



Jurnal Surya Teknika

Volume 1 Edisi 2 (Desember 2024)

ISSN 3063-055X

Analisis Kinerja Struktur Stadion Bola Basket Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) <i>Muhammad Azwar Fahmi, Ilham, Arzal M. Zain</i>	1
Review Design Box Culvert terhadap Banjir Sungai Cangak di Kecamatan Candipuro Kabupaten Lumajang <i>Rezky Susmono Karuru, Clara Zenicha Lioni, Tiffani Mandasari Putri Mantong</i>	15
Kajian Laju Angkutan Sedimen Dasar pada Sungai Pondo-Poboya <i>Sulfiati, Triyanti Anasiru, Iryanto Umabaihi</i>	21
Analisis Kelayakan Infrastruktur Pariwisata di Kota Palu, Sulawesi Tengah: Studi Kasus Kampung Nelayan Palu <i>Fritswel Ratmadi Payung, William Arrang Sarungallo, Bayu Rahmat Ramadhan, Ni Made Ayu Juli Andjani</i>	35
Pengaruh Dosis pada Kehilangan Berat Mortar dengan Bahan Pengikat Alkali Activated Slag <i>Bayu Rahmat Ramadhan, Fritswel Ratmadi Payung, Sri Nur Akifa, Willian Arrang Sarungallo</i>	41



Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Palu
Persatuan Insinyur Indonesia Kota Palu

Jurnal Surya Teknika

Volume 1 Edisi 2 (Desember 2024)

ISSN 3063-055X

Pimpinan Editor

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

Universitas Muhammadiyah Palu

Dewan Editor

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

Universitas Muhammadiyah Palu

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

Universitas Tadulako

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

Universitas Muhammadiyah Palu

Nursalim, S.Kom., M.Kom.

Universitas Muhammadiyah Palu

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

Universitas Muhammadiyah Palu

Reviewer

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

Universitas Muhammadiyah Palu

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

Universitas Tadulako

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

Universitas Muslim Indonesia

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

Universitas Tadulako

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

Sekolah Tinggi Teknologi Payakumbuh

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



Analisis Kinerja Struktur Stadion Bola Basket Dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK)

Muhammad Azwar Fahmi¹, Ilham*¹, Arzal M. Zain²

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

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

*Penulis korespondensi: ilham.chaniago@gmail.com

DISUBMIT 9 Desember 2024

DIREVISI 10 Desember 2024

DITERIMA 12 Desember 2024

ABSTRAK Indonesia berada di wilayah tektonik yang sangat aktif, dibelah oleh banyak sesar aktif dengan tiga lempeng besar. Pada prinsipnya gempa bumi tidaklah menimbulkan korban jiwa. Yang membunuh atau dapat menimbulkan korban jiwa adalah lingkungan sekitar seperti bangunan yang runtuh. Sifat bahan beton bertulang yang getas pada dasarnya tidak cocok digunakan pada struktur bangunan yang berada di wilayah yang rawan gempa bumi. Namun, dengan menerapkan *detailing* penulangan yang baik maka akan membuat bahan beton bertulang dapat berperilaku daktile, sehingga bahan beton bertulang tetap dapat digunakan dalam struktur bangunan tahan gempa. Oleh karena itu pada penelitian ini akan membahas tentang desain struktur stadion bola basket tahan gempa dengan SRPMK dan analisis kinerja struktur tersebut terhadap beban gempa. Untuk menganalisis level kinerja struktur digunakan analisis *pushover* dan *time history* dengan bantuan *software* ETABS. Berdasarkan hasil perhitungan struktur dengan SRPMK didapat penampang yang digunakan untuk balok dan kolom. Selanjutnya penampang terpakai dimodelkan menggunakan ETABS untuk dilihat level kinerja struktur. Didapat level kinerja struktur hasil *pushover* dan *time history* adalah *immediate occupancy* (IO) dimana setelah terjadinya pertama kali adalah pada balok, setelah semua balok mencapai leleh, maka kelelahan selanjutnya terjadi pada kolom dan kondisi gedung hampir sama dengan sebelum gempa terjadi dan dapat digunakan kembali. Analisis statik *pushover* dengan analisis dinamik *time history* menunjukkan bahwa analisis statik *pushover* cukup akurat untuk memprediksi kinerja struktur karena pada dinamik *time history* gempa yang diberikan pada bangunan masih kecil sehingga tidak bisa memprediksi dimana kelelahan pertama terjadi.

KATA KUNCI Gempa; SRPMK; *Pushover*; *Time history*; *Immediate Occupancy*

1 PENDAHULUAN

Latar Belakang. Indonesia berada di wilayah tektonik yang sangat aktif, dibelah oleh banyak sesar aktif dan dibingkai oleh tiga lempeng besar. Sebelah utara adalah Lempeng Eurasia, sebelah timur adalah Lempeng Pasifik, dan sebelah selatan dan barat adalah Lempeng Indo-Australia. Hal ini berakibat pada banyaknya kejadian gempa bumi di wilayah Indonesia.

Pada prinsipnya gempa bumi tidaklah membunuh atau dapat menimbulkan korban jiwa. Yang membunuh atau dapat menimbulkan korban jiwa adalah lingkungan sekitar seperti bangunan yang runtuh menimpa manusia. Sifat bahan beton bertulang yang getas pada dasarnya tidak cocok digunakan pada struktur bangunan yang berada di wilayah yang rawan gempa bumi. Namun, dengan

menerapkan *detailing* penulangan yang baik dan tepat, maka akan membuat bahan beton bertulang dapat berperilaku daktile, sehingga bahan beton bertulang tetap dapat digunakan dalam struktur bangunan tahan gempa.

Oleh karena itu pada penelitian ini akan membahas tentang desain struktur stadion bola basket tahan gempa dengan SRPMK dan analisis kinerja struktur stadion yang sudah direncanakan dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) untuk mengetahui perilaku inelastis struktur dan level kinerja struktur stadion tersebut. Analisis Kinerja Struktur akan menggunakan Analisis Statis Non-Linier *Pushover* dan Analisis Dinamis Non-Linier *Time History*. Dari hasil kedua analisis tersebut akan dilakukan perbandingan mana yang lebih

akurat untuk memprediksi kinerja struktur stadion.

Tujuan dan Manfaat. Tujuan dari Penelitian ini sebagai berikut: 1) Mendesain struktur rangka atap stadion bola basket, 2) Mendesain struktur atas stadion bola basket, 3) Mengevaluasi kinerja struktur stadion bola basket, 4) Membandingkan analisis statis non linier *pushover* dan analisis dinamis non linier *time history*.

Manfaat dari Tugas Akhir ini sebagai berikut: 1) Mengetahui prosedur desain struktur rangka atap stadion bola basket, 2) Mengetahui prosedur desain struktur atas stadion bola basket, 3) Mengetahui level kinerja struktur stadion bola basket, 4) Mengetahui mana yang lebih akurat antara analisis statis non linier *pushover* dan analisis dinamis non linier *time history*.

Tinjauan Pustaka. Pada struktur baja AISC menetapkan *Direct Analysis Method* (DAM) sebagai cara analisis baru pada struktur baja yang telah memasukkan prinsip modern dalam analisis stabilitas [1]. Memang untuk itu diperlukan analisis struktur berbasis komputer.

DAM dibuat untuk mengatasi keterbatasan *Effective Length Method* (ELM) yang merupakan strategi penyederhanaan analisis manual. Akurasi DAM dapat diandalkan karena memakai komputer dan mensyaratkan program analisis struktur yang dipakai, seperti: a) Dapat memperhitungkan deformasi komponen-komponen struktur dan sambungannya yang mempengaruhi deformasi struktur keseluruhan. Deformasi komponen yang dimaksud berupa deformasi akibat lentur, aksial dan geser. b) Pengaruh Orde ke-2 ($P - \Delta$ dan $P - \delta$) perlu diperhitungkan dalam mencari gaya-gaya internal batang.

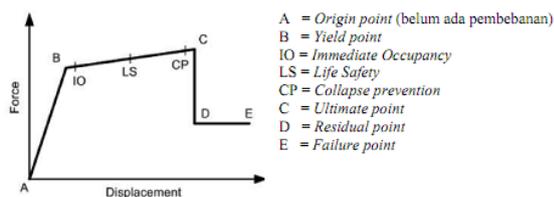
Pada struktur beton untuk SRPMK ada beberapa persyaratan yang perlu dipenuhi. **Persyaratan Detailing Komponen Struktur Lentur.** *Persyaratan Gaya dan Geometri.* a) Bentang bersih komponen struktur tidak boleh kurang dari empat kali tinggi efektifnya (lentur). b) Perbandingan lebar terhadap

tinggi komponen struktur tidak boleh kurang dari 0,3. c) Lebar penampang haruslah ≥ 250 mm. *Persyaratan Tulangan Lentur.* a) Masing-masing luas tulangan atas dan bawah harus lebih besar dari luas tulangan minimum yang disyaratkan, yaitu $(0,25b_w d \sqrt{f_c'})/f_y$ atau $(1,4b_w d)/f_y$ dengan b_w dan d masing-masing adalah lebar dan tinggi efektif penampang komponen lentur. Rasio tulangan lentur maksimum (ρ_{maks}) juga dibatasi sebesar 0,025. b) Kuat lentur positif balok pada muka kolom harus lebih besar atau sama dengan setengah kuat lentur negatifnya. Kuat lentur negatif dan positif pada setiap penampang di sepanjang bentang tidak boleh kurang dari seperempat kuat lentur terbesar pada bentang tersebut. c) Sambungan lewatan untuk penyambungan tulangan lentur harus diberi tulangan spiral atau sengkang tertutup di sepanjang sambungan tersebut. d) Sambungan lewatan tidak boleh digunakan pada daerah hubungan balok-kolom, daerah hingga jarak dua kali tinggi balok dari muka kolom, dan lokasi-lokasi yang berdasarkan basil analisis, memperlihatkan kemungkinan terjadinya leleh lentur akibat perpindahan lateral inelastis struktur portal bangunan. *Persyaratan Tulangan Transversal.* a) Sambungan lewatan tidak boleh digunakan pada daerah hingga dua kali tinggi balok diukur dari muka tumpuan, di sepanjang daerah dua kali tinggi balok pada kedua sisi dari suatu penampang yang berpotensi membentuk sendi plastis. b) Sengkang tertutup pertama harus dipasang tidak lebih dari 50 mm dari muka tumpuan. Spasi sengkang tertutup tidak boleh melebihi $d/4$, enam kali diameter terkecil tulangan memanjang, 150 mm.

Detailing Komponen Struktur Kombinasi Lentur dan Beban. *Persyaratan Geometri.* a) Ukuran penampang terkecil tidak kurang dari 300 mm. b) Perbandingan antara ukuran terkecil penampang terhadap ukuran dalam arah tegak lurus tidak kurang dari 0,4. *Persyaratan Tulangan Lentur.* Berdasarkan SNI 2847-2013, tulangan lentur kolom harus memenuhi beberapa persyaratan berikut: a) Rasio penulangan dibatasi minimum tidak boleh kurang dari 0,01 dan maksimum tidak

boleh lebih dari 0,06. b) Sambungan mekanis tipe 1 untuk penyambungan tulangan lentur (dengan kekuatan 125% kuat leleh batang tulangan yang disambung) tidak boleh ditempatkan di lokasi yang berpotensi membentuk sendi plastis, kecuali sambungan mekanis tipe 2 (yaitu sambungan mekanis dengan kekuatan yang lebih kuat dari kuat tarik batang tulangan yang disambung). c) Sambungan las untuk penyambungan tulangan lentur (dengan kekuatan 125% kuat leleh batang tulangan yang disambung) tidak ditempatkan di lokasi yang berpotensi membentuk sendi plastis. d) Sambungan lewatan hanya diizinkan di lokasi setengah panjang elemen struktur yang berada di tengah, direncanakan sebagai sambungan lewatan tarik, dan harus diikat dengan tulangan spiral atau sengkang tertutup yang direncanakan sesuai ketentuan tulangan transversal. *Persyaratan Tulangan Transversal.* Berdasarkan SNI Beton, spasi tulangan transversal yang dipasang di sepanjang daerah yang berpotensi membentuk sendi plastis (yaitu di ujung-ujung kolom) tidak boleh lebih dari: a) Seperempat dimensi terkecil komponen struktur, b) Enam kali diameter tulangan longitudinal, dan c) $s_x = 100 + (350 - h_x)/3$, Nilai s_x pada persamaan di atas dibatasi maksimum 150 mm dan tidak perlu lebih kecil dari 100 mm.

Teori Performa Kriteria. Berdasarkan FEMA 356, ditentukan level kinerja struktur gedung berdasarkan kondisi sendi plastis yang terbentuk, mulai dari *operational* dimana tidak ada kerusakan apa pun sampai dengan *failure*. Berikut diberikan penjelasan dari level kinerja berdasarkan sendi plastisnya. [2]



Gambar 1 Kondisi sendi plastis

Dalam FEMA 451B pun dijelaskan bahwa untuk analisis gedung yang didesain dengan

beban gempa 2500 tahun atau peluang terjadinya 2% dalam 50 tahun [3], direkomendasikan untuk dilakukan analisis non linier dengan melihat performa gedung saat kondisi beban MCER (*Maximum Considered Earthquake Risk*) tercapai. Target level kinerja (*performance objectives*) untuk gedung yang direncanakan dengan beban gempa 500 tahun, target level kinerjanya harus mencapai *Life Safety*. Sedangkan beban gempa 2500 tahun kondisi level kinerjanya diizinkan mencapai *Collapse Prevention*. Tetapi untuk tujuan keamanan, FEMA 451B menyebutkan bahwa target level kinerja dapat ditingkatkan. Untuk gedung dengan beban gempa 500 tahun harus mencapai level *Operational (Immediate occupancy)*. Sedangkan untuk beban gempa 2500 tahun target level kinerja adalah *Life Safety*.

2 METODOLOGI

Lokasi dan Parameter Gempa Desain Spektra. Lokasi studi kasus pada penelitian ini terletak di Padang Panjang dengan koordinat lintang = -0.470299 dan bujur = 100.4028511. Pada lokasi ini memiliki parameter respons spektrum sebagai berikut dengan kondisi tanah di asumsikan tanah lunak.



Gambar 2 Lokasi studi kasus



Gambar 3 Respons spektrum Padang Panjang

Tabel 1 Parameter gempa desain spektra

Tanah Lunak			
PGA (g)	0,624	PSA (g)	0,561
S_s (g)	1,557	S_{MS} (g)	1,401
S_1 (g)	0,612	S_{M1} (g)	1,468
C_{RS}	1,024	S_{DS} (g)	0,934
C_{R1}	0,945	S_{D1} (g)	0,978
F_{PGA}	0,9	T_0 (detik)	0,209
F_A	0,9	T_s (detik)	1,047
F_V	2,4	PSA (g)	0,561

Metode Analisis Data. Adapun metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan rumusan masalah yaitu analisis kuantitatif yang dilakukan dengan metode perhitungan matematis sesuai dengan kegunaannya.

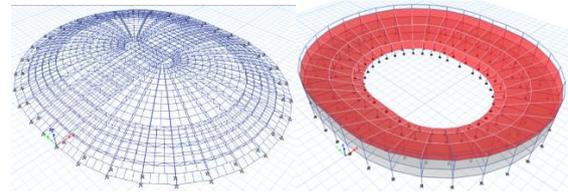
Analisis Statis Non Linier. Analisis statis non linier merupakan salah satu dari prosedur analisis untuk pengolahan data menjadi lebih mudah dimengerti dari suatu permasalahan. Tujuan utama dari analisis statis non linier yaitu untuk meramalkan perilaku struktur terhadap beban lateral seismik dan untuk mengetahui letak posisi struktur akan leleh ketika terkena beban lateral.

Analisis Dinamis Non Linier. Analisis dinamis non linier adalah analisa yang menggunakan *input akselerogram* untuk mendapatkan respons dinamis suatu struktur. Deformasi plastis yang terjadi pada elemen struktur tergantung pada sejarah pembebanan. Menggunakan Data percepatan gempa asal yang digunakan sebagai data awal adalah percepatan dari gempa Imperial Valey (1940), Northridge AS (1994), Kobe Jepang (1995). Data percepatan maksimum dan durasi dari data Tabel 2.

Selanjutnya lakukan Cek Kuat Nominal Terhadap AISC 2010. **Baja Pipa $D = 165,2 \text{ mm}$, $L = 2,9 \text{ m}$, $f_y = 250 \text{ MPa}$.** Penampang Kompak, Ketentuan F8 (AISC 2010) terhadap leleh. $M_n = f_y \times Z = 38,02 \text{ kNm}$. Kapasitas maksimum $P_n = 754 \text{ kN}$. **Baja Pipa $D = 139,8 \text{ mm}$, $L = 2,9 \text{ m}$, $f_y = 250 \text{ MPa}$.** Penampang Kompak, Ketentuan F8 (AISC 2010) terhadap leleh. $M_n = f_y \times Z = 22,03 \text{ kNm}$. Kapasitas maksimum $P_n = 516 \text{ kN}$.

percepatan gempa yang sudah diskalakan dengan respons spektrum desain di Padang Panjang.

Pemodelan struktur atap dan struktur atas seperti diperlihatkan pada Gambar 4.

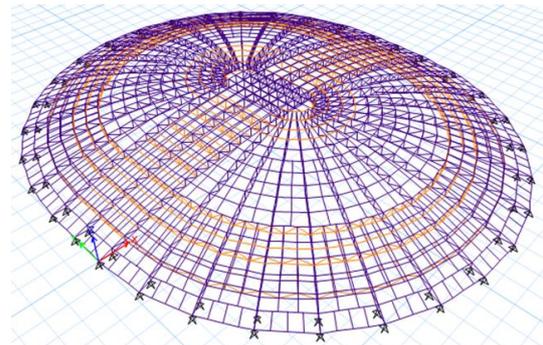


Gambar 4 Tampak 3D struktur

Kombinasi pembebanan mengikuti SNI 1726:2012 Pasal 4.2.2. [4]

3 PERENCANAAN STRUKTUR ATAP DAN STRUKTUR ATAS

Perencanaan Struktur Atap. Dilakukan terlebih dahulu adalah permodelan struktur atap menggunakan ETABS 16 sebagaimana pada Gambar 5.



Gambar 5 Aplikasi baja pada model struktur

Lalu dilakukan pembebanan terhadap struktur atap dengan kombinasi pembebanan. Maka didapatkan profil baja *hollow* yang dapat memikul kombinasi beban tersebut sebagaimana

Maka dari kedua kapasitas maksimum pipa baja yang digunakan dapat memikul beban terfaktor yang dihasilkan kombinasi pembebanan sebesar 400 kN yang membebani pipa baja $D165,2$ dan 100 kN yang membebani pipa baja $D139,8$.

Perencanaan Struktur Atas SRPMK. Data Struktur Atas SRPMK. Berikut ini data-data struktur atas stadion olahraga yang akan direncanakan, Tipe bangunan: Stadion olahraga bola basket; Lokasi rencana bangunan: Padang Panjang; Kategori Desain

Tabel 2 Profil baja hollow

Outside Diameter (mm)	Wall Thickness (mm)	Weight (kg/m)	Sectional Area (cm ²)	Moment of Inertia (cm ⁴)	Section Modulus (cm ³)	Radius of Gyration (cm)	Warna
165,2	7	27,3	34,79	1090	132	5,6	
139,8	6	19,8	25,22	566	80,9	4,74	

Seismik: D; Tebal pelat lantai dan tribun: 30 cm dan 35 cm; Tinggi tegak lurus kolom: 4 m; Mutu beton (f_c): 30 MPa; Mutu baja (f_y): 400 MPa.

Desain Balok SRPMK. Dimensi dan Panjang Balok sesuai dengan Tabel 3.

Tabel 3 Dimensi dan panjang balok

No	Nama Balok	L (mm)	h (mm)	b (mm)
1	B-T	9960	900	500
2	B-T2	4500	600	400
3	B-L1	7000	700	400
4	B-L2	7000	700	400
5	B-L3	7000	700	400
6	B-L4	8700	700	500
7	B-At	8700	600	400
8	B-Lu	8500	700	400
9	B-Pe	4000	400	300

Dimensi tersebut diperoleh dari ETABS 16 dimana dimensi tersebut menghasilkan modal participating mass ratio di atas 90%.

Desain tulangan lentur negatif dan positif balok. Dari hasil perhitungan kebutuhan tulangan balok diperlihatkan pada Tabel 4.

Tabel 4 Luas tulangan terpakai

Nama Balok	Tulangan Negatif	Tulangan Positif
	Balok Lapis 1	Balok Lapis 1
B-T	9D22	5D22
B-T2	8D22	3D22
B-L1	8D22	4D22
B-L2	7D22	3D22
B-L3	7D22	4D22
B-L4	8D22	4D22
B-At	6D16	3D16
B-Lu	9D22	5D22
B-Pe	4D16	3D16

Tulangan sengkang (*hoops*). SNI Pasal 21.5.3.1: diperlukan *hoops* (sengkang tertutup) di sepanjang jarak $2h$ dari sisi muka kolom terdekat, $2h = 2(900) = 1800$ mm. SNI Pasal 21.5.3.1: *Hoops* pertama dipasang 50 mm dari muka kolom terdekat, dan yang berikutnya dipasang dengan spasi tidak

perlu sampai kurang dari 100 mm maka diambil jarak *hoops* untuk semua balok didaerah plastis diperlihatkan pada Tabel 5.

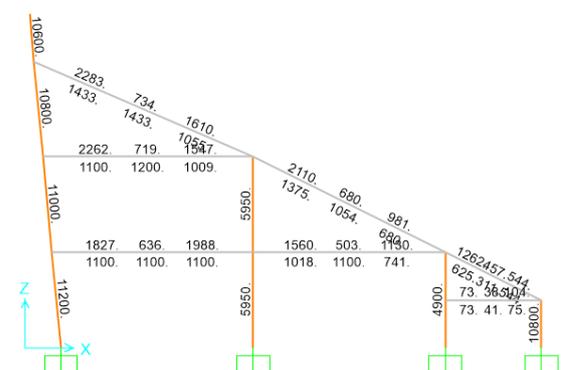
Tabel 5 Hoops di daerah $2h$ terpakai

Nama Balok	(D) mm	Jumlah	s (mm)
B-T	13.0	2.0	120
B-T2	13.0	2.0	120
B-L1	13.0	2.0	130
B-L2	10.0	2.0	130
B-L3	13.0	2.0	130
B-L4	13.0	2.0	130
B-At	10.0	2.0	100
B-Lu	13.0	2.0	130
B-Pe	13.0	2.0	100

SNI Pasal 21.5.3.4: Spasi maksimum tulangan geser di sepanjang balok SRPMK adalah $d/2$, maka didapat jumlah, jarak, dan dimensi tulangan sengkang yang digunakan.

Desain Kolom SRPMK. Gaya aksial terfaktor maksimum yang bekerja pada kolom melebihi $A_g f_c' / 10$. Jika P_u kurang dari $A_g f_c' / 10$, maka gunakan hasil dari $A_g f_c' / 10$ sebagai gaya aksial desain dengan $f_c' = 30$ MPa.

Dari hasil perhitungan analisis ETABS didapat jumlah kebutuhan tulangan minimum kolom sebagaimana



Gambar 6 Kebutuhan tulangan memanjang kolom

SNI Beton Pasal 21.6.4.1, tulangan *hoops* tersebut diperlukan sepanjang l_o dari ujung-

Tabel 6 Syarat gaya aksial terfaktor

Kolom	h (mm)	b (mm)	Ag (mm ²)	$A_g f'_c / 10$ (kN)	Ket
K1-D	1400	800	1120000	3360	OK
K1-M	1375	800	1100000	3300	OK
K1-U	1350	800	1080000	3240	Gunakan $A_g f'_c / 10$
K1-At	1325	800	1060000	3180	Gunakan $A_g f'_c / 10$
K2-D	700	700	595000	1785	OK
K2-U	700	700	595000	1785	OK
K3	600	600	490000	1470	OK
K4	1200	900	1080000	3240	Gunakan $A_g f'_c / 10$

ujung kolom, dipilih yang terbesar diantara berikut ini: a) Tinggi elemen kolom, b) 1/6 tinggi bersih kolom, c) 450 mm. Maka diambil l_o sebagaimana pada Tabel 9.

Tabel 7 Syarat tulangan memanjang kolom

Kolom	As butuh (mm ²)	Tulangan Terpakai		
		Jumlah	D (mm)	As (mm ²)
K1-D	11200	28	25	13744.5
K1-M	11000	28	25	13744.5
K1-U	10800	28	25	13744.5
K1-At	10600	28	25	13744.5
K2-D	5950	20	22	7602.7
K2-U	5950	20	22	7602.7
K3	4900	16	22	6082.1
K4	10800	28	25	13744.5

Tabel 8 Tulangan *hoops* yang digunakan

Kolom	Tulangan			s (mm)	As (mm ²)
	Jumlah	D	s (mm)		
K1-D	8	D	13	100	1062
K1-M	8	D	13	100	1062
K1-U	8	D	13	100	1062
K1-At	8	D	13	100	1062
K2-D	6	D	13	120	796
K2-U	6	D	13	120	796
K3	4	D	13	120	531
K4	8	D	13	100	1062

Tabel 9 l_o terpakai

Kolom	h (mm)	1/6 tk (mm)	450 (mm)
K1-D	1400	667	450
K1-M	1375	667	450
K1-U	1350	667	450
K1-At	1325	417	450
K2-D	850	667	450
K2-U	850	667	450
K3	700	667	450
K4	1200	333	450

SNI Beton Pasal 21.7.2.3, Panjang join yang diukur paralel terhadap tulangan lentur balok yang menyebabkan geser di join sedikitnya 20 kali d_b longitudinal terbesar. Lalu penulangan *Confinement* pada join mengikuti SNI Beton Pasal 21.7.3.1 Harus ada tulangan *confinement* dalam join. SNI

Beton Pasal 21.7.3.2 Untuk join interior, jumlah tulangan *confinement* yang dibutuhkan setidaknya setengah tulangan *confinement* yang dibutuhkan di ujung-ujung kolom dan *vertical hoops* diizinkan menggunakan spasi maksimum 150 mm.

Desain Pelat. Gunakan tulangan diameter (D) = 13 mm dengan spasi (s) = 100 mm. $A_s = (1/4)\pi D^2 (b/s) = 1327.7 \text{ mm}^2$. Dengan cara yang sama untuk pelat dan arah lainnya maka didapat tulangan pelat sebagaimana pada Tabel 10.

Tabel 10 Tebal pelat dan tulangan pelat

Pelat	Arah	Tebal Pelat	Tulangan Pelat	Spasi (mm)
		(mm)		
Tribun	x	350	D13	100
Tribun	y	350	D13	90
Biasa	x	300	D13	80
Biasa	y	300	D13	75

4 ANALISIS KINERJA STRUKTUR

Analisis Modal. SNI 03-1726-2012 Pasal 7.9.1 disebutkan bahwa analisis harus dilakukan untuk menentukan ragam getar alami struktur. Analisis harus menyertakan jumlah ragam yang cukup untuk mendapatkan partisipasi massa ragam terkombinasi sebesar paling sedikit 90 persen dari massa aktual dalam masing-masing arah horizontal ortogonal dari respons yang ditinjau oleh model.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, jumlah partisipasi massa pada mode ke 8 untuk struktur bangunan stadion tersebut sudah mencapai 90 %.

Dari hitungan C_s hitungan di atas diperoleh nilai $R = 7.12$ untuk struktur bangunan stadion, Sehingga nilai C_s menjadi batasan

Tabel 11 Partisipasi massa dan faktor *direction modal*

Mode	Period sec	Sum UX	Sum UY	Sum RX	Sum RY	Sum RZ	UX	UY	RZ
1	0.570	0.8735	0	0	0.1405	2.2E-06	1	0	0
2	0.567	0.8735	0.0001	9.79E-06	0.1405	0.8883	0	0	1
3	0.559	0.8735	0.8932	0.1199	0.1405	0.8884	0	1	0
4	0.256	0.9801	0.8932	0.1199	0.8747	0.8884	1	0	0
5	0.234	0.9801	0.8957	0.1404	0.8747	0.9792	0	0	1
6	0.232	0.9801	0.982	0.8685	0.8747	0.9818	0	1	0
7	0.152	1	0.982	0.8685	1	0.9818	1	0	0
8	0.141	1	0.9833	0.9078	1	0.9988	0	0.068	0.932
9	0.141	1	1	1	1	1	0	0.931	0.069

Tabel 12 Nilai faktor respons gempa minimum hitungan dan maksimum

Story	$C_{s\ min}$	$C_{s\ calculate}$	$C_{s\ max}$	Keterangan
Lantai 4	0.025177481	0.072580645	0.071526933	Gunakan $C_{s\ max}$

dan nilai R didapat dari proses hitungan. Berdasarkan hitungan di atas, nilai C_s minimum adalah sebesar 0,0252. Sehingga nilai R apabila menggunakan C_s minimum adalah sebesar 0,71 dan nilai *base shear* nya adalah $V = 0,0252W$.

Evaluasi Beban Gempa. Evaluasi beban gempa berdasarkan SNI 1726:2012 ditentukan dengan persamaan $V = 0.0251W$. Berat struktur W diperoleh dengan menghitung beban mati sebesar 100% dan beban hidup sebesar 30%.

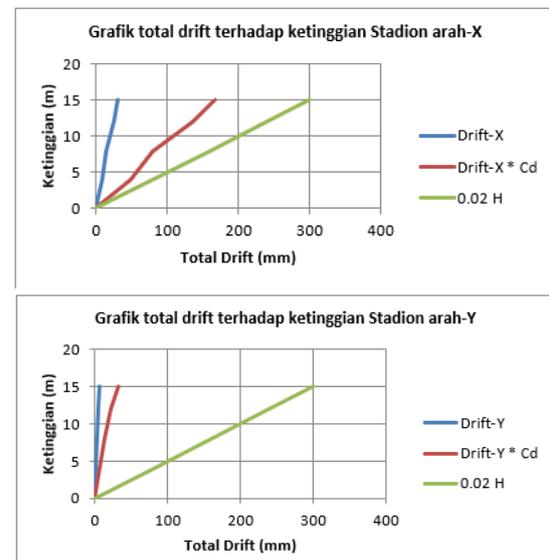
SNI 1726:2012 menyatakan bahwa nilai akhir respons dinamik struktur bangunan gedung terhadap pembebanan gempa nominal dalam suatu arah tertentu, tidak boleh diambil kurang dari 85 % nilai respons ragam yang pertama.

Dari hasil perhitungan gaya geser dasar struktur statik dan dinamik, dapat diketahui bahwa nilai $V_{dinamik}$ respon spektra lebih besar dari $0.85V_{statik}$, maka V dinamik akibat respon spektra tidak perlu lagi dikalikan dengan faktor koreksi sedangkan V dinamik akibat analisis riwayat waktu V dinamiknya lebih kecil dari $0,85 V$ statik maka gempa dinamik tersebut harus dikalikan dengan faktor koreksi skala sebesar $0.85 V$ statik dibagi dengan V dinamik akibat analisis riwayat waktu untuk masing-masing arah.

Evaluasi Kinerja Struktur. Pada Pasal 7.8.6 SNI 1726:2012 disebutkan bahwa penentuan simpangan antar lantai tingkat

desain harus dihitung sebagai perbedaan defleksi pada pusat massa ditingkat teratas dan terbawah yang ditinjau.

Besarnya nilai simpangan antar tingkat yang diizinkan, ditentukan berdasarkan SNI 1726-2012. Berikut merupakan grafik simpangan pada arah-x dan arah-y.



Gambar 7 Grafik total drift terhadap ketinggian bangunan

Dapat dilihat pada Gambar 7 besarnya perpindahan horizontal akibat beban gempa arah x adalah 30.3 mm. Sedangkan perpindahan horizontal maksimum setelah dikalikan nilai C_d sebesar 5 adalah 166.65 mm. Nilai tersebut masih di bawah batas maksimum 2% sebesar 3000 mm. Untuk beban gempa arah y adalah 31,9 mm,

Tabel 13 Pengecekan gaya geser sebelum dikoreksi

Story	Tipe Beban Gempa	Fx (kN)	Fy (kN)	85 % Statik X (kN)	85 % Statik Y (kN)	
3 lantai	Statik	EQ-X	2699.916	809.9749	2294.92894	688.478665
		EQ-Y	809.9749	2699.916	688.478665	2294.92894
	Dinamik	RSP-X	2378.993	727.5488		
		RSP-Y	713.698	2425.163		
		TH-X	944.8763	313.2718		
		TH-Y	283.4629	1044.239		

Tabel 14 Pengecekan gaya geser setelah dikoreksi

Story	Tipe Beban Gempa	Fx (kN)	Fy (kN)	85 % Statik X (kN)	85 % Statik Y (kN)	
3 lantai	Statik	EQ-X	2699.9164	809.9749	2294.92894	688.478665
		EQ-Y	809.9749	2699.9164	688.478665	2294.92894
	Dinamik	RSP-X	2378.9934	727.5488		
		RSP-Y	713.698	2425.1628		

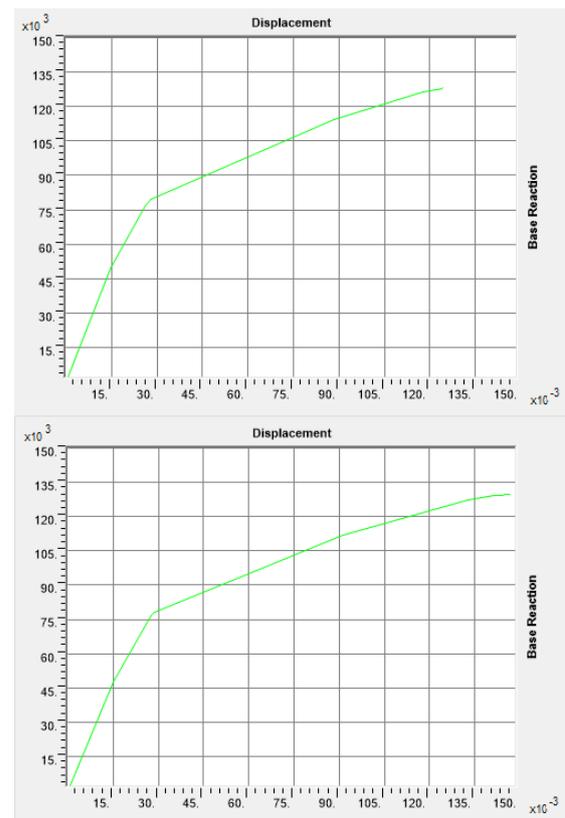
dikalikan nilai C_d nya sebesar 5,8 adalah 185.02 mm dan masih jauh dibawah nilai batas maksimum 2% sebesar 3000 mm.

Pengaruh P-Delta. Berdasarkan SNI 1726-2012 pasal 7.8.7, suatu struktur gedung yang nilai koefisien stabilitas (θ) nya melebihi θ_{maks} harus dipertimbangkan terhadap pengaruh P-Delta, yaitu gejala yang terjadi pada struktur gedung fleksibel, dimana simpangan ke samping yang besar akibat beban gempa lateral menimbulkan beban lateral tambahan akibat momen guling yang terjadi oleh beban gravitasi yang titik tangkapnya menyimpang ke samping. Selain itu, efek P-Delta juga dapat didefinisikan sebagai pengaruh geometri terhadap respons struktur akibat gaya normal tekan. $\theta = (P_x \Delta I) / (V_x h_{sx} C_d)$.

Hasil Analisis Statik Pushover. Hasil analisis *pushover* adalah berupa kurva kapasitas (*capacity curve*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.7.1 dan 5.7.2. Dari kurva tersebut dapat diketahui karakteristik dari struktur dan juga besarnya gaya geser dasar saat tercapainya masing-masing level kinerja. Berikut diberikan kurva kapasitas hasil analisis *pushover* untuk masing-masing sistem struktur.

Dari kurva bilinear untuk arah x dan y dapat disimpulkan bahwa Kapasitas ultimit struktur stadion masih dapat menerima tambahan gaya dan perpindahan yang lebih besar daripada beban gempa rencana, dan

dari hasil analisis statik *pushover* juga dapat dilihat bahwa ada cadangan daktilitas yang cukup besar sampai kondisi ultimit tercapai, meskipun nilai R dan C_d yang didapat lebih kecil dari nilai R dan C_d rencana.



Gambar 8 Kurva pushover arah-X dan arah-Y

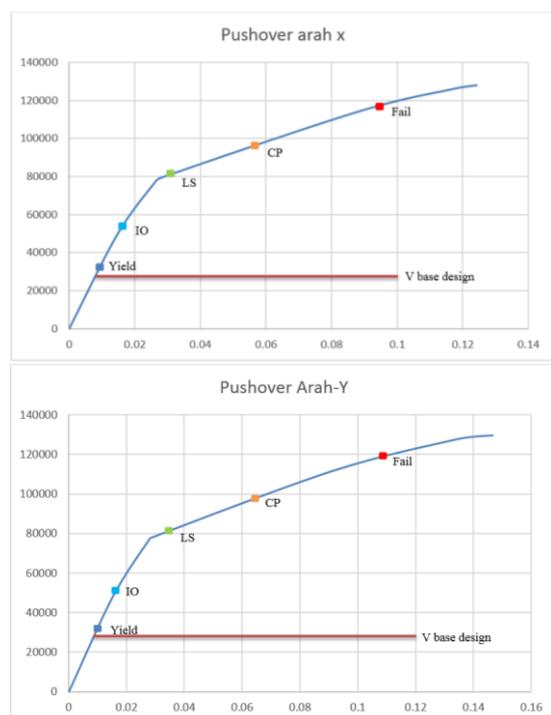
Penentuan Parameter Beban Gempa (R , Ω_0 , dan C_d). Berdasarkan kurva *pushover* (kurva kapasitas) yang telah diperoleh sebelumnya, dapat diketahui bagaimana kinerja dan perilaku struktur secara

Tabel 15 Perhitungan P-Delta arah X untuk struktur bangunan stadion

Lantai	Height (mm)	Px	Δ	Vx	θ	β	θ_{max}	Ket
4	3000	14657.67478	21.8	2583.646	0.00618	0.870452	0.114883	Ok
3	4000	14724.04438	16.3	2968.167	0.00404	0.91681	0.109074	Ok
2	4000	14895.14038	11.5	3237.495	0.00265	0.952308	0.105008	Ok
1	4000	14994.27728	7	3399.629	0.00154	0.978618	0.102185	Ok

Tabel 16 Perhitungan P-Delta arah Y untuk struktur bangunan stadion

Lantai	Height (mm)	Px	Δ	Vx	θ	β	θ_{max}	Ket
4	3000	14657.67478	16.9	3028.2508	0.00409	0.864543	0.11565	Ok
3	4000	14724.04438	13	3502.715	0.00273	0.911069	0.10974	Ok
2	4000	14895.14038	9.5	3844.6187	0.00184	0.947298	0.10555	Ok
1	4000	14994.27728	6.1	4058.5066	0.00113	0.975243	0.10253	Ok



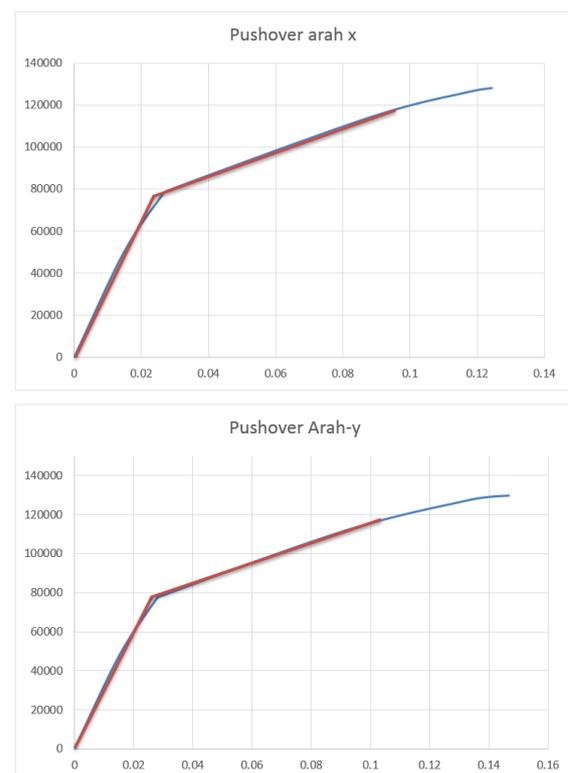
Gambar 9 Level kinerja struktur bangunan stadion arah-X dan arah-Y

Tabel 17 Kondisi pembatas level kinerja

Struktur Stadion		
Level Kinerja	Drift (m/m)	Vb (KN)
Yield	26%	35.100
IO	50%	54.000
LS	60%	81.000
CP	82%	97.200
Fail	88%	118.800

menyeluruh. Berdasarkan kurva tersebut dapat dicari berapa nilai faktor modifikasi respons gempa (R) masing-masing tipe struktur, faktor kuat lebih (Ω_0), dan faktor pembesaran defleksi (C_d). Berdasarkan

perhitungan nilai faktor modifikasi beban gempa untuk struktur stadion dengan SRPMK untuk kasus stadion adalah sebagaimana pada Tabel 18.



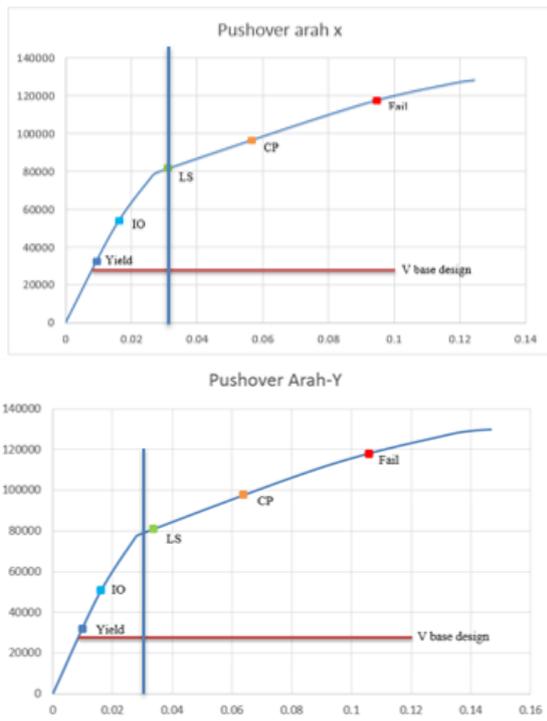
Gambar 10 Kurva bilinear struktur bangunan stadion arah-X dan arah-Y

Tabel 18 Faktor respons gempa

	Arah-x	Arah-y
R	= 5,4	R = 6,1
Ω_0	= 2,0	Ω_0 = 2,0
C_d	= 3,4	C_d = 3,4

Displacement Coefficient Method (FEMA 356). Merupakan metode utama yang

terdapat dalam FEMA 356 untuk prosedur statik non linier. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier dari sistem SDOF ekuivalen dengan faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 dan C_3 sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut "performance point", δ_T . Berikut hasil *Performance Point* struktur stadion menurut FEMA 356.

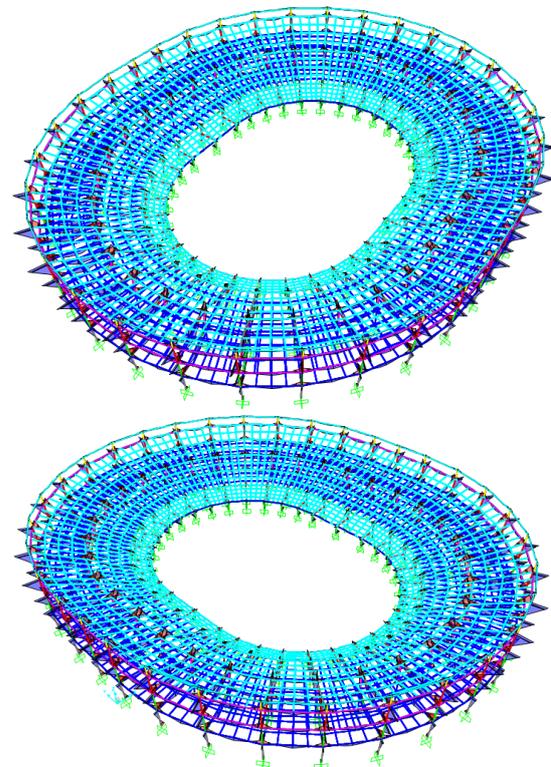


Gambar 11 *Performance point* struktur arah X dan Y stadion menurut FEMA

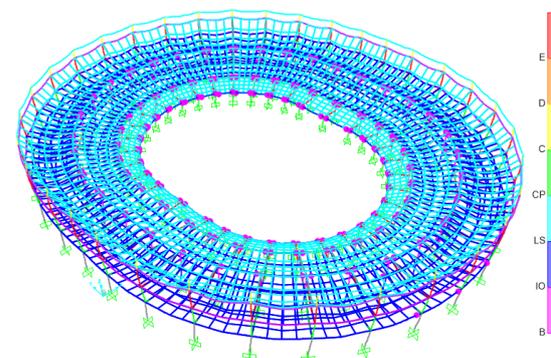
Hasil arah-x tersebut level kinerja menurut FEMA 356 adalah LS (*Life Safety*). Level tersebut sesuai dengan batas kinerja yang disyaratkan yaitu LS (*life safety*) untuk beban gempa 2500 tahun. Elemen struktur yang mencapai level kinerja LS adalah pada balok tepi. Dan hasil arah-y tersebut level kinerja menurut FEMA 356 adalah IO (*Immediate Occupancy*) menuju LS (*Life Safety*). Level tersebut masih dibawah batas kinerja yang disyaratkan yaitu LS (*life safety*) untuk beban gempa 2500 tahun. Elemen struktur yang mencapai level kinerja IO adalah pada struktur balok tengah. Selengkapnya dapat dilihat pada Gambar 13.

Konsep Equal Energy. Konsep ini menggunakan pendekatan energi disipasi

ekuivalen antara energi disipasi struktur elastik akibat gempa rencana dengan energi disipasi struktur yang mencapai kondisi inelastik.



Gambar 12 Momen yang terjadi akibat pushover arah-X dan arah-Y

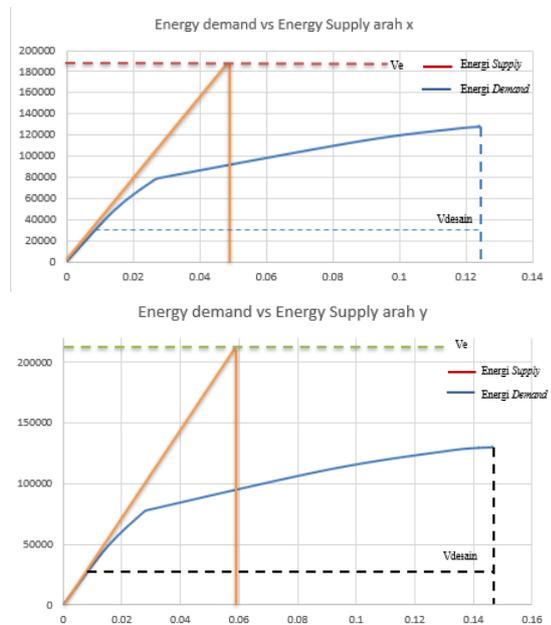


Gambar 13 Letak pembentukan sendi plastis pertama pada balok miring

Target akhir dari analisis dengan prinsip *equal energy* adalah energi disipasi elastik dan inelastik yang dibuat sama besar. Perhitungan energi tersebut dilakukan dengan menghitung luasan area di bawah kurva kapasitas.

Besarnya gaya geser dasar elastik dari beban gempa MCER pada struktur arah x adalah sebesar 189.983 kN dan struktur

arah y adalah sebesar 219.564 kN. Dengan batasan $V_{b\text{MCER}}$ tersebut dapat dibentuk suatu luasan segitiga yang berarti nilai energi *demand* akibat gempa. Luasan energi tersebut harus mampu di *supply* oleh gedung yang dapat digambarkan melalui kurva kapasitas.



Gambar 14 Kurva *equal energy* struktur arah-X dan arah-Y

Namun perhitungan energi *demand* tersebut tidak sederhana, karena apabila besarnya energi langsung dihitung berdasarkan gaya geser elastik akibat beban gempa 2500 tahun maka nilai energi tersebut akan sangat besar. Sehingga saat diplotkan pada kurva *pushover* akan membutuhkan deformasi (drift) yang lebih besar dari batasan fail untuk moment frame dan *immediate occupancy* (IO) untuk arah x agar luasan kurva elastik dan inelastik menjadi sama.

Terjadi perbedaan hasil antara kedua pendekatan yang sudah dilakukan dengan *performance point* dan *equal energy*. Hal ini dikarenakan dalam perhitungan energi *demand* belum memperhitungkan kontribusi dari *plastifikasi* elemen sehingga nilai gaya geser elastik tersebut akan menjadi besar.

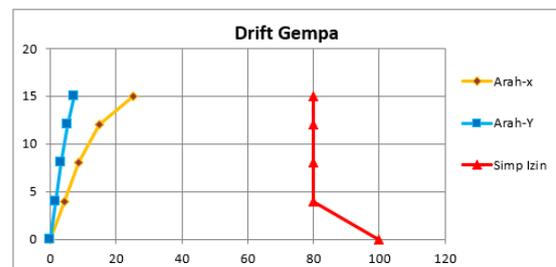
Hasil Analisis Non Linear Time History.

Hasil yang ditinjau meliputi level kinerja gedung dan *drift* maksimum yang terjadi

setelah gedung mengalami beban gempa. Berikutnya dilakukan perhitungan parameter inelastik struktur stadion dari hasil analisis dinamik *time history*. Level kinerja gedung ditinjau apakah sudah sesuai dengan level kinerja target bangunan stadion. Dalam penelitian ini yang dianalisis dengan NLTHA.

Evaluasi Kinerja Struktur. Pada Pasal 7.8.6 SNI 03-1726-2012 disebutkan bahwa penentuan simpangan antar lantai tingkat desain harus dihitung tidak boleh melebihi simpangan izin yang ditentukan.

Besarnya nilai simpangan antar tingkat yang diizinkan ditentukan berdasarkan SNI 1726-2012. Berikut merupakan grafik simpangan pada arah-x dan arah-y.



Gambar 15 Grafik total drift terhadap ketinggian bangunan (arah X dan Y)

Level Target Kinerja Struktur. Data percepatan maksimum dan durasi dari data percepatan gempa yang sudah diskalakan dengan respons spektra desain di Padang Panjang dengan kondisi tanah sedang sesuai dengan

Tabel 19 Percepatan maksimum dan durasi dari data gempa yang sudah diskalakan terhadap respons spektra desain

No	Nama Gempa	Akselerasi Maksimum (g)	Durasi (detik)
1	Imperial Valey	0.3587	40
2	Kobe	0.3725	48
3	Northridge	0.3673	40

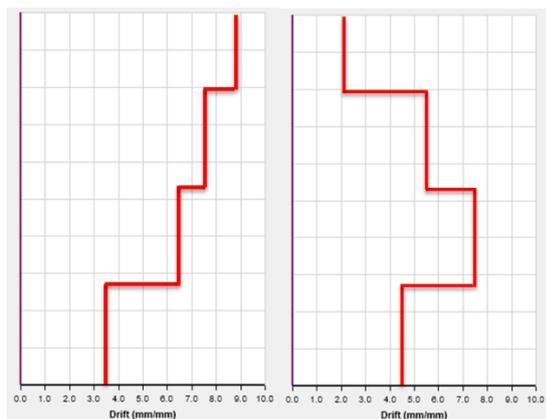
Level kinerja gedung dengan beban gempa yang sudah diskalakan sesuai dengan respons spektra desain adalah IO (*Immediate Occupancy*) dari tiga analisis gempa tersebut. Hal ini cukup sesuai dengan level kinerja hasil dari analisis *pushover* jika *demand* gempa ditentukan dengan metode *capacity spectrum* sesuai

Tabel 20 Respons gedung hasil analisis non linier riwayat waktu dengan beban gempa Padang Panjang terskalakan

No.	Nama Gempa	Level Kinerja	Percepatan Maksimum (g)	Gaya Geser Dasar (kN)		Drift Antar Lantai		Drift Atap Max	
				Arah-X	Arah-Y	Arah-X	Arah-Y	Arah-X	Arah-Y
1	ElCentro	IO	0.19	3465.72255	3457.4568	1.03%	1.09%	0.63%	0.65%
2	Kobe	IO	0.23	3457.3335	3461.3865	1.00%	1.05%	0.53%	0.52%
3	Northridge	IO	0.21	3455.2421	3461.5114	0.91%	0.95%	0.55%	0.53%

FEMA-440. Level kinerja IO dicapai setelah terjadinya kelelahan dimana kelelahan yang terjadi pertama kali adalah pada balok, setelah semua balok mencapai leleh, maka kelelahan selanjutnya terjadi pada kolom.

Drift antar lantai pada masing-masing lantai hasil analisis non linear riwayat waktu dengan beban gempa yang sudah diskalakan dengan respons spektra desain tingkat gempa MCER masih berada di bawah batas maksimum yaitu 3%. Drift antar lantai yang dipakai sebagai acuan adalah drift antar lantai rata-rata dari hasil analisis menggunakan 3 data gempa. Dimana nilai maksimum absolut dari rata-rata hasil analisis 3 data gempa yang sudah diskalakan dengan respons spektra desain tingkat MCER. Dengan begitu drift dari gedung yang didesain masih berada dalam batas yang diizinkan. Drift antar lantai gedung dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16 Drift antar lantai rata-rata arah-X dan arah-Y hasil NLTHA

5 KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

Dari hasil perhitungan struktur rangka atap baja dengan metode DAM (*Direct Analysis Method*) didapat dimensi profil dan kuat nominal baja hollow sebagaimana pada Tabel 21.

Tabel 21 Kuat nominal baja

Profil Baja Hollow	ϕM_n (kNm)	ϕP_n (kNm)
D165.2	38.02	754
D139.8	22.03	516

Struktur atas stadion dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) dengan gaya geser dasar yang bekerja terbukti mampu memberikan kinerja cukup baik terhadap beban gempa yang bekerja. Level kinerja yang dihasilkan dari analisis non linier statik *pushover* dan analisis *time history* untuk masing-masing variasi ketinggian struktur adalah *immediate occupancy* (IO) dimana setelah terjadinya pertama kali adalah pada balok, setelah semua balok mencapai leleh, maka kelelahan selanjutnya terjadi pada kolom dan kondisi gedung hampir sama dengan sebelum gempa terjadi dan dapat digunakan kembali.

Desain struktur atas stadion dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) juga memenuhi persyaratan mekanisme keruntuhan ideal dan menghasilkan perilaku *hysteresis* yang stabil yaitu mekanisme *beam-sway*.

Kapasitas ultimit struktur stadion masih dapat menerima tambahan gaya dan perpindahan yang lebih besar daripada beban gempa rencana, hal ini ditunjukkan oleh kurva bilinear untuk target perpindahan hasil analisis statik *pushover* bahwa ada cadangan daktilitas yang cukup besar sampai kondisi ultimit tercapai, meskipun

nilai R dan C_d yang didapat lebih kecil dari nilai R dan C_d rencana.

Dari sebaran sendi plastis yang terjadi pada elemen-elemen struktur dapat disimpulkan bahwa pada saat kondisi *performance point*, kelelahan yang terjadi hanya pada balok. Setelah itu, kelelahan pada kolom mulai terbentuk sampai mekanisme keruntuhan terjadi.

Perbandingan hasil analisis statik *pushover* dengan analisis dinamik *time history* menunjukkan bahwa analisis statik *pushover* cukup akurat untuk memprediksi kinerja struktur. Sedangkan untuk analisis dinamik *time history* belum cukup baik memprediksi kinerja struktur hal ini disebabkan karena gempa yang diberikan pada bangunan masih kecil sehingga tidak bisa memprediksi dimana kelelahan pertama terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] AISC, ANSI/AISC 360-10 Specification for Structural Steel Buildings, 2010.
- [2] FEMA, FEMA 356 Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, 2000.
- [3] FEMA, FEMA 451B NEHR Recommended Provisions for New Buildings and Other Structures: Training and Instructional Material, 2007.
- [4] BSN, SNI 1726:2012 Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, 2012.



Review Design Box Culvert Terhadap Banjir Sungai Cangk Di Kecamatan Candipuro Kabupaten Lumajang

Rezky Susmono Karuru*¹, Clara Zenicha Lioni¹, Tiffani Mandasari Putri Mantong¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Jalan Soekarno Hatta

*Penulis korespondensi: rezkykaruru@untad.ac.id

DISUBMIT 2 Desember 2024

DIREVISI 11 Desember 2024

DITERIMA 12 Desember 2024

ABSTRAK Dusun Kamar Kajang dulunya merupakan salah satu kawasan padat penduduk di Desa Sumberwuluh, Kecamatan Candipuro adalah kawasan padat penduduk yang rentan terhadap banjir. Hampir setiap tahun, wilayah ini mengalami banjir yang mengakibatkan kerusakan lingkungan dan infrastruktur. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan banjir yang disebabkan oleh luapan Kali Kasin dan mengidentifikasi cakupan area genangan banjir. Pendekatan hidrolika digunakan untuk memodelkan debit air pada setiap segmen sungai dengan bantuan perangkat lunak HEC-RAS. Selain itu, metode GIS dimanfaatkan untuk memvisualisasikan area genangan dan dampak banjir, serta mempersiapkan data spasial seperti geometri sungai, deliniasi daerah aliran sungai, dan kebutuhan analisis spasial lainnya. Data debit Banjir diperoleh dari analisa Hidrologi oleh P2JN dengan periode ulang Q50 tahun sebesar 50 m³/s. Sumber data geometrik diperoleh dari Model Elevasi Digital hasil citra DEMNAS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemodelan banjir berhasil memvisualisasikan daerah genangan di Dusun Kamar Kajang, dan melakukan perencanaan desain Box Culvert sebagai salah satu penanganan banjir di Sungai Cangk. Analisis ini juga merubah desain box culvert eksisting agar mengurangi dampak limpasan baik dari sungai dan jalan.

KATA KUNCI Banjir; HEC-RAS; SIG; Box Culvert

1 PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana alam yang kerap kali terjadi di Indonesia, salah satunya adalah bencana banjir yang terjadi di beberapa wilayah setiap musim penghujan. Sungai Cangk yang terletak di Kabupaten Lumajang merupakan salah satu sungai yang mengalami banjir hampir setiap musim penghujan. Banjir yang terjadi khususnya di sepanjang Sungai Cangk di wilayah Kecamatan Candipuro merendam permukiman warga yang terletak di sepanjang sungai tersebut.

Sejalan dengan perkembangan wilayah perkotaan, terjadi perubahan penggunaan lahan terutama di kota-kota besar. Perubahan yang paling nyata adalah terjadinya alih fungsi dari lahan terbuka menjadi menjadi kawasan terbangun. Adanya perubahan fungsi lahan Kota Malang memberikan dampak pada perubahan tata air wilayah. Perubahan tata air adalah salah satu sebab yang berkaitan erat terhadap peristiwa banjir perkotaan. [1]

Bencana banjir disebabkan oleh beberapa faktor, baik faktor alam maupun manusia [2]. Banjir yang disebabkan oleh faktor alam antara lain karena curah hujan, pengaruh fisiografis, erosi, sedimentasi, kapasitas sungai, kapasitas drainase yang tidak memadai dan pengaruh air pasang. Sedangkan faktor-faktor yang disebabkan oleh manusia adalah perubahan kondisi DAS, kawasan kumuh, sampah, drainase lahan, bendung dan bangunan air, kerusakan bangunan pengendali banjir dan perencanaan sistem pengendalian banjir yang tidak tepat. [3]

Kajian yang berbasis keruangan tidak terlepas dari peranan Sistem Informasi Geografis (SIG) sebagai alat pendukung. SIG merupakan suatu prosedur terkomputerisasi yang digunakan untuk menampilkan, menerima, menyimpan, menganalisa, dan memproses data spasial dan data non-spasial (data atribut) [4]. Penggunaan SIG, pengindraan jauh, dan integrasi dengan perangkat lunak analisis hidrologi seperti HEC RAS dan HEC-GeoRAS



Gambar 1 Metodologi review perencanaan Box Culvert di Sungai Cangka

memberikan kemudahan dalam pemodelan banjir [5].

Data DEM berperan penting untuk pengembangan model komponen basin pada model HEC HMS dan data geometrik dalam model HEC-RAS. Data DEM berperan penting dalam model hidrologi, model hidraulik dan peta persebaran bahaya banjir [6] [7], memprediksi banjir dengan memanfaatkan penginderaan jauh, SIG, dan perangkat lunak analisis hidrologi (HEC RAS dan HEC-GeoRAS) di Sungai Cangak.

Data geometri sungai dapat diperoleh dari berbagai macam sumber. Pada resolusi yang rendah, data geometri sungai dan karakteristik terrain dapat peroleh menggunakan SRTM [8]. Selain data DEM sebagai sumber data geometris, pemodelan dibentuk dari parameter-parameter hidrologis untuk memprediksi daerah-daerah terdampak banjir dengan besaran dan volume tertentu, seperti debit sungai dan curah hujan. [5]

Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan bangunan perlintasan sungai yaitu Box Culvert terhadap pemodelan banjir di sepanjang ruas Sungai

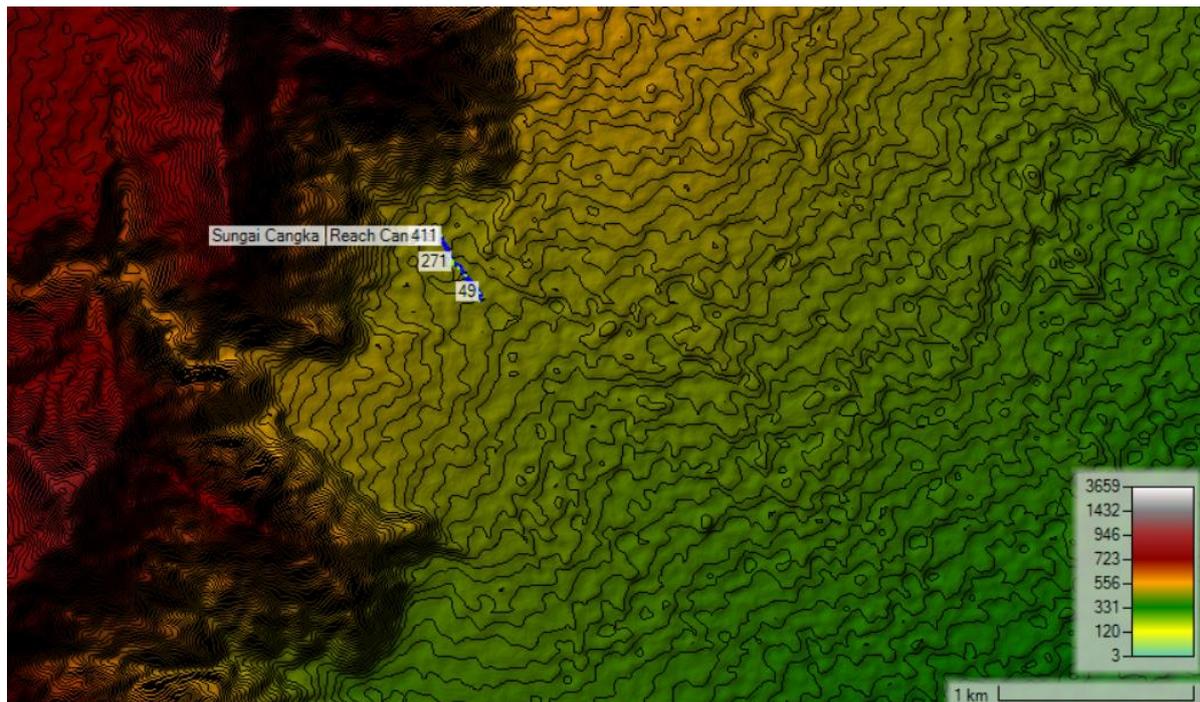
Cangak yang melintasi Dusun Kamar Kajang Kabupaten Lumajang, serta melakukan visualisasi genangan banjir dan dampaknya terhadap lingkungan di sekitar bantaran Sungai Cangak dalam bentuk peta untuk mendukung mitigasi bencana.

2 METODOLOGI

HEC-RAS merupakan inti sari dari analisa ini agar review perencanaan pengalihan sungai Cangka dapat direalisasikan. Untuk mempermudah analisa maka disusun beberapa metodologi seperti pada Gambar 1. Kondisi Eksisting, digunakan untuk mengetahui kondisi sebenarnya yang terjadi di kondisi asli dengan skala 1:1. Kondisi setelah normalisasi sungai, digunakan untuk menganalisa hasil perencanaan ulang dalam *design* geometrik sungai dengan melakukan simulasi dengan bantuan aplikasi.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Debit sungai tertinggi dalam 50 tahun terakhir mencapai 50 m³/s, yang terjadi di wilayah hulu Sungai Cangak. Hasil simulasi genangan banjir untuk debit tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Area penelitian terdapat pada garis warna biru,



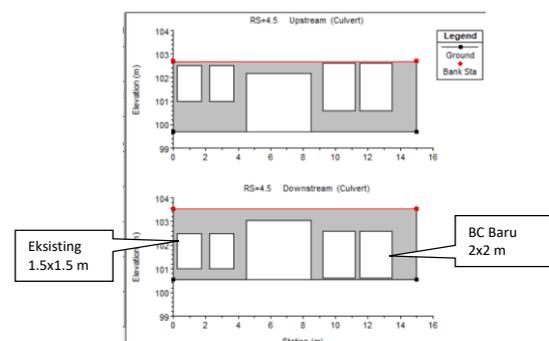
Gambar 2 Gambar peta DEM lokasi sungai Cangka

menggunakan latar belakang data Model Elevasi Digital (DEM).

Pengamatan lebih rinci menunjukkan adanya beberapa segmen sungai yang tidak mengalir berdasarkan hasil simulasi. Hal ini ditandai dengan pola aliran sungai yang terputus di beberapa bagian, seperti terlihat pada Gambar 4. Setelah dilakukan verifikasi lapangan, diketahui bahwa kondisi ini disebabkan oleh data *cross-section* yang dihasilkan dari DEM tidak mampu merepresentasikan keadaan sebenarnya di lapangan. Data DEM yang digunakan tidak dapat secara akurat menggambarkan aliran sungai yang berada di bawah tanah. Di wilayah Sungai Cangka, yang mengalir melalui area pemukiman warga, terdapat beberapa segmen aliran sungai yang tertutup oleh jalan. Ketika dilakukan survei lapangan di area yang pada model menunjukkan aliran terputus, ditemukan bahwa beberapa bagian merupakan aliran bawah tanah, sehingga sulit terdeteksi oleh data DEM.

Evaluasi dimensi box culvert dilakukan dengan menghitung kapasitas box culvert terpasang, kapasitas box culvert terpasang (Q_{ex}) selanjutnya dibandingkan dengan debit banjir rencana (Q_{10} , Q_{20} , dan Q_{25})

untuk mengetahui apakah dimensi eksisting mampu mengalirkan debit rencana. Kriteria yang digunakan adalah jika Q_{ex} lebih dari debit banjir rencana, maka dimensi box culvert mampu mengalirkan debit banjir rencana. Menambahkan struktur Box Culvert dan Jembatan sebagai tambahan inlet di perlintasan pada Gambar 3.



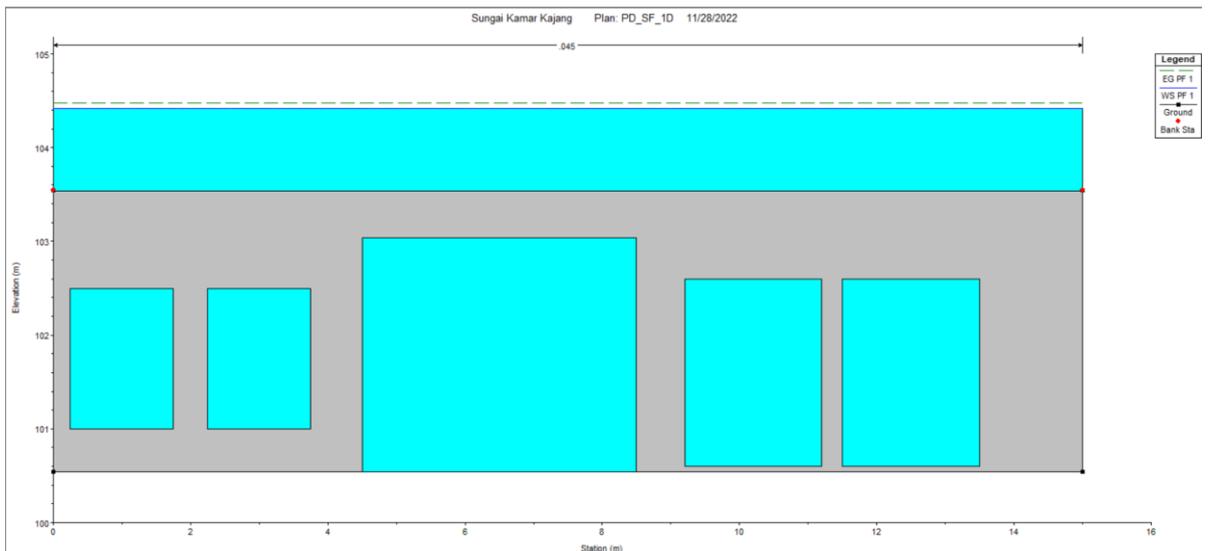
Gambar 3 Penambahan box culvert dan struktur jalan

Melakukan simulasi penampang sungai dan perlintasan Box Culvert terhadap debit $50\text{m}^3/\text{s}$. pada Gambar 5 terjadi luapan ke arah jalan sekitar 0.86 m .

Dari hasil review perencanaan terhadap debit yang sudah di kaji maka pada Gambar 6 menampilkan rekap dari keseluruhan



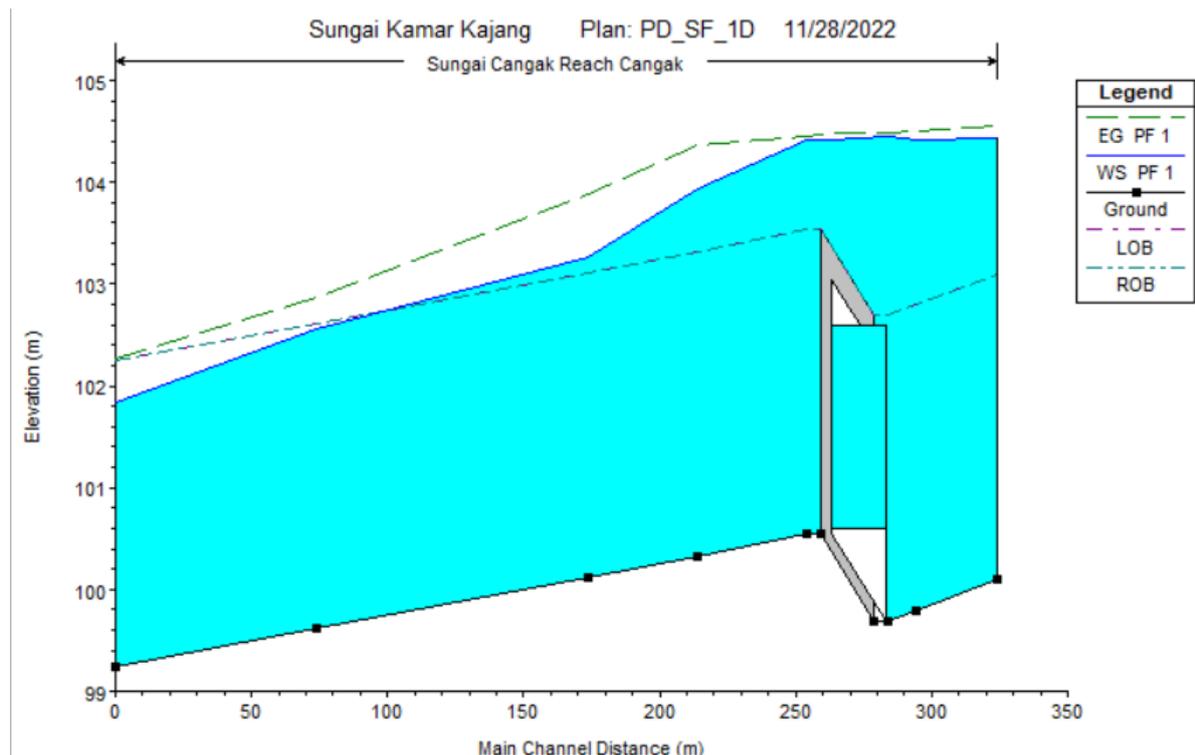
Gambar 4 Lokasi Sungai Cangka di Dusun Kamar Kajang



Gambar 5 Tinggi muka air di area perlintasan

HEC-RAS Plan: 1D Penampang rencana River: Sungai Cangak Reach: Reach Cangak Profile: PF 1												Reload Da
Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
Reach Cangak	7	PF 1	50.00	100.09	104.44	102.19	104.55	0.001428	1.45	34.47	10.00	0.25
Reach Cangak	6	PF 1	50.00	99.79	104.41		104.50	0.001162	1.34	37.19	10.00	0.22
Reach Cangak	5	PF 1	50.00	99.69	104.45	100.73	104.48	0.000239	0.70	71.42	15.00	0.10
Reach Cangak	4.5											
Reach Cangak	4	PF 1	50.00	100.54	104.41		104.45	0.000430	0.86	58.07	15.00	0.14
Reach Cangak	3	PF 1	50.00	100.32	103.94		104.37	0.009341	2.90	17.21	6.00	0.55
Reach Cangak	2	PF 1	50.00	100.12	103.26		103.88	0.015133	3.48	14.36	6.00	0.72
Reach Cangak	1	PF 1	50.00	99.62	102.55		102.86	0.006228	2.45	20.37	9.87	0.55
Reach Cangak	0	PF 1	50.00	99.24	101.84	101.33	102.27	0.010010	2.92	17.10	9.19	0.68

Gambar 6 Rekap hasil simulasi penampang sungai Cangak STA 0+220 sampai hilir 0+544



Gambar 7 Profil memanjang Sungai Cangkang

crossing dari hulu sungai Cangkang STA 0+220 sampai hilir STA 0+544.

Pada Gambar 7 menampilkan profil memanjang dari sungai Cangkang, sisi kiri merupakan hilir dan sebelah kanan adalah hulu. Terlihat bahwa terjadi kenaikan muka air di bagian hulu terutama yang mengarah ke perlintasan box culvert.

4 KESIMPULAN

Secara tampungan dari dimensi penampang rencana masih belum bisa menampung debit aliran $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Masih terjadi luapan ke arah jalan raya setinggi 0.86 m.

Adapun permasalahan lain adalah penampang sungai yang berada di hulu mengalami pendangkalan dan tidak memiliki tanggul (rusak). Efek ini bisa mengakibatkan permasalahan di areal hilir sungai terutama yang mengarah ke batas proyek pengerjaan jalan.

Dengan box culvert ukuran $2 \times 2 \text{ m}$ dan tambahan struktur jembatan belum cukup bisa mengalirkan debit $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Namun dengan kemiringan memanjang sungai dan box culvert bisa mengalirkan aliran air lebih cepat yaitu 3 m/s sehingga air cepat surut.

Dengan penambahan outlet di beberapa titik hal ini bisa juga mengurangi dampak limpasan air baik dari sungai dan jalan. Kondisi penampang yang ada di hilir terjadi penyempitan atau penampang basah lebih kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suripin, Sistem drainase perkotaan yang berkelanjutan, Yogyakarta: Penerbit Andi, 2004.
- [2] L. N. Arief, B. S. Purnama and T. Aditya, "Pemetaan risiko bencana banjir rob Kota Semarang," in *The 1st Conference on Geospatial Information Science and Engineering*.
- [3] R. J. Kodoatie, Banjir: Beberapa penyebab dan metode pengendaliannya dalam perspektif lingkungan, Pustaka Pelajar, 2002.
- [4] A. M. Melesse, W. D. Graham and J. D. Jordan, "Spatially distributed watershed mapping and modeling: GIS-Based storm runoff response and hydrograph analysis: Part 2," *Journal of Spatial Hydrology*, vol. 3, no. 2, pp. 1-28, 2003.
- [5] S. M. J. S. Samarasinghe, H. K. Nandalal, D. P. Welivitiya, J. S. M. Fowze, M. K. Hazarika and L. Samarakoon, "Application of remote sensing and GIS for flood risk analysis: A case study at Kalu-Ganga River, Sri Lanka," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, vol. XXXVIII, no. 8, pp. 110-115, 2010.
- [6] S. Ullah, M. Farooq, T. Sarwar, M. J. Tareen and M. A. Wahid, "Flood modelling and simulations using

hydrodynamic model and ASTER DEM - A case study of Kalpani River," *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 9, 2016.

- [7] O. Martin, A. Rugumayo and J. Ovcharovichova, "Application of HEC HMS/RAS and GIS Tools in Flood Modelling: A Case Study for River Sironko - Uganda," *Global Journal of Engineering, Design & Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 19-31, 2012.
- [8] B. R. S. Tambunan and P. B. Santosa, "Progo Watershed Delineation and River Network Analysis using SRTM DEM and Contour DEM Hypsography of RBI 1:25000," in *2018 4th International Conference on Science and Technology*, Yogyakarta, 2018.



Kajian Laju Angkutan Sedimen Dasar Pada Sungai Pondo-Poboya

Sulfiati*¹, Triyanti Anasiru¹, Iryanto Umabaihi¹

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

*Penulis korespondensi: tekniksulfiati@gmail.com

DISUBMIT 10 Desember 2024

DIREVISI 11 Desember 2024

DITERIMA 12 Desember 2024

ABSTRAK Sungai atau aliran sungai adalah jumlah air yang mengalir sepanjang lintasan dari darat menuju ke laut sehingga dapat dikatakan sungai merupakan suatu lintasan dimana air yang berasal dari hulu bergabung dan menuju ke arah hilir. Sungai merupakan sarana yang sangat penting bagi penghidupan dan kehidupan masyarakat dalam pemanfaatan untuk berbagai keperluan. Sedimentasi adalah proses pengendapan material yang terangkut oleh aliran dari bagian hulu akibat dari erosi. Sungai Pondo-Poboya merupakan salah satu sungai yang berada di Kota Palu yang memiliki panjang mencapai ±20 km dengan dasar sungai berupa material granuler yang pasti akan mengalami transportasi sedimen secara individu yang disebabkan oleh kecepatan aliran di dalam sungai. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya laju angkutan sedimen dasar pada Sungai Pondo-Poboya dan data yang digunakan adalah data primer yaitu data yang diperoleh langsung dari hasil penelitian dan data sekunder yaitu data yang diperoleh dari instansi terkait atau sumber terpercaya. Laju angkutan sedimen dasar pada Sungai Pondo-Poboya dihitung dengan menggunakan Metode Meyer-Peter dan Muller berdasarkan pada debit banjir rencana periode ulang 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun dan 100 tahun. Dari hasil perhitungan laju angkutan sedimen dasar pada periode ulang 5, 10, 25, 50, 100 tahun pada segmen I sebesar 0,72219; 0,75041; 0,75128; 0,74010; 0,72527 m³/dtk, dan pada segmen II sebesar 0,95561; 0,99528; 0,99651; 0,98078; 0,95995 m³/dtk, serta pada segmen III sebesar 0,33855; 0,35150; 0,35190; 0,34677; 0,33997 m³/dtk. Faktor yang menyebabkan laju angkutan sedimen dasar yaitu; curah hujan, topografi DAS, ukuran butir sedimen, dan karakteristik hidrolika saluran (sungai). Hasil analisis memperlihatkan bahwa nilai laju angkutan sedimen dasar terbesar terjadi pada saat debit banjir periode ulang 25 tahun pada lokasi 2 yaitu sebesar 0,99651 m³/dtk dan laju angkutan sedimen dasar terkecil terjadi pada saat debit banjir periode ulang 25 tahun pada Lokasi 3 yaitu sebesar 0,35190 m³/dtk. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa pada lokasi 3 akan terjadi aggradasi pada dasar sungai, hal ini dikarenakan jumlah angkutan sedimen yang masuk ke lokasi 3 lebih besar dari pada jumlah angkutan sedimen yang keluar.

KATA KUNCI Sungai Pondo-Poboya; Debit banjir rencana; Angkutan sedimen dasar; Metode Meyer Peter dan Muller

1 PENDAHULUAN

Latar Belakang. Sungai mempunyai fungsi mengumpulkan curah hujan dalam suatu daerah tertentu dan mengalirkannya ke laut. Sungai juga dapat digunakan dalam berbagai aspek kehidupan lainnya seperti pembangkit tenaga listrik, pelayaran, pariwisata, perikanan dan lain-lain. Dengan adanya aliran air di dalam sungai maka secara alami hal tersebut akan menimbulkan terjadinya gerusan pada penampang sungai. Gerusan tersebut akan menyebabkan material sungai terlepas dari tempat asalnya, kemudian material sungai tersebut akan terangkut oleh aliran air di sepanjang sungai sampai ke bagian hilir, hal tersebut akan menimbulkan sedimentasi di sepanjang alur sungai terutama di bagian hilir sungai. Selain itu sedimentasi juga merupakan dampak yang terjadi akibat dari

erosi di bagian hulu sungai. Erosi tersebut bisa terjadi dikarenakan pengelolaan DAS bagian hulu yang kurang baik.

Sungai Pondo-Poboya merupakan salah satu sungai yang berada di kota Palu dengan panjang sungai utama kira-kira mencapai ± 20 km dan tergolong sungai periodik yaitu sungai yang pada musim kemarau debit airnya kecil bahkan hampir kering sedangkan pada musim penghujan debit airnya besar.

Hal ini dapat kita lihat pada aliran air di Sungai Pondo-Poboya ketika debit air yang terjadi cukup besar dari biasanya yang diakibatkan karena terjadinya hujan, aliran air tersebut terlihat sangat keruh ini menandakan bahwa aliran air tersebut membawa material sedimen akibat erosi

pada bagian hulu sungai menuju ke bagian hilir sungai, dimana kecepatan aliran di hilir sungai yang rendah dikarenakan kemiringan dasar sungai yang landai sehingga berdampak pada terjadinya sedimentasi.

Tujuan dan Manfaat. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besarnya laju angkutan sedimen dasar pada Sungai Pondo-Poboya.

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut: a) Memberikan informasi mengenai besarnya laju angkutan sedimen dasar pada Sungai Pondo-Poboya. b) Digunakan sebagai acuan dalam merencanakan besar volume tampungan bangunan pengendali sedimen. c) Dapat digunakan sebagai acuan dalam melakukan normalisasi sungai. d) Dapat mengetahui karakteristik butiran sedimen seperti gradasi butiran sedimen dan berat jenis sedimen. e) Sebagai tambahan referensi dalam menghitung laju angkutan sedimen dasar pada sungai.

Batasan Masalah. Agar memudahkan dalam proses analisis dan pembahasan masalah dalam penelitian ini maka penulis membatasi lingkup pembahasan yaitu sebagai berikut: a) Pengukuran di lapangan terbatas pada titik atau ruas yang terpilih dengan mempertimbangkan keadaan di lapangan dan tingkat kesulitannya. b) Pengambilan sampel sedimen dilakukan pada tiga lokasi, bagian hulu, tengah dan hilir. c) Tidak mengukur kecepatan aliran di lapangan. d) Laju angkutan sedimen dasar dihitung berdasarkan debit banjir rencana periode ulang 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun dan 100 tahun. e) Laju angkutan sedimen dasar dihitung dengan menggunakan Metode Meyer-Peter dan Muller. f) Tidak menghitung besarnya erosi.

2 LANDASAN TEORI

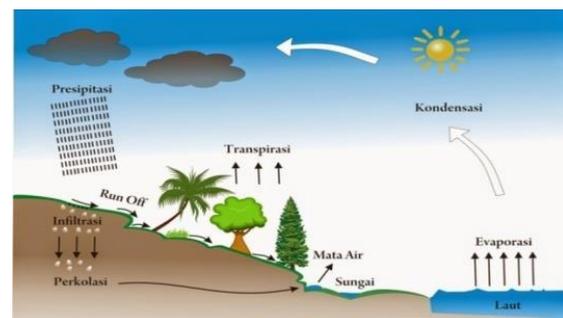
Daerah Aliran Sungai (DAS). Daerah Aliran Sungai (DAS) adalah suatu wilayah daratan yang merupakan satu kesatuan dengan sungai dan anak-anak sungainya, yang berfungsi menampung, menyimpan, dan mengalirkan air yang berasal dari curah hujan ke danau atau ke laut secara alami,

yang batas di darat merupakan pemisah topografi dan batas di laut sampai dengan daerah perairan yang masih terpengaruh aktivitas daratan (SNI 2415-2016).

Berdasarkan kaitannya dengan wilayah daratan tempat berlangsungnya salah satu siklus hidrologi yaitu sebagai tempat berlangsungnya penampungan, pengaliran, dan pendistribusian air, maka wilayah DAS dapat dibedakan ke dalam beberapa bagian yaitu [1]: a) Daerah Aliran Sungai Bagian Hulu; b) Daerah Aliran Sungai Bagian Tengah; c) Daerah Aliran Sungai Bagian Hilir.

Analisis Hidrologi. Hidrologi adalah ilmu yang berkaitan dengan air bumi, terjadinya, peredaran dan agihannya, sifat-sifat kimia dan fisiknya, dan reaksi dengan lingkungannya, termasuk hubungannya dengan makhluk-makhluk hidup. Karena perkembangannya yang begitu cepat, hidrologi telah menjadi ilmu dasar dari pengelolaan sumber daya air yang merupakan pengembangan, agihan dan penggunaan sumber daya air secara terencana. [2]

Berdasarkan kaitannya dengan wilayah daratan tempat berlangsungnya salah satu siklus hidrologi yaitu sebagai tempat berlangsungnya penampungan, pengaliran, dan pendistribusian air. [1]



Gambar 1 Siklus hidrologi

Curah Hujan Wilayah. Curah hujan rencana (X_T) adalah hujan dengan periode ulang tertentu (T) yang diperkirakan akan terjadi di suatu daerah aliran sungai. Periode ulang (*return period*) adalah waktu hipotetik di mana suatu kejadian dengan nilai tertentu, hujan rencana misalnya akan disamai atau dilampaui 1 kali dalam jangka waktu hipotetik tersebut. Hal ini tidak berarti

bahwa hujan rencana akan berulang secara teratur setiap periode ulang tersebut. [3]

Distribusi Probabilitas. Dalam distribusi probabilitas data hujan atau data debit guna memperoleh nilai hujan rencana atau debit rencana, dikenal beberapa distribusi probabilitas kontinu yang sering digunakan, yaitu: Gumbel, Normal, Log Normal, dan Log Pearson Tipe III. Penentuan jenis distribusi probabilitas yang sesuai dengan data dilakukan dengan mencocokkan parameter data tersebut dengan syarat masing-masing jenis distribusi seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Persyaratan parameter statistik suatu distribusi

No.	Distribusi	Persyaratan
1	Gumbel	$C_s = 1,14$ $C_k = 5,4$
2	Normal	$C_s \approx 0$ $C_k \approx 3$
3	Log Normal	$C_s = C_v^3 + 3C_v$ $C_k = C_v^8 + 6C_v^6 + 15C_v^4 + 16C_v^2 + 3$
4	Log Pearson Type III	Selain dari nilai yang di atas

Pemilihan agihan frekuensi. Adapun langkah-langkah yang harus ditempuh dalam pemilihan agihan frekuensi yaitu menghitung rerata curah hujan maksimum, perhitungan simpangan baku atau deviasi standar dan parameter-parameter statistik seperti Koefisien Skewness (C_s), Koefisien Variance (C_v), dan Koefisien Kurtosis (C_k). Langkah-langkah yang harus ditempuh dalam pemilihan agihan frekuensi yaitu:

$$X_{i_{rt}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{i_{rt}})^2}{n - 1}}$$

$$C_s = \frac{n \sum (X_i - X_{i_{rt}})^3}{(n - 1)(n - 2)S_x^3}$$

$$C_k = \frac{n^2 \sum (X_i - X_{i_{rt}})^4}{(n - 1)(n - 2)(n - 3)S_x^4}$$

$$C_v = \frac{S_x}{X_{i_{rt}}}$$

Keterangan: X_i , Curah hujan maksimum (mm), $X_{i_{rt}}$, Curah hujan maksimum rata-rata

(mm), n , Jumlah data, S_x , Standar Deviasi, C_s , Koefisien Skewnes, C_v , Koefisien Varians, C_k , Koefisien Kurtosis.

Distribusi Probabilitas Log Pearson Tipe III.

Perhitungan hujan rencana rencana berdasarkan distribusi probabilitas Log Pearson Tipe III, jika data yang dipergunakan adalah berupa sampel maka akan dianalisis dengan persamaan $\log X_T = \log X_{i_{rt}} + K_{Tr} \times S_x \log X_i$. Keterangan: X_T , Curah hujan rancangan dengan periode ulang T tahun (mm), $\log X_{i_{rt}}$, Log curah hujan maksimum tahunan rata-rata (mm), K_{Tr} , Faktor frekuensi yang tergantung dari periode ulang dan nilai Koefisien Skewnes, $S_x \log X_i$, Standar Deviasi.

Tabel 2 Nilai K_{Tr} untuk setiap nilai C_s

C_s	Periode Ulang (Tahun)					
	2	5	10	25	50	100
-0,1	0,017	0,836	1,270	1,761	2,000	2,252
-0,2	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178
-0,3	0,050	0,853	1,245	1,643	1,890	2,104
-0,4	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029
-0,5	0,083	0,856	1,216	1,567	1,777	1,955
-0,6	0,099	0,857	1,200	1,528	1,720	1,880
-0,7	0,116	0,857	1,183	1,488	1,663	1,806
-0,8	0,132	0,856	1,166	1,448	1,606	1,733
-0,9	0,148	0,854	1,147	1,407	1,549	1,660
-1,0	0,164	0,852	1,128	1,366	1,492	1,588
-1,1	0,180	0,848	1,107	1,324	1,435	1,518
-1,2	0,195	0,844	1,086	1,282	1,379	1,449
-1,3	0,210	0,838	1,064	1,240	1,324	1,383
-1,4	0,225	0,832	1,041	1,198	1,270	1,318
-1,5	0,240	0,825	1,018	1,157	1,217	1,256

Pengujian Kecocokan Fungsi Distribusi (Goodness of fit).

Uji distribusi probabilitas dimaksudkan untuk mengetahui apakah persamaan distribusi probabilitas yang dipilih dapat mewakili distribusi statistik sampel data yang dianalisis. Untuk itu sebelumnya dilakukan perhitungan peluang dengan menggunakan Metode Weibull dengan $P_e = 100 \times m / (n + 1)$, Keterangan: P_e , Peluang (%), m , Nomor urut data, n , Banyaknya data.

Uji Chi-Square. Metode ini menganggap pengamatan membentuk variabel acak dan dilakukan secara statistik dengan mengikuti kurva distribusi *chi square*. (SNI 2415-2016). Uji kecocokan ini dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$K = 1 + 3,322 \log n$$

$$DK = K - (h + 1)$$

$$E_f = n/K$$

$$X_h^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(E_f - O_f)^2}{E_f}$$

Keterangan: X_h^2 , Nilai *Chi Square* hitung, E_f , Frekuensi yang diharapkan, O_f , Frekuensi yang diamati.

Tabel 3 Nilai kritis (X^2C) untuk uji *Chi Square*

(DK)	Tarf Signifikan (α)				
	0,995	0,99	0,975	0,95	0,05
2	0,0100	0,0201	0,0506	0,103	5,991
3	0,0717	0,115	0,216	0,352	7,815
4	0,207	0,297	0,484	0,711	9,488
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070
6	0,676	0,872	1,237	1,635	12,592
7	0,989	1,239	1,690	2,167	14,067
8	1,344	1,646	2,180	2,733	15,507
9	1,735	2,088	2,700	3,325	16,919
10	2,156	2,558	3,247	3,940	18,307

Uji Smirnov-Kolmogorov. Uji kecocokan ini adalah uji kecocokan “non parametric” karena tidak mengikuti distribusi tertentu. (SNI 2415-2016). Perbedaan jarak maksimum untuk Uji Smirnov-Kolmogorov tertera pada persamaan, $\Delta_{maks} = |P_e - P_t|$, Keterangan: Δ_{maks} , Selisih terbesar antara peluang empiris dengan teoritis, P_e , Peluang empiris dengan menggunakan Persamaan dari Weibull (%), P_t , Peluang teoritis dari hasil penggambaran data pada kertas distribusi (Persamaan distribusinya) secara grafis (%).

Tabel 4 Nilai kritis (ΔC_r) untuk uji Smirnov-Kormogolov

Jumlah Data (n)	Tarf Signifikan (α)			
	20 %	10 %	5 %	1 %
5	0,45	0,51	0,56	0,67
10	0,32	0,37	0,41	0,49
15	0,27	0,30	0,34	0,40
20	0,23	0,26	0,29	0,36
25	0,21	0,24	0,27	0,32
30	0,19	0,22	0,24	0,29
35	0,18	0,20	0,23	0,27
40	0,17	0,19	0,21	0,25
45	0,16	0,18	0,20	0,24
50	0,15	0,17	0,19	0,23
n > 50	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

Analisis Debit Banjir Rencana. Penetapan masing-masing metode dalam perhitungan debit rencana, secara umum bergantung pada ketersediaan data hujan, karakteristik daerah aliran, dan data debit. Adapun metode yang dipergunakan apabila data curah hujan dan karakteristik daerah aliran tersedia adalah metode empiris. Adapun beberapa metode yang termasuk dalam kelompok metode empiris adalah sebagai berikut: Metode Rasional \rightarrow (Luas DAS \leq 50 km²), Metode Weduwen \rightarrow (Luas DAS \leq 50 km²), Metode Haspers \rightarrow (Luas DAS 50 – 100 km²), Metode Melchior \rightarrow (Luas DAS \geq 100 km²), Metode Hidrograf Satuan.

Adapun metode empiris yang biasa dipakai dalam analisis debit banjir rencana adalah Metode Haspers. Berikut adalah langkah-langkah perhitungan dengan menggunakan Metode Haspers [4].

$$\alpha = \frac{1 + 0,012 \times A^{0,7}}{1 + 0,075 \times A^{0,7}}$$

$$T_c = 0,10 \times L^{0,8} \times S^{-0,3}$$

$$r = \frac{T_c \times X_T}{T_c + 1}$$

$$R_T = \frac{3,6 \times T_c}{r}$$

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{T_c + 3,7 \times 10^{-0,4T_c}}{T_c^2 + 15} \times \frac{A^{0,75}}{12}$$

$$Q_n = \alpha \times R_T \times \beta \times A$$

Keterangan: Q_n , Debit banjir rencana dengan periode ulang T tahun (m³/det), A , Luas daerah pengaliran sungai (km²), α , Koefisien pengaliran, T_c , Waktu tiba banjir (jam), β , Koefisien reduksi, X_T , Curah hujan rencana dengan kala ulang T tahun (mm), R_T , Intensitas hujan maksimum per km² dengan periode ulang T tahun (m³/det/km²), L , Panjang sungai (km), S , Kemiringan dasar sungai.

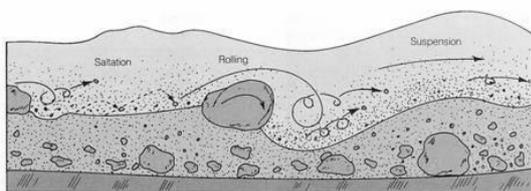
Sedimentasi. Sedimentasi adalah proses pengendapan material yang terangkut oleh aliran dari bagian hulu akibat dari erosi. Sungai-sungai membawa sedimen dalam setiap alirannya. Sedimen dapat berada di berbagai lokasi dalam aliran, tergantung pada keseimbangan antara kecepatan ke atas pada partikel (gaya tarik dan gaya angkat) dan kecepatan pengendapan

partikel. Proses sedimentasi meliputi proses erosi, transportasi (angkutan), pengendapan (*deposition*) dan pemadatan (*compaction*) dari sedimentasi itu sendiri.

Proses sedimentasi berjalan sangat kompleks, dimulai dari jatuhnya hujan yang menghasilkan energi kinetik yang merupakan permulaan dari proses erosi.

Permulaan Gerak Butiran Sedimen. Akibat adanya aliran air, timbul gaya-gaya yang bekerja pada material sedimen. Gaya-gaya tersebut mempunyai kecenderungan untuk menggerakkan atau menyeret butiran material sedimen. Pada waktu gaya-gaya yang bekerja pada butiran sedimen mencapai suatu harga tertentu, sehingga apabila sedikit gaya ditambahkan akan menyebabkan butiran sedimen bergerak, maka kondisi tersebut dinamakan kondisi kritis. Parameter-parameter aliran pada kondisi tersebut, seperti tegangan geser dasar (τ_0), kecepatan aliran (U^*) juga mencapai kondisi kritis. [5]

Tegangan geser dasar adalah gaya akibat geseran pada dasar yang merupakan gaya penghambat terhadap gaya pendorong (gaya hidrostatis, gaya tekanan atmosfer, dan berat massa air) pada aliran. Untuk suatu kondisi aliran tertentu pada suatu saluran atau sungai dimana komposisi material dasarnya dapat bergerak (*movable bed*), kondisi kritis angkutan sedimen dapat terlampaui, dan pada tahap ini gerakan partikel sedimen akan terjadi.



Gambar 2 Mekanisme pergerakan sedimen dasar

Partikel sedimen akan mulai bergerak pada kondisi apa bila tegangan geser dasar aliran (τ_0) lebih besar dari tegangan geser kritis butiran sedimen (τ_c) dan kecepatan geser aliran (U^*) lebih besar dari kecepatan geser kritis butiran sedimen (U^*_c). Berikut adalah persamaannya:

$$\tau_0 = \rho \times g \times h \times S$$

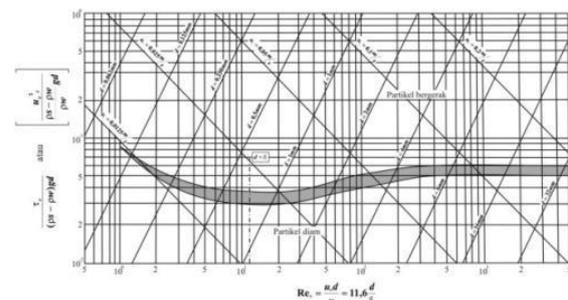
$$U^* = \sqrt{g \times h \times S}$$

$$\tau_c = \theta_c \times (\rho_s - \rho) \times g \times d$$

$$U^*_c = \sqrt{\theta_c \times \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) \times g \times d}$$

$$Re_e = \frac{U^* \times d_{50}}{\nu}$$

Keterangan: U^*_c , Kecepatan geser kritis butiran sedimen (m/det), τ_0 , Tegangan geser dasar aliran (N/m²), τ_c , Tegangan geser kritis butiran sedimen (N/m²), g , Percepatan gravitasi bumi (m/det²), S , Kemiringan dasar sungai, d , Diameter signifikan butir sedimen atau d_{50} (mm), h , Kedalaman aliran (m), θ_c , Parameter *Shield* dapat dilihat pada grafik berdasarkan nilai bilangan *Reynold*, ν , Viskositas kinematik (m²/det), Re_e , Bilangan *Reynold*.



Gambar 3 Grafik Shield hubungan antara θ_c dan Re_e

Faktor-faktor yang Mempengaruhi Laju Angkutan Sedimen. Faktor-faktor yang Mempengaruhi Laju Angkutan Sedimen: Ukuran Butiran Sedimen, Viskositas Kinematik (ν), Berat Jenis Sedimen (G_s), Debit Aliran (Q), Kemiringan Dasar Sungai (*Slope*), Koefisien *Manning*.

Tabel 5 Tipikal harga koefisien *Manning* untuk saluran alam [6]

Tipe saluran	Harga Koefisien <i>Manning</i> (n)		
	Min.	Normal	Maks.
Bersih lurus	0,025	0,030	0,033
Bersih, berkelok-kelok	0,033	0,040	0,045
Banyak tanaman	0,050	0,070	0,080
pengganggu			
Dataran banjir berumput	0,025	0,030	0,035
pendek-tinggi			
Saluran di belukar	0,035	0,050	0,070

Tabel 6 Viskositas air berdasarkan suhu

Suhu (⁰ C)	Viskositas	Viskositas
	Kinematik (ν) (m ² /det)	Dinamis (μ) (N.det/m ²)
0	1,79 x 10 ⁻⁶	1,79 x 10 ⁻³
5	1,51 x 10 ⁻⁶	1,51 x 10 ⁻³
10	1,31 x 10 ⁻⁶	1,31 x 10 ⁻³
15	1,14 x 10 ⁻⁶	1,14 x 10 ⁻³
20	1,00 x 10 ⁻⁶	1,00 x 10 ⁻³
25	8,91 x 10 ⁻⁷	8,91 x 10 ⁻⁴
30	7,96 x 10 ⁻⁷	7,96 x 10 ⁻⁴
35	7,20 x 10 ⁻⁷	7,20 x 10 ⁻⁴
40	6,53 x 10 ⁻⁷	6,53 x 10 ⁻⁴
50	5,47 x 10 ⁻⁷	5,47 x 10 ⁻⁴
60	4,66 x 10 ⁻⁷	4,66 x 10 ⁻⁴
70	4,04 x 10 ⁻⁷	4,04 x 10 ⁻⁴
80	3,54 x 10 ⁻⁷	3,54 x 10 ⁻⁴
90	3,15 x 10 ⁻⁷	3,15 x 10 ⁻⁴
100	2,82 x 10 ⁻⁷	2,82 x 10 ⁻⁴

Persamaan Laju Angkutan Sedimen Dasar. Persamaan ini dikembangkan di Zurich (Swiss) pada tahun 1948 untuk material sedimen tidak seragam Meyer-Peter dan Muller menyatakan bahwa gesekan (kehilangan energi) yang terjadi pada dasar bergelombang (*ripple* atau *dunes*) disebabkan oleh bentuk gelombang (*form roughnes*) dan ukuran butiran (*grain roughness*). Dengan memperhitungkan faktor gesekan tersebut dan dengan didukung oleh data pengukuran dengan *range* data yang cukup besar, maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$q_B = \sqrt{\left(\frac{\gamma_w R \left(\frac{K_s}{K_s'} \right)^{\frac{3}{2}} S - 0,047(\gamma_s - \gamma_w) d_{50}}{0,25 \left(\frac{\gamma_w}{g} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)^3}$$

$$Q_s = q_B \times b$$

Keterangan: *R*, Jari-jari hidrolis sungai (m), *K_s*, Koefisien *Strickler* (m^{1/3}/det), *K_s'*, Koefisien kekasaran akibat butiran (m^{-1/6}), *S*, Kemiringan dasar sungai, γ_s , Berat isi sedimen dasar (gr/cm³ atau ton/m³), γ_w , Berat isi air (gr/cm³ atau ton/m³), *g*, Percepatan gravitasi bumi (m/det²), *b*, Lebar dasar sungai (m), *d₅₀*, Diameter butiran yang bersesuaian dengan 50 % lolos saringan (m), *d₉₀*, Diameter butiran yang bersesuaian dengan 90 % lolos saringan (m), *q_B*, Laju angkutan sedimen dasar per meter lebar

sungai (m³/det.m), *Q_s*, Laju angkutan sedimen dasar untuk keseluruhan lebar sungai (m³/det).

Dari Persamaan di atas dapat dilihat beberapa parameter utama yang digunakan yaitu antara lain nilai *d₅₀* yang merupakan diameter signifikan (representatif) atau biasa disebut diameter median butiran kemudian nilai *R* atau jari-jari hidrolis, dimana untuk sungai sangat lebar nilainya sama dengan kedalaman aliran (pengaruh gesekan tebing dapat diabaikan), dan nilai *q_B* adalah volume angkutan sedimen dasar di dalam air per satuan waktu per satuan lebar sungai.

3 METODE PENELITIAN

Penelitian ini tergolong pada jenis penelitian eksperimental karena dalam penelitian ini akan dilakukan pengujian dengan instrumen di lapangan atau di laboratorium kemudian melakukan analisa dan menginterpretasikan hasilnya. Berikut adalah beberapa tahapan dalam penelitian ini: Studi pendahuluan mengenai masalah yang akan diteliti, Identifikasi dan perumusan masalah, Melakukan kajian pustaka berhubungan dengan masalah yang akan diteliti, Pengambilan data primer dan data sekunder, Pengelolaan data primer dan data sekunder, Perhitungan laju angkutan sedimen dasar, Pembahasan hasil perhitungan, Kesimpulan dan Saran.

4 ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Analisis. Perhitungan Debit Banjir Rencana. Dalam penelitian ini, akan dihitung debit banjir rencana untuk berbagai periode ulang, yaitu 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun, dan 100 tahun. Data curah hujan yang menjadi dasar perhitungan tersebut merupakan curah hujan harian maksimum dari tahun 2013 hingga 2022, yang diperoleh dari Stasiun Meteorologi Mutiara Palu.

Perhitungan curah hujan rencana. Untuk mengetahui besarnya nilai curah hujan rencana maka dalam penelitian ini akan digunakan analisis frekuensi dengan Metode Log Pearson Tipe III. Pemilihan ini didasarkan karena metode tersebut

memiliki syarat harga parameter statistik (C_s, C_k, C_v) bebas.

Tabel 7 Penentuan curah hujan harian maksimum

Bulan	Tahun									
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Januari	51	137	55,9	27,4	12,2	110	87	126	16,2	38,8
Februari	28	34,8	58	8,8	47,5	23,6	56	35,9	45,7	63,9
Maret	35	33,4	64,6	25,8	11,2	46,4	35	24,7	129,5	82
April	58,5	42,2	69,6	87,1	12,9	98,8	74,6	54,1	83	19,3
Mei	49,8	68,8	32,4	27,8	15,3	15,9	121,5	110,7	36,3	87
Juni	97	25,6	112,5	66,4	54,9	52,8	87,7	24,8	77,4	92,4
Juli	130	41,9	21,2	61,9	6	166	43,6	43,3	125,8	103,2
Agustus	79,8	119	4,5	47,5	13,7	83	34,4	67,5	122	112,3
September	98,4	30,8	20	63,5	50,3	15	54,9	36,8	93,2	121,3
Oktober	57,2	29,5	11,5	187,3	19,5	32	43,7	57,6	154	120,2
November	152	37,1	42,5	21,1	19,4	28	176,2	67,5	57,4	9,6
Desember	69	105	0	33,5	23,1	79	45,6	46,9	55,8	21,3
Maksimum	152	137	112,5	187,3	54,9	166	176	126	154	121,3

Tabel 8 Parameter perhitungan curah hujan rencana metode Log Pearson tipe III

(Xi)	Log Xi	Log Xi - Log Xi _n	(Log Xi - Log Xi _n) ²	(Log Xi - Log Xi _n) ³
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
152	2,18184	0,05987	0,00358	0,00021
137	2,13672	0,01475	0,00022	0,00000
115,2	2,05115	-0,07082	0,00502	-0,00036
187,3	2,27254	0,15057	0,02267	0,00341
54,9	1,73957	-0,38240	0,14623	-0,05592
166,0	2,22011	0,09814	0,00963	0,00095
176	2,24601	0,12404	0,01539	0,00191
126	2,10037	-0,02160	0,00047	-0,00001
154	2,18752	0,06555	0,00430	0,00028
121,3	2,08386	-0,03811	0,00145	-0,00006
Σ	21,21969	0,00000	0,20895	-0,04957

$$\log X_{i_{rt}} = \frac{\sum \log Xi}{n} = \frac{21,21969}{10} = 2,12197 \text{ mm}$$

$$S_x \log Xi = \sqrt{\frac{\sum (\log Xi - \log x_{i_{rt}})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,20895}{10 - 1}} = 0,15237$$

$$C_s = \frac{n \times \sum (\log Xi - \log X_{i_{rt}})^3}{(n - 1) \times (n - 2) \times (S_x \log Xi)^3} = \frac{10(-0,04957)}{(10 - 1)(10 - 2)(0,15237)^3} = -0,94626$$

Uji kecocokan distribusi frekuensi Metode Chi-Square. Langkah pertama sebelum memulai uji kecocokan distribusi frekuensi Metode *Chi-Square* adalah melakukan perhitungan peluang empiris dengan menerapkan Metode *Weibull*. Tahap awal ini melibatkan pengurutan data curah hujan dari nilai terkecil hingga terbesar, sehingga data siap untuk digunakan dalam analisis uji kecocokan distribusi frekuensi yang lebih lanjut.

Tabel 9 Perhitungan peluang dengan menggunakan metode *Weibull*

Nomor Urut Data (m)	Curah Hujan (Xi) (mm)	Peluang Empiris (P _e) P _e = 100 x (m / (n + 1)) (%)
1	54,9	9,091
2	112,5	18,182
3	121,3	27,273
4	126	36,364
5	137	45,455
6	152	54,545
7	154	63,636
8	166	72,727
9	176,2	81,818
10	187,3	90,909

Jumlah data (n) = 10, Taraf signifikan (α) = 5%. Jumlah kelas (K) = $1 + 3,322 \log n = 1 + 3,322 \log 10 = 4,322$. Derajat kebebasan (DK) = $K - (h + 1) = 4 - (2 + 1) = 1$. *Expected Frequency (E_i)* = $n/K = 10/4 = 2,5$. Dari diperoleh nilai kritis untuk Uji *Chi-Square* ($X^2_{C_r}$) adalah sebesar 3,841.

Tabel 10 Perhitungan nilai uji *Chi-Square* hitung (X^2_h) berdasarkan data curah hujan maksimum

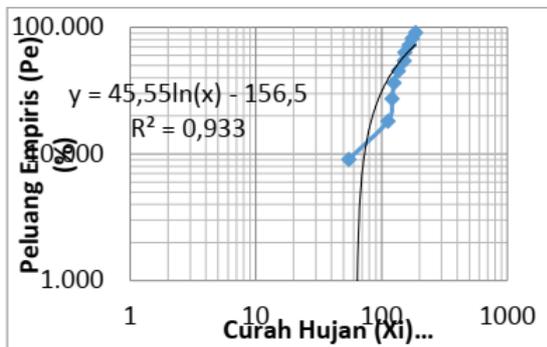
Kelas (K)	Probabilitas (%)				
	E _f	O _f	(E _f - O _f) ²	X ² _h = (E _f - O _f) ² / E _f	
1	0 ≤ P _e ≤ 25	2,5	2	0,25	0,10
2	25 < P _e ≤ 50	2,5	3	0,25	0,10
3	50 < P _e ≤ 75	2,5	3	0,25	0,10
4	75 < P _e ≤ 100	2,5	2	0,25	0,10
Σ		10	10	1	0,40

Dengan demikian dapat diketahui bahwa: $X^2h = 0,40 < X^2C_r = 3,481$ maka Metode Log Pearson Tipe III dapat digunakan.

Uji kecocokan distribusi frekuensi Metode Smirnov-Kolmogorov.

Dilakukan pembuatan grafik logaritma untuk menggambarkan hubungan antara curah hujan dan peluang empiris. Tujuan dari pembuatan grafik ini adalah untuk mendapatkan persamaan yang dapat digunakan dalam menghitung peluang teoritis.

Jumlah data (n) = 10. Taraf signifikan (α) = 5%. Dari Tabel 4 diperoleh nilai kritis untuk Uji Smirnov-Kolmogorov (ΔC_r) adalah sebesar 0,41.



Gambar 4 Grafik hubungan antara curah hujan (X_i) dan peluang empiris (P_e)

Tabel 11 Perhitungan uji Smirnov-Kormogolov

No (m)	Curah Hujan (X_i) (mm)	Peluang Empiris (P_e) $P_e = 100 \times m / (n + 1)$ (%)	Peluang Teoritis (P_t) $y = 45,55 \ln(x) - 156,5$ (%)	$\Delta = \left \frac{P_e - P_t}{100} \right $
1	54,9	9,091	25,951	-0,169
2	112,5	18,182	58,631	0,404
3	121,3	27,273	62,061	-0,348
4	126	36,364	63,793	-0,274
5	137	45,455	67,605	0,222
6	152	54,545	72,338	0,178
7	154	63,636	72,933	0,093
8	166	72,727	76,351	-0,036
9	176,2	81,818	79,067	0,028
10	187,3	90,909	81,850	0,091
Nilai Uji Smirnov-Kolmogorov Maksimum (Δ_{maks})				0,404

Dengan demikian dapat diketahui bahwa: $\Delta_{maks} = 0,404 < \Delta C_r = 0,41$. Berdasarkan hasil tersebut berarti bahwa analisis frekuensi

dengan Metode Log Pearson Tipe III dapat digunakan.

Perhitungan curah hujan rencana dengan analisis frekuensi Metode Log Pearson Tipe III.

Curah hujan rencana periode ulang 5 tahun. *Diketahui:* $\log X_{i_r} = 2,12197$ mm, $S_x \log X_i = 0,15237$, $C_s = -1,94626$, $K_{T_r} = 0,87046$. *Penyelesaian:* $\log X_T = \log X_{i_r} + K_{T_r} \times S_x \log X_i$, $\log X_T = 2,12197 + 0,87046 \times 0,15237$, $\log X_T = 2,12197 + 0,13263$, $\log X_T = 2,25460$ mm, $X_T = 102,25460$, $X_T = 179,722$ mm.

Tabel 12 Curah hujan rencana (X_T) dengan analisis frekuensi Metode Log Pearson Tipe III

Periode Ulang (Tahun)	Standar Deviasi (S, Log Xi)	Log X_{i_r} (mm)	Koefisien Skewnes (C _s)	Faktor Frekuensi (K _{T_r})	Curah Hujan Rencana (X _T) (mm)
5	0,15237	2,12197	-1,94626	0,87046	179,722
10	0,15237	2,12197	-1,94626	0,99906	188,016
25	0,15237	2,12197	-1,94626	1,00296	188,274
50	0,15237	2,12197	-1,94626	0,95263	184,978
100	0,15237	2,12197	-1,94626	0,88477	180,626

Perhitungan debit banjir rencana Metode Haspers.

Lokasi 1 (00052'25,9" LS - 119055'44,5" BT). *Diketahui:* Luas Daerah Aliran Sungai (A) = 41,84 km², Panjang Sungai (L) = 14,20 km, Kemiringan dasar sungai (S) = 0,02009. Curah hujan rencana (X_{T5}) = 179,722 mm. *Penyelesaian:* Menghitung besarnya koefisien pengaliran:

$$\alpha = \frac{1 + 0,012 \times A^{0,7}}{1 + 0,075 \times A^{0,7}} = \frac{1 + 0,012 \times 41,84^{0,7}}{1 + 0,075 \times 41,84^{0,7}} = 0,575$$

Menghitung waktu tiba banjir : $T_c = 0,10 \times L^{0,8} \times S^{-0,3} = 0,10 \times 14,20^{0,8} \times 0,02009^{-0,3} = 2,697$ jam.

Menghitung distribusi hujan per hari.

$$r = \frac{T_c \times X_T}{T_c + 1} = \frac{2,697 \times 179,722}{2,697 + 1} = 131,115 \text{ mm/hari}$$

Menghitung Intensitas hujan maksimum per km².

$$R_T = \frac{r}{3,6 \times T_c} = \frac{131,115}{3,6 \times 2,697} = 13,502 \text{ m}^3/\text{det}/\text{km}^2$$

Menghitung besarnya koefisien reduksi.

Tabel 13 Rekapitulasi hasil perhitungan hidrolika sungai

Periode Ulang (Tahun)	Parameter									Q _n (m ³ /det)
	A (km ²)	L (km)	S	X _T (mm)	A	T _c (jam)	R (mm/hr)	R _T (m ³ /det/km ²)	β	
Lokasi 1 (00°52'25,9" LS - 119°55'44,5" BT)										
5	41,84	14,20	0,02009	179,722	0,575	2,697	131,115	13,502	0,844	274,157
10	41,84	14,20	0,02009	188,016	0,575	2,697	137,166	14,125	0,844	286,810
25	41,84	14,20	0,02009	188,274	0,575	2,697	137,354	14,144	0,844	287,202
50	41,84	14,20	0,02009	184,978	0,575	2,697	134,950	13,897	0,844	282,176
100	41,84	14,20	0,02009	180,626	0,575	2,697	131,775	13,570	0,844	275,536
Lokasi 2 (00°53'30,2" LS - 119°54'29,0" BT)										
5	50,49	16,7	0,02009	179,722	0,548	3,071	135,577	12,263	0,825	279,572
10	50,49	16,7	0,02009	188,016	0,548	3,071	141,833	12,829	0,825	292,474
25	50,49	16,7	0,02009	188,274	0,548	3,071	142,028	12,846	0,825	292,876
50	50,49	16,7	0,02009	184,978	0,548	3,071	139,541	12,621	0,825	287,749
100	50,49	16,7	0,02009	180,626	0,548	3,071	136,258	12,324	0,825	280,979
Lokasi 3 (00°52'46,5" LS - 119°52'14,5" BT)										
5	64,65	20,6	0,02009	179,722	0,512	3,633	140,927	10,776	0,798	284,400
10	64,65	20,6	0,02009	188,016	0,512	3,633	147,431	11,274	0,798	297,525
25	64,65	20,6	0,02009	188,274	0,512	3,633	147,633	11,289	0,798	297,933
50	64,65	20,6	0,02009	184,978	0,512	3,633	145,048	11,092	0,798	292,717
100	64,65	20,6	0,02009	180,626	0,512	3,633	141,636	10,831	0,798	285,831

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{T_c + 3,7 \times 10^{-0,4T_c}}{T_c^2 + 15} \times \frac{A^{0,75}}{12}$$

$$= 1 + \frac{2,697 + 3,7 \times 10^{(-0,4 \times 2,697)}}{2,697^2 + 15} \times \frac{41,84^{0,75}}{12} = 1,185$$

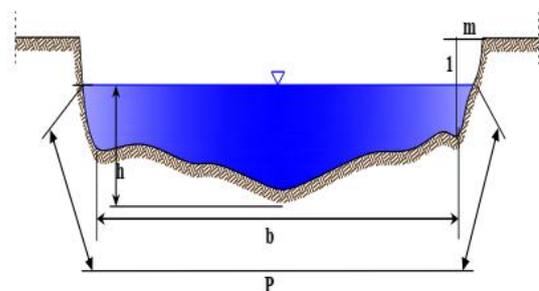
$$\beta = \frac{1}{1,185} = 0,844$$

Menghitung debit banjir rencana berdasarkan persamaan *Haspers*: $Q_5 = \alpha \times R_T \times \beta \times A = 0,575 \times 13,502 \times 0,844 \times 41,84 = 274,157 \text{ m}^3/\text{det}$.

Perhitungan Hidrolika Sungai. Adapun langkah-langkah perhitungan hidrolika sungai adalah sebagai berikut. Penentuan parameter awal perhitungan: Kemiringan dasar sungai 0,02009, Lebar dasar sungai 24,80 m, Kemiringan talud (m) 0,50, Koefisien *Manning* (*n*) 0,033, Debit banjir rencana (Q_5) 274,157 m³/det.

Menghitung luas penampang basah sungai: $A = (b + m \times h) \times h = (24,80 + 0,5 \times h) \times h = 24,80h + 0,5h^2$

Menghitung keliling basah sungai: $P = b + 2 \times h \times \sqrt{1 + m^2} = 24,80 + 2 \times h \times \sqrt{(1 + 0,5^2)} = 24,80 + 2,236h$



Gambar 5 Sketsa potongan melintang sungai

Menghitung jari-jari hidrolis sungai:

$$R = \frac{A}{P} = \frac{24,80h + 0,5h^2}{24,80 + 2,236h}$$

Menghitung kecepatan aliran sungai:

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{0,033} \times \left(\frac{24,80h + 0,5h^2}{24,80 + 2,236h} \right)^{\frac{2}{3}} \times 0,02009^{\frac{1}{2}}$$

$$= 4,295 \times \left(\frac{24,80h + 0,5h^2}{24,80 + 2,236h} \right)^{\frac{2}{3}}$$

Tabel 14 Rekapitulasi hasil perhitungan debit banjir rencana metode *Haspers*

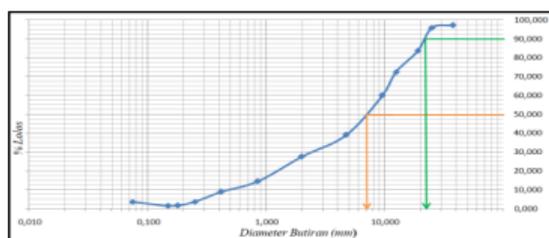
Periode Ulang (Tahun)	Debit Banjir Rencana (Q_n) (m^3/det)	S	b (m)	H (m)	m	A (m^2)	P (m)	R (m)	n	V (m/det)
Lokasi 1 ($00^{\circ}52'25,9''$ LS - $119^{\circ}55'44,5''$ BT)										
5	274,157	0,02009	24,80	1,807	0,50	46,456	28,841	1,611	0,033	5,901
10	286,810	0,02009	24,80	1,858	0,50	47,805	28,955	1,651	0,033	6,000
25	287,202	0,02009	24,80	1,860	0,50	47,847	28,958	1,652	0,033	6,003
50	282,176	0,02009	24,80	1,840	0,50	47,313	28,913	1,636	0,033	5,964
100	275,536	0,02009	24,80	1,813	0,50	46,604	28,854	1,615	0,033	5,912
Lokasi 2 ($00^{\circ}53'30,2''$ LS - $119^{\circ}54'29,0''$ BT)										
5	279,572	0,02009	46,6	1,234	0,50	58,292	49,396	1,180	0,033	4,796
10	292,474	0,02009	46,6	1,268	0,50	59,928	49,473	1,211	0,033	4,880
25	292,876	0,02009	46,6	1,269	0,50	59,979	49,475	1,212	0,033	4,883
50	287,749	0,02009	46,6	1,255	0,50	59,332	49,445	1,200	0,033	4,850
100	280,976	0,02009	46,6	1,237	0,50	58,472	49,405	1,184	0,033	4,805
Lokasi 3 ($00^{\circ}52'46,5''$ LS - $119^{\circ}52'14,5''$ BT)										
5	284,400	0,02009	26,4	1,777	0,50	48,482	30,373	1,596	0,033	5,866
10	297,525	0,02009	26,4	1,826	0,50	49,886	30,484	1,636	0,033	5,964
25	297,933	0,02009	26,4	1,828	0,50	49,929	30,487	1,838	0,033	5,967
50	292,717	0,02009	26,4	1,808	0,50	49,374	30,443	1,622	0,033	5,929
100	285,831	0,02009	26,4	1,782	0,50	48,637	30,385	1,601	0,033	5,877

Menghitung debit aliran: $Q_5 = A \times V$

Melalui cara *trial and error* berdasarkan nilai debit banjir rencana, maka diperoleh nilai kedalaman aliran sungai (h) adalah sebesar 1,641 m.

Substitusi nilai $h = 1,614$ m ke dalam persamaan hidrolika sebelumnya: $A = 46,453 m^2$, $P = 28,841 m$, $R = 1,610 m$, $V = 5,901 m/det$.

Perhitungan Analisa Saringan Sedimen Dasar. Pengujian analisa saringan bertujuan untuk mendapatkan ukuran diameter sedimen dasar (d_{50} dan d_{90}). Sampel sedimen dasar yang akan diuji diambil dari tiga lokasi berbeda. Perhitungan pada Tabel 15.



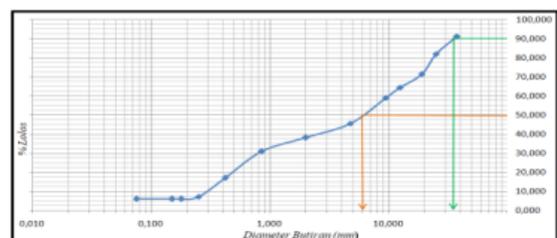
Gambar 6 Grafik gradasi butiran sedimen dasar pada lokasi 1

Tabel 15 Perhitungan analisa saringan untuk sampel sedimen dasar pada Lokasi 1

Berat kering sampel sebelum disaring : 2002,09 gr Tgl Pengujian : 09/06/2023

Saringan No.	Bukaan (mm)	Berat Tertahan (gr)	Kumulatif Tertahan (gr)	Tertahan (%)	Lolos (%)
1 1/2"	37,500	53,680	53,680	2,782	97,218
1"	25,000	25,340	79,020	4,095	95,905
3/4"	19,000	234,840	313,860	16,263	83,737
1/2"	12,500	216,450	530,310	27,479	72,521
3/8"	9,520	240,730	771,040	39,953	60,047
#4	4,750	403,070	1174,110	60,838	39,162
#10	2,000	222,210	1396,320	72,352	27,648
#20	0,850	252,110	1648,430	85,416	14,584
#40	0,420	108,660	1757,090	91,046	8,954
#60	0,250	103,190	1860,280	96,393	3,607
#80	0,180	37,720	1898,000	98,348	1,652
#100	0,150	2,610	1900,610	98,483	1,517
#200	0,075	29,280	1929,890	96,394	3,606
Pan		72,200	2002,090	100,000	0,000

Dari hasil plot dari grafik pada Gambar 6 diperoleh ukuran butiran sedimen dasar: $d_{50} = 7$ mm ; $d_{90} = 20,4$ mm.



Gambar 7 Grafik gradasi butiran sedimen dasar pada lokasi 2

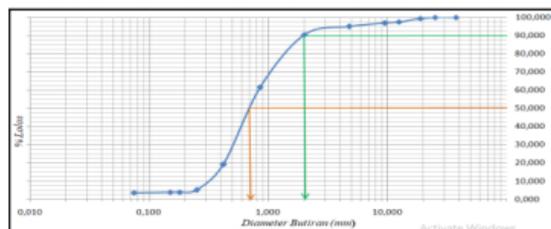
Tabel 16 Perhitungan analisa saringan untuk sampel sedimen dasar pada Lokasi 2

Berat kering sampel sebelum disaring : 2002,69 gr Tgl Pengujian : 09/06/2023					
Saringan	Bukaan	Berat Tertahan	Kumulatif Tertahan	Tertahan (%)	Lolos (%)
No.	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)
1 1/2"	37,500	179,510	179,510	8,963	91,037
1"	25,000	179,710	359,220	17,937	82,063
3/4"	19,000	214,940	574,160	28,667	71,331
1/2"	12,500	136,620	710,780	35,491	64,509
3/8"	9,520	108,090	818,870	40,889	59,111
#4	4,750	270,860	1089,730	54,413	45,587
#10	2,000	147,890	1237,620	61,798	38,202
#20	0,850	145,670	1383,290	69,072	30,928
#40	0,420	276,190	1659,480	82,863	17,137
#60	0,250	197,860	1857,340	92,742	7,258
#80	0,180	22,870	1880,210	93,884	6,116
#100	0,150	0,090	1880,300	93,889	6,111
#200	0,075	0,380	1880,680	93,908	6,029
Pan		122,010	2002,690	100,000	0,000

Dari hasil plot dari grafik pada Gambar 7 diperoleh ukuran butiran sedimen dasar: $d_{50} = 6 \text{ mm}$; $d_{90} = 30,5 \text{ mm}$.

Tabel 17 Perhitungan analisa saringan untuk sampel sedimen dasar pada Lokasi 3

Berat kering sampel sebelum disaring : 2001,63 gr Tgl Pengujian : 09/06/2023					
Saringan	Bukaan	Berat Tertahan	Kumulatif Tertahan	Tertahan (%)	Lolos (%)
No.	(mm)	(gr)	(gr)	(%)	(%)
1 1/2"	37,500	0,000	0,000	0,000	100,000
1"	25,000	0,000	0,000	0,000	100,000
3/4"	19,000	12,350	12,350	0,617	99,383
1/2"	12,500	36,150	48,500	2,423	97,577
3/8"	9,520	14,200	62,700	3,132	96,868
#4	4,750	38,340	101,040	5,048	94,952
#10	2,000	89,260	190,300	9,509	90,493
#20	0,850	581,900	772,200	38,579	61,421
#40	0,420	845,370	1617,570	80,813	19,187
#60	0,250	282,250	1899,820	94,914	5,086
#80	0,180	24,480	1924,300	96,137	3,863
#100	0,150	1,000	1925,300	96,187	3,813
#200	0,075	4,060	1929,360	96,389	3,611
Pan		72,270	2002,630	100,000	0,000



Gambar 8 Grafik gradasi butiran sedimen dasar pada lokasi 3

Dari hasil plot dari grafik pada Gambar 8 diperoleh ukuran butiran sedimen dasar: $d_{50} = 0,7 \text{ mm}$; $d_{90} = 2 \text{ mm}$.

Perhitungan Berat Jenis Sedimen Dasar.

Setelah dilakukan pengujian analisa saringan terhadap sampel sedimen dasar, maka selanjutnya dilakukan pengujian untuk mengetahui nilai dari berat jenis sedimen dasar. Sebagaimana pada Tabel 18.

Tabel 18 Hasil pengujian dan perhitungan berat jenis sedimen dasar

Tgl Pengujian : 10/06/2023		Sampel Sedimen Dasar					
Parameter	Satuan	Lokasi 1		Lokasi 2		Lokasi 3	
W ₁	(gr)	70,72	69,45	69,52	70,73	70,68	69,56
W ₂	(gr)	120,66	123,58	117,04	117,25	116,03	114,86
W ₃	(gr)	206,54	206,52	204,53	203,68	202,04	203,02
W ₄	(gr)	174,16	176,16	174,16	176,16	174,16	176,16
Suhu	°C	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
W _s	(gr)	49,94	54,13	47,52	46,52	45,35	45,30
W _t	(gr)	224,10	230,29	221,68	222,68	219,51	221,46
W _w	(gr)	17,56	23,77	17,15	19,00	17,47	18,44
G _s	-	2,84	2,28	2,77	2,45	2,60	2,64
G _{rat}	-	2,56	2,61	2,53			

- Keterangan:**
- ✓ W₁ : Berat piknometer
 - ✓ W₂ : Berat piknometer + Berat contoh
 - ✓ W₃ : Berat piknometer + Berat contoh + Berat air
 - ✓ W₄ : Berat piknometer + Berat air pada t*
 - ✓ W_s : Berat contoh → (W_s = W₂ - W₁)
 - ✓ W_t : Berat contoh + Berat piknometer + Berat air pada t* → (W_t = W₄ + W₄)
 - ✓ W_w : Berat air suling → (W_w = W₃ - W₂)
 - ✓ G_s : Berat jenis sedimen dasar → (G_s = W_s / W_w)
 - ✓ G_{rat} : Berat jenis sedimen dasar rata-rata → (G_{rat} = (G_{s1} + G_{s2}) / 2)

Perhitungan Laju Angkutan Sedimen Dasar.

Dalam penelitian ini laju angkutan sedimen dasar dihitung menggunakan Metode Meyer-Peter and Muller dan berdasarkan debit banjir rencana periode ulang 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun dan 100 tahun pada tiga lokasi yang berbeda. Adapun langkah-langkah perhitungannya adalah berikut:

Lokasi 1 (00052'25,9" LS - 119055'44,5" BT).
Diketahui: Debit banjir rencana (Q₅) = 274,157 m³/det, Kemiringan dasar sungai (S) = 0,02009, Lebar dasar sungai (b) = 24,80 m, Jari-jari hidrolis sungai (R) = 1,611 m, Kecepatan aliran sungai (V) = 5,901 m/det, Berat jenis air (γ_w) = 1 gr/cm³, Berat jenis sedimen dasar (γ_s) = 2,56 gr/cm³, Percepatan gravitasi bumi (g) = 9,81 m/det², Diameter butiran sedimen (d₅₀) = 0,00700 m, Diameter butiran sedimen (d₉₀) = 0,02040 m.

Penyelesaian: Menghitung nilai koefisien kekasaran butiran (K_s')

$$K'_s = \frac{26}{\frac{1}{d_{90}^6}} = \frac{26}{\frac{1}{0,02040^6}} = 49,740 \text{ m}^{-\frac{1}{6}}$$

Menghitung nilai Koefisien Strickler (K_s)

$$K_s = \frac{V}{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}} = \frac{5,901}{1,611^{\frac{2}{3}} \times 0,02009^{\frac{1}{2}}} = 30,30 \text{ m}^{\frac{1}{3}}/\text{det}$$

Tabel 19 Rekapitulasi hasil perhitungan laju angkutan sedimen dasar metode Meyer-Peter dan Muller

Periode Ulang (Tahun)	Q_n (m ³ /det)	S	b (m)	R (m)	V (m/det)	γ_s (gr/cm ³)	γ (m/det ²)	d_{50} (m)	d_{90} (m)	$K_{s'}$ (m ^{-1/6})	K_s (m ^{1/3} /det)	q_B (m ³ /m.det)	Q_s (m ³ /det)
Lokasi 1 (00°52'25,9" LS - 119°55'44,5" BT)													
5	274,157	0,02009	24,80	1,611	5,901	2,56	9,81	0,00700	0,02040	49,740	30,30	0,02912	0,72219
10	286,810	0,02009	24,80	1,651	6,000	2,56	9,81	0,00700	0,02040	49,740	30,30	0,03026	0,75041
25	287,202	0,02009	24,80	1,652	6,003	2,56	9,81	0,00700	0,02040	49,740	30,30	0,03029	0,75128
50	282,176	0,02009	24,80	1,636	5,964	2,56	9,81	0,00700	0,02040	49,740	30,30	0,02984	0,74010
100	275,536	0,02009	24,80	1,615	5,912	2,56	9,81	0,00700	0,02040	49,740	30,30	0,02924	0,72527
Lokasi 2 (00°53'30,2" LS - 119°54'29,0" BT)													
5	279,572	0,02009	46,6	1,180	4,796	2,61	9,81	0,00600	0,03050	46,515	30,30	0,02049	0,95561
10	292,474	0,02009	46,6	1,211	4,880	2,61	9,81	0,00600	0,03050	46,515	30,30	0,02134	0,99528
25	279,876	0,02009	46,6	1,212	4,883	2,61	9,81	0,00600	0,03050	46,515	30,30	0,02137	0,99651
50	287,749	0,02009	46,6	1,200	4,850	2,61	9,81	0,00600	0,03050	46,515	30,30	0,02103	0,98078
100	280,979	0,02009	46,6	1,184	4,805	2,61	9,81	0,00600	0,03050	46,515	30,30	0,02058	0,95995
Lokasi 3 (00°52'46,5" LS - 119°52'14,5" BT)													
5	284,400	0,02009	26,4	1,596	5,866	2,53	9,81	0,00070	0,00200	73,249	30,30	0,01282	0,33855
10	297,525	0,02009	26,4	1,636	5,964	2,53	9,81	0,00070	0,00200	73,249	30,30	0,01331	0,35150
25	297,933	0,02009	26,4	1,638	5,967	2,53	9,81	0,00070	0,00200	73,249	30,30	0,01333	0,35190
50	292,717	0,02009	26,4	1,622	5,929	2,53	9,81	0,00070	0,00200	73,249	30,30	0,01314	0,34677
100	285,831	0,02009	26,4	1,601	5,877	2,53	9,81	0,00070	0,00200	73,249	30,30	0,01288	0,33997

Menghitung laju angkutan sedimen dasar per meter lebar sungai (q_B)

$$q_B = \sqrt{\left(\frac{\gamma_w R \left(\frac{K_s}{K_s'} \right)^{\frac{3}{2}} S - 0,047(\gamma_s - \gamma_w)d_{50}}{0,25 \left(\frac{\gamma_w}{g} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)^3}$$

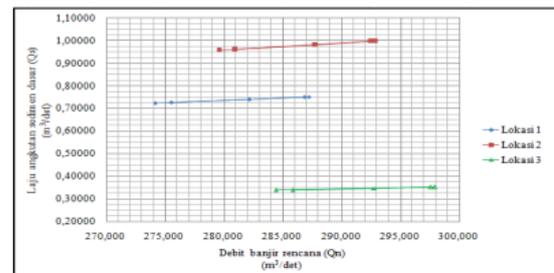
$$= \sqrt{\left(\frac{1(1,1476) \left(\frac{30,3}{49,74} \right)^{\frac{3}{2}} - 0,047(2,56 - 1)0,007}{0,25 \left(\frac{1}{9,81} \right)^{\frac{1}{3}}} \right)^3}$$

$$= \frac{0,04545}{2,56 - 1} = 0,02912 \text{ m}^3/\text{det.m}$$

Menghitung laju angkutan sedimen dasar untuk keseluruhan lebar sungai (Q_s), $Q_s = q_B \times b = 0,02912 \times 24,80 = 0,72219 \text{ m}^3/\text{det.}$

Pembahasan. Berdasarkan Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8 pengujian hasil analisa saringan di atas maka dapat diperoleh gradasi butiran sedimen pada tiap-tiap lokasi pengambilan sampel. Sehingga dapat diketahui bahwa karakteristik butiran sedimen pada Lokasi 1 memiliki ukuran butiran yang lebih besar ($d_{50} = 7,00 \text{ mm}$) dibandingkan dengan butiran sedimen pada Lokasi 2 ($d_{50} = 6,00 \text{ mm}$) dan Lokasi 3 ($d_{50} =$

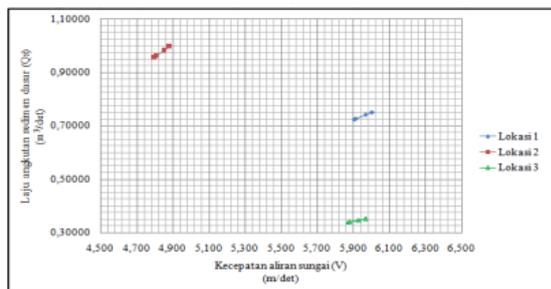
$0,70 \text{ mm}$), sehingga menyebabkan perbedaan besar laju angkutan sedimen dasar (Q_s) di Sungai Pondo-Poboya.



Gambar 9 Grafik hubungan antara debit banjir rencana (Q_n) dengan laju angkutan sedimen dasar (Q_s)

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai debit banjir rencana (Q_n) dengan menggunakan Metode *Haspers* yaitu sebagai berikut: **Lokasi 1 (00°52'25,9" LS - 119°55'44,5" BT).** Periode ulang 5 tahun sebesar 274,157 m³/det. Periode ulang 10 tahun sebesar 286,810 m³/det. Periode ulang 25 tahun sebesar 287,202 m³/det. Periode ulang 50 tahun sebesar 282,176 m³/det. Periode ulang 100 tahun sebesar 275,536 m³/det. **Lokasi 2 (00°53'30,2" LS - 119°54'29,0" BT).**

BT). Periode ulang 5 tahun sebesar 279,572 m³/det. Periode ulang 10 tahun sebesar 292,474 m³/det. Periode ulang 25 tahun sebesar 279,876 m³/det. Periode ulang 50 tahun sebesar 287,749 m³/det. Periode ulang 100 tahun sebesar 280,979 m³/det. **Lokasi 3 (00052'46,5" LS - 119052'14,5" BT).** Periode ulang 5 tahun sebesar 284,400 m³/det. Periode ulang 10 tahun sebesar 297,525 m³/det. Periode ulang 25 tahun sebesar 297,933 m³/det. Periode ulang 50 tahun sebesar 292,717 m³/det. Periode ulang 100 tahun sebesar 285,831 m³/det.



Gambar 10 Grafik hubungan antara kecepatan aliran sungai (V) dengan laju angkutan sedimen dasar (Q_s)

Hasil perhitungan debit banjir rencana di atas dapat dilihat bahwa besarnya nilai debit banjir rencana sangat dipengaruhi oleh luas DAS dan curah hujan.

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai laju angkutan sedimen dasar (Q_s) dengan menggunakan Metode Meyer-Peter and Muller yaitu sebagai berikut: **Lokasi 1 (00052'25,9" LS - 119055'44,5" BT).** Periode ulang 5 tahun sebesar 0,72219 m³/det. Periode ulang 10 tahun sebesar 0,75041 m³/det. Periode ulang 25 tahun sebesar 0,75128 m³/det. Periode ulang 50 tahun sebesar 0,74010 m³/det. Periode ulang 100 tahun sebesar 0,72527 m³/det. **Lokasi 2 (00053'30,2" LS - 119054'29,0" BT).** Periode ulang 5 tahun sebesar 0,95561 m³/det. Periode ulang 10 tahun sebesar 0,99528 m³/det. Periode ulang 25 tahun sebesar 0,99651 m³/det. Periode ulang 50 tahun sebesar 0,98078 m³/det. Periode ulang 100 tahun sebesar 0,95995 m³/det. **Lokasi 3 (00052'46,5" LS - 119052'14,5" BT).** Periode ulang 5 tahun sebesar 0,33855 m³/det. Periode ulang 10 tahun sebesar 0,35150

m³/det. Periode ulang 25 tahun sebesar 0,35190 m³/det. Periode ulang 50 tahun sebesar 0,34677 m³/det. Periode ulang 100 tahun sebesar 0,33997 m³/det.

Berdasarkan hasil perhitungan laju angkutan sedimen dasar (Q_s) dengan menggunakan Metode Meyer-Peter and Muller pada tiga lokasi pengambilan sampel maka dapat diperoleh laju angkutan sedimen dasar terbesar rata-rata terjadi pada Lokasi 2 dan laju angkutan sedimen dasar terkecil rata-rata terjadi pada Lokasi 3. Distribusi angkutan sedimen yang berbeda-beda pada setiap lokasi sungai tersebut secara tidak langsung menunjukkan bahwa kondisi sungai dalam keadaan tidak stabil.

Hasil perhitungan laju angkutan sedimen dasar (Q_s) tersebut dapat dilihat bahwa pada Lokasi 3 akan terjadi aggradasi (pengendapan material sedimen), hal ini dikarenakan jumlah angkutan sedimen yang masuk ke Lokasi 3 lebih besar dari pada jumlah angkutan sedimen yang keluar.

Perbedaan besar laju angkutan sedimen dasar (Q_s) di Sungai Pondo-Poboya pada tiap-tiap lokasi bukan hanya dipengaruhi oleh debit aliran sungai (Q) dan kecepatan aliran sungai (V) melainkan juga ada beberapa faktor penting lainnya yang mempengaruhi yaitu seperti berat jenis sedimen dasar (G_s), diameter butiran sedimen (d₅₀ dan d₉₀), Koefisien Strickler (K_s), Koefisien kekasaran akibat butiran (K_s') dan jari-jari hidrolis sungai (R).

Berdasarkan hubungan antara debit banjir rancangan (Q_n) dengan laju angkutan sedimen dasar (Q_s) dapat diketahui bahwa semakin besar debit aliran sungai yang terjadi maka semakin besar pula laju angkutan sedimen yang terjadi.

Berdasarkan grafik pada Gambar 9 dan Gambar 10 dapat dilihat bahwa besarnya angkutan sedimen sangat dipengaruhi oleh debit aliran sungai (Q) dan kecepatan aliran sungai (V).

Berdasarkan grafik pada Gambar 10 hubungan antara kecepatan aliran sungai (V) dengan laju angkutan sedimen dasar (Q_s)

dapat diketahui bahwa semakin besar kecepatan aliran sungai yang terjadi maka semakin besar pula laju angkutan sedimen yang terjadi.

5 KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan dengan menggunakan Metode Meyer-Peter and Muller maka diperoleh laju angkutan sedimen dasar terbesar dan terkecil pada periode ulang dan tiap-tiap lokasi pada Sungai Pondo-Poboya adalah sebagai berikut: a) Periode ulang 5 tahun, Q_s terbesar berada pada lokasi 2 = $0,95561 \text{ m}^3/\text{det}$, Q_s terkecil berada pada lokasi 3 = $0,33855 \text{ m}^3/\text{det}$. b) Periode ulang 10 tahun, Q_s terbesar berada pada lokasi 2 = $0,99528 \text{ m}^3/\text{det}$, Q_s terkecil berada pada lokasi 3 = $0,33855 \text{ m}^3/\text{det}$. c) Periode ulang 25 tahun, Q_s terbesar berada pada lokasi 2 = $0,99651 \text{ m}^3/\text{det}$, Q_s terkecil berada pada lokasi 3 = $0,35190 \text{ m}^3/\text{det}$. d) Periode ulang 50 tahun, Q_s terbesar berada pada lokasi 2 = $0,98078 \text{ m}^3/\text{det}$, Q_s terkecil berada pada lokasi 3 = $0,34677 \text{ m}^3/\text{det}$. e) Periode ulang 100 tahun, Q_s terbesar berada pada lokasi 2 = $0,95995 \text{ m}^3/\text{det}$, Q_s terkecil berada pada lokasi 3 = $0,33997 \text{ m}^3/\text{det}$.

Berdasarkan hasil perhitungan laju angkutan sedimen dasar (Q_s) menggunakan Metode Meyer-Peter and Muller pada periode ulang 5 tahun, 10 tahun, 25 tahun, 50 tahun dan 100 tahun di atas, dapat dilihat bahwa laju angkutan sedimen dasar terbesar rata-rata terjadi pada lokasi 2 Sementara itu, laju angkutan sedimen dasar terkecil rata-rata terjadi pada lokasi 3.

Dari hasil perhitungan, dapat disimpulkan bahwa angkutan sedimen (Q_s) yang keluar dari lokasi 2 lebih besar dari pada lokasi 3, sehingga lokasi 3 akan terjadi agradasi, yaitu proses pengendapan material sedimen.

6 SARAN

Bagian hilir Sungai Pondo-Poboya sebaiknya dilakukan pengerukan dasar sungai secara berkala dengan tujuan agar daya tampung sungai tidak berkurang dan fungsi sungai tetap terjaga.

Bagian hulu Sungai Pondo-Poboya sebaiknya dibuat bangunan pengendali sedimen (*check dam*) yang bertujuan untuk mengurangi jumlah angkutan sedimen dasar yang terbawa ke muara.

Perlu adanya perbaikan atau penataan kembali terutama pada kawasan DAS bagian hulu seperti dengan melakukan penanaman kembali pada kawasan lahan yang kritis.

Penelitian selanjutnya untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat maka dalam melakukan pengukuran sungai detail pengukuran lebih diperbanyak sehingga keseluruhan bagian sungai dapat terwakili dengan baik.

Penelitian lebih lanjut disarankan menggunakan metode lain dalam menghitung laju angkutan sedimen sehingga dengan menggunakan metode lain akan dapat dilihat perbandingan dari hasil perhitungan.

Penelitian lebih lanjut disarankan untuk menghitung besarnya laju erosi di bagian hulu sungai karena hal ini akan sangat berpengaruh terhadap besarnya angkutan sedimen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Rauf, K. S. Lubis and Jamilah, Dasar-dasar pengelolaan daerah aliran sungai, Medan: USU Press, 2011.
- [2] S. Sosrodarsono and T. Kensaku, Hidrologi untuk pengairang, Jakarta: Pradnya Paramita, 1987.
- [3] I. M. Kamiana, Teknik perhitungan debit rencana bangunan air, Yogyakarta: Graha Ilmu, 2011.
- [4] BSN, SNI 2415:2016 Tata cara perhitungan debit banjir rencana, BSN, 2016.
- [5] B. A. Kironoto, "Sediment Delivery Ratio pada Daerah Tangkapan Waduk Sermo," Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta, 1997.
- [6] V. T. Chow, Open Channel Hydraulics, New York: McGraw-Hill, 1959.



Analisis Kelayakan Infrastruktur Pariwisata Di Kota Palu, Sulawesi Tengah: Studi Kasus Kampung Nelayan Palu

Fritswel Ratmadi Payung*¹, William Arrang Sarungallo¹, Bayu Rahmat Ramadhan¹, Ni Made Ayu Juli Andjani¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Jalan Soekarno Hatta

*Penulis korespondensi: payungfritswel@gmail.com

DISUBMIT 2 Desember 2024

DIREVISI 11 Desember 2024

DITERIMA 12 Desember 2024

ABSTRAK Penelitian ini menganalisis kelayakan infrastruktur pariwisata di Kampung Nelayan Palu, Sulawesi Tengah, sebagai destinasi wisata potensial. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan, kuesioner, dan wawancara dengan berbagai responden, termasuk wisatawan lokal, masyarakat sekitar, serta pemangku kepentingan. Infrastruktur dinilai berdasarkan sepuluh indikator, seperti akomodasi, tempat makan, transportasi, dan telekomunikasi, menggunakan skala kelayakan ASCE (2009). Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar infrastruktur berada dalam kategori buruk dengan nilai rata-rata 65,37% atau D. Temuan ini mengindikasikan perlunya perbaikan mendasar, khususnya dalam aspek transportasi, telekomunikasi, dan sanitasi, untuk mendukung pengembangan pariwisata berkelanjutan di Kampung Nelayan Palu. Dengan peningkatan infrastruktur yang tepat, kawasan ini memiliki potensi besar untuk meningkatkan daya tarik wisata dan kontribusi ekonomi lokal.

KATA KUNCI Infrastruktur Pariwisata; Kampung Nelayan Palu; Kelayakan; Sulawesi Tengah

1 PENGANTAR

Infrastruktur pariwisata adalah komponen produk wisata daerah, infrastruktur terdiri dari perangkat dasar, bangunan dan institusi pelayanan, yang keberadaannya sangat penting untuk kegiatan ekonomi dan sosial. Infrastruktur dibagi menjadi: 1) Teknis, termasuk perangkat dasar dan transportasi, komunikasi, gas, panas, listrik dan industri jalan; 2) Sosial, termasuk perangkat dan lembaga yang berhubungan dengan pendidikan, budaya, ilmu pengetahuan, kesehatan, budaya fisik dan pariwisata, administrasi publik. [1]

Dalam banyak kasus, daya tarik pariwisata di suatu daerah bisa ditingkatkan melalui penyediaan atraksi unggulan, layanan dan infrastruktur. Namun evaluasi yang perlu dilakukan untuk menjadikan investasi ialah mencari potensi pariwisata yang perlu dimanfaatkan dan memprediksi penggunaan di masa depan. [2]

Berdasarkan data jumlah kunjungan wisatawan kabupaten/kota di Provinsi Sulawesi Tengah Tahun 2023, Kota Palu menerima kunjungan wisatawan sebanyak 545.446 kunjungan dengan persentase

10.6% dari total kunjungan wisatawan seluruh Sulawesi Tengah. Jumlah ini terlampaui jauh dari Kabupaten Morowali yaitu sebanyak 1.338.490 kunjungan wisatawan dengan persentase 26% dari total kunjungan wisatawan Sulawesi Tengah [3]. Dinas Pariwisata Kota Palu dalam Rancangan Awal Rencana Strategis 2021-2026 menjelaskan bahwa rata-rata wisatawan menjadikan Kota Palu sebagai tempat transit untuk selanjutnya menuju ke Destinasi di Kabupaten sesuai tujuan masing-masing [4].

Sebagai daerah ibu kota Sulawesi Tengah, Kota Palu memiliki potensi besar dalam pengembangan pariwisata pada sektor kekayaan alam dan budaya. Salah satu destinasi wisata yang memiliki potensi dan menjadi unggulan adalah Kampung Nelayan Palu, dengan pesona pantai dan kehidupan masyarakat nelayan yang autentik. Namun, ketersediaan infrastruktur memadai masih menjadi tantangan dalam pengembangan potensi tersebut. Oleh karena itu, diperlukan analisis kelayakan infrastruktur untuk memastikan kesiapan destinasi ini dalam mendukung sektor pariwisata di kota Palu.

Tabel 1 Skala rating pengukuran kelayakan infrastruktur

Huruf Gradasi	% Rating	Istilah	Definisi
A	90-100	Baik Sekali	Infrastruktur memenuhi tujuan dan kebutuhan saat ini dan mengantisipasi mendatang.
B	80-89	Baik	Kebutuhan kecil dibutuhkan agar infrastruktur memenuhi tujuan dan saat ini dan mengantisipasi mendatang.
C	70-79	Cukup	Perubahan besar dibutuhkan agar infrastruktur memenuhi tujuan dan mengantisipasi mendatang.
D	51-69	Buruk	Perubahan mendasar dibutuhkan agar infrastruktur memenuhi tujuan saat ini dan mengantisipasi mendatang.
E	<50	Buruk Sekali	Infrastruktur tidak memadai untuk memenuhi tujuan dan kebutuhan saat ini.

Penelitian ini bertujuan untuk menilai sejauh mana kelayakan infrastruktur pariwisata di Kota Palu khususnya pada destinasi wisata Kampung Nelayan agar dapat mendukung kegiatan pariwisata dan selanjutnya dapat dilakukan pengembangan lebih lanjut.

Dengan demikian, penelitian ini dapat dijadikan sarana yang dapat digunakan oleh pemerintah setempat baik daerah maupun pusat dalam mendukung, memperhatikan, dan mengembangkan potensi destinasi wisata di Kota Palu, Sulawesi Tengah. Dengan adanya pengembangan pariwisata akan berdampak pada pendapatan daerah dan juga membantu Masyarakat di sekitar daerah wisata dalam sektor ekonomi.

2 METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif. Data dikumpulkan melalui observasi lapangan dengan cara penyebaran kuesioner, wawancara dengan Masyarakat, wisatawan mancanegara, wisatawan lokal dan pemangku kepentingan, analisis dokumen dari instansi terkait, penelitian terdahulu, artikel, internet dan lain sebagainya yang dapat mendukung proses analisa dalam penelitian ini.

Sistem Penilaian. *Rating* pemberian nilai kelayakan infrastruktur Pariwisata di Kota Palu, Sulawesi Tengah: khususnya pada Kampung Nelayan Palu ini terdiri dari 5 tingkatan [5], disajikan pada Tabel 1.

Pengumpulan Data. Metode pengumpulan data dilakukan dengan cara pengisian

Kuisisioner. Kuisisioner berisi tentang pernyataan yang meliputi: 1) Pengantar yang berisi topik penelitian, tujuan penelitian, dan ucapan terima kasih kepada responden. 2) Data Umum responden, yang berisi nama, jenis kelamin, Usia, Asal, dan pekerjaan. 3) Pertanyaan yang khusus ditujukan untuk wisatawan, yang berisi pengalaman wisata yang anda rasakan dalam mengunjungi lokasi wisata dan bagaimana sambutan masyarakat terhadap wisatawan. 4) Data penilaian responden, berisi penilaian dari responden untuk menilai Kelayakan infrastruktur Pariwisata di Kota Palu, Sulawesi Tengah: khususnya pada Kampung Nelayan Palu.

Metode Analisis Data. Setelah seluruh data dari responden diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis data. Analisis yang digunakan adalah analisis deskriptif dengan menghitung *mean*, standar deviasi, dan *rating*.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Umum Responden. Dalam penelitian ini, kuisisioner diberikan kepada 35 responden yang terdiri dari wisatawan mancanegara dan lokal, Masyarakat sekitar, dan para pemangku kepentingan. Kuisisioner diberikan secara langsung kepada responden agar ketika responden menemui hal yang kurang dimengerti maka akan dijelaskan langsung oleh peneliti.

1) Jenis Kelamin Responden. Dari 35 responden, terdapat 54,28% responden laki-laki dan 45,72% responden Perempuan.

Analisis jenis kelamin responden disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Jenis kelamin responden

No.	Jenis Kelamin	Frekuensi	Persentase (%)
1	Laki-laki	19	54,28
2	Perempuan	16	45,72
	Total	35	100

2) Usia Responden. Usia dikelompokkan menjadi 4 bagian, yaitu 17-25 tahun, 26-45 tahun, 46-65 tahun, dan 65 ≤ tahun. Analisis usia responden disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Usia responden

No.	Usia (Tahun)	Frekuensi	Persentase (%)
1	17 – 25	7	20
2	26 – 45	18	51,43
3	46 – 65	9	25,71
4	≥ 65	1	2,86
	Total	35	100

3) Pekerjaan Responden. Pekerjaan responden dalam penelitian ini dibagi menjadi 3 kelompok yang berkaitan dengan bidang pariwisata, yaitu: wisatawan lokal, wisatawan mancanegara, pemangku kepentingan (Penyedia Akomodasi, Pengelola Tempat Wisata, Dinas Pariwisata, dan lain-lain). Analisis pekerjaan responden tersajikan pada

Tabel 4 Pekerjaan Responden

No.	Pekerjaan	Frekuensi	Persentase (%)
1	Wisatawan mancanegara	0	0
2	Wisatawan lokal	29	82,86
3	Lainnya	6	17,14
	Total	35	100

Pertanyaan Untuk Wisatawan. Dalam penelitian ini juga disediakan pertanyaan untuk responden khususnya wisatawan, total wisatawan yang mengisi pertanyaan ini adalah 29 orang.

1) Pengalaman Wisata. Pengalaman wisata diberikan kepada wisatawan untuk mengetahui apa yang dirasakan Ketika berkunjung ke destinasi wisata Kampung Nelayan Palu. Ada 4 pilihan yang diberikan yaitu Sangat Baik, Baik, Cukup, dan Kurang

baik. Hasil analisis pengalaman wisata disediakan pada Tabel 5.

Tabel 5 Pengalaman Wisata

No	Pengalaman wisata	Jumlah
1	Sangat Baik	10
2	Baik	15
3	Cukup	3
4	Kurang baik	1
	Total	29

2) Sambutan Masyarakat Terhadap Wisatawan. Responden juga diberikan pertanyaan tentang bagaimana sambutan Masyarakat terhadap wisatawan khususnya pada destinasi wisata Kampung Nelayan. Disediakan 4 pilihan yaitu Sangat Baik, Baik, Cukup, dan Kurang Baik. Analisis tersedia pada tabel 6.

Tabel 6 Sambutan masyarakat terhadap wisatawan

No	Pengalaman wisata	Jumlah
1	Sangat Baik	15
2	Baik	13
3	Cukup	1
4	Kurang baik	0
	Total	29

Penilaian Infrastruktur. Terdapat 10 indikator infrastruktur yang dinilai oleh responden antara lain: akomodasi (penginapan/hotel), tempat makan dan minum (rumah makan/restoran/cafe), sarana penjualan (toko-toko yang menjual barang – barang souvenir atau benda – benda lain khusus wisatawan), air bersih untuk minum, listrik, toilet/MCK umum, transportasi (ketersediaan sarana transportasi dan kemudahan mencapai kawasan wisata), tempat rekreasi, tempat buangan sampah di objek wisata, dan telekomunikasi (sinyal di lokasi wisata). Penilaian responden pada setiap indikator infrastruktur pariwisata sesuai petunjuk pada skala kelayakan infrastruktur dari ASCE tahun 2009 tersedia pada Tabel 7.

Keterangan: I1: Akomodasi (Penginapan/Hotel), I2 : Tempat makan dan minum (Rumah makan/Restoran/Cafe), I3 : Sarana penjualan (toko-toko yang menjual barang-barang souvenir atau benda-benda lain khusus wisatawan), I4 : Air bersih untuk minum, I5 : Listrik, I6 : Toilet/MCK umum,

Tabel 7 Penilaian infrastruktur responden

Responden	Infrastruktur									
	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	I9	I10
1	B	B	D	C	C	D	D	B	D	D
2	C	C	C	B	D	D	C	C	D	C
3	B	C	B	C	B	B	C	A	B	D
4	D	B	C	C	B	B	B	A	B	D
5	C	B	C	B	C	D	E	C	C	D
6	D	B	D	B	C	E	C	C	D	C
7	C	C	C	B	B	B	C	B	B	C
8	B	B	D	C	C	A	C	B	C	B
9	C	B	D	B	B	B	B	B	C	B
10	C	C	C	C	B	C	C	C	D	D
11	C	B	D	B	C	B	C	C	B	B
12	C	B	D	C	C	E	B	B	C	D
13	C	B	D	C	C	D	D	B	B	C
14	C	B	C	B	C	B	D	C	B	B
15	C	B	C	B	B	C	C	B	C	B
16	B	C	C	C	B	D	B	B	C	C
17	B	B	D	B	B	C	C	B	B	B
18	B	B	D	C	B	C	C	C	B	C
19	D	B	C	C	C	D	C	B	D	C
20	C	B	C	B	B	C	B	B	B	B
21	C	B	D	D	C	D	B	B	B	B
22	C	B	C	B	C	C	C	B	A	C
23	B	B	D	B	C	C	C	C	C	C
24	C	B	D	C	C	C	C	B	B	C
25	B	B	C	C	C	C	C	B	B	C
26	B	C	C	B	B	B	B	C	C	B
27	C	C	D	B	B	C	C	B	C	C
28	C	C	C	B	B	B	B	B	B	B
29	B	B	C	B	C	B	A	A	D	C
30	B	C	C	B	B	C	C	C	D	C
31	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C
32	C	B	C	C	B	D	C	C	C	C
33	C	C	D	C	B	D	B	C	C	C
34	C	C	D	B	B	B	C	B	D	B
35	C	C	C	B	B	C	B	B	C	D

I7 : Transportasi (ketersediaan sarana transportasi dan kemudahan mencapai kawasan wisata), I8 : Tempat rekreasi, I9 : Tempat buangan sampah di objek wisata, I10 : Telekomunikasi (Sinyal di lokasi wisata).

Dari hasil penilaian infrastruktur pada Tabel 7, data kemudian diolah untuk mencari rata-rata (mean), standar deviasi, dan nilai akhir. Hasil analisis mean, standar deviasi, dan nilai akhir infrastruktur yang diteliti tersedia pada Tabel 8.

Review Infrastruktur. Review infrastruktur pariwisata memberikan gambaran kondisi terkini berdasarkan data dari berbagai sumber, termasuk internet, surat kabar,

jurnal, dan wawancara dengan pihak terkait, sehingga menghasilkan informasi yang komprehensif.

1) Akomodasi (Penginapan/Hotel).

Ketersediaan Akomodasi di Kampung Nelayan memiliki *rating* 64,57% dengan nilai D berarti dapat dikatakan bahwa akomodasi di Kampung Nelayan masuk dalam kategori buruk.

2) Tempat makan dan minum (Rumah makan/Restoran/Cafe).

Tempat makan dan minum di Kampung Nelayan memiliki *rating* 72,57% dengan nilai C berarti dapat dikatakan bahwa Tempat makan dan minum

Tabel 8 Analisis kelayakan infrastruktur

Infrastruktur	Mean	Std. Deviasi	Rating %	Nilai (Huruf)
Akomodasi (Penginapan/Hotel)	3,23	0,60	64,57	D
Tempat makan dan minum (Rumah makan/Restoran/Cafe)	3,63	0,49	72,57	C
Sarana penjualan (toko – toko yang menjual barang – barang souvenir atau benda -benda lain khusus wisatawan)	2,60	0,55	52,00	D
Air bersih untuk minum	3,51	0,56	70,29	C
Listrik	3,51	0,56	70,29	C
Toilet/MCK umum	2,97	0,95	59,43	D
Transportasi (ketersediaan sarana transportasi dan kemudahan mencapai kawasan wisata)	3,20	0,76	64,00	D
Tempat rekreasi	3,71	0,62	74,29	C
Tempat buangan sampah di objek wisata	3,20	0,83	64,00	D
Telekomunikasi (Sinyal di lokasi wisata)	3,11	0,72	62,29	D

di Kampung Nelayan masuk dalam kategori cukup.

3) Sarana penjualan (toko-toko yang menjual barang-barang souvenir atau benda-benda lain khusus wisatawan).

Sarana penjualan (toko-toko yang menjual barang-barang souvenir atau benda-benda lain khusus wisatawan) di Kampung Nelayan memiliki *rating* 52,00% dengan nilai D berarti dapat dikatakan bahwa Sarana penjualan di Kampung Nelayan masuk dalam kategori buruk.

4) Air bersih untuk minum. Air bersih untuk minum di Kampung Nelayan memiliki *rating* 70,29% dengan nilai C berarti dapat dikatakan bahwa Air bersih untuk minum di Kampung Nelayan masuk dalam kategori cukup.

5) Listrik. Listrik di Kampung Nelayan memiliki *rating* 70,29% dengan nilai C berarti dapat dikatakan bahwa Listrik di Kampung Nelayan masuk dalam kategori cukup.

6) Toilet/MCK umum. Toilet/MCK umum di Kampung Nelayan memiliki *rating* 59,43% dengan nilai D berarti dapat dikatakan bahwa Listrik di Kampung Nelayan masuk dalam kategori buruk.

7) Transportasi (ketersediaan sarana transportasi dan kemudahan mencapai kawasan wisata). Transportasi (ketersediaan sarana transportasi dan kemudahan mencapai kawasan wisata) di Kampung Nelayan memiliki *rating* 64,00%

dengan nilai D berarti dapat dikatakan bahwa Transportasi (ketersediaan sarana transportasi dan kemudahan mencapai kawasan wisata) di Kampung Nelayan masuk dalam kategori buruk.

8) Tempat rekreasi. Tempat rekreasi di Kampung Nelayan memiliki *rating* tertinggi yaitu 74,29% dengan nilai C berarti dapat dikatakan bahwa Tempat rekreasi di Kampung Nelayan masuk dalam kategori cukup.

9) Tempat buangan sampah di objek wisata. Tempat buangan sampah di objek wisata di Kampung Nelayan memiliki *rating* 64,00% dengan nilai D berarti dapat dikatakan bahwa Tempat buangan sampah di Kampung Nelayan masuk dalam kategori buruk.

10) Telekomunikasi (Sinyal di lokasi wisata). Telekomunikasi (Sinyal di lokasi wisata) di Kampung Nelayan memiliki *rating* 62,29% dengan nilai D berarti dapat dikatakan bahwa Telekomunikasi (Sinyal di lokasi wisata) di Kampung Nelayan masuk dalam kategori buruk.

Pembahasan Keseluruhan Infrastruktur. Berdasarkan semua *review* indikator kelayakan infrastruktur pariwisata di Kampung Nelayan dapat disimpulkan secara keseluruhan nilai *rating* dan *mean* dari masing-masing infrastruktur pariwisata menunjukkan nilai D atau masuk dalam kategori Buruk. Berikut adalah hasil rerata

dari semua infrastruktur pariwisata di Kampung Nelayan Palu pada

Tabel 9 Nilai keseluruhan infrastruktur

Mean	Rating	Nilai
3,27	65,37	D

4 KESIMPULAN

Infrastruktur pariwisata di Kampung Nelayan Palu, Sulawesi Tengah, secara keseluruhan berada dalam kategori buruk dengan nilai rata-rata 65,37% atau D berdasarkan skala kelayakan ASCE (2009). Beberapa aspek infrastruktur seperti akomodasi dan tempat makan cukup memadai, namun terdapat kelemahan signifikan pada aspek transportasi, telekomunikasi, dan sanitasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa infrastruktur yang ada belum sepenuhnya mendukung kebutuhan wisatawan, baik dari segi kenyamanan maupun aksesibilitas.

Untuk meningkatkan daya tarik wisata dan mendukung pertumbuhan ekonomi lokal, diperlukan perbaikan dan pengembangan infrastruktur secara menyeluruh. Kolaborasi antara pemerintah, masyarakat, dan pemangku kepentingan lainnya menjadi kunci dalam mewujudkan Kampung Nelayan Palu sebagai destinasi wisata unggulan yang berkelanjutan. Dengan upaya perbaikan yang terintegrasi, kawasan ini memiliki potensi besar untuk menjadi daya tarik wisata yang kompetitif di Sulawesi Tengah.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. W. Gaworecki, *Tourism infrastructure as a determinant of regional development*, 2003.
- [2] S. G. Lasdianti, Salahudin and Saiman, "Studi pembangunan infrastruktur pariwisata," *Jurnal Kawistara*, vol. 12, no. 3, pp. 341-353, 2022.
- [3] Dinas Pariwisata Provinsi Sulawesi Tengah, "Data statistik kunjungan wisatawan," [Online]. Available: <https://www.pariwisata.sultengprov.go.id/data-pariwisata.html>. [Accessed 2023].
- [4] BAPPEDA Kota Palu, "Rancangan awal Rencana Strategis 2021-2026," [Online]. Available: <https://bappeda.palukota.go.id/>. [Accessed 2021].
- [5] ASCE, "Report card for America's infrastructure," ASCE, 2009.



Pengaruh Dosis Pada Kehilangan Berat Mortar Dengan Bahan Pengikat Alkali *Activated Slag*

Bayu Rahmat Ramadhan¹, Fritswel Ratmadi Payung¹, Sri Nur Akifa¹, William Arrang Sarungallo¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Palu, Jalan Soekarno Hatta

*Penulis korespondensi: bayurramadhan@untad.ac.id

DISUBMIT 2 Desember 2024

DIREVISI 11 Desember 2024

DITERIMA 12 Desember 2024

ABSTRAK Sulawesi Tengah merupakan salah satu wilayah di Indonesia dengan produksi limbah baja terbesar, didorong oleh pesatnya pertumbuhan industri baja berbasis nikel. Limbah baja tersebut, seperti *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS), memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan dasar dalam produk alkali-activated slag (AAS), seperti pasta, mortar, dan beton. Inovasi ini menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dibandingkan dengan penggunaan semen konvensional. Namun, tantangan utama adalah memastikan ketahanan material berbasis AAS di lingkungan agresif, khususnya dalam media asam sulfat. Penelitian ini berfokus pada pengaruh variasi dosis terhadap perubahan berat mortar berbasis AAS (alkali-activated slag mortar atau AASM), yang diaktifkan dengan Na_2SiO_3 dan NaOH sebagai *activator* utama, dalam larutan asam sulfat (H_2SO_4) 7% selama 56 hari, dengan rasio air semen, modulus, *activator/binder*, dan *superplasticizer* yang tetap. Kinerja AASM dibandingkan dengan mortar Portland Composite Cement (PCC) konvensional dan mortar campuran untuk mengevaluasi ketahanannya. Lima desain campuran diuji pada ketiga jenis mortar, masing-masing dirancang untuk mencapai kuat tekan target sebesar 40 MPa. Hasil pengujian selama 56 hari menunjukkan perbedaan signifikan dalam perubahan berat dan karakteristik visual antar jenis mortar. Sampel AASM mengalami ekspansi, dengan berat yang tetap stabil atau bahkan meningkat, disertai munculnya retakan di tepi sampel. Sebaliknya, mortar campuran dan PCC menunjukkan sifat rapuh, pelarutan material, serta penurunan berat yang signifikan. Hasil ini mengindikasikan bahwa AASM memiliki kemampuan mempertahankan berat yang lebih baik dalam lingkungan asam sulfat 7% dibandingkan dengan mortar campuran maupun PCC, sehingga menjadikannya alternatif yang lebih tahan lama untuk konstruksi di kondisi kimia yang agresif. Penelitian ini mempertegas potensi AAS sebagai solusi konstruksi ramah lingkungan, dengan menyoroti pentingnya optimalisasi desain campuran untuk meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat.

KATA KUNCI Alkali Activated slag Mortar; Asam Sulfat; Serangan Sulfat; Dosis; GGBS

1 PENGANTAR

Alkali-Activated Slag (AAS) merupakan teknologi beton terbaru yang mampu menggantikan semen konvensional, serupa dengan alternatif berbasis geopolimer. AAS terdiri dari *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) dan *activator* seperti natrium hidroksida (NaOH), natrium silikat (Na_2SiO_3), atau kalium hidroksida (KOH). Pada tahap awal hidrasi, kation alkali berperan sebagai katalis dengan bertukar ion kalsium (Ca^{2+}), yang kemudian terintegrasi ke dalam struktur dan membentuk fasa seperti zeolit [1]. Proses aktivasi ini menghilangkan kebutuhan akan semen tradisional, menjadikan AAS sebagai alternatif berkelanjutan terhadap beton berbasis *Ordinary Portland Cement* (OPC).

Berkat kandungan silika oksida (SiO_2) dan alumina oksida (Al_2O_3) yang tinggi, AAS memiliki sifat mekanik dan durabilitas yang menjanjikan, sehingga layak digunakan untuk aplikasi non-struktural maupun struktur beton bertulang. Selain itu, AAS menawarkan emisi karbon yang lebih rendah, memperkuat posisinya sebagai material konstruksi berkelanjutan untuk proyek yang peduli terhadap lingkungan [2].

Penelitian ini menggunakan NaOH dan Na_2SiO_3 sebagai aktivator dengan variasi rasio aktivator, yang disebut juga sebagai dosis, didefinisikan oleh persentase Na_2O dalam GGBFS. Selain itu, penelitian ini juga menggunakan modulus yang tetap, yaitu rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ dalam aktivator, sebagai salah satu parameter dalam desain campuran mortar.

Salah satu keterbatasan utama dalam teknologi beton konvensional adalah kerentanannya terhadap serangan asam. Lingkungan seperti hujan asam, sungai yang bersifat asam, saluran pembuangan, dan fasilitas kimia merupakan contoh kondisi asam yang dapat menyebabkan kerusakan permanen pada struktur beton [3]. Kerusakan ini mengakibatkan penurunan kekuatan dan massa beton. Dalam kasus yang parah, beton dapat mengalami retak ekspansif akibat reaksi antara alkali dan silika atau interaksi antara natrium sulfat dan magnesium sulfat dengan kalsium hidroksida, yang berujung pada kerusakan struktural yang signifikan [4].

Beberapa penelitian telah mengeksplorasi durabilitas *alkali-activated slag* (AAS) terhadap serangan asam seperti HCl, yang menunjukkan ketahanannya dalam lingkungan kimia yang agresif [5]. Temuan penelitian mengindikasikan bahwa AASC (*alkali-activated slag concrete*) memiliki durabilitas yang jauh lebih baik dibandingkan dengan beton konvensional di bawah kondisi agresif, dengan ketahanan yang lebih tinggi terhadap degradasi asam dan tingkat kehilangan material yang lebih rendah [6]. Kinerja yang unggul dalam lingkungan korosif ini menyoroti potensi AAS untuk digunakan pada aplikasi di mana ketahanan kimia menjadi faktor kritis, seperti pada struktur industri dan lingkungan laut.

Penelitian ini berfokus pada hubungan perbedaan dosis terhadap ketahanan mortar AAS didalam lingkungan agresif yang diwakili oleh asam sulfat H_2SO_4 dengan konsentrasi 7 % dengan cara pengukuran perubahan berat benda uji selama 0, 7, 14, 28, 56 hari target.

2 MATERIAL

GGBFS (*Ground Granulated Blast Furnace Slag*) yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT Krakatau Semen Indonesia. Komposisi kimia GGBFS ditentukan melalui berbagai metode pengujian, seperti ICP, *combustion*, dan *gravimetric*, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Komposisi kimia GGBFS

Oxide	% by Mass
CaO	41.56%
SiO ₂	37.42%
Al ₂ O ₃	15.2 %

Larutan Sodium silika campuran (15,4% Na₂O; 32,33% SiO₂) dan larutan sodium hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 10 M digunakan sebagai aktivator kimia. Larutan natrium hidroksida disiapkan dengan melarutkan serpihan natrium hidroksida ke dalam air suling, kemudian didiamkan selama satu hari sebelum digunakan dalam proses pencampuran.

Untuk menghasilkan mortar dengan tingkat kepadatan yang baik, digunakan pasir sungai berkualitas tinggi yang memiliki gradasi baik dengan *fineness* modulus sebesar 3,87 sebagai agregat halus.

3 METODOLOGI

Sebanyak 5 Mix Desain mortar disiapkan untuk mengkaji pengaruh dosis terhadap perubahan berat. Rincian campuran serta hasil pengujian kuat tekan disajikan pada

Proporsi bahan, termasuk GGBFS, aktivator kimia, agregat, dan air, ditentukan menggunakan metode volume absolut [7]. Oleh karena itu, total berat pengikat (*binder*) dan air disesuaikan untuk menjaga volume material yang konsisten pada setiap variabel yang diamati. Dalam rasio air terhadap padatan, kandungan air mencakup total air yang terdapat dalam larutan sodium silika, larutan sodium hidroksida, dan air tambahan. Sementara itu, padatan terdiri dari GGBFS, serta komponen padat dari larutan natrium silikat dan natrium hidroksida.

Urutan proses pencampuran. Pada tahap awal, air, GGBFS, dan larutan aktivator dicampur kering di dalam mixer selama 2.5 menit. Selanjutnya, agregat halus kering dan *superplasticizer* ditambahkan, dan proses pencampuran kering dilanjutkan selama 1.5 menit. Setelah itu pencampuran dilanjutkan dengan mesin pada kecepatan tinggi selama 30 detik. Setelah proses pencampuran selesai, kemampuan kerja (*workability*) mortar dievaluasi menggunakan *flow table*.

Tabel 2 AAS, PCC, dan *blended mix* desain

Mix Code	Binde Type	D (%)	M (%)	A	W	SP (%)	G (%)	PCC %
AAS 1	GGBFS+ Aktivator	4	1.2	2.25	0.47	1	100	0
AAS 2	GGBFS+ Aktivator	4	0.8	2.25	0.47	1	100	0
AAS 3	GGBFS+ Aktivator	4	1	2.25	0.47	1	100	0
PCC1	PCC	-	-	2.25	0.47	-	-	100
BLENDDED 1	PCC + GGBFS	-	-	2.25	0.47	-	50	50

Tabel 3 Persentase perubahan berat terhadap berat awal

No.	Desain Campuran	Kehilangan Berat/Penambahan Berat Terhadap Berat Awal %			
		0	14	28	56
1	D4M1.2W0.47A2.25S1	100,00%	102,11%	107,20%	111,07%
2	D4M0.8W0.47A2.25S1	100,00%	102,75%	108,60%	106,58%
3	D4M1W0.47A2.25S1	100,00%	103,26%	106,26%	111,44%
4	PCCA2.25W0.47	100,00%	87,93%	64,08%	25,02%
5	G50%A2.25W0.47	100,00%	100,65%	79,02%	38,97%

Mortar kemudian dituangkan ke dalam cetakan berbentuk persegi panjang dengan ukuran 50 mm x 50 mm, diikuti dengan proses pemadatan menggunakan getaran selama 1 menit. cetakan dilepaskan dari cetakan setelah 24 jam.

Tiga desain campuran dipilih untuk evaluasi lebih lanjut. Desain ini mencakup variasi dosis sebesar 4%, 5%, dan 6% dikembangkan untuk mencapai target kuat tekan sebesar 40 MPa. Desain campuran yang terpilih mempertahankan parameter yang konsisten untuk rasio air terhadap pengikat (*water-to-binder ratio*), rasio *superplasticizer*, modulus dan rasio agregat terhadap pengikat, sementara nilai *dosage* divariasikan.

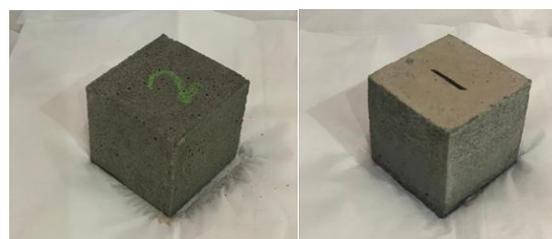
Sebagai perbandingan, desain campuran lain juga disiapkan dengan menggunakan *Portland Composite Cement* (PCC) sebagai satu-satunya pengikat serta campuran 50% GGBFS dan 50% PCC. Desain campuran perbandingan ini juga dikembangkan dengan target kuat tekan, rasio air terhadap pengikat, dan rasio agregat terhadap pengikat yang sama. Rincian semua desain campuran disajikan pada Tabel 3.

Untuk mengevaluasi durabilitas mortar di lingkungan agresif, digunakan proses *curing* tiga tahap. Spesimen dibasahi dengan menyemprotkan air pada permukaannya selama 27 hari, kemudian disegel dalam

plastik kedap udara untuk menjaga suhu. Setelah itu, spesimen direndam dalam air selama satu hari sebelum direndam dalam larutan asam sulfat, sesuai dengan ASTM C 267, selama periode 0, 14, 28, 56 hari. Untuk menjaga konsistensi larutan asam, larutan diganti setiap dua minggu.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

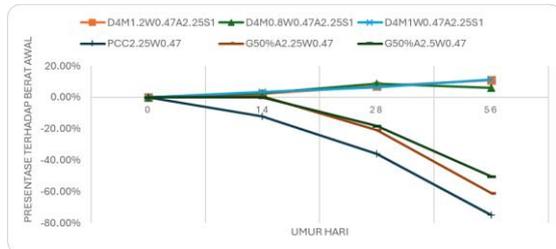
Sebelum dilakukan perendaman, setiap benda uji ditimbang dan beratnya dibandingkan dengan berat awal yang diukur pada umur 0 hari sesuai Gambar 2. Setiap benda uji diberi nomor identifikasi untuk memastikan akurasi data. Tabel 3 dan Gambar 2 menyajikan perubahan berat benda uji dibandingkan dengan berat awalnya.



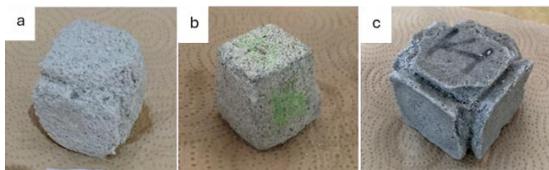
Gambar 1 Penomoran mortar AAS dan mortar normal

Gambar 2 menunjukkan perbedaan tren perubahan berat benda uji dibandingkan dengan berat awal. Seluruh desain campuran mortar AAS mengalami peningkatan berat yang berkisar antara 5% hingga 19% dari berat awal. Secara visual, benda uji mortar AAS menunjukkan

ekspansi, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3 yang berbanding terbalik dengan mortar normal dan mortar *blended*, yang mengalami kehilangan berat seiring berjalannya waktu.



Gambar 2 Grafik perubahan berat terhadap berat awal



Gambar 3 Benda uji setelah 56 hari perendaman, a) blended b) PCC c) AAS

Dapat diamati semakin tinggi kadar persentase dosis maka semakin tinggi penambahan berat benda uji di umur perendaman ke-56 hari.

Terdapat dua skenario reaksi yang berbeda antara mortar PCC normal dan mortar AAS setelah perawatan dalam larutan asam sulfat dengan konsentrasi 7% selama 28 hari. Secara visual, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Mortar AAS mengalami ekspansi, di mana terjadi peningkatan reaksi pengkristalan dibandingkan dengan kondisi pada umur perendaman 0 hari. Asam sulfat mengubah struktur mikro internal mortar, di mana ion sulfat bereaksi dengan produk hidrasi dalam mortar untuk membentuk kristal *ettringite* dan *gypsum* yang bersifat ekspansif. Peningkatan produksi kristal ini, disertai dengan gaya ekspansi yang lebih besar, menyebabkan munculnya retakan mikro di dalam mortar yang semakin meluas seiring waktu. Retakan ini mendorong ekspansi lebih lanjut serta penetrasi retakan dan pori, yang pada akhirnya menyebabkan kerusakan struktur makro dan mengurangi kinerja mortar [8]. Pada mortar normal dan *blended* terjadi hal yang berbeda.

Ditemukan reaksi pengkristalan tapi hanya sedikit dan bukannya mengembang melainkan terjadinya penyusutan. Asam sulfat menyerang kalsium hidroksida di dalam mortar dan merubahnya menjadi *calcium sulphate* yang dapat larut di air sebagaimana terlihat pada sampel C pada Gambar 3. *Calcium silicate hydrate* bereaksi dengan asam sulfat dan membentuk *silica gel* yang rapuh, yang mudah untuk larut akibat gaya luar. *Calcium sulphate* membentuk reaksi inisial yang bereaksi dengan *calcium aluminate* fase semen dan membentuk *voluminous calcium sulphoaluminate*, yang mana bisa menyebabkan pengembangan, retakan, kehilangan kekuatan dan kehancuran mortar [9].

5 KESIMPULAN

Pada perendaman selama 56 hari pada lingkungan agresif asam sulfat dengan kadar 7% kedua jenis mortar mengalami perkembangan benda uji yang berbeda. Mortar konvensional dan *blended* mengalami penyusutan (*shrinkage*) pengurangan berat hingga 81% dari berat awal, sementara mortar AAS mengalami pengembangan (*expansive*) dengan mengalami penambahan rata-rata 13% dari berat awal.

Mortar AAS melebihi performa mortar *blended* dan mortar konvensional dalam ketahanan (*durability*) terhadap lingkungan agresif asam sulfat dengan kadar 7% yang diukur dalam perubahan berat mortar. Mortar AAS dengan desain campuran D4M1W0.47A2.25S1 memiliki ketahanan tertinggi dengan mempertahankan rata-rata 39% kuat tekannya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Shi, D. Roy and P. Krivenko, Alkali-activated cements and concretes, London: Taylor & Francis, 2003.
- [2] O. A. Mohamed and R. Al Khatib, "Fresh Properties and Sulfuric Acid Resistance of Sustainable Mortar using Alkali-Activated GGBS/Fly Ash Binder," *Polymers*, vol. 14, no. 591, 2022.
- [3] A. Khatab, M. T. Arshad, F. M. Awan and I. Khan, "Development of an Acid Resistant Concrete: A Review," *International Journal of Sustainable*

- Construction Engineering & Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 33-38, 2013.
- [4] M. Teymouri, K. Behfarnia and A. Shabani, "Mix Design Effects on the Durability of Alkali-Activated Slag Concrete in a Hydrochloric Acid Environment," *Sustainability*, vol. 13, no. 8096, 2021.
- [5] A. Ozcan and M. B. Karakoc, "The Resistance of Blast Furnace Slag-and Ferrochrome Slag-Based Geopolymer Concrete Against Acid Attack," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 17, pp. 1571-1583, 2019.
- [6] F. Matakah, T. Salem and P. Soroushian, "Acid Resistance and Corrosion Protection Potential of Concrete Prepared with Alkali Aluminosilicate," *Journal of Building Engineering*, vol. 20, pp. 705-711, 2018.
- [7] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, Pearson, 2011.
- [8] D. Min and T. Mingshu, "Formation and Expansion of Ettringite Crystals," *Cement and Concrete Research*, vol. 24, no. 1, pp. 119-126, 1994.
- [9] S. R. Ahmed and N. Munirudrappa, "Effect of Sulphuric Acid on Plasticized Concrete," *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 5, pp. 291-294, 1998.

