dan komunitas akademis secara global.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Goda, N. Mori, T. Yasuda, A. Prasetyo, A. Muhammad and D. Tsujio, "Cascading Geological Hazards and Risks of the 2018 Sulawesi Indonesia Earthquake and Sensitivity Analysis of Tsunami Inundation Simulations," *Frontier in Earth Science*, vol. 7, 2019.
- [2] Madiawati, J. Tanjung, Y. Sanada, F. Nugroho and S. Wardi, "Seismic Analysis of Damaged Buildings Based on Post-Earthquake Investigation of the 2018 Palu Earthquake," *International Journal of GEOMATE*, vol. 18, no. 70, pp. 116-122, 2020.
- [3] J. Moehle, *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*, McGraw Hill Education, 2014.
- [4] D. Llanos and R. M. Delgadillo, "Linear Seismic Analysis and Structural Optimization of Reinforced Concrete Frames Using OpenSeesPy," *Buildings*, vol. 15, 2025.
- [5] F. McKenna, M. H. Scott and G. L. Fenves, "Nonlinear Finite-Element Analysis Software Architecture Using Object Composition," *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 24, pp. 95-107, 2010.
- [6] W. McKinney, "Data Structures for Statistical Computing in Python," in *The 9th Python in Science Conference*, 2010.
- [7] BSN, SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung, Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [8] BSN, SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, Jakarta: BSN, 2019.



EVALUASI RESIKO PENERAPAN SISTEM MANAJEMEN K3 PADA PEKERJAAN PENINGKATAN JALAN DALAM KOTA DONGGALA

Hasanuddin^{*1}, Eko Widodo¹, I Putu Bayu Anggara¹

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

Penulis korespondensi: bayuputu253@gmail.com

DISUBMIT 13 Agustus 2026

DIREVISI 14 Agustus 2026

DITERIMA 15 Agustus 2026

ABSTRAK Seiring dengan pesatnya laju perkembangan pembangunan konstruksi jalan di Indonesia, maka peranan pengendalian risiko kecelakaan kerja dirasakan semakin penting. Namun pada kenyataan penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) secara umum masih sering terabaikan. Hal ini ditunjukkan dengan tingginya kecelakaan kerja yang terjadi di Indonesia. Untuk mencegah kecelakaan kerja, diperlukan suatu Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) yang mengatur dan dapat menjadi acuan bagi konsultan, kontraktor dan para pekerja konstruksi. Penelitian ini bertujuan (1) Mengetahui resiko pelaksanaan penerapan dan tingkat keberhasilan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja. (2) Mengetahui Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) pada proyek ini. Lokasi penelitian dilakukan di Kota Donggala Kecamatan Banawa Provinsi Sulawesi Tengah. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan kajian pustaka dari berbagai sumber yang berkaitan. Data yang didapatkan berasal dari pengisian kuisioner yang bergerak dibidang jasa konstruksi yaitu berdasarkan sudut pandang kontraktor, dan konsultan. Berdasarkan hasil analisis total tindakan SMK3 keberhasilan penerapan di proyek Pekerjaan Peningkatan Jalan Dalam Kota Donggala mencapai nilai rata-rata 3,048, SMK3 berpengaruh baik bagi perusahaan maupun tenaga kerja itu sendiri, Hal tersebut terlihat dari keselamatan kesehatan.

KATA KUNCI Resiko Kecelakaan Kerja; Faktor Tindakan SMK3; K3

1 LATAR BELAKANG

Seiring dengan pesatnya laju perkembangan pembangunan konstruksi jalan di Indonesia, maka peranan pengendalian risiko kecelakaan kerja dirasakan semakin penting. Namun pada kenyataan penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) secara umum masih sering terabaikan. Hal ini ditunjukkan dengan tingginya kecelakaan kerja yang terjadi di Indonesia.

SMK3 merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari sistem perlindungan tenaga kerja dan bagi pekerja jasa konstruksi dapat meminimalisir dari menghindarkan diri dari risiko kerugian moral maupun material, kehilangan jam kerja, maupun keselamatan manusia dan lingkungan sekitarnya yang nantinya dapat menunjang peningkatan kinerja yang efektif dan efisien dalam proses pembangunan.

Proyek pembangunan Jalan di Donggala merupakan salah satu proyek konstruksi yang memiliki risiko kecelakaan kerja yang

tinggi. Salah satu penyebabnya penggunaan alat-alat berat dan mesin-mesin canggih yang perlu keahlian untuk menggunakan dengan benar. Oleh karena itu perlu diadakan penelitian tentang evaluasi penerapan SMK3 pada proyek tersebut sehingga kecelakaan kerja bisa dikurangi. Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja yang dilaksanakan dengan sebaik-baiknya diharapkan akan memberi iklim keamanan dan ketenaga kerja sehingga dapat membantu dalam meningkatkan produktivitas tenaga kerja.

1. Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3). Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) adalah struktur, tanggung jawab, praktik dan prosedur sumber daya perusahaan untuk menerapkan manajemen keselamatan kerja (ILO 1998). Menurut Permenaker 05/MEN/1996, definisi SMK3 adalah bagian dari sistem manajemen secara keseluruhan yang meliputi struktur organisasi, perencanaan, tanggung jawab, pelaksanaan, penerapan, pencapaian,

pengkajian dan pemeliharaan kebijakan keselamatan dan kesehatan kerja, untuk mencapai tempat kerja yang aman, efisien dan produktif

Menurut Rudi Suardi (2005) terdapat tujuan dan manfaat dari penerapan SMK3 yaitu:

1. Sebagian alat untuk mencapai derajat kesehatan tenaga kerja yang setinggi-tingginya, baik untuk semua para pekerja-pekerja proyek konstruksi.
2. Sebagai upaya untuk mencegah dan memberantas penyakit dan kecelakaan-kecelakaan akibat kerja, memelihara dan meningkatkan kesehatan dan gizi para tenaga kerja, merawat dan meningkatkan efisiensi dan daya produktivitas tenaga manusia, memberantas kecelakaan kerja dan melipatgandakan gairah serta kenikmatan bekerja.

Adapun manfaat dari penerapan SMK3 yaitu:

1. Melindungi karyawan.
2. Melihatkan kepatuhan pada peraturan dan undang-undang.
3. Mengurangi biaya.
4. Membuat sistem manajemen yang efektif.
5. Meningkatkan kepercayaan dan kepuasan pelanggan

Demikian disimpulkan bahwa pengertian sistem adalah suatu proses dari gabungan berbagai komponen/bagian/elemen yang saling berhubungan dan saling ketergantungan satu sama lain yang di pengaruhi aspek lingkungan untuk mencapai tujuan yang di inginkan (Tarore, H dan Mandagi, 2006).

Manajemen merupakan suatu ilmu tentang pengetahuan seni memimpin organisasi yang terdiri atas kegiatan perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan dan pengendalian terhadap sumber-sumber daya yang terbatas dalam usaha mencapai tujuan dan sasaran yang efektif dan efisien.

2. Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3).

Kesehatan kerja adalah praktik-praktik meningkatkan kesehatan keselamatan kerja dengan sebaik-baiknya. Sasaran adalah

faktor manusia dan lingkungannya. Tujuan akhirnya adalah tenaga kerja yang sehat, sejahtera, gairah dan produktif. Keselamatan kerja bertujuan, agar tenaga kerja mendapatkan perlindungan keselamatan pada pekerjaannya dari bahaya-bahaya kecelakaan yang bersumber kepada mesin dan peralatan kerja, lingkungan dan faktor-faktor manusia sendiri (Suma'mur 1977). Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) ditinjau dari segi keilmuan dapat diartikan sebagai ilmu pengetahuan dan penerapan mencegah kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja. Penerapan K3 dijabarkan kedalam Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja yang disebut SMK3 (Soemaryanto, 2002).

Secara hukum, Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) diartikan sebagai "suatu upaya perlindungan agar setiap tenaga kerja dan orang lain yang memasuki tempat kerja senantiasa dalam keadaan sehat dan selamat serta sumber-sumber proses produksi dapat dijalankan dengan aman, efisiensi dan produktif. Ditinjau dari segi ilmu pengetahuan dan penerapannya dalam usaha mencegah keyakinan terjadinya kecelakaan dan penyakit akibat kerja. Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan skala prioritas, karena dalam pelaksanaannya, selain dilandasi oleh peraturan perundang-undangan tetapi juga dilandasi oleh ilmu-ilmu tertentu terutama ilmu keteknikan dan ilmu kedokteran.

2. METODOLOGI

Lokasi penelitian dilakukan pada pekerjaan Peningkatan Jalan dalam kota di Kota Donggala Kecamatan Banawa Provinsi Sulawesi Tengah.

1. Pengumpulan Data. Cara pengumpulan data merupakan bagian dari desain riset yang bermanfaat untuk analisis pengujian hipotesis dan solusi. Pengumpulan data pada penelitian ini adalah dengan cara kuesioner. Kuesioner dalam penelitian ini adalah dengan tipe kuesioner pilihan, karena kemudahannya dalam memberikan jawaban dan jauh lebih singkat waktunya.

Kuesioner disebarikan langsung kepada responden. Disini pertanyaan dibagi, yaitu data umum, serta tanggapan mengenai identifikasi penyebab terjadinya keterlambatan penyelesaian proyek responden dalam hal ini adalah pakar ahli. Setelah itu jawaban dari responden akan diolah dalam bentuk data.

Pemberian nilai atas jawaban kuisisioner untuk dipergunakan dalam analisa data:

Nilai 4: Sangat Berpengaruh (SB)

Nilai 3: Berpengaruh (B)

Nilai 2: Kurang Berpengaruh (KB)

Nilai 1: Tidak Berpengaruh (TB)

Menganalisa data untuk menentukan rangking dari kuisisioner dengan menghitung nilai Indeks Kepentingan Relatif (IKR).

Untuk Mendapatkan nilai IKR digunakan rumus:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Dimana:

$\bar{x}$ = rata-rata ukuran nilai faktor

x_i = ukuran nilai faktor pada responden ke-1

n = Jumlah responden

$$IKR = \frac{\bar{x}}{M}$$

Dimana:

IKR = Indeks Kepentingan n Relatif

M = jangkauan nilai faktor

M = 4

2. Penyimpulan Data. Cara penyimpulan data adalah dengan cara menarik kesimpulan berdasarkan analisis data yang telah dilakukan yang termasuk kategori analisa resiko penerapan sistem manajemen K3 pada Pekerjaan Peningkatan Jalan. yaitu dengan menentukan interval yang setuju sampai yang tidak setuju dengan melihat kriteria skor hasil analisa sebagai berikut:

- Skor $3,5 \leq x \leq 4$ merupakan faktor yang sangat berpengaruh.
- Skor $2,5 \leq x < 3,5$ merupakan faktor yang berpengaruh.
- Skor $1,5 \leq x < 2,5$ merupakan faktor yang kurang berpengaruh.
- Skor $1 \leq x < 1,5$ merupakan faktor yang tidak berpengaruh.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Pekerjaan Responden. Diketahui bahwa jumlah responden dalam penelitian ini sebanyak 35 orang yang terdiri atas dua kelompok pekerjaan, yaitu konsultan dan kontraktor dapat dilihat dari Tabel 1. Pekerjaan Responden.

Tabel 1 Pekerjaan Responden

Pekerjaan Responden	Jumlah	Persentase (%)
Konsultan	15	43%
Kontraktor	20	57%

Berdasarkan hasil pada Tabel 1, diketahui bahwa seluruh responden yang berpartisipasi dalam penelitian ini berasal dari dua kelompok pekerjaan, yaitu kontraktor dan konsultan. Responden yang bekerja sebagai kontraktor merupakan kelompok terbesar dengan persentase sebesar 57%, sedangkan responden yang bekerja sebagai konsultan berjumlah 43%.

2. Pengalaman Responden Bekerja Dalam Proyek

Tabel 2 Pengalaman Responden dalam Proyek

Pengalaman Responden	Jumlah	Persentase (%)
1 – 5 tahun	10 orang	29%
>5 tahun	25 orang	71%

Berdasarkan hasil pada Tabel 2, diketahui bahwa mayoritas responden yang berpartisipasi dalam pengisian kuesioner memiliki pengalaman kerja di bidang proyek konstruksi lebih dari 5 tahun dengan persentase sebesar 71%. Sementara itu, responden yang memiliki pengalaman kerja antara 1–5 tahun berjumlah 29%.

3. Pendidikan Terakhir Responden

Tabel 3 Pendidikan Terakhir Responden

Pendidikan Terakhir	Jumlah	Persentase (%)
SLTA / sederajat	2	6%

Pendidikan Terakhir	Jumlah	Persentase (%)
S1	30	85%
S2	3	9%
S3	0	0%
Lainnya	0	0%
Total	35	100%

Berdasarkan hasil pada Tabel 3, diketahui bahwa tingkat pendidikan responden didominasi oleh lulusan Strata 1 (S1) dengan persentase sebesar 85%. Selanjutnya, responden dengan tingkat pendidikan Strata 2 (S2) berjumlah 9%, sedangkan responden dengan pendidikan SMA/SMK sebesar 6%.

4. Jabatan Responden

Tabel 4. Jabatan Responden

Jabatan	Jumlah	Persentase (%)
Project manager	3	9%
Site Manager	4	11%
Site enginner	6	18%
Supervisor	22	62%
Lainnya	0	0%
TOTAL	35	100%

Berdasarkan hasil pada Tabel 4, diketahui bahwa jabatan responden yang paling banyak dalam pengisian kuesioner adalah Supervisor dengan persentase sebesar 62%. Selanjutnya, responden dengan jabatan Site Engineer sebesar 18%, diikuti oleh Site Manager sebesar 11%, dan Project Manager sebesar 9%.

5. Usia Responden Pada Saat Ini

Tabel 5. Usia Responden Pada Saat Ini

Usia	Jumlah	Persentase (%)
<20 tahun	3	9%
20 – 50 tahun	32	91%
>50 tahun	0	0%
Total	35	100%

Berdasarkan hasil pada Tabel 5, menunjukkan usia pada responden berada pada rentang usia 20–50 tahun dengan persentase sebesar 91%, sedangkan responden yang berusia di bawah 20 tahun memiliki persentase sebesar 9%.

6. Data Hasil Kuisisioner

Berikut hasil dalam proyek dari masing-masing tahapan yang telah didapat dari data kuisisioner, dapat dilihat dari Tabel 6. Dengan penilaian yang dilakukan sebagai berikut:

1. Dilaksanakan = nilai $3 \leq x \leq 4$
2. Tidak dilaksanakan sepenuhnya = nilai $2 \leq x < 3$
3. Tidak dilaksanakan = nilai $1 \leq x < 2$
4. Belum dipantau = nilai $0 \leq x \leq 1$

Tabel 6 Data Rekapitulasi Hasil Kuisisioner Tindakan

No.	PERNYATAAN	1	2	3	4
1.	Jaminan Kemampuan				
	a. Sumber daya manusia, fisik dan financial.	12	19	4	0
	b. Integrasi	11	15	6	3
	c. Tanggung jawab dan tanggung gugat.	9	17	8	1
	d. Konsultasi, Motivasi dan Kesadaran	9	16	6	4
	e. Pelatihan dan Keterampilan	7	21	6	1
2.	Dukungan Tindakan				
	a. Komunikasi	17	14	2	2
	b. Pelaporan	9	16	8	2
	c. Dokumentasi	13	9	13	0

d. Pengendalian Dokumen	7	16	10	2
e. Pencatatan Manajemen Operasi	8	16	8	3
3. Identifikasi Sumber Bahaya dan Pengendalian Resiko				
a. Identifikasi Sumber Bahaya	13	12	18	2
b. Penilaian Resiko	10	17	6	2
c. Tindakan Pengendalian	8	18	8	1
d. Perencanaan dan Rekayasa	3	19	9	4
e. Pengendalian Administratif	4	14	15	2
f. Tinjauan Ulang Kontrak	7	18	6	4
g. Pembelian	4	12	11	8
4. Pengukuran dan Evaluasi				
a. Inspeksi dan pengujian	15	12	7	1
b. Audit SMK3	6	23	6	0
c. Tindakan perbaikan dan pencegahan	9	18	6	2
5. Tinjauan Oleh Pihak Manajemen				
a. Evaluasi terhadap penerapan kebijakan keselamatan dan kesehatan kerja.	11	13	8	3
b. Tujuan, sasaran dan kinerja keselamatan dan kesehatan kerja.	11	17	5	2
c. Hasil temuan audit Sistem Manajemen K3.	3	19	9	4
d. Evaluasi efektifitas penerapan Sistem Manajemen K3 dan kebutuhan untuk mengubah Sistem Manajemen K3 sesuai dengan:				
1) Perubahan peraturan perundangan.	8	16	10	1
2) Tuntutan dari pihak yang terkait dan pasar.	6	20	7	2
3) Perubahan produk dan kegiatan perubahan.	6	20	8	1
4) Perubahan struktur organisasi perusahaan.	13	13	8	1
5) Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi termasuk epidemiologi.	10	11	12	2
6) Pengalaman yang didapat dari insiden keselamatan dan kesehatan kerja.	6	15	9	5
7) Pelaporan.	7	16	7	5
8) Umpan balik khususnya dari tenaga kerja	3	17	8	7

7. Hasil Kuisisioner

Berikut hasil dalam proyek dari masing-masing tahapan yang telah didapat dari data kuisisioner, dapat dilihat dari Tabel 7.

Tabel 7 Analisis Hasil Kuisisioner Tindakan

No.	PERNYATAAN	1	2	3	4	$\sum x_i$	$\bar{X}$	IKR	Keterangan
1.	Jaminan Kemampuan								

a. Sumber daya manusia, fisik dan financial	12	19	4	0	114	3,257	0,814	Dilaksanakan
b. Integrasi	11	15	6	3	104	2,971	0,743	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
c. Tanggung jawab dan tanggung gugat	9	17	8	1	104	2,971	0,743	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
d. Konsultasi, Motivasi dan Kesadaran	9	16	6	4	100	2,857	0,714	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
e. Pelatihan dan Keterampilan	7	21	6	1	105	3	0,75	Dilaksanakan
2. Dukungan Tindakan								
a. Komunikasi	17	14	2	2	116	3,314	0,829	Dilaksanakan
b. Pelaporan	9	16	8	2	102	2,914	0,729	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
c. Dokumentasi	13	9	13	0	105	3	0,75	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
d. Pengendalian Dokumen	7	16	10	2	98	2,8	0,7	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
e. Pencatatan Manajemen Operasi	8	16	8	3	99	2,829	0,707	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
3. Identifikasi Sumber Bahaya dan Pengendalian Resiko								
a. Identifikasi Sumber Bahaya	13	12	8	2	107	3,057	0,764	Dilaksanakan
b. Penilaian Resiko	10	17	6	2	105	3	0,75	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
c. Tindakan Pengendalian	8	18	8	1	103	2,943	0,736	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
d. Perencanaan dan Rekayasa	3	19	9	4	91	2,6	0,65	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
e. Pengendalian Administratif	4	14	15	2	91	2,6	0,65	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
f. Tinjauan Ulang Kontrak	7	18	6	4	100	2,857	0,714	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
g. Pembelian	4	12	11	8	82	2,343	0,586	Tidak dilaksanakan sepenuhnya

4.	Pengukuran dan Evaluasi								
a.	Inspeksi dan pengujian	15	12	7	1	111	3,171	0,793	Dilaksanakan
b.	Audit SMK3	6	23	6	0	105	3	0,75	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
c.	Tindakan perbaikan dan pencegahan	9	18	6	2	104	2,971	0,743	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
5.	Tinjauan Oleh Pihak Manajemen								
a.	Evaluasi terhadap penerapan kebijakan keselamatan dan kesehatan kerja.	11	13	8	3	100	2,857	0,714	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
b.	Tujuan, sasaran dan kinerja keselamatan dan kesehatan kerja.	11	17	5	2	107	3,057	0,764	Dilaksanakan
c.	Hasil temuan audit Sistem Manajemen K3.	3	19	9	4	88	2,514	0,629	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
d.	Evaluasi efektifitas penerapan Sistem Manajemen K3 dan kebutuhan untuk mengubah Sistem Manajemen K3 sesuai dengan:						2,804	0,701	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
1)	Perubahan peraturan perundang-undangan.	8	16	10	1	101	2,886	0,721	Tidak dilaksanakan sepenuhnya

2) Tuntutan dari pihak yang terkait dan pasar.	6	20	7	2	100	2,857	0,714	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
3) Perubahan produk dan kegiatan perubahan.	6	20	8	1	101	2,886	0,721	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
4) Perubahan struktur organisasi Perusahaan.	13	13	8	1	108	3,086	0,771	Dilaksanakan
5) Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi termasuk epidemiologi.	10	11	12	2	101	2,886	0,721	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
6) Pengalaman yang didapat dari insiden keselamatan dan Kesehatan kerja.	6	15	9	5	93	2,657	0,664	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
7) Pelaporan.	7	16	7	5	95	2,714	0,679	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
8) Umpan balik khususnya dari tenaga kerja.	3	17	8	7	86	2,457	0,614	Tidak dilaksanakan sepenuhnya

8. Ranking Tindakan untuk Menerapkan SMK3

Berikut hasil penerapan SMK3 dari masing-masing tahapan yang telah didapat dari data kuisisioner, dapat dilihat dari Tabel 8.

Tabel 8 Rangking Tindakan Untuk Menerapkan SMK3

No.	PERNYATAAN	RATA-RATA	KETERANGAN	RANGKING
1.	Jaminan Kemampuan			
a.	Sumber daya manusia, fisik dan financial.	3,257	Dilaksanakan	1
b.	Integritas	2,971	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	3
c.	Tanggung jawab dan tanggung gugat.	2,971	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	3

	d. Konsultasi, Motivasi dan Kesadaran	2,857	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	4
	e. Pelatihan dan Keterampilan	3	Dilaksanakan	2
2.	Dukungan Tindakan			
	a. Komunikasi	3,314	Dilaksanakan	1
	b. Pelaporan	2,914	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	3
	c. Dokumentasi	3	Dilaksanakan	2
	d. Pengendalian Dokumen	2,8	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	5
	e. Pencatatan Manajemen Operasi	2,829	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	4
3.	Identifikasi Sumber Bahaya dan Pengendalian Resiko			
	a. Identifikasi Sumber Bahaya	3,057	Dilaksanakan	1
	b. Penilaian Resiko	3	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	2
	c. Tindakan Pengendalian	2,943	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	3
	d. Perencanaan dan Rekayasa	2,6	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	5
	e. Pengendalian Administratif	2,6	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	5
	f. Tinjauan Ulang Kontrak	2,857	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	4
	g. Pembelian	2,343	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	5
4.	Pengukuran dan Evaluasi			
	a. Inspeksi dan Pengujian	3,171	Dilaksanakan	1
	b. Audit SMK3	3	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	2
	c. Tindakan perbaikan dan pencegahan	2,971	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	3
5.	Tinjauan Oleh Pihak Manajemen			
	a. Evaluasi terhadap penerapan kebijakan keselamatan dan kesehatan kerja.	2,857	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	2

b. Tujuan, sasaran dan kinerja keselamatan dan kesehatan kerja.	3,057	Dilaksanakan	1
c. Hasil temuan audit Sistem Manajemen K3.	2,514	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	5
d. Evaluasi efektifitas penerapan Sistem Manajemen K3 dan kebutuhan untuk mengubah Sistem Manajemen K3 sesuai dengan:	2,804	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	4
1) Perubahan peraturan perundangan.	2,886	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	2
2) Tuntutan dari pihak yang terkait dan pasar.	2,857	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	3
3) Perubahan produk dan kegiatan perubahan.	2,886	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	2
4) Perubahan struktur organisasi Perusahaan.	3,086	Dilaksanakan	1
5) Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi termasuk epidemiologi.	2,886	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	2
6) Pengalaman yang didapat dari insiden keselamatan dan kesehatan kerja.	2,657	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	5
7) Pelaporan	2,714	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	4
8) Umpan balik khususnya dari tenaga kerja.	2,457	Tidak dilaksanakan sepenuhnya	6

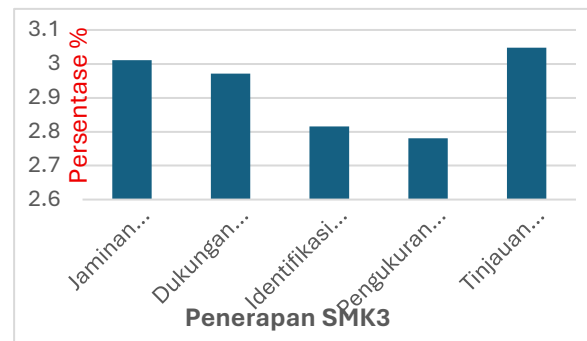
9. Analisa Tindakan Rata-rata Setiap Tindakan Untuk Menerapkan SMK3

Dari sejumlah 35 eksemplar kuisioner yang disebabkan kepada responden, diperoleh jawaban dari responden yang diminta partisipasinya untuk pengisian kuisioner penelitian ini. Dapat dilihat pada Tabel 9 dan Gambar 1.

Tabel 9 Analisa Tindakan Rata-rata setiap Tindakan Untuk Menerapkan SMK3

No	Analisa Tindakan Rata-rata Setiap Tindakan Untuk Menerapkan SMK3	Rata-rata	Keterangan
1	Jaminan Kemampuan	3,011	Dilaksanakan
2	Dukungan Tindakan	2,971	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
3	Identifikasi Sumber Bahaya dan Pengendalian Resiko	2,816	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
4	Pengukuran dan Evaluasi	2,781	Tidak dilaksanakan sepenuhnya
5	Tinjauan Oleh Pihak Manajemen	3,048	Dilaksanakan

Berdasarkan hasil pada Tabel 4.19, dapat dijelaskan bahwa seluruh tindakan yang berkaitan dengan pelaksanaan proyek peningkatan jalan di Kota Donggala memiliki pengaruh dalam mendukung keberhasilan proyek. Namun, dari berbagai tindakan yang dianalisis, faktor yang paling dominan berpengaruh adalah tinjauan oleh pihak manajemen, dengan nilai rata-rata sebesar 3,048. Nilai ini menunjukkan bahwa keterlibatan manajemen dalam melakukan evaluasi, pengawasan, dan peninjauan terhadap pelaksanaan proyek memiliki peran yang sangat penting dibandingkan faktor lainnya.



Gambar 1 Diagram Analisa Tindakan Rata-rata Setiap Kelompok Faktor Tindakan Untuk Menerapkan SMK3

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis Evaluasi Resiko Penerapan Sistem Manajemen K3 Pada Pekerjaan Peningkatan Jalan Dalam Kota Donggala ini disusun berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan. Maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Faktor resiko sebagai dampak tidak diterapkan sistem manajemen kesehatan dan keselamatan kerja pada Pekerjaan Peningkatan Jalan Dalam Kota Donggala, dari segi resiko pekerjaan masih kurang kesadaran dari para pekerja dalam memperhatikan resiko sehingga masih terjadi kecelakaan kerja di proyek.
2. Berdasarkan hasil penelitian total tindakan SMK3 Keberhasilan penerapan di proyek peningkatan jalan dalam Kota Donggala mencapai nilai rata-rata 3,048, SMK3 berpengaruh baik bagi perusahaan maupun tenaga kerja itu sendiri, hal tersebut terlihat dari atas keselamatan dan kesehatan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.A. Anwar Prabu Mangkunegara. (2009). *Manajemen Sumber Daya Manusia*. Bandung: PT. Remaja Rosdakarya.
- [2] Akbar Husen. (2008). *Manajemen Proyek. (SNI 1726-2019)*. Yogyakarta: Andi.

- [3] Buchari. (2007). *Manajemen Kesehatan Kerja Dan Alat Pelindung Diri*. Medan: Universitas Sumatera Utara.
- [4] Dipohusodo, Istimawan. (1996). *Manajemen Proyek & Konstruksi*. Kanisius. Jogjakarta.
- [5] Ervianto, W.I., (2005), *Manajemen Proyek Konstruksi*. ANDI Yogyakarta. Yogyakarta.
- [6] Faisal Tamim, Agus Ismail (2020). *Analisis Manajemen Risiko Dan Pengendalian Kesehatan Dan Keselamatan Kerja (K3) Pada Pekerjaan Power House*. (Studi Kasus Proyek Pltmh Cikandang 1 Pakenjeng-Garut).
- [7] Hadiningrum, Kunlestiowati. (2003). *Keselamatan Dan Kesehatan Kerja*. Bandung: Politeknik Negeri Bandung.
- [8] Hotma Sitohang dan Karen Magdalena . (2020). *Penerapan Sistem Keselamatan Kesehatan Kerja Dan Lingkungan (K3l) Pada Proyek Konstruksi*. (Studi Kasus: Pembangunan Jalan Tol Cibitung-Cilincing). Jurnal Teknik Sipil. Vol. IX No. 2.
- [9] ILO (*International Labour Organization*). 1998. *Statistics of Occupational Injuries*. Geneva. *International Labour Office Geneva*.
- [10] Kurnia, M. B. (2020). *Faktor-Faktor Penyebab Rendahnya Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan dan Kesehatan Kerja (SMK3) Pada Perusahaan Bidang Pekerjaan Konstruksi*. Jurnal Student Teknik Sipil. 2(2), 141–146.
- [11] Manihuruk, E. G. P. R. B. (2021). *Pengaruh Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi Terhadap Pengendalian Kecelakaan Kerja Pada Proyek Konstruksi Jalan Tol*.
- [12] Mathis, R. L., & Jackson, J. H. (2000). *Human Resource Management*. California: South-Western College Publishing.
- [13] Muhammad Agis Firdaus, AL Hasin. (2022). *Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Penerapan Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Cv Agis Truss*. Jurnal Mahasiswa Bisnis & Manajemen. Vol. 01, No. 04, 2022, pp. 192-208.
- [14] Pangkey F, Malingkas GY, Walangitan D. (2012). *Penerapan Sistem Manajemen Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (SMK3) Pada Proyek Konstruksi Di Indonesia*. (Studi Kasus: Pembangunan Jembatan Dr. Ir. Soekarno-Manado). Jurnal Ilmiah MEDIA ENGINEERING. Vol. 2, No. 2.
- [15] Peraturan Menteri Tenaga Kerja No. 03 Tahun 1998 Tentang Tatacara Pelaporan dan Pemeriksaan Kecelakaan. Menteri Ketenagakerjaan.
- [16] Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 10 Tahun 2021 Tentang Pedoman Sistem Manajemen Keselamatan Konstruksi. Menteri PUPR.
- [17] Peraturan Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi No. 01/MEN/1980. Tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Konstruksi Bangunan. Menteri Tenaga Kerja dan Transmigrasi.
- [18] Rudi Suardi. (2005). *Sistem manajemen keselamatan dan kesehatan kerja*. Jakarta : penerbit PPM.

- [19] Septina Herawati, Maulidya Octaviani, Wisnu Abiarto. (2024). *Analisis Penerapan K3 Dengan Metode Job Safety Analysis Pada Proyek Peningkatan Jalan Masangan Wetan Sukodono Kabupaten Sidoarjo*.
- [20] Soeharto I. (1995). *Manajemen proyek dari konseptual sampai operasional*. Penerbit Erlangga, Jakarta.
- [21] Suma'mur. (1989). *Ergonomi Untuk Produktifitas Kerja*. CV Haji Masagung.
- [22] Tarore, H dan Mandagi, R. J. M. 2006. *Sistem Manajemen Proyek dan Konstruksi (SIMPROKON)*. Tim Penerbit JTS Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi. Manado.
- [23] Undang-undang (UU) Nomor 1 Tahun 1970 Tentang Keselamatan Kerja. Jakarta: Pemerintah Pusat.
- [24] Undang-undang No. 3 tahun 1992 Tentang Jaminan Sosial Tenaga Kerja. Jakarta: Pemerintah Pusat.
- [25] Dipohusodo, Istimawan.(1996). *Manajemen Proyek & Konstruksi*. Kanisius. Jogjakarta.
- [26] Undang-undang (UU) Nomor 13 Tahun 2003 Tentang Ketenagakerjaan. Jakarta: Pemerintah Pusat.

