



VOLUME 29
No. 2 Juli 2024

ISSN : 2807 - 9418 (Print)

ISSN : 2598 - 2257 (Online)

JURNAL

TEKNIK SIPIL DAN ARSITEKTUR

PENGARUH PEMBERIAN SILICA FUME TERHADAP KEKUATAN TEKAN GROUT MORTAR DENGAN PENDEKATAN PRACTICAL MIXED DESIGN

Aulia Rahman, Anisah Nur Fajarwati, Indah Ria Riskiyah, Mochamad Ardie Noegroho

ANALISIS KINERJA STRUKTUR PADA GEDUNG BERTINGKAT DENGAN ANALISIS PUSHOVER BERDASARKAN ATC-40 (Studi Kasus: Bangunan Pasar Jongke)

Ega Ayu Krisdianti, Kukuh Kurniawan Dwi Sungkono, Gunarso

ANALISIS EFISIENSI BIAYA DALAM PENYEDIAAN AIR LAUT UNTUK OCEANARIUM KOTA: STUDI KASUS BXSea BINTARO

Sidi Ahyar Wiraguna

SISTEM OPERASIONAL BENDUNG BARAN DITINJAU DARI KETERSEDIAAN AIR

Paska Wijayanti, Reki Arbianto, Sintia Kareri Laki

ANALISIS INFRASTRUKTUR PENDUKUNG PARIWISATA DI LABUAN BAJO, KABUPATEN MANGGARAI BARAT DAN KABUPATEN ENDE

Triapriyono Kaidu, Firmimus Konstantinus Bhara, Alfrendo Satriawan Kabupung

PEMANFAATAN BUBUK GAMPING SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON

Yohanes Laka Suku, Marselinus Y. Nisanson, Maria Andriani Moi

EVALUASI EROSI TANAH BERVEGETASI DENGAN ALAT RAINFALL SIMULATOR (TES EKSPERIMENTAL DI LABORATORIUM)

Iftasya Shafa Azzahra, Yuda Romdania, Ahmad Herison, Subuh Tugiono, Gung Bagus J Murda

EVALUASI BANGUNAN PENGAMAN LERENG SUNGAI CILIWUNG RUAS KALIBATA DENGAN MENGGUNAKAN ANALISIS BERDASARKAN LOAD RESISTANCE FACTOR DESIGN

Furqaan Harjanto, Agus Darmawan Adi, Hary Christady Hardiyatmo

PERBANDINGAN KUAT TEKAN BETON MUTU SEDANG 21 MPA BERDASARKAN SNI 03 2834: 2000, SNI 7656:2012, DAN AHSP 2023

Hindira Maharani, Dadang Dwi Pranowo, Catur Bejo Santoso, M. Shofiul Amin, Mohamad Galuh Khomari

PENGARUH PENAMBAHAN SILICA FUME TERHADAP CAMPURAN BETON MEMADAT SENDIRI (SELF COMPACTING CONCRETE) MUTU TINGGI

Nadya Putri Astika Ningrum, Dadang Dwi Pranowo, Wahyu Naris Wari, Ahmad Utanaka, Mohamad Galuh Komari

ANALISIS KESELAMATAN JALAN DENGAN PENDEKATAN AUDIT KESELAMATAN JALAN PADA JALAN LOKAL DI KOTA TEGAL

Bani Irsyad, Raudina Rillawani Putri, Suprpto Hadi, Salsabilla Varadinta, Muhammad Rifqi Nazzaya

ANALISIS GEOTEKNIK DAN KESTABILAN LERENG TOWER SUTT PT. PLN (Studi kasus: TW. 203 Pembangunan T/L 150 KV GI KAMBANG – GI TAPAN)

Kukuh Kurniawan Dwi Sungkono, Reki Arbianto, Made Eka Prayuda Pande

JURNAL

TEKNIK SIPIL DAN ARSITEKTUR

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TUNAS PEMBANGUNAN SURAKARTA

- Penanggungjawab : Dr. Tri Hartanto, S.T., Msc.
- Pemimpin Umum : Teguh Yuono, S.T., M.T.
- Pemimpin Redaksi : Ir. Reki Arbianto, S.T., M.Eng., IPM., ASEAN Eng.
- Anggota Redaksi : Ir. Kukuh Kurniawan DS, S.T., M.Eng.
Paska Wijayanti, S.T., M.Eng.
- Mitra Bestari : Dr. Ars. Avi Marlina, S.T., M.T.
(Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret)
Dr. T. Putri Anggi Permata S, S.T., M.T.
(Fakultas Teknik Universitas PGRI Semarang)
- Pelaksana Teknis : Agustine Tri Wulandari, S.E.
Rio Kurnia Prasetyo, S.Ds.
Chery Ayu Alamanda, S.Pd.
Icarisma Anindita, S.T.
- Alamat Redaksi : Jl. Walanda Maramis No.31 Surakarta 57135
Telp. (0271) 853824 - Fax . (0271) 853824

JURNAL

TEKNIK SIPIL DAN ARSITEKTUR

FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS TUNAS PEMBANGUNAN SURAKARTA

DAFTAR ISI

PENGARUH PEMBERIAN SILICA FUME TERHADAP KEKUATAN TEKAN GROUT MORTAR DENGAN PENDEKATAN PRACTICAL MIXED DESIGN	1-6
Aulia Rahman, Anisah Nur Fajarwati, Indah Ria Riskiyah, Mochamad Ardie Noegroho	
ANALISIS KINERJA STRUKTUR PADA GEDUNG BERTINGKAT DENGAN ANALISIS PUSHOVER BERDASARKAN ATC-40 (Studi Kasus: Bangunan Pasar Jongke)	7-16
Ega Ayu Krisdianti, Kuku Kurniawan Dwi Sungkono, Gunarso	
ANALISIS EFISIENSI BIAYA DALAM PENYEDIAAN AIR LAUT UNTUK OCEANARIUM KOTA: STUDI KASUS BXSea BINTARO	17-22
Sidi Ahyar Wiraguna	
SISTEM OPERASIONAL BENDUNG BARAN DITINJAU DARI KETERSEDIAAN AIR	23-32
Paska Wijayanti, Reki Arbiyanto, Sintia Kareri Laki	
ANALISIS INFRASTRUKTUR PENDUKUNG PARIWISATA DI LABUAN BAJO, KABUPATEN MANGGARAI BARAT DAN KABUPATEN ENDE	33-39
Triapriyono Kaidu, Firnimus Konstantinus Bhara, Alfrendo Satriawan Kabupung	
PEMANFAATAN BUBUK GAMPING SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON	40-45
Yohanes Laka Suku, Marselinus Y. Nisanson, Maria Andriani Moi	
EVALUASI EROSI TANAH BERVEGETASI DENGAN ALAT RAINFALL SIMULATOR (TES EKSPERIMENTAL DI LABORATORIUM)	46-54
Iftasya Shafa Azzahra, Yuda Romdania, Ahmad Herison, Subuh Tugiono, Gung Bagus J Murda	
EVALUASI BANGUNAN PENGAMAN LERENG SUNGAI CILIWUNG RUAS KALIBATA DENGAN MENGGUNAKAN ANALISIS BERDASARKAN LOAD RESISTANCE FACTOR DESIGN	55-64
Furqaan Harjanto, Agus Darmawan Adi, Hary Christady Hardiyatmo	
PERBANDINGAN KUAT TEKAN BETON MUTU SEDANG 21 MPA BERDASARKAN SNI 03 2834: 2000, SNI 7656:2012, DAN AHSP 2023	65-72
Hindira Maharani, Dadang Dwi Pranowo, Catur Bejo Santoso, M. Shofiul Amin, Mohamad Galuh Khomari	
PENGARUH PENAMBAHAN SILICA FUME TERHADAP CAMPURAN BETON MEMADAT SENDIRI (SELF COMPACTING CONCRETE) MUTU TINGGI	73-80
Nadya Putri Astika Ningrum, Dadang Dwi Pranowo, Wahyu Naris Wari, Ahmad Utanaka, Mohamad Galuh Komari	
ANALISIS KESELAMATAN JALAN DENGAN PENDEKATAN AUDIT KESELAMATAN JALAN PADA JALAN LOKAL DI KOTA TEGAL	81-86
Bani Irsyad, Raudina Rillawani Putri, Suprpto Hadi, Salsabilla Varadinta, Muhammad Rifqi Nazzaya	
ANALISIS GEOTEKNIK DAN KESTABILAN LERENG TOWER SUTT PT. PLN (Studi kasus: TW. 203 Pembangunan T/L 150 KV GI KAMBANG – GI TAPAN)	87-95
Kuku Kurniawan Dwi Sungkono, Reki Arbiyanto, Made Eka Prayuda Pande, Gunarso	

PENGARUH PEMBERIAN SILICA FUME TERHADAP KEKUATAN TEKAN GROUT MORTAR DENGAN PENDEKATAN PRACTICAL MIXED DESIGN

*Aulia Rahman¹, Anisah Nur Fajarwati², Indah Ria Riskiyah³, Mochamad Ardie Noegroho⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang

⁴PT Sika Indonesia - Jl. Raya Cibinong - Bekasi, Km. 20, Limusnunggal - Cileungsi, Bogor - Jawa Barat

*) Email: aulia.rahman@polinema.ac.id

ABSTRACT

Ongoing research aims to reduce or replace traditional cement concrete with more environmentally friendly binder materials, with silica fume being a promising candidate due to its high silica content that forms molecular-level bonds in concrete. The initial phase of the study involves using grout mortar, a simpler substance with an identical composition to concrete. A practical mix design approach is employed to evaluate mortar strength at 7 and 28 days, incorporating varying percentages of silica fume (5%, 10%, 15%, and 0% as control). The theoretical compressive strengths are calculated as 33.43 MPa at 7 days and 42.79 MPa at 28 days, closely aligning with the actual test results of 30.2 MPa at 7 days and 47.7 MPa at 28 days. Notably, all silica fume variations consistently exhibit reduced strength at both ages. The closest match to the control specimen is a 5% variation at 7 days, achieving a strength of 29.7 MPa. As anticipated, the lowest strength at the conclusion of the test is observed with the 15% proportion, yielding only 39.2 MPa.

Keyword: grout mortar, silica fume, practical mix design, compressive strength

ABSTRAK

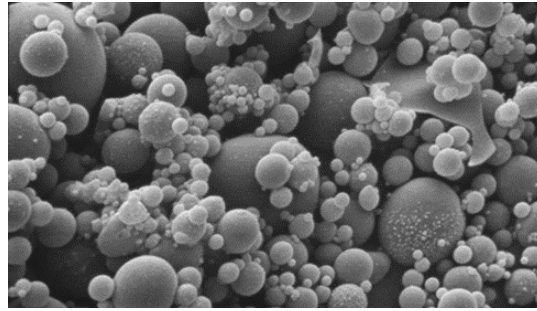
Penelitian yang terus berlangsung bertujuan untuk mengurangi atau menggantikan semen beton konvensional dengan bahan binder beton yang lebih ramah lingkungan, dan silica fume menjadi salah satu pilihan yang menjanjikan karena kandungan silika yang tinggi membentuk ikatan molekuler pada mortar. Seperti yang disarankan Hatungimana *et al*, bahwa silica fume bisa mengurangi jumlah semen sampai dengan 15%. Sebagai langkah awal dalam penelitian, digunakan grout mortar sebagai substansi yang lebih sederhana namun tetap memiliki komposisi identik dengan beton. Pendekatan desain campuran praktis juga diterapkan untuk menilai kekuatan mortar pada umur 7 dan 28 hari, dengan variasi persentase silica fume sebesar 5%, 10%, 15%, dan 0% sebagai kontrol. Pengujian dilakukan pada sampel mortar berukuran 5 x 5 x 5 cm dengan uji tekan sesuai dengan standar SNI 03-6825-2002. Hasil kuat tekan teoritis menunjukkan angka 33,43 MPa pada umur 7 hari dan 42,79 MPa pada umur 28 hari, mendekati hasil uji aktual yaitu 30,2 MPa pada 7 hari dan 47,7 MPa pada 28 hari. Seluruh variasi silica fume menunjukkan penurunan kekuatan yang konsisten pada kedua umur tersebut. Variasi 5% pada umur 7 hari menjadi yang paling mendekati spesimen kontrol dengan nilai 29,7 MPa. Seperti yang diantisipasi, kekuatan terendah pada akhir pengujian ditemukan pada proporsi 15%, menghasilkan hanya 39,2 MPa.

Kata kunci: grout mortar, silica fume, mix disain praktis, kuat tekan

1. PENDAHULUAN

Aspek lingkungan sering menjadi fokus perhatian seiring dengan kemajuan teknologi, termasuk dalam bidang material seperti beton dan produk turunannya. Salah satu isu yang terus diperbincangkan adalah penggunaan bahan pengganti semen, yang diduga menjadi salah satu penyebab emisi gas rumah kaca. Diskusi ini masih relevan seiring dengan terusnya produksi bahan perekat (binder) beton. Dalam upaya menggantikan semen, pertimbangan perlu diberikan terhadap material hasil sisa dari suatu proses atau substansi lain dengan komposisi yang serupa. Dalam konteks ini, penelitian ini memilih silica fume sebagai pengganti semen, yang merupakan produk sampingan dari produksi paduan silicon untuk mengurangi penggunaan semen dalam campuran berbasis cementitious.

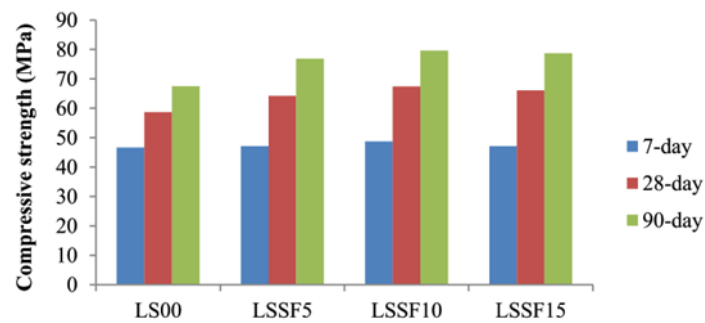
Silica fume, yang dalam ukuran mikroskopis ditunjukkan pada **Gambar 1**, dihasilkan sebagai produk sampingan dalam produksi paduan silicon melalui proses reduksi batuan kwarsa dan batu bara. Bahan tersebut (batuan kwarsa dan batu bara) dicampur di dalam tungku dengan suhu tinggi menggunakan energi panas listrik secara bersamaan.



Gambar 1. Bentuk mikroskopis butiran silika fume [1]

Faktor yang berpengaruh terhadap variasi kandungan silika fume antara lain adalah jenis batu bara dengan kandungan unsur besi, krom, kalsium, dan mangan, serta kualitas panas tungku yang digunakan. Reaksi kimia kompleks terjadi setelah suhu mencapai 2000°C dan mengalami reaksi oksidasi dan kondensasi SiO₂. Reaksi-reaksi tersebut menghasilkan karakter silika fume berbentuk butiran dengan tingkat kehalusan tertentu. [7] Diameter silika fume yang dihasilkan berukuran sekitar 30 hingga 300 nm, rata-rata yang dihasilkan tidak lebih dari 100 nm. [5] Hasil proses pembetonan menunjukkan bahwa kalsium hidroksida mampu membuat silika fume reaktif sehingga membentuk senyawa yang stabil, yaitu kalsium hidro silikat. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa kepadatan ikatan C-S-H tidak terpengaruh dengan adanya tambahan silika fume, namun berpengaruh pada reaksi kimia tahap pembentukan ikatan C-S-H. [4] partikel silika fume yang halus berpengaruh pada proses hidrasi (kecepatan), yaitu pada tujuh hari pertama proses pengerasan. [10]

Penelitian tentang hubungan antara kandungan silika fume dan kekuatan mortar sudah banyak dilakukan, seperti yang tersaji pada **Gambar 2**, yaitu perbandingan kuat tekan campuran mortar dan silika fume dan umur pengujian.



Gambar 2. Hasil uji kuat pengaruh kadar silika fume terhadap kuat tekan beberapa sampel [2]

Penelitian tentang pengaruh penambahan kadar silika fume ini menggunakan pendekatan dengan cara mengubah proporsi silika fume, yaitu dengan berat semen dalam suatu campuran, dimulai dari 0% (LS00), 5% (LS05), 10% (LS10), hingga 15% (LS15). Dilakukan pengujian kuat tekan untuk setiap sampel pada umur, tujuh, 28, dan 90 hari. Pengujian tersebut menunjukkan hasil perbedaan kekuatan tekan yang tidak signifikan, yaitu proporsi semen dapat dikurangi hingga 15%. [2]

Keputusan untuk menggunakan silika fume didasarkan pada penggunaannya yang sudah umum dalam beberapa pekerjaan konstruksi dan telah resmi diproduksi dan diberi identitas oleh beberapa penyedia jasa kebutuhan konstruksi tingkat nasional. Contohnya, bahan pengganti semen yang lain, rekomendasi persentase penambahan kadar silika fume sebesar 10%, sehingga variasi kadar yang diuji sebesar 5% dan 15% untuk perbandingan yang lain.

Dalam pengujian ini, mortar dipilih sebagai campuran yang lebih sederhana dari beton. Untuk memperkirakan kekuatan tekan mortar yang digunakan menggunakan metode pendekatan desain campuran. Hal ini karena mempertimbangkan beberapa data berat isi dan berat jenis dengan perhitungan yang sederhana. Pada penelitian sebelumnya, telah disarankan bahwa metode desain campuran tertentu dapat digunakan untuk pengujian kuat tekan dengan penambahan silika fume. Tujuan adanya rasio pasir dan semen (s/c) dalam persamaan yang pertama, yakni untuk umur tujuh hari dan persamaan kedua untuk umur 28 hari dapat digunakan untuk menghitung perkiraan kekuatan tekan (f'm). [8]

$$f'm = -9.09 \left(\frac{s}{c}\right)^2 + 9.461 \left(\frac{s}{c}\right) + 31.03 \quad (1)$$

$$f'm = -8.932 \left(\frac{s}{c}\right)^2 + 10.27 \left(\frac{s}{c}\right) + 39.84 \quad (2)$$

Pertimbangan lain dalam pelaksanaan penelitian ini adalah daya tampung laboratorium material, yaitu tempat dilakukan pengujian. Material mortar dinilai lebih gampang diproduksi dan dapat dijangkau dari pada material beton. Terkait mutu dan campurannya, dibuktikan dari penelitian yang telah dilakukan. Sedangkan, tujuan penelitian ini sendiri adalah mencari kadar silica fume paling optimal yang memberikan kuat tekan terbaik.

2. METODE PENELITIAN

Di dalam penelitian tentang ‘Pengaruh Kadar Pemberian Silica Fume terhadap Kekuatan Tekan Grout Mortar dengan Pendekatan Practical Mixed Design’ menggunakan alat dan bahan yang telah tersedia di Laboratorium Beton dan Bahan Bangunan Politeknik Negeri Malang. Seperti yang ditampilkan pada **Gambar 3a**, alat dan bahan yang digunakan di antaranya adalah: air, silica fume, semen Portland, agregat halus, satu set cetakan mortar logam ukuran 5x5x5 cm, satu set bejana, satu set mesin pengaduk, satu set neraca, satu set ayakan, dan *Universal Testing Machine* (UTM). Pengujian yang dilakukan, yaitu uji kuat tekan mortar semen Portland berdasar pada SNI 03-6825-2002, dengan menggunakan UTM seperti yang terlihat pada **Gambar 3b**.



Gambar 3. a) Cetakan mortar logam, **b)** Pengujian kuat tekan mortar dengan mesin UTM

Pada penelitian ini, rasio konstan pasir dan semen ditentukan sebesar 0,6, dengan volume semen lebih banyak daripada pasir. Rasio kandungan air dengan semen ditentukan sebesar 0,5. Rasio ini berlaku untuk semua variasi sampel uji. Penambahan kadar silica fume (SF) dilakukan secara berurutan dimulai dari 5%, 10%, dan yang terakhir sebesar 15% dalam takaran berat. Waktu pengujian sampel adalah umur tujuh hari dan 14 hari. Sedangkan, detail komposisi setiap sampel disajikan pada **Tabel 1**, yang ditakar dalam satuan berat (gram), dengan jumlah total 5 sampel per perlakuan. Setelah sampel dicetak, dilakukan *curing* dengan merendamnya dalam air sampai hari pengujian.

Dilakukan juga penelitian pendahuluan untuk menguji sifat fisik material penyusun mortar tersebut. Didapatkan nilai sebagai berikut, berat isi semen 1124,06 kg/m³, berat isi pasir 1658,01 kg/m³, dan berat isi air 1000 kg/m³. Sedangkan untuk nilai berat jenis semen, pasir, dan air berturut-turut adalah 2,99, 2,51, dan 1.

Tabel 1. Konfigurasi sampel uji

Sampel	Umur (hari)	Semen (gr)	Pasir (gr)	Air (gr)	SF (gr)
0%	7	693.50	613.75	348.78	0.00
	28	693.50	613.75	348.78	0.00
5%	7	658.83	613.75	348.78	34.68
	28	658.83	613.75	348.78	34.68
10%	7	624.15	613.75	348.78	69.35
	28	624.15	613.75	348.78	69.35
15%	7	589.48	613.75	348.78	104.03
	28	589.48	613.75	348.78	104.03

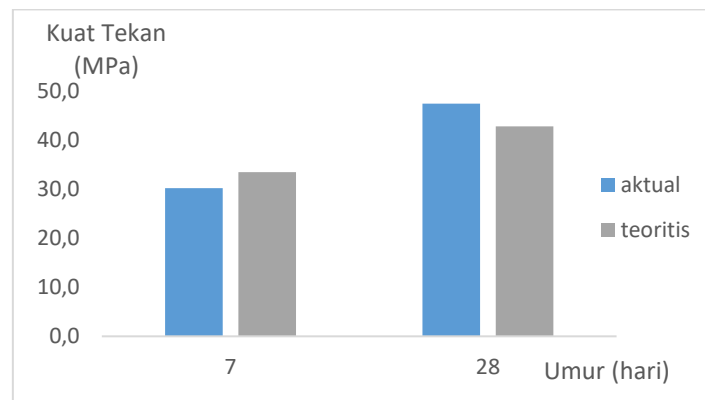
Silica fume yang digunakan mengandung silika oksida (SiO₂) mencapai 92,5 %, air (H₂O) sebesar 0,6 %, *lost of ignition* (LOI) sebesar 2,73 %, dan berat jenis sebesar 628 kg/m³. Adapun jika diamati secara fisik silica fume berwarna lebih gelap daripada semen, seperti pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Perbandingan kondisi fisik semen Portland (kiri) dan silica fume (kanan)

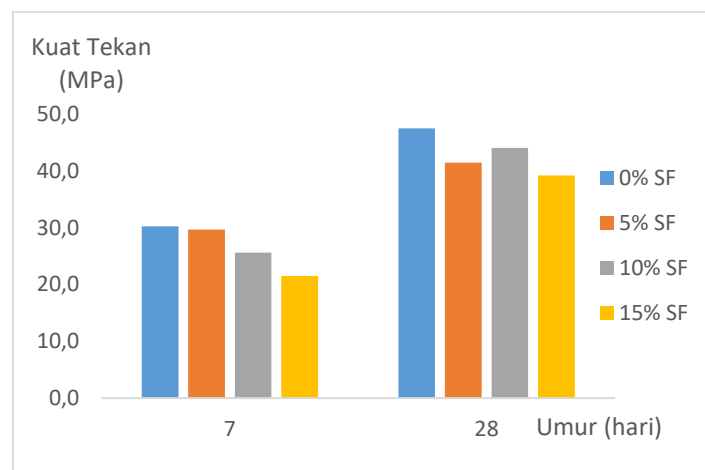
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan nilai perbandingan antara pasir dan semen (s/c) adalah 0,6. Perbandingan air dan semen (w/c) adalah 0,5. Seperti yang tersaji pada **Gambar 5**, hasil persamaan I dan II diperoleh kuat tekan (f'_m) rencana sebesar 33,43 MPa pada tujuh hari dan sebesar 42,79 MPa pada 28 hari. Hasil ini adalah nilai teoritis yang bisa divalidasi dengan uji langsung variasi silica fume 0%.



Gambar 5. Grafik perbedaan kuat tekan teoritis dan aktual

Pengujian aktual diperoleh rata-rata nilai kuat tekan sebesar 30,2 MPa pada umur tujuh hari dan sebesar 47,4 MPa pada umur 28 hari. Perbedaan kedua nilai ini hanya sebesar 3,23 MPa lebih besar pada umur tujuh hari dan sebesar 4,61 MPa lebih kecil pada umur 28 hari. Perbedaan nilai yang tidak terlalu signifikan ini menunjukkan bahwa hasil pengujian grout mortar mendekati aktual dengan konsep perhitungan practical mix design. Sedangkan pada **Gambar 6**, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemberian silica fume menunjukkan hasil tren menurun, yaitu pada penambahan 5%, 10 %, dan 15%.



Gambar 6. Grafik perkembangan kuat tekan tiap sampel

Variasi 0% SF memperoleh nilai kuat tekan tertinggi, yaitu pada umur tujuh hari dan 28 hari. Perilaku serupa juga ditunjukkan oleh variasi 10% dan 15% SF. Kedua variasi tersebut mengalami penurunan kekuatan pada pengujian hari ketujuh, yaitu kadar 10% SF sebesar 25,6 MPa dan kadar 15% SF sebesar 21,5 MPa. Perilaku yang sama juga ditunjukkan pada umur pengujian 28 hari. Hasil yang diperoleh untuk kadar 10% SF sebesar 44,0 MPa dan variasi kadar 15% SF hanya sebesar 39,3 MPa, maka sampel tersebut memiliki kekuatan terendah dari keseluruhan sampel yang diuji. Variasi 5% SF mendekati nilai kontrol pada umur 7 hari, dengan kekuatan 29,7 MPa, dan terjadi penurunan kekuatan pada umur 28 hari, yaitu sebesar 41,4 MPa. Hasil tersebut semakin menunjukkan bahwa adanya perbedaan nilai teoritis saat proporsi semen diganti silica fume dengan metode desain campuran praktis grout mortar.

Penurunan kekuatan tekan pada sampel dengan komposisi silica fume yang lebih banyak dapat mengindikasikan adanya perubahan kebutuhan air dan kelembaban campuran. [3] Daya serap air oleh semen dan silica fume berbeda, ketika proporsi semen terus dikurangi, kelembaban campuran pun mengalami perubahan, salah satu faktor penyebab penurunan kekuatan tekan. [9] Kekuatan tekan sampel dengan kadar SF 5% mendekati variabel kontrol yang sejalan dengan sifat kimia silica fume dan mampu membentuk kalsium silikat hidrat pada umur pengujian awal. [6] Dengan hasil kuat tekan pada sampel 5% SF yang mendekati variabel kontrol (0% SF), maka campuran ini dapat diimplementasikan pada sela-sela pasangan batu bata yang memerlukan penambahan mortar, karena *workability* atau kelecakan pada komposisi ini sangat memungkinkan material diinjeksikan pada bagian-bagian tersebut. Sedangkan penurunan kekuatan pada variasi sampel lainnya bisa ditingkatkan dengan pemakaian zat aditif lain bersifat kimia yang bisa mengubah rasio silica per alumina campuran.

4. KESIMPULAN

Metode desain campuran praktis memperkirakan bahwa hasil uji pemberian kadar silica fume terhadap kuat tekan grout mortar mencapai 33,43 MPa pada umur tujuh hari dan 42,79 MPa saat umur 28 hari. Hasil yang hampir mendekati uji aktual, yaitu 30,2 MPa pada 7 hari dan 47,4 MPa pada 28 hari. Nilai tersebut terus menunjukkan penurunan seiring adanya peningkatan kandungan silica fume di campuran, baik saat pengujian umur tujuh hari maupun 28 hari. 29,7 Mpa adalah nilai kuat tekan yang nyaris mendekati variasi kontrol, yaitu didapat dari sampel dengan kadar 5% SF pada umur tujuh hari. 39,2 Mpa adalah besaran hasil nilai terendah praktis yang ditemukan SF dengan kadar 15% pada umur 28 hari.

Adanya penurunan kuat tekan disebabkan oleh perbedaan daya serap air antara semen portland dan silica fume. Akibatnya, terjadi perubahan kelembaban dan berpengaruh pada penurunan kuat tekan. Namun, hasil nilai kuat tekan yang mendekatimendekati variasi SF berkadar 5% saat awal pengujian dipengaruhi oleh adanya proses kimia saat proses hidrasi pembentukan kalsium silikat hidrat. Hal ini, memerlukan analisis kimia lebih dalam sehingga dapat dipahami dengan lebih baik.

Karena pada komposisi 5% SF kekuatannya tidak berbeda jauh dengan sampel kontrol (0%), maka silica fume dapat direkomendasikan sebagai bahan alternatif untuk mengurangi kadar semen pada mortar konvensional, yang lebih ramah lingkungan dan memiliki kandungan kimia identik dengan semen Portland yaitu silica, yang bisa membentuk ikatan pada tahapan molekuler. Adapun untuk bahan pengganti semen sepenuhnya tidaklah direkomendasikan, karena hasil pengujian menunjukkan kekuatan yang terus turun seiring bertambahnya prosentase silica fume (10% SF dan 15% SF), dan angka prosentase yang disarankan untuk menghasilkan kekuatan terbaik adalah 5%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gruszczynski, M., & Lenart, M. (2020). Durability of mortars modified with the addition of amorphous aluminum silicate and silica fume. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107, 102526.
- [2] Hatungimana, D., Taşköprü, C., İçhedef, M., Saç, M. M., & Yazıcı, Ş. (2019). Compressive strength, water absorption, water sorptivity and surface radon exhalation rate of silica fume and fly ash based mortar. *Journal of Building Engineering*, 23, 369-376.
- [3] Johari, M. M., Brooks, J. J., Kabir, S., & Rivard, P. (2011). Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2639-2648.
- [4] Muller, A. C. A., Scrivener, K. L., Skibsted, J., Gajewicz, A. M., & McDonald, P. J. (2015). Influence of silica fume on the microstructure of cement pastes: New insights from 1H NMR relaxometry. *Cement and Concrete Research*, 74, 116-125.
- [5] Neville, A. (2012). *Properties of Concrete* 5th edition (Harlow).

- [6] Nochaiya, T., Wongkeo, W., & Chaipanich, A. (2010). Utilization of fly ash with silica fume and properties of Portland cement–fly ash–silica fume concrete. *Fuel*, 89(3), 768-774.
- [7] Ramezaniapour, A. A. (2014). Cement replacement materials. *Springer geochemistry/mineralogy*, DOI, 10, 978-3.
- [8] Satyarno, I., Solehudin, A. P., Meyarto, C., Hadiyatmoko, D., Muhammad, P., & Afnan, R. (2014). Practical method for mix design of cement-based grout. *Procedia Engineering*, 95, 356-365.
- [9] Sezer, G. İ. (2012). Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars. *Construction and Building Materials*, 26(1), 613-618.
- [10] Tobón, J. I., Payá, J. J., Borrachero, M. V., & Restrepo, O. J. (2012). Mineralogical evolution of Portland cement blended with silica nanoparticles and its effect on mechanical strength. *Construction and Building Materials*, 36, 736-742.

ANALISIS KINERJA STRUKTUR PADA GEDUNG BERTINGKAT DENGAN ANALISIS PUSHOVER BERDASARKAN ATC-40 Studi Kasus: Bangunan Pasar Jongke

Ega Ayu Krisdianti¹, *Kukuh Kurniawan Dwi Sungkono², Gunarso³
^{1,2,3}Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan, Surakarta
*) Email: kukuhkurniawan@lecture.utp.ac.id

ABSTRACT

Indonesia is an area prone to earthquakes. Earthquakes can cause infrastructure damage and casualties. Efforts are needed to reduce the risk of earthquake hazards by strengthening earthquake-resistant infrastructure. The design procedures for earthquake-resistant buildings are carried out using a performance based design approach. Building performance can be estimated through non-linear static pushover analysis. This research takes a case study in Jongke Market, Surakarta. This research aims to determine the capacity curve, performance level, and structure collapse mechanism. The method used is pushover analysis with the capacity spectrum. The result of this analysis is a capacity curve that processed to determine the level of structure performance referring to the drift ratio limitation table in the Applied Technology Council (ATC-40). Based on the results of this research, displacement that occurred in the x direction is 92 mm and in the y direction is 77 mm. Building displacement is good because the displacement that occurred is smaller than the displacement limit (control). The total maximum drift in the x direction is 0.007 and in the y direction is 0.006. The maximum inelastic total drift in the x direction is 0.005 and in the y direction is 0.004. Based on the drift ratio limitation table in the ATC-40 document, this building has an immediate occupancy performance level. Based on the plastic hinge mechanism formed, the existing structure also meets the ideal collapse concept (strong column-weak beam).

Keywords: Pushover analysis; structure performance level; earthquake-resistant building.

ABSTRAK

Indonesia termasuk wilayah yang rawan bencana gempa bumi. Bencana gempa bumi dapat menimbulkan kerusakan infrastruktur dan korban jiwa. Diperlukan upaya pengurangan resiko bahaya gempa dengan melakukan penguatan infrastruktur tahan gempa. Tata cara desain bangunan tahan gempa dilakukan dengan menggunakan pendekatan perencanaan berbasis kinerja. Kinerja bangunan dapat diperkirakan melalui analisis statik non-linier pushover. Penelitian dilakukan dengan menggunakan studi kasus Gedung Pasar Jongke Surakarta. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kurva kapasitas, level kinerja, dan mekanisme keruntuhan struktur. Metode yang digunakan adalah analisis pushover dengan spektrum kapasitas. Hasil dari analisis ini adalah kurva kapasitas yang selanjutnya diproses untuk menentukan tingkat kinerja struktur merujuk pada tabel batasan rasio *drift* yang ada di dokumen *Applied Technology Council (ATC-40)*. Berdasarkan hasil penelitian, diperoleh besar simpangan atap yang terjadi pada arah x sebesar 92 mm dan pada arah y sebesar 77 mm. *Displacement* gedung dapat dikatakan baik karena *displacement* yang terbentuk lebih kecil dari *displacement limit (control)* yang ditentukan. Total *drift* maksimum pada arah x sebesar 0,007 dan pada arah y sebesar 0,006. *Inelastic total drift* maksimum pada arah x sebesar 0,005 dan pada arah y sebesar 0,004. Berdasarkan tabel batasan rasio *drift* yang ada pada dokumen ATC-40, gedung ini memiliki level kinerja *immediate occupancy*. Dilihat dari mekanisme sendi plastis yang terbentuk, struktur eksisting juga memenuhi konsep keruntuhan ideal (kolom kuat balok lemah).

Kata kunci: Analisis pushover; level kinerja struktur; bangunan tahan gempa.

1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara yang terletak pada jalur gempa tektonik di dunia yakni Kawasan Cincin Api Pasifik [1] dan berada di atas tiga tumbukan lempeng benua: Indo-Australia dari selatan, Eurasia dari utara, dan Pasifik dari timur. Kondisi geografis ini menjadikan Indonesia sebagai wilayah yang rawan bencana gempa bumi. Bencana gempa bumi dapat menimbulkan kerusakan infrastruktur dan korban jiwa. Diperlukan upaya pengurangan resiko bahaya gempa dengan melakukan penguatan infrastruktur tahan gempa.

Tata cara desain bangunan tahan gempa dilakukan dengan menggunakan pendekatan perencanaan berbasis kinerja (*Performance based design*). Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistis terhadap resiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang. Mekanisme keruntuhan bangunan harus disesuaikan dengan konsep desain kolom kuat balok lemah. Jika kemudian terjadi keruntuhan struktur, maka yang runtuh terlebih dahulu adalah balok.

Kinerja dan mekanisme keruntuhan struktur bangunan dapat diperkirakan melalui analisis statik non-linier pushover. Dengan analisis ini, bangunan diberikan beban lateral secara bertahap hingga mencapai target peralihan yang diharapkan atau sampai mencapai kondisi plastis. Hasil dari analisis ini adalah kurva kapasitas yang

selanjutnya diproses untuk menentukan tingkat kinerja struktur merujuk pada tabel batasan rasio drift yang ada di dokumen *Applied Technology Council (ATC-40)*.

Penelitian tentang evaluasi kinerja struktur bangunan dilakukan dengan menggunakan studi kasus Gedung Pasar Jongke yang terletak di Jl. Dr. Rajiman, Pajang, Kecamatan Laweyan, Kota Surakarta. Gedung ini berlantai tiga dengan tinggi bangunan 13,5 meter. Konstruksi bangunan ini menggunakan struktur beton bertulang. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kurva kapasitas, level kinerja, dan mekanisme keruntuhan struktur Gedung Pasar Jongke Surakarta. Metode yang digunakan adalah analisis pushover dengan spektrum kapasitas.

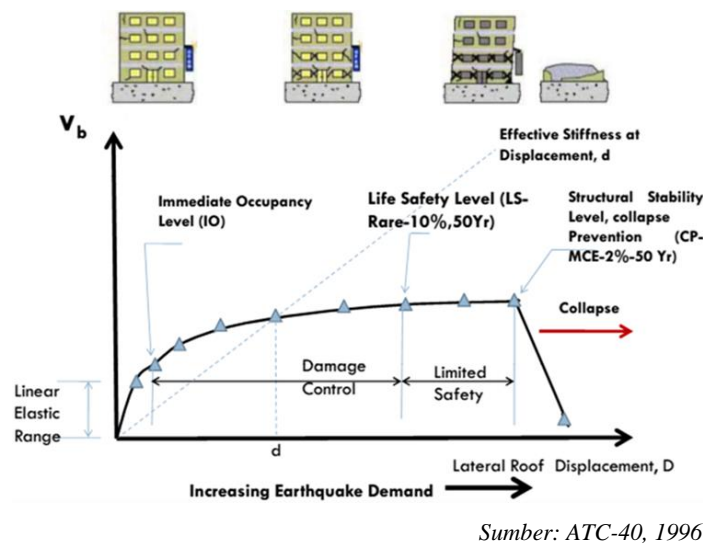
2. TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Desain Bangunan Tahan Gempa

Bangunan tahan gempa adalah bangunan yang mampu mempertahankan strukturnya agar tidak runtuh saat terjadi gempa. Bangunan yang dimaksud bukan berarti tidak diperbolehkan mengalami kerusakan sedikitpun, namun boleh mengalami kerusakan selama masih memenuhi persyaratan yang berlaku [2].

Level Kinerja Struktur Tahan Gempa

Kinerja struktur bangunan dibagi menjadi 6 kategori level [3]: (1) *Immediate occupancy*. (2) *Damage control*. (3) *Life safety*. (4) *Limited safety*. (5) *Structural stability*. (6) *Non-considered*. Gambaran level kinerja dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Level kinerja struktur bangunan

ATC-40 memberikan batasan rasio *drift* yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur. Batasan rasio *drift* ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Batasan Rasio *Drift* Atap untuk Berbagai Level Kinerja Struktur Berdasarkan ATC-40

Parameter	Level Kinerja Struktur			
	<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Damage Control</i>	<i>Life Safety</i>	<i>Structural Stability</i>
<i>Total drift</i> maksimum	0,01	0,01-0,02	0,02	0,33Vi/Pi
<i>Inelastic drift</i> maksimum	0,005	0,005-0,015	Tidak dibatasi	Tidak dibatasi

Sumber: ATC-40, 1996

Perencanaan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance based seismic design*) dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan bangunan yang sudah ada [4]. Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja merupakan konsep mendesain bangunan dimana target level kinerja struktur ditentukan terlebih dahulu. Kinerja struktur ditargetkan sesuai dengan fungsi suatu bangunan, pertimbangan faktor ekonomis terhadap perbaikan bangunan saat terjadi gempa (*economic loss*), tanpa mengesampingkan resiko keselamatan pengguna

bangunan (*life*). Pada akhir proses perencanaan, target tersebut dijadikan parameter minimum yang harus dipenuhi sebagai status operasional (*operational state*). Target level kinerja dalam desain yang menjadi kriteria penerimaan (*acceptance criteria*) diatur oleh FEMA 356 dengan faktor keutamaan disesuaikan dari SNI 1726 2019 [5] dapat dilihat pada Gambar 2.

Level Desain Gempa		Target Level Kinerja Bangunan Beton			
		Operational	IO	LS	CP
		Level (1-A)	Level (1-B)	Level(3-C)	Level(5-E)
Kala Ulang	72 tahun 50%DBE		x	x	x
	225 tahun 70%DBE			x	x
	474 tahun DBE			Desain umum	x
	2475 tahun MCE				
Drift %		0-0.5%	0.5-1%	1%-2%	2%-4%

Sumber: Ertanto, Satyarno, & Suhendro, 2017

Gambar 2. Target level kinerja menurut FEMA 356

Mekanisme Keruntuhan

Hirarki kekuatan elemen-elemen struktur bangunan harus disesuaikan dengan konsep desain kolom kuat balok lemah [6]. Konsep ini bertujuan untuk membentuk mekanisme keruntuhan ideal dimana sendi plastis terbentuk pada ujung-ujung balok. Jika kemudian terjadi sebuah keruntuhan struktur, maka yang runtuh terlebih dahulu adalah balok. Jika kolom struktur runtuh terlebih dahulu, maka struktur akan langsung hancur [7].

Analisis Pushover

Kinerja dan mekanisme keruntuhan struktur bangunan dapat diperkirakan melalui analisis statik non-linier pushover. Analisis pushover adalah analisis dimana pengaruh gempa rencana pada struktur dianggap sebagai beban statik yang menangkap pada pusat massa. Beban statik kemudian ditingkatkan secara bertahap sampai melampaui pembebanan sehingga menyebabkan terjadinya pelelehan (sendi plastis) pertama pada struktur. Kemudian peningkatan beban lebih lanjut dilakukan hingga struktur mengalami perubahan bentuk pasca-elastik yang besar sampai mencapai target peralihan yang diharapkan atau sampai mencapai kondisi plastik [8].

Terdapat dua macam metode yang dipakai dalam analisis pushover, keduanya adalah metode spektrum kapasitas dan metode koefisien perpindahan [9]. Dalam penelitian ini, metode yang dipakai yakni metode spektrum kapasitas. Metode spektrum kapasitas merupakan metode yang memplotkan spektrum kapasitas dengan *demand spectrum* dalam satu format ADRS (*acceleration displacement response spectra*). Titik dimana kurva kapasitas berpotongan dengan *demand spectrum* disebut dengan *performance point* [10]. Dari *performance point* bisa didapat informasi tentang nilai *displacement* efektif, gaya geser dasar, waktu getar efektif dan *damping* efektif.

3. METODOLOGI PENELITIAN

Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah Gedung Pasar Jongke yang terletak di Jl. Dr. Rajiman, Pajang, Kecamatan Laweyan, Kota Surakarta. Gedung ini berlantai tiga dengan tinggi bangunan 13,5 meter. Luas massa bangunan yang menjadi objek penelitian adalah $\pm 13.165 \text{ m}^2$. Konstruksi bangunan ini menggunakan struktur beton bertulang.

Pengumpulan Data

Data pada penelitian ini berupa data primer yaitu data asli yang diperoleh atau dikumpulkan oleh peneliti. Data yang diperoleh adalah gambar kerja, hasil penyelidikan tanah, hasil uji tekan beton, dan hasil uji tarik baja tulangan.

Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dengan bantuan software SAP2000 V23 dilakukan sesuai dengan data aktual lapangan yang diperoleh. Tahapan yang dilakukan yaitu: (1) Pendefinisian material beton dan baja tulangan, (2) Input semua jenis dan ukuran penampang elemen pelat, balok, dan kolom, (3) Pemodelan elemen struktur berdasarkan gambar kerja, (4) Perhitungan pembebanan, (5) Pendefinisian sendi plastis.

Analisis Pushover Metode Spektrum Kapasitas

Pada *static pushover case* dibuat dua macam pembebanan, yaitu beban gravitasi dan beban lateral. DOF beban gravitasi adalah U3. Untuk beban gravitasi dipilih *load pattern*: beban mati dengan faktor skala 1, beban mati tambahan dengan faktor skala 1 dan beban hidup dengan faktor skala 0,25. Untuk beban lateral dipilih *acceleration*: UX dan UY. *Monitored displacement* berada di titik pusat massa bangunan.

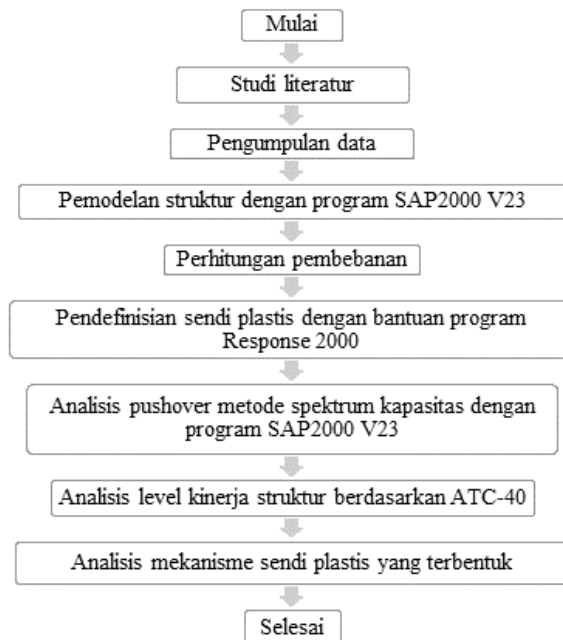
Pola pembebanan diberikan secara bertahap sampai mencapai target peralihan yang diharapkan atau sampai mencapai kondisi plastis. Tahap pertama analisis belum mempertimbangkan kondisi nonlinier dimana struktur diberi beban gravitasi. Tahap kedua dilanjutkan dengan memberikan pola beban lateral (*pushover case* arah x dan arah y) secara bertahap. Hasil pushover disimpan secara *multiple states* dengan jumlah minimum 10 *steps* dan maksimum 100 *steps*.

Dari hasil analisis pushover didapatkan kurva kapasitas yang memberikan gambaran perilaku struktur ketika dikenai gaya geser pada level tertentu. Respon spektrum format ADRS kemudian diplotkan dengan kurva kapasitas format ADRS sehingga diperoleh *performance point*. Proses konversi dilakukan sepenuhnya oleh program SAP2000. Dari *performance point* diperoleh nilai *displacement* efektif, gaya geser dasar, waktu getar efektif dan *damping* efektif. Dari nilai *displacement* akan diketahui level kinerja struktur berdasarkan ATC-40.

Untuk menampilkan skema kelelahan sendi plastis, dapat dilihat dari *deformed shape* akibat *pushover case* x atau y. Sendi plastis yang leleh terlebih dahulu akibat beban pushover dapat diketahui. Perilaku pelelehan pada elemen ditunjukkan dengan warna pada sendi plastis.

Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian dapat dilihat pada diagram alir berikut ini.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

4. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Data Struktur Gedung

Bahan elemen struktur bersumber dari hasil uji tekan beton dan hasil uji tarik baja tulangan, diantaranya: (1) Mutu beton balok, $f_c' = 28,7$ MPa; (2) Mutu beton kolom, $f_c' = 31,01$ MPa; (3) Mutu BJTS 10 mm, $f_y = 537,6$ MPa dan

$f_u = 699,62$ MPa; (4) Mutu BJTS 13 mm, $f_y = 439,49$ MPa dan $f_u = 598,72$ MPa; (5) Mutu BJTS 19 mm, $f_y = 407,64$ MPa dan $f_u = 592,36$ MPa; (6) Mutu BJTS 22 mm, $f_y = 414,01$ MPa dan $f_u = 624,2$ MPa.

Dimensi elemen struktur yang didefinisikan pada program SAP2000 dapat dilihat pada Tabel 2, 3, dan 4 berikut:

Tabel 2. Data dimensi struktur pelat

No	Tipe	Ketebalan (mm)
1	Pelat lantai	120
2	Pelat atap	100

Sumber: Gambar kerja

Tabel 3. Data dimensi struktur balok

No	Tipe		Dimensi (mm)
1	Sloof	S1	300 x 500
2	Balok induk	B1	300 x 600
3	Balok induk	B2	300 x 400
4	Balok induk	B3	300 x 600
5	Balok anak	BA1	250 x 500
6	Ring balok	RB1	300 x 400
7	Ring balok	RB2	300 x 400
8	Ring balok	RBA1	250 x 400

Sumber: Gambar kerja

Tabel 4. Data dimensi struktur kolom

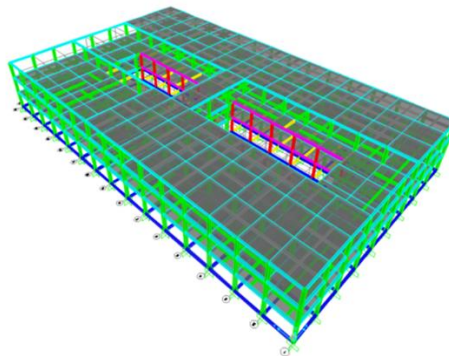
No	Tipe		Dimensi (mm)
1	Kolom	K1	500 x 500
2	Kolom	K2	400 x 400

Sumber: Gambar kerja

Dari laporan penyelidikan tanah, dapat diketahui bahwa nilai N-SPT berkisar antara 15-50, maka dapat dikategorikan klasifikasi situs tanah sedang (SD).

Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur dilakukan dengan bantuan software SAP2000 V23 sesuai dengan data aktual lapangan yang diperoleh.



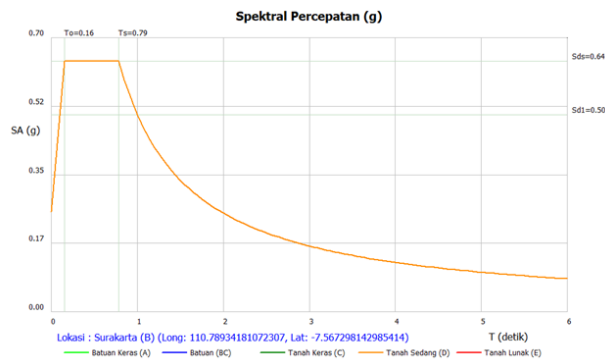
Gambar 4. Pemodelan struktur

Perhitungan Pembebanan

Pembebanan yang diperhitungkan dalam pemodelan struktur meliputi beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Dalam analisis struktur ini digunakan pembebanan gempa dinamis dengan respons spektrum. Fungsi respons spektrum ditetapkan sesuai peta wilayah gempa untuk kondisi tanah sedang (SD) dengan koordinat *Longitude 110.789 degrees* dan *Latitude -7,567 degrees*. Parameter seismik dan fungsi respons spektrum diperoleh dari program RSA 2019.

Tabel 5. Perhitungan pembebanan

No	Jenis beban	Berat
1	Beban mati	
	Beton bertulang	24 kN/m ³
2	Beban mati tambahan	
	Pasangan bata ringan	60 kg/m ²
	Adukan semen atau spesi	21 kg/m ²
	Penutup lantai (keramik)	42 kg/m ²
	Plafond dan rangka	18 kg/m ²
	Mekanikal dan elektrik	25 kg/m ²
3	Beban hidup	
	Toko lantai satu [11]	4,79 kN/m ²
	Toko lantai di atasnya [11]	3,59 kN/m ²
	Atap datar [11]	0,96 kN/m ²

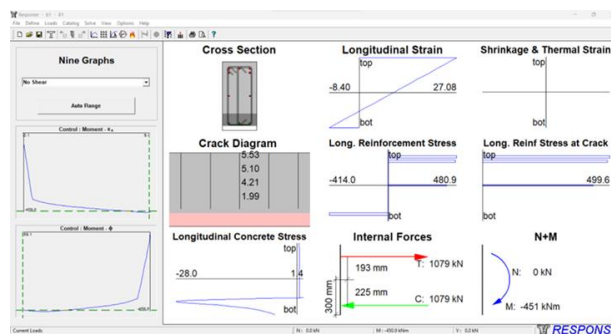


Sumber: RSA, 2019

Gambar 5. Respons Spektrum

Pendefinisian Sendi Plastis

Berikut tahapan pendefinisian sendi plastis untuk salah satu balok induk, yaitu balok B1 dengan ukuran 30 x 60 cm. Pendefinisian sendi plastis dimulai dengan analisis momen kurvatur menggunakan bantuan program Response 2000. Setelah momen kurvatur diperoleh, dilakukan perhitungan titik kurva berdasarkan ATC-40. Dari hasil perhitungan kemudian diplot menjadi kurva *backbone*.



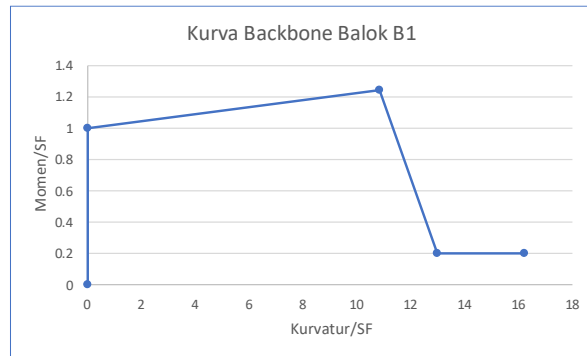
Gambar 6. Hasil sectional response balok B1

Tabel 6. Hasil sectional response balok B1

No	Parameter	Nilai
1	Yield moment	M_y 359,66 kNm
2	Yield curvature	ϕ_y 5,46 mrad/m
3	Ultimate moment	M_u 448,92 kNm
4	Ultimate curvature	ϕ_u 59,13 mrad/m

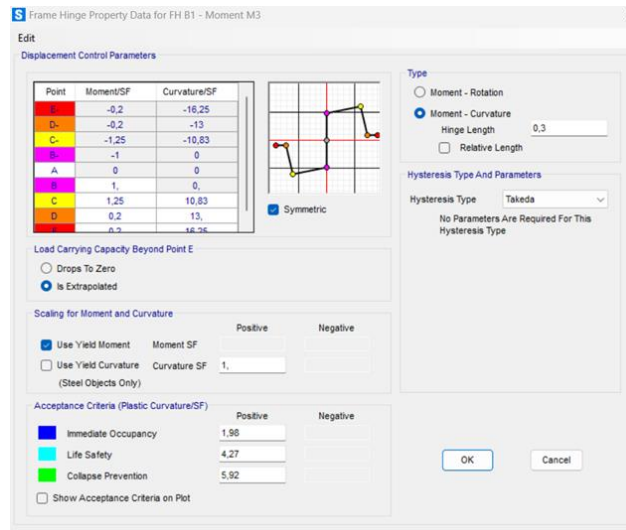
Tabel 7. Perhitungan Titik Kurva Berdasarkan ATC-40

Titik	Momen / SF (kNm)	Kurvatur (mrad/m)
A	0	0
B	1	0
C	$M_u/M_y = 1,25$	$\phi_u / \phi_y = 10,83$
D	0,2	$1,2 \phi_u / \phi_y = 13$
E	0,2	$1,5 \phi_u / \phi_y = 16,25$



Gambar 7. Kurva *backbone* balok B1

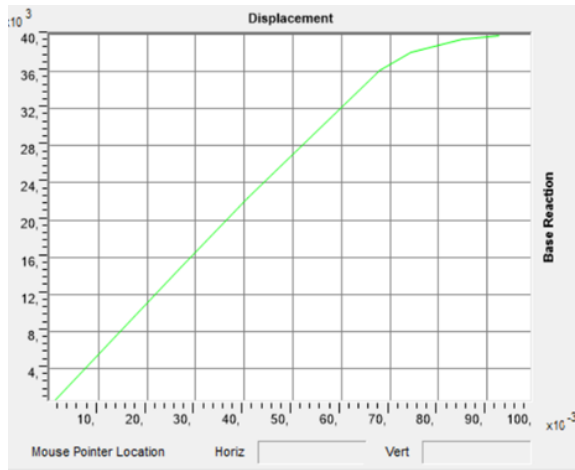
Setelah diperoleh kurva backbone, selanjutnya dilakukan pendefinisian properti sendi plastis. Elemen balok pada portal diasumsikan tidak terjadi leleh karena aksial, leleh hanya dikarenakan momen terhadap sumbu lokal 3. Oleh karena itu, tipe sendi adalah *deformation controlled (ductile) - moment M3*. Tipe parameter *displacement control* adalah *moment-curvature* dengan *hinge length* 0,5 x tinggi penampang balok (0,5 x 0,6 = 0,3). Kemudian dilakukan input nilai sesuai Tabel 7, sehingga diperoleh data *frame hinge property* seperti berikut.



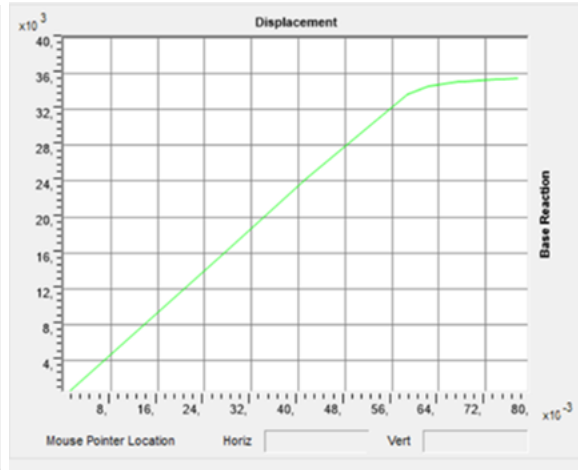
Gambar 8. Data *frame hinge property* balok B1

Hasil Analisis Pushover

Dari proses iterasi, didapatkan kurva kapasitas yang merupakan hubungan antara perpindahan titik acuan pada atap (D) dengan gaya geser dasar (V).



Gambar 9. Kurva kapasitas arah x



Gambar 10. Kurva kapasitas arah y

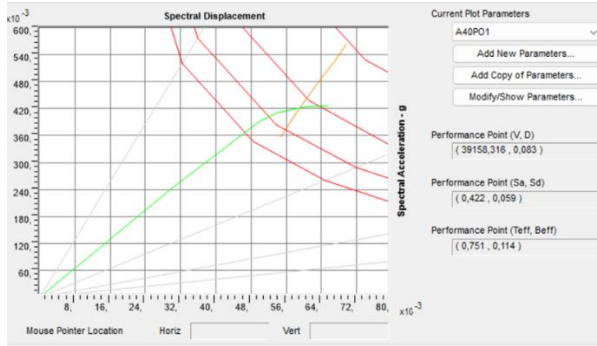
Tabel 8. Pushover capacity curve arah x

Load case	Step	Displacement	Base Force	A to B	B to C	C to D	D to E	Beyond E
Text	Unitless	m	kN	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
Push X	0	0.000	0.00	4328	0	0	0	0
Push X	1	0.027	14869.14	4328	0	0	0	0
Push X	2	0.041	22386.11	4327	1	0	0	0
Push X	3	0.068	36142.23	4152	176	0	0	0
Push X	4	0.074	38087.71	4019	309	0	0	0
Push X	5	0.085	39425.26	3887	441	0	0	0
Push X	6	0.092	39907.68	3843	485	0	0	0

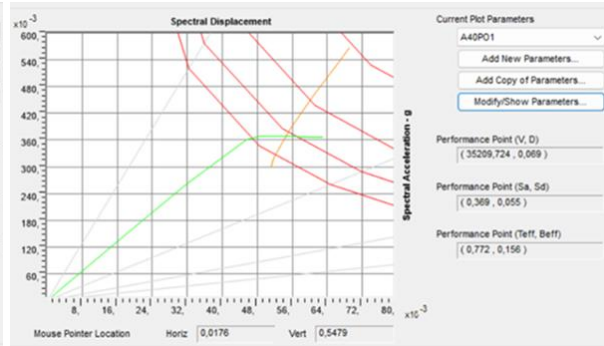
Tabel 9. Pushover capacity curve arah y

Load case	Step	Displacement	Base Force	A to B	B to C	C to D	D to E	Beyond E
Text	Unitless	m	kN	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless	Unitless
Push Y	0	0.000	0.00	4332	0	0	0	0
Push Y	1	0.027	15878.36	4332	0	0	0	0
Push Y	2	0.041	24332.99	4331	1	0	0	0
Push Y	3	0.059	33720.06	4099	233	0	0	0
Push Y	4	0.062	34646.07	3994	338	0	0	0
Push Y	5	0.067	35130.84	3914	418	0	0	0
Push Y	6	0.068	35174.96	3900	432	0	0	0
Push Y	7	0.071	35286.59	3886	446	0	0	0
Push Y	8	0.074	35337.58	3883	449	0	0	0
Push Y	9	0.075	35411.92	3875	457	0	0	0
Push Y	10	0.077	35502.56	3867	465	0	0	0
Push Y	11	0.077	35454.78	3867	465	0	0	0

Berdasarkan Tabel 8 dan Tabel 9, diperoleh besar simpangan atap yang terjadi pada arah x sebesar 92 mm dan pada arah y sebesar 77 mm. *Displacement* gedung dapat dikatakan baik karena *displacement* yang terbentuk lebih kecil dari *displacement limit (control)* yang ditentukan sebesar $2\% H = 2\% \times 13,5 \text{ m} = 0,27 \text{ m}$.



Gambar 11. Kurva pushover arah x



Gambar 12. Kurva pushover arah y

Tabel 10. Nilai performance point

Parameter	Arah X	Arah Y
Performance Point (V; D)	37958,362; 0,082	35209,724; 0,069
Performance Point (Sa; Sd)	0,41; 0,059	0,369; 0,055
Performance Point (Teff; Beff)	0,761; 0,119	0,772; 0,156

Level Kinerja Struktur

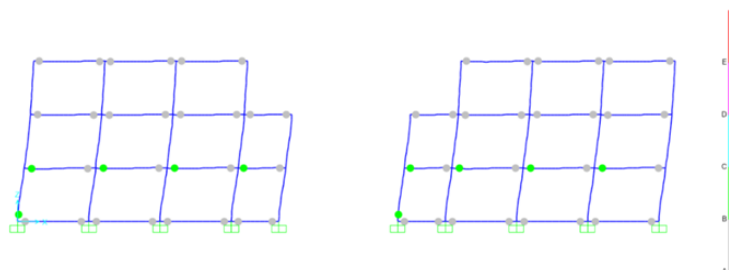
Level kinerja struktur ditentukan berdasarkan batasan rasio drift pada Tabel 1.

Tabel 11. Level kinerja struktur

Parameter	Arah X	Arah Y	Level Kinerja Struktur
Total drift maksimum (Dt/H)	0,092/13,5 = 0,007	0,077/13,5 = 0,006	Immediate occupancy
Inelastic total drift maksimum ((Dt-D1)/H)	(0,092-0,027)/13,5 = 0,005	(0,077-0,027)/13,5 = 0,004	Immediate occupancy

Skema Distribusi Sendi Plastis

Penyajian gambar skema distribusi sendi plastis diambil contoh pada portal as-4. Pada step 0, sendi plastis menunjukkan level A yang berarti belum terjadi kelelahan struktur. Pada step 1-2, sendi plastis juga menunjukkan level A. Sendi plastis dengan level B mulai terjadi pada step 3, saat nilai displacement sebesar 0,068 m. Level ini menunjukkan batas linier yang kemudian diikuti terjadinya pelepasan pertama pada struktur. Sendi plastis dengan level B muncul pada balok lantai dua (B1, B2) dan kolom dasar (K1, K2). Hal ini menunjukkan bahwa struktur eksisting memenuhi konsep keruntuhan ideal (*strong column-weak beam*). Pada step 4-5, terjadi sendi plastis dengan level B pada titik lainnya. Iterasi program berhenti pada step 6 saat nilai displacement sebesar 0,092 m yang berarti struktur telah memasuki kondisi limit.



Gambar 13. Deformed shape pada step 3

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, maka dapat disimpulkan bahwa: (1) Besar simpangan atap yang terjadi pada arah x sebesar 92 mm dan pada arah y sebesar 77 mm. Displacement gedung dapat dikatakan baik karena displacement yang terbentuk lebih kecil dari displacement limit (control) yang ditentukan sebesar 2% H = 2% x 13,5 m = 0,27 m, (2) Total drift maksimum pada arah x sebesar 0,007 dan pada arah y sebesar 0,006. Inelastic total drift maksimum pada arah x sebesar 0,005 dan pada arah y sebesar 0,004. Berdasarkan batasan rasio drift untuk berbagai level kinerja struktur yang ada pada dokumen ATC-40, gedung Pasar Jongke Surakarta memiliki level kinerja Immediate Occupancy, (3) Dilihat dari mekanisme sendi plastis yang terbentuk, sendi plastis dengan level B terjadi

pertama kali pada balok dan kolom dasar. Hal ini menunjukkan bahwa struktur eksisting memenuhi konsep keruntuhan ideal (*strong column-weak beam*).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Shulhan, E. Julianto, D. L. C. Galuh and A. Y. Adipradana, "Analisis Kinerja Struktur Gedung Sekolah 4 Lantai dengan Metode Pushover," *Fakultas Teknik Universitas Tidar*, pp. 19-24, 2014.
- [2] R. Kurniawati, B. H. R. Husni and M. Isneini, "Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Bertingkat Menggunakan Nonlinear Static Pushover Analysis dengan Capacity Spectrum Method (CSM) (Studi Kasus: Gedung B Rumah Sakit Umum Muhammadiyah Metro)," *JRSDD*, pp. 605-622, 2021.
- [3] ATC-40, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, California: California Seismic Safety Commission, 1996.
- [4] M. R. Saputra, F. Alami and R. Widyawati, "Studi Kinerja Gedung Empat Tingkat Terhadap Beban Gempa dengan Metode Statik Pushover," *JRSDD*, pp. 113-124, 2020.
- [5] B. C. Ertanto, I. Satyarno and B. Suhendro, "Performance Based Design Bangunan Gedung untuk Level Kinerja Operasional," *INERSIA*, pp. 189-204, 2017.
- [6] SNI 1726 2019, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [7] H. Y. Mamesah, S. E. Wallah and R. S. Windah, "Analisis Pushover pada Bangunan dengan Soft First Story," *Jurnal Sipil Statik*, pp. 212-224, 2014.
- [8] H. Istiono, Y. Septiarsilia, D. K. Fitriyah, I. Komara and F. T. Nuciferani, "Evaluasi Struktur Gedung Hotel Swiss-Belhotel Darmo Surabaya Menggunakan Analisis Pushover Berdasarkan SNI 1726-2019," *Jurnal Teknologi dan Manajemen*, pp. 97-110, 2023.
- [9] R. F. Nabhillah and G. A. Hayu, "Analisis Perilaku Struktur Perkantoran Tahan Gempa Menggunakan Metode Pushover Analysis," *Siklus Jurnal Teknik Sipil*, pp. 141-154, 2020.
- [10] M. A. Prasetya, I. Wirakusuma and G. Sarya, "Kinerja Struktur Gedung Perkuliahan 10 Lantai Berdasarkan Analisis Nonlinier Pushover dan ATC-40 (Studi Kasus: Graha Wiyata UNTAG Surabaya)," *Jurnal Extrapolasi*, pp. 35-45, 2022.
- [11] SNI 1727 2020, *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2020.

ANALISIS EFISIENSI BIAYA DALAM PENYEDIAAN AIR LAUT UNTUK OCEANARIUM KOTA: STUDI KASUS BXSea BINTARO

*Sidi Ahyar Wiraguna¹

¹Students of the Architecture Doctoral Study Program Majoring Digital Architecture at Soegijapranata Catholic University Semarang

^{*)}Email: w.wiraguna24@gmail.com

ABSTRACT

This research focuses on assessing how to procure seawater for the BXSea Bintaro Oceanarium, which is located far from natural seawater sources. The two main options analyzed were the purchase of seawater directly from the coast and the creation of artificial seawater. The research method used in this study was conducted through a qualitative, case study approach by combining literature study, field observation, and the researcher's experience as an oceanarium designer, to gain an in-depth understanding of the technical, economic, and environmental aspects associated with both ways of seawater procurement. The results show that the use of native seawater is more economical and environmentally friendly than artificial seawater. Analysis of the initial costs, long-term operational costs, and logistical and environmental implications of both methods showed the superiority of direct seawater procurement. This method is not only efficient in reducing logistical complexity and initial investment, but also has minimal environmental impact. The conclusions of this study confirm that natural seawater procurement is a cheaper option than the use of artificial seawater. Artificial seawater is significantly up to 5.58 times higher than natural seawater. This study makes an important contribution to the literature of seawater resource management in educational and recreational facilities, and underscores the importance of a sustainable approach in oceanarium development.

Keywords: Cost Efficiency; Seawater; Municipal Oceanarium; Bxsea Bintaro

ABSTRAK

Penelitian ini berfokus pada pengkajian cara pengadaan air laut untuk *Oceanarium* BXSea Bintaro, yang berlokasi jauh dari sumber air laut alami. Dua opsi utama yang dianalisis adalah pembelian air laut langsung dari pantai dan pembuatan air laut buatan. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini dilakukan melalui pendekatan kualitatif, studi kasus dengan menggabungkan studi literatur, observasi lapangan, dan pengalaman peneliti sebagai desainer oceanarium, untuk memperoleh pemahaman mendalam tentang aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan yang terkait dengan kedua cara pengadaan air laut tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan air laut asli lebih ekonomis dan ramah lingkungan dibandingkan dengan air laut buatan. Analisis biaya awal, biaya operasional jangka panjang, serta implikasi logistik dan lingkungan dari kedua metode tersebut menunjukkan keunggulan pembelian air laut langsung. Cara ini tidak hanya efisien dalam mengurangi kompleksitas logistik dan investasi awal, tetapi juga minim dampak lingkungan. Kesimpulan penelitian ini menegaskan bahwa pengadaan air laut alami merupakan pilihan yang lebih murah dibandingkan penggunaan air laut buatan. Air laut buatan secara signifikan mencapai 5,58 kali lebih tinggi dibandingkan dengan air laut alami. Studi ini memberikan kontribusi penting pada literatur manajemen sumber daya air laut di fasilitas pendidikan dan rekreasi, serta menggarisbawahi pentingnya pendekatan berkelanjutan dalam pengembangan oceanarium.

Kata Kunci: Efisiensi Biaya; Air Laut; *Oceanarium* Kota; Bxsea Bintaro

1. PENDAHULUAN

Penelitian ini diawali dengan pengamatan terhadap kondisi geografis Kota Bintaro yang jauh dari pantai, menimbulkan kendala dalam penyediaan air laut secara langsung. Keterbatasan akses langsung ke sumber air laut alami menyebabkan *Oceanarium* BXSea Bintaro harus mencari alternatif lain untuk memenuhi kebutuhan air lautnya. Alternatif ini meliputi pembelian air laut dari sumber eksternal atau pembuatan air laut buatan. Namun, kedua opsi ini membawa tantangan operasional dan finansial yang signifikan. Pertimbangan ini menjadi fokus utama dalam penelitian efisiensi biaya penyediaan air laut untuk *Oceanarium* BXSea Bintaro.

Oceanarium sebagai fasilitas edukasi dan rekreasi memegang peran penting dalam meningkatkan kesadaran masyarakat tentang kehidupan laut[1]. Dalam konteks pembangunan *oceanarium* di BXSea Bintaro yang terletak jauh dari pantai membutuhkan 2.500.000 liter (2500 m³). Ini merupakan tantangan signifikan yang berkaitan dengan penyediaan dan pengelolaan air laut. Penyediaan air laut yang memadai tidak hanya penting untuk mempertahankan ekosistem akuatik yang sehat tetapi juga menentukan kelayakan dan kesuksesan operasional *oceanarium*. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi opsi yang paling efektif dan berkelanjutan dalam penyediaan air laut untuk *oceanarium* di lokasi yang jauh dari sumber air alami.

Analisis biaya awal dan operasional menjadi aspek krusial dalam studi ini. Biaya awal untuk pembuatan atau pembelian air laut memiliki dampak langsung pada anggaran pembangunan oceanarium. Biaya operasional, termasuk pemeliharaan dan penggantian air, menjadi pertimbangan penting untuk kelangsungan operasi oceanarium. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi opsi yang paling efisien secara biaya, mengingat keterbatasan sumber daya dan kebutuhan berkelanjutan oceanarium.

Pembangunan oceanarium, khususnya di lokasi yang jauh dari pantai seperti BXSea Bintaro, menimbulkan tantangan tersendiri, terutama dalam penyediaan dan pengelolaan air laut. Penelitian ini berfokus pada pengkajian mendalam tentang opsi penyediaan air laut yang paling efektif dan berkelanjutan untuk oceanarium di lokasi yang tidak langsung berdekatan dengan sumber air alami. Dalam konteks Indonesia, di mana terdapat banyak kota besar yang jauh dari pantai, pertimbangan ini menjadi sangat relevan. Faktor-faktor seperti biaya, keberlanjutan jangka panjang, lingkungan, dan efisiensi operasional memainkan peran kunci dalam penentuan pilihan yang paling layak. Studi ini, melalui pendekatan studi pustaka, literature virtual dan pengalaman langsung penulis dalam perencanaan oceanarium, bertujuan untuk menyediakan analisis komprehensif tentang kedua pilihan penyediaan air laut ini.

Mempertimbangkan bahwa air laut adalah komponen utama dalam menopang kehidupan dalam *oceanarium*, terdapat dua pilihan utama dalam penyediaannya: pertama, Pembelian air laut langsung ke penjual; dan kedua, pembuatan air laut buatan melalui impor garam akuarium. Kedua cara ini memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing[2]. Pembelian air laut langsung ke penjual, meskipun lebih alami, menyiratkan tantangan logistik yang signifikan terkait dengan jarak dan biaya pengangkutan. Sebaliknya, penggunaan air laut buatan menawarkan kemudahan dalam hal kontrol kualitas, tetapi pengadaan barang import dan biaya produksi serta pengelolannya cenderung tinggi dan membutuhkan teknologi yang canggih[3].

Selain mempertimbangkan opsi penyediaan air laut, baik melalui pembelian langsung maupun produksi air laut buatan, penelitian ini juga menghadapi sejumlah permasalahan yang kompleks. Permasalahan ini mencakup aspek logistik dalam pengadaan dan pengelolaan air laut, analisis biaya yang terkait baik secara langsung maupun tidak langsung, serta dampak lingkungan dari masing-masing metode. Kesulitan dalam mengakses sumber air laut yang berkualitas dan kebutuhan akan teknologi canggih untuk produksi air laut buatan menambah kompleksitas dari permasalahan yang dihadapi.

Logistik pengangkutan air laut langsung dari pantai menjadi tantangan tersendiri. Jarak dari sumber air laut ke lokasi oceanarium mempengaruhi biaya transportasi dan efisiensi waktu. Faktor ini sangat mempengaruhi keputusan antara membeli air laut atau memproduksi air laut buatan. Analisis ini mempertimbangkan waktu dan biaya yang dibutuhkan untuk transportasi, serta ketergantungan terhadap pihak ketiga. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi solusi logistik yang optimal dan berkelanjutan.

Pertimbangan lain adalah stabilitas pasokan air laut dan kontinuitas kualitasnya. Fluktuasi dalam ketersediaan dan kualitas air laut dapat mempengaruhi kesehatan dan keberlangsungan hidup spesies di dalam oceanarium. Risiko ini perlu diminimalkan, baik melalui pembelian air laut yang terkelola dengan baik atau produksi air laut buatan yang konsisten. Analisis stabilitas pasokan ini penting untuk memastikan bahwa *Oceanarium* BXSea Bintaro dapat beroperasi tanpa gangguan. Studi ini berupaya menemukan metode penyediaan air laut yang dapat menjamin ketersediaan dan kualitas air secara konsisten.

Ketersediaan dan pemilihan teknologi yang tepat untuk pengelolaan dan pemeliharaan kualitas air laut juga menjadi faktor penting. Inovasi terkini dalam bidang teknologi pemurnian dan pengolahan air laut harus dipertimbangkan untuk mendukung keberlanjutan oceanarium. Namun, ketersediaan dan akses terhadap teknologi tersebut di Indonesia menimbulkan tantangan tersendiri, yang perlu diatasi agar dapat mendukung keberhasilan dan kelangsungan operasional oceanarium.

Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, penelitian ini tidak hanya bertujuan menyediakan analisis komprehensif tentang pilihan penyediaan air laut, tetapi juga memberikan kontribusi pada literatur yang ada mengenai pengelolaan sumber daya air laut untuk keperluan rekreasi dan pendidikan. Penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan kesadaran tentang pentingnya pendekatan yang berkelanjutan dalam pengembangan fasilitas oceanarium, dengan fokus pada aspek teknis dan efisiensi biaya.

Penelitian ini juga bertujuan untuk memberikan kontribusi pada literatur yang ada mengenai pengelolaan sumber daya air laut untuk keperluan rekreasi dan pendidikan, serta untuk meningkatkan kesadaran tentang pentingnya pendekatan yang berkelanjutan dalam pengembangan fasilitas *oceanarium*. Dengan demikian, studi ini berfokus pada aspek teknis, efisiensi biaya.

Pertanyaan Penelitian

1. Bagaimana perbandingan biaya awal dan jangka panjang antara menggunakan air laut buatan dan mengangkut air laut secara langsung dari pantai untuk *oceanarium* yang terletak di tengah kota?

2. Apa implikasi logistik dan lingkungan dari kedua metode penyediaan air laut tersebut (air laut buatan dan pengangkutan langsung dari pantai) terhadap keberlanjutan operasional *oceanarium*?

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif melalui studi *literature*[4]. Observasi lapangan, dan pengalaman pribadi penulis sebagai desainer *oceanarium*. Metode ini dipilih untuk mendapatkan pemahaman mendalam tentang aspek teknis, ekonomis, dan lingkungan yang terkait dengan penyediaan air laut untuk *oceanarium* BXSea Bintaro khususnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan Biaya Jangka Panjang Antara Menggunakan Air Laut Buatan Dan Mengangkut Air Laut Secara Langsung Dari Pantai Untuk *Oceanarium* Yang Terletak Di Tengah Kota

Penelitian ini berfokus pada perbandingan biaya awal dan biaya jangka panjang antara penggunaan air laut buatan dibandingkan dengan pembelian air laut langsung ke penjual atau supplier yang tersedia. Berdasarkan analisis yang dilakukan melalui studi literatur, observasi lapangan, dan pengalaman penulis sebagai desainer *oceanarium*, beberapa temuan penting dapat diidentifikasi.

Penggunaan air laut buatan melibatkan pencampuran air tawar dengan garam khusus untuk mendapatkan kondisi yang menyerupai air laut alami[2]. Keuntungan utama dari metode ini adalah kontrol kualitas yang lebih tinggi, stabil dan konsistensi kondisi air[2]. Namun pada acara ini diperlukan persiapan dan investasi terkait dengan tempat, bak pencampuran, bak penampungan hasil olahan, alat alat laboratorium untuk melakukan pengecekan parameter kualitas air dan alat mixer serta alat lainya berupa kompresor udara. Selain itu diperlukan juga gudang untuk stok kebutuhan garam. Stok kebutuhan garam minimal harus tersedia untuk kebutuhan 3 bulan mendatang. Stok kebutuhan tersebut harus tersedia sepanjang tahun. Kebutuhan bahan baku garam dimaksud merupakan barang import dari beberapa negara, dengan waktu import antara 3 bulan dalam kondisi normal, bisa sampai 4 bulan jika ada masalah seperti kendala transportasi laut.

Biaya produksi air laut buatan juga tidak boleh diremehkan. Biaya awal untuk pengadaan bahan dan instalasi sistem pencampuran dapat cukup signifikan. Selain itu, biaya operasional berkaitan dengan pemeliharaan peralatan *system mixer* dan pembelian garam terus menerus menjadi pertimbangan utama. Dalam jangka panjang, pertimbangan kebutuhan akan penambahan air baru secara rutin perlu dikalkulasi secara mendalam.

Harga bahan baku garam nilainya sangat dipengaruhi oleh fluktuasi nilai tukar dolar[5]. Dalam jangka panjang, ketidakstabilan ini dapat menyebabkan biaya operasional yang tidak terduga dan berpotensi sulit dikendalikan. Selain itu, proses impor sering kali dihadapkan pada kendala seperti keterlambatan pengiriman dan birokrasi di pelabuhan Indonesia, yang bisa mengganggu kelancaran operasional *oceanarium*.

Informasi beberapa jenis garam aquarium yang ada di pasaran Indonesia, namun ketersediaan stok terbatas dalam jumlah yang besar:

Berikut ada lima produk garam yang digunakan untuk membuat air laut buatan beserta harganya [6]:

1. *Red Sea Coral Pro Salt* (7 kg): Garam pembuat air laut ini dijual dengan harga Rp. 599.000 di Tokopedia.
2. Garam Laut ASW / Garam Laut Sintetis (900 gr): Dijual dengan harga Rp 21.000 per bungkus di Tokopedia, dengan catatan pembelian minimal 10 bungkus seharga Rp. 18.000 per bungkus.
3. *LPS Coral Sea Salt* / Garam Laut / Garam Aquarium Laut (720 gr): Tersedia dengan harga Rp. 473.100 di Tokopedia.
4. *KTP Blue Treasure SPS Sea Salt* / Garam Sintetis (6.7 kg): Garam ini dijual dengan harga Rp. 198.000 di Tokopedia.

Garam yang dibutuhkan = Volume air (dalam liter) × Salinitas (gram/liter)

Garam yang dibutuhkan untuk menghasilkan 1m³ (1000 liter) air laut adalah = 35 kg garam aquarium atau *ocean instant*.

Tabel 1. Analisis biaya untuk menghasilkan 1 meter kubik (m³) air laut menggunakan *Red Sea Coral Pro Salt*, dengan tambahan harga air tawar:

Komponen	Biaya per Unit (Rp)	Total Biaya (Rp)
Garam (35 kg)	85,571.43	2,995,000
Air Tawar (1 m ³)	2,850	2,850
Total		2,997,850

Untuk menghasilkan 1 m³ air laut buatan, diperlukan sekitar 35 kg garam dengan biaya total Rp 2,995,000 untuk garam dan Rp 2,850 untuk air tawar, sehingga total biaya produksi menjadi Rp 2,997,850. Asumsi ini didasarkan pada rasio campuran garam dengan air laut yang umum yaitu 35g per liter, atau 35 kg per m³ (per-meter Kubik)[7]. Biaya ini hanya mencakup garam dan air tawar, belum termasuk biaya tenaga, energy listrik untuk alat mixer, operasional atau pemeliharaan lainnya.

Tabel 2. Adalah tabel analisis yang menunjukkan jumlah garam yang dibutuhkan untuk menghasilkan 2.500 m³ air laut dan biaya untuk stok cadangan 3 bulan mendatang

Parameter	Nilai
Total Volume Air (m ³)	2.500 m ³
Garam yang Dibutuhkan per m ³ (kg)	35 kg
Total Garam yang Dibutuhkan (kg)	87.500 kg
Persentase untuk Stok Cadangan	30%
Jumlah Garam untuk Cadangan (kg)	26.250 kg
Harga Garam per kg (Rp)	Rp 85.572
Biaya untuk Stok Cadangan (Rp)	Rp 2.246.265.000

Dengan asumsi harga garam per kilogram adalah Rp 85.572, total biaya yang diperlukan untuk stok cadangan 30% (atau 26.250 kg) dari total garam yang dibutuhkan adalah sekitar Rp 2.246.265.000.

Pembelian Air Laut Langsung Ke Penjual

Pembelian air laut langsung ke penjual menawarkan keuntungan dalam hal keaslian kondisi air laut. Cara pengadaan ini juga dapat lebih berkelanjutan jika sumber air laut dikelola dengan baik. Namun, tantangan logistik dalam pengangkutan air laut, terutama untuk jarak yang relatif jauh, menjadi faktor penting dalam pertimbangan dan kalkulasi waktu pengadaan. Lokasi sumber air laut yang tersedia saat ini berada di sekitar kawasan pantai Kapuk Jakarta. Jika di kalkulasi jarak dari BXSea ke lokasi sumber air kurang lebih berjarak 30 KM. Jarak tersebut dapat ditempuh selama 55-60 menit pada malam hari antara pkl: 21: 00 hingga Pkl: 5:00 pagi hari. Sedangkan waktu untuk loading dan un-loading di perkirakan 60 menit (1 Jam/1 truk tangki kapasitas 15.000 liter). Dengan demikian untuk mengangkut total kebutuhan air laut sebanyak 2.500.000 liter dengan truk berkapasitas 15.000 liter. Menggunakan 10 truk dan waktu operasional efektif selama 7 jam per hari, mulai jam 10 malam sampai dengan jam 05.00 pagi. Setiap truk membutuhkan waktu 2 jam untuk satu perjalanan bolak-balik (rit) termasuk *loading* dan *unloading*. Dibutuhkan sekitar 167 (rit) dibulatkan. Jadi, dibutuhkan sekitar 5 hari untuk mengangkut 2.500.000 liter air laut dengan armada yang terdiri dari 10 truk tangki.

Tabel 3. Adalah tabel analisis yang menggambarkan waktu yang dibutuhkan untuk mengangkut 2.500.000 liter air laut

Parameter	Jumlah
Total Kebutuhan Air (liter)	2.500.000 liter
Kapasitas per Truk (liter)	15.000 liter
Waktu Perjalanan dan Loading (jam)	2 jam
Jam Operasional per Hari (jam)	7 jam
Jumlah Armada Truk	10 truk
Jumlah Total Perjalanan	167 rit
Perjalanan per Hari oleh Seluruh Armada	35 rit

Biaya Untuk Pengadaan Air Laut

Biaya untuk pengadaan 1 meter kubik (m³) air laut yang dibeli dari “sumber pengepul” atau air laut di sekitaran pantai Tanjung Kait, Kapuk dan sekitarnya, termasuk biaya kirim ke lokasi BXSea Bintaro berkisar Rp. 500.000-575.000/m³. Harga ini adalah harga januari 2024[8].

Analisis Perbandingan Biaya Antara Air Laut Buatan Dan Air Laut Asli

Tabel 4. Perbandingan antara biaya air laut buatan dan air laut asli, termasuk analisis perbedaan harga per meter kubik dan total biaya untuk kebutuhan air laut di *Oceanarium* BXsea Bintaro (2500 m³):

Jenis Air Laut	Biaya per m ³ (Rp)	Total Biaya (Rp)	Perbedaan Harga per m ³ (Rp)	Persentase Perbedaan (%)
Buatan	2,997,850	7,494,625,000	2,460,350	457.74
Asli	537,500	1,343,750,000	2,460,350	457.74

Analisis ini menunjukkan bahwa biaya air laut buatan per meter kubik adalah Rp 2,997,850, sedangkan biaya air laut asli per meter kubik adalah Rp 537,500. Perbedaan harga per meter kubik antara keduanya adalah Rp 2,460,350, yang mana air laut buatan lebih mahal sekitar 457.74% dibandingkan dengan air laut asli. Jika dilihat dari total kebutuhan air laut di *Oceanarium* BXsea Bintaro yang sebesar 2500 m³, maka biaya total untuk air laut buatan untuk pengisian pertama adalah Rp 7,494,625,000.-

Sedangkan untuk air laut asli adalah Rp 1,343,750,000.- Ini menunjukkan bahwa biaya total untuk air laut buatan pada pengisian pertama lebih mahal hampir 5.58 kali lipat dibandingkan dengan air laut asli.

Selisih biaya total pada pengisian pertama antara air laut buatan dan air laut asli untuk kebutuhan 2500 meter kubik air laut di *Oceanarium* BXsea Bintaro adalah Rp 6,150,875,000.- Ini menunjukkan bahwa air laut buatan secara signifikan lebih mahal dibandingkan dengan menggunakan air laut asli.

Kebutuhan Air Laut Pada Saat Operasional

Pada saat operasional berlangsung diperlukan penambahan air secara rutin. Persentase Volume yang Ditambahkan secara umum, sekitar 10% hingga 15% dari masing-masing volume akuarium, volume tersebut harus diganti dengan air baru setiap minggu[9].

Tabel 5. Analisis perbedaan biaya antara air laut buatan dan air laut asli untuk penggantian air akuarium (10% volume per minggu) di *Oceanarium* BXsea Bintaro:

Jenis Air Laut	Biaya per Minggu (Rp)	Biaya per Bulan (Rp)	Biaya per Tahun (Rp)
Buatan	749,462,500	2,997,850,000	39,972,050,000
Asli	134,375,000	537,500,000	6,987,500,000

Dari tabel ini, dapat dilihat bahwa biaya penggantian air laut buatan secara signifikan lebih tinggi daripada biaya penggantian air laut asli. Secara mingguan, penggantian air laut buatan membutuhkan biaya sekitar Rp 749,462,500, sedangkan untuk air laut asli hanya sekitar Rp 134,375,000. Dalam setahun, perbedaan ini semakin besar, dengan biaya penggantian air laut buatan mencapai Rp 39,972,050,000, sementara air laut asli hanya membutuhkan Rp 6,987,500,000.

Ini menunjukkan bahwa penggunaan air laut asli untuk penggantian air secara berkala di *Oceanarium* BXsea Bintaro dapat menghemat biaya operasional yang signifikan yaitu Rp. 32,984,550,000,-/tahun.

Implikasi Logistik Dan Lingkungan Dari Kedua Metode Penyediaan Air Laut Tersebut (Air Laut Buatan Dan Pengangkutan Langsung Dari Pantai) Terhadap Keberlanjutan Operasional *Oceanarium*

Implikasi logistik dan lingkungan dari dua metode penyediaan air laut yaitu, air laut buatan dan pembelian air laut ke penjual adalah kunci untuk mengevaluasi keberlanjutan operasional *Oceanarium* BXsea Bintaro.

Dengan mempertimbangkan pembelian air laut ke penjual dari pantai, keuntungan utama terletak pada kesederhanaan dan efisiensi proses. Karena *Oceanarium* BXsea Bintaro membeli air laut ini langsung dari penjual, ini mengeliminasi kebutuhan untuk sistem logistik yang rumit dan mahal. Tidak ada investasi awal yang besar atau kebutuhan untuk manajemen logistik yang kompleks. Dari perspektif operasional, metode ini memungkinkan *oceanarium* untuk mengurangi biaya *overhead* dan fokus pada pengelolaannya, seperti pemeliharaan habitat dan peningkatan pengalaman pengunjung[10]. Dari sudut pandang lingkungan, walaupun ada pertimbangan mengenai dampak pengambilan air laut dari sumber alami, metode ini cenderung memiliki dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan proses industri yang terlibat dalam pembuatan air laut buatan.

Di sisi lain, pembuatan air laut buatan melibatkan biaya operasional yang 5 kali lebih tinggi. Penggunaan garam yang diimpor dan energi yang diperlukan untuk pemurnian dan pencampuran air mewakili biaya berkelanjutan yang signifikan. Selain itu, ada dampak lingkungan yang terkait dengan impor bahan baku dan konsumsi energi. Meskipun air laut buatan memungkinkan kontrol kualitas yang lebih ketat, aspek-aspek ini menambah beban finansial dan lingkungan yang bisa berpengaruh pada keberlanjutan jangka panjang *oceanarium*.

Dari perspektif keberlanjutan, memilih pembelian air laut langsung ke penjual dari pantai tampaknya menjadi pilihan yang lebih sesuai untuk *Oceanarium* BXsea Bintaro. Metode ini tidak hanya lebih efisien secara biaya tetapi juga meminimalkan komplikasi logistik dan dampak lingkungan. Keberlanjutan operasional tidak hanya tentang mengurangi biaya, tetapi juga tentang menjaga keseimbangan antara kebutuhan operasional dan tanggung jawab lingkungan. Dengan memilih metode yang lebih sederhana dan ramah lingkungan, *Oceanarium* BXsea Bintaro dapat lebih fokus pada tujuan utamanya sebagai pusat pendidikan dan konservasi kehidupan laut.

4. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan bahwa *Oceanarium* BXsea Bintaro menghadapi pilihan penting antara menggunakan air laut buatan atau pembelian air laut yang dibeli langsung ke penjual. Untuk keberlanjutan operasionalnya. Pembelian air laut langsung ke penjual, yang sudah termasuk biaya transportasi dalam harga pengadaan, menawarkan sebuah solusi yang ekonomis dan efisien. Metode ini mengeliminasi kebutuhan untuk investasi awal yang besar dan manajemen logistik kompleks, yang sering kali menyertai produksi air laut buatan. Dengan mengurangi kompleksitas operasional, *Oceanarium* BXsea Bintaro dapat lebih fokus pada aspek-aspek penting lainnya, seperti pengelolaan habitat dan pengembangan pengalaman pengunjung.

Di sisi lain, produksi air laut buatan melibatkan biaya operasional yang 5 kali lebih tinggi, terutama karena ketergantungan pada impor garam dan konsumsi energi yang diperlukan dalam proses pemurnian. Meskipun metode ini memungkinkan kontrol kualitas yang lebih baik, dampak finansial dan lingkungan dari proses produksi yang berkelanjutan dapat menjadi beban bagi operasional jangka panjang *oceanarium*. Dari perspektif lingkungan, penggunaan air laut buatan cenderung memiliki dampak yang lebih besar akibat penggunaan energi dan bahan kimia dalam proses produksinya.

Mengingat faktor-faktor ini, pilihan terbaik untuk *Oceanarium* BXsea Bintaro adalah menggunakan air laut langsung dari pantai. Pilihan ini tidak hanya menguntungkan dari segi ekonomi, tetapi juga lebih sesuai dengan prinsip keberlanjutan lingkungan. Dengan mengurangi kompleksitas dan biaya operasional, *oceanarium* dapat lebih efektif dalam mengalokasikan sumber dayanya untuk tujuan utamanya, yaitu konservasi dan edukasi mengenai kehidupan laut. Pendekatan ini juga memungkinkan *Oceanarium* BXsea Bintaro untuk mempertahankan keseimbangan antara operasional yang efisien dan tanggung jawab lingkungan, yang penting untuk keberhasilan jangka panjangnya sebagai pusat edukasi dan rekreasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Andriawan, T. Hartanto, and W. Prabowo, "Journal of Architecture, Cultural, and Tourism Studies," *OCEANARIUM SEBAGAI SARANA EDUKASI DAN REKREASI DI PACITAN BERPENDEKATAN ARSITEKTUR BIOFILIK*, vol. 1, no. 2, pp. 80–97, Oct. 2023.
- [2] J. Berges, "Journal of Phycology," *EVOLUTION OF AN ARTIFICIAL SEAWATER MEDIUM: IMPROVEMENTS IN ENRICHED SEAWATER, ARTIFICIAL WATER OVER THE LAST TWO DECADES*, vol. 37, pp. 1138–1145, 2001.
- [3] T. Nishida, N. Otsuki, H. Ohara, Z. M. Garba-Say, and T. Nagata, "Some considerations for the applicability of seawater as mixing water in concrete," in *Sustainable Construction Materials and Technologies*, International Committee of the SCMT conferences, 2013. doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001006.
- [4] B. Bungin, *Metodologi Penelitian Kualitatif: Aktualisasi metodologis ke arah ragam varian kontemporer*, 1st ed. Jakarta: Rajawali Pers, 2011.
- [5] O. Putri and T. Sugiarti, "Perkembangan dan Faktor yang Mempengaruhi Permintaan Volume Impor Garam Industri di Indonesia," *Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis*, vol. 5, no. 3, pp. 748–761, Jul. 2021, doi: 10.21776/ub.jepa.2021.005.03.13.
- [6] Tokopedia, "Red Sea Coral Pro," <https://www.tokopedia.com/find/red-sea-coral-pro>.
- [7] S. Ram, "How to mix perfect saltwater from Red Sea Salts," <https://g1.redseafish.com/how-to-mix-salt/>.
- [8] CV. Anugrah Mandiri, "Air Laut Asli untuk Aquarium," <https://www.supplierairbersih.com/2014/12/jual-air-laut.html>.
- [9] A. Miftasha, "Ini Aturan-Aturan dalam Mengganti Air Akuarium," <https://momsmoney.kontan.co.id/news/ini-aturan-aturan-dalam-mengganti-air-akuarium>.
- [10] M. Karydis, "ORGANIZING A PUBLIC AQUARIUM: OBJECTIVES, DESIGN, OPERATION AND MISSIONS. A REVIEW," 2011

SISTEM OPERASIONAL BENDUNG BARAN DITINJAU DARI KETERSEDIAAN AIR

*Paska Wijayanti¹, Reki Arbianto², Sintia Kareri Laki³

^{1,2,3}Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan, Surakarta

^{*)}Email: paska.wijayanti@lecture.utp.ac.id

ABSTRACT

Indonesia's population majority depends on agriculture as food source, irrigation water availability from a weir can influence agricultural sector success level and determine national economy level. Baran Weir irrigates an irrigation area with 179 ha area. This research aims to determine Baran Weir operating system regarding water availability and irrigation water needs. The methods used are FJ.Mock method to calculate water availability, KP-01 method to calculate irrigation water needs, and water balance method to calculate operational simulations. Rainfall data used is Cengklik Reservoir Station for 10 years (2013-2022), climatology data, Baran Weir technical data, and irrigation network scheme/layout. Water availability calculation results is able to serve irrigation water needs with an average monthly discharge of 2,73 m³/s, where the largest discharge in January was 5,495 m³/s and the lowest discharge in August was 0,93 m³/s. The irrigation water needs calculating results show that the monthly average discharge is 0,44 m³/s, where the largest discharge was obtained at 0,60 m³/s in second period of June and the lowest discharge was obtained at 0,21 m³/s, namely in first period. March. Baran Weir operations simulation results show that water availability and irrigation water requirements during the rice planting period are not sufficient in July and August. This is due to minimal rainfall, there are several damaged irrigation networks, and rubbish accumulation, so that change in storage volume calculation result plus Baran Weir volume initial storage is below Baran Weir minimum storage volume.

Keywords: water availability, water requirement, weir operation simulation

ABSTRAK

Sebagian besar penduduk Indonesia bergantung pada pertanian sebagai sumber pangan, ketersediaan air irigasi dari suatu bendung dapat mempengaruhi tingkat keberhasilan sektor pertanian serta menentukan tingkat ekonomi nasional. Bendung Baran mengairi daerah irigasi (D.I) dengan luas area 179 ha. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sistem operasi Bendung Baran terhadap ketersediaan air dan kebutuhan air irigasi. Metode yang digunakan yaitu metode FJ.Mock untuk menghitung ketersediaan air, metode KP-01 untuk menghitung kebutuhan air irigasi, dan metode imbangan air untuk menghitung simulasi operasi. Data hujan yang digunakan adalah Stasiun Waduk Cengklik selama 10 tahun (2013-2022), data klimatologi, data teknis Bendung Baran, dan skema/layout jaringan irigasi. Hasil perhitungan ketersediaan air mampu melayani kebutuhan air irigasi dengan debit bulanan rerata sebesar 2,73 m³/detik, dimana debit terbesar dibulan Januari sebesar 5,495 m³/detik dan debit terendah dibulan Agustus sebesar 0,93 m³/detik. Hasil perhitungan kebutuhan air irigasi menunjukkan debit rerata bulanan sebesar 0,44 m³/detik, dimana debit terbesar diperoleh sebesar 0,60 m³/detik pada periode kedua bulan Juni dan debit terendah diperoleh sebesar 0,21 m³/detik yaitu pada periode pertama bulan Maret. Hasil perhitungan simulasi operasi Bendung Baran menunjukkan ketersediaan air dan kebutuhan air irigasi pada masa tanam padi tidak memenuhi pada bulan Juli dan Agustus. Hal ini dikarenakan minimnya curah hujan, terdapat beberapa jaringan irigasi yang rusak, dan adanya penimbunan sampah, sehingga hasil perhitungan perubahan volume tampungan ditambah dengan volume tampungan awal Bendung Baran berada dibawah tampungan minimum Bendung Baran.

Kata kunci: ketersediaan air, kebutuhan air, simulasi operasi bendung

1. PENDAHULUAN

Air sangat penting karena tanpanya tidak ada kehidupan di Bumi. Karena makhluk hidup tidak dapat dipisahkan dari kebutuhan air, maka potensi air harus dimanfaatkan semaksimal mungkin untuk penyediaan air dalam berbagai keperluan, salah satunya adalah untuk irigasi. Air irigasi sangat penting untuk kelangsungan produktivitas pertanian karena sebagai penunjang utama sumber pangan dan menentukan tingkat ekonomi nasional. Pengoperasian dan pengelolaan air irigasi masih menghadapi banyak tantangan untuk memastikan keberlanjutan air. Tantangannya seperti minimnya curah hujan akibat kemarau yang berkepanjangan, persaingan dalam penggunaan air untuk berbagai keperluan, penimbunan sampah, dan beberapa jaringan irigasi yang tidak layak. Oleh karena itu, ketersediaan dan kebutuhan air sangat memengaruhi produksi pertanian melalui sistem operasi air irigasi. Untuk memenuhi kebutuhan air di sektor pertanian, maka diperlukan sistem irigasi dan bangunan bendung. Tujuan penelitian ini yaitu mengetahui sistem operasi Bendung Baran terhadap ketersediaan air dan kebutuhan air irigasi pada Daerah Irigasi (D.I) Baran.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu keterbaruan penelitian ini memiliki karakteristik yang relative sama, dalam hal metode dan rumus yang digunakan. Yang membedakan penelitan ini dengan penelitian-penelitian terdahulu yaitu studi kasus, lokasi penelitian, permasalahan, dan pembahasan. Mizanuddin Sitompul, dkk (2018),

melakukan penelitian menganalisis ketersediaan air, kebutuhan air, dan mengevaluasi neraca air antara ketersediaan air dengan kebutuhan air masa mendatang di DAS Deli Kota Medan. Metode yang digunakan adalah FJ Mock. Hasil analisis menunjukkan jumlah ketersediaan air terhadap kebutuhan air di DAS Deli adalah surplus dalam kurun waktu satu tahun, *water balanced* tertinggi pada Bulan September pertengahan pertama sebesar 43,526 m³/det. Potensi defisit terjadi pada Bulan Maret pertengahan pertama (*water balanced* -1,425 m³/det) sehingga perlu dilakukan penanganan dalam menanggulangi defisit air tersebut oleh stakeholder atau pemerintah [1].

Prima Jaya Osly, dkk (2019), melakukan penelitian menganalisis seberapa besar potensi kebutuhan air dan ketersediaan air berdasarkan debit andalan di Kabupaten Monokwari Provinsi Papua Barat. Metode yang digunakan adalah FJ Mock. Debit bulanan pada periode waktu 2010-2018 dan rekapitulasi debit rata-rata bulanan didapatkan debit andalan minimum sebesar 7,07 m³/det. Sedangkan debit maksimum sebesar 24,08 m³/det dan debit andalan minimum tahunan sebesar 96,59 m³/det pada tahun 2010 dan debit andalan maksimum tahunan sebesar 211,18 m³/det pada tahun 2010. Ketersediaan air di Kabupaten Manokwari mengalami surplus dengan konsumsi kebutuhan terbesar didominasi sektor pertanian dan sektor peternakan memiliki permintaan konsumsi air terendah [2].

Leni Dwiwana, dkk (2019), melakukan penelitian untuk mengetahui besarnya ketersediaan air dan kebutuhan air Daerah Irigasi (D.I) Terdu Anjongan di Desa Anjongan. Metode yang digunakan adalah Penman Modifikasi untuk perhitungan evapotranspirasi dan F.J.Mock untuk ketersediaan air irigasi. Hasil analisa ketersediaan air didapat debit andalan 80% Sungai Tangkit sebesar 0,028 m³/det (28 liter/detik). Analisa imbalan air dengan membandingkan debit ketersediaan dan debit di pintu pengambilan diperoleh hasil dari kedua pola tanam yang dianalisa menunjukkan ketersediaan air memungkinkan penanaman dengan pola padi-padi dan pola tanam padi-padi jagung [3].

Novia Komala Sari, dkk (2023), melakukan penelitian untuk menganalisis kebutuhan air dan mengetahui neraca kesetimbangan air di D.I Cikunten II. Metode yang digunakan adalah KP01 dan program *Cropwat*. Hasil analisis diperoleh kebutuhan air pada pola tanam padi-padi-palawija dengan KP01 lebih besar dibandingkan dengan hasil *Cropwat* dengan persentase mencapai 277,42%. Ketersediaan air D.I Cikunten menggunakan *Cropwat* masih memenuhi kebutuhan air ditandai dengan factor k yang lebih stabil dibandingkan metode KP01 [4].

Puput Puji Susanti, dkk (2020), melakukan penelitian untuk menganalisis sistem operasi Bendung Arca dalam pemenuhan kebutuhan air irigasi di D.I Kedung Limus Kabupaten Banyumas. Metode yang digunakan adalah membandingkan antara debit terbagi dengan kebutuhan air keseluruhan. Hasil analisis menunjukkan pada bulan April-Juni pengoperasian pemberian debit masih mencukupi kebutuhan airnya, namun debit yang diberikan semakin berkurang karena memasuki musim kemarau. Pada bulan Juli-Oktober pengoperasian debit tidak mencukupi kebutuhan airnya karena bertepatan dengan musim kemarau [5].

Irigasi merupakan upaya penyediaan, pengaturan dan pembuangan air irigasi untuk menunjang pertanian dan memanfaatkan air irigasi yang tersedia secara efisien, efektif dan optimal agar produktivitas pertanian dapat meningkat sesuai yang diharapkan [6]. Bendung adalah bangunan air melintang sungai yang sengaja dibuat untuk meninggikan tingkat muka air dengan tujuan air sungai dapat disadap sesuai dengan kebutuhan/pemanfaatan [7].

Ketersediaan air dapat diartikan dalam berbagai cara, lokasi ketersediaan air dapat merujuk pada suatu tempat, seperti pos duga air, bendung tempat pengambilan air irigasi, dan sebagainya, dimana satuan yang kerap digunakan adalah berupa nilai debit aliran. [8]. Angka yang menunjukkan variabilitas ketersediaan air sekaligus menunjukkan seberapa besar debit yang dapat diandalkan disebut dengan debit andalan [8]. Kebutuhan air irigasi adalah volume air yang dialirkan dari suatu bangunan pengambilan irigasi untuk mengairi satu satuan luas sawah (1 Ha) secara fungsional untuk memenuhi kebutuhan evapotranspirasi, kehilangan air, kebutuhan air untuk tanaman dengan mempertimbangkan volume air yang diberikan oleh alam seperti hujan dan kontribusi air tanah [9]. Simulasi operasi bendung merupakan suatu teknik pemodelan pelepasan air pada bendung untuk menyuplai kebutuhan air di hilir berdasarkan fungsi dari *inflow* (ketersediaan air), *outflow* (kebutuhan air), dan kapasitas bendung [10].

2. LANDASAN TEORI

Evapotranspirasi (ET) adalah perpaduan proses penguapan air dari tanah (evaporasi) dan penguapan air dari tanaman (transpirasi). Apabila ketersediaan air tidak menjadi faktor pembatas, maka evapotranspirasi akan mencapai kondisi maksimal (evapotranspirasi potensial) atau evapotranspirasi potensial akan berlangsung bila

ketersediaan air tidak terbatas bagi stomata maupun permukaan tanah [11]. Persamaan untuk menghitung evapotranspirasi potensial (ETo) menggunakan Metode Penman-Monteith sebagai berikut.

$$ETo = \frac{0,408\Delta Rn + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)}$$

Dimana: Eto adalah Evapotranspirasi potensial (mm/hari), Rn adalah radiasi matahari netto diatas permukaan tanaman (MJ/m²/hr), T adalah suhu udara rerata (oc), U₂ adalah kecepatan angin pada ketinggian 2 m dari atas permukaan tanah (m/s), Es adalah tekanan uap air jenuh (Kpa), Ea adalah Tekanan uap air actual (Kpa), Δ adalah kemiringan kurva tekanan uap air terhadap suhu (Kpa/°c), γ adalah konstanta psikometrik (Kpa/°c).

Evapotranspirasi aktual merupakan kemampuan air untuk menguap dan lebih dipengaruhi fisiologi tanaman dan faktor tanah, besarnya sangat berpengaruh pada kebutuhan air selama penyiapan lahan dan dapat dihitung dengan menghitung evaporasi terbuka (Eo). Pemodelan untuk penaksiran debit dengan interval waktu bulanan menggunakan metode F.J.Mock. baku. Model ini menggunakan data hujan, data luas DAS, evapotranspirasi potensial, evapotranspirasi terbatas, evaporasi aktual, dan keseimbangan air di permukaan tanah.

$$Ee = \left(\frac{m}{20}\right) \cdot (18 - n) \cdot ETo$$

$$Ea = ETo - Ee$$

Dimana: ETo adalah evapotranspirasi potensial (mm /bulan), Ee adalah evapotranspirasi terbatas (mm /bulan), m adalah singkapan lahan (*exposed surface*), n adalah jumlah hari hujan, Ea adalah evaporasi actual.

Perhitungan keseimbangan air diawali dengan mencari kelebihan hujan atau *excess rainfall*. Berikut ini adalah persamaan yang digunakan untuk perhitungan keseimbangan air.

$$\Delta S = R - Ea$$

$$SR = 0,5 \times R$$

$$WS = R - SR$$

$$I = if \times WS, (if = 40\%)$$

$$0,5(1+K) I, K = 60\%$$

$$\text{Water storage} = K \times (Vn-1)$$

$$Vn = (0,8 \times i) + (k \times (Vn-1))$$

$$\Delta Vn = Vn - (Vn-1)$$

$$BF = I - \Delta Vn$$

$$DR = WS - I$$

$$RO = BF + DR + SR$$

$$Q_{\text{Bulan}} = \frac{RO \times A \times 1000}{60 \times 60 \times 24 \times 31}$$

Dimana: Δs adalah jumlah imbangan air (mm/bulan), SR adalah limpasan badai (mm/bulan), ER adalah air hujan yang sampai di permukaan, P adalah curah hujan bulanan, WS adalah *water surplus*/sisa dari air hujan (mm/bulan), I adalah air yang meresap kedalam tanah (mm/bulan), If adalah koefisien infiltrasi diperkirakan berdasarkan kondisi porositas tanah dan kemiringan tanah (0-1), K adalah faktor resesi aliran tanah (0-1), harga k yang tinggi akan memberikan resesi yang lambat seperti pada kondisi geologi yang sangat lulus air, sehingga diambil nilai k = 60 %, Vn adalah volume air tanah, Vn -1 adalah selisih volume air tanah bulan ke n-1 dengan volume air tanah diawal bulan, RO adalah total limpasan (mm/bulan), Q adalah debit efektif (m³/det), A adalah luas daerah tadah hujan (m²).

Kebutuhan air untuk penyiapan lahan termasuk kebutuhan air untuk persemaian. Untuk perhitungan kebutuhan irigasi selama penyiapan lahan menggunakan metode yang dikembangkan oleh Van de Goor dan Zijlstra (1968) dan dalam perhitungannya perlu memperhatikan jenis tanaman, usia tanaman sampai dengan panen, pola tanam, efisiensi irigasi, dan lama penyinaran matahari. Penggunaan air konsumtif untuk tanaman adalah sejumlah air yang diperlukan untuk menggantikan air yang hilang akibat evapotranspirasi.

$$IR = \frac{M \cdot e^k}{ek - 1}$$

$$M = Eo + P$$

$$Eo = 1,1 ETo$$

$$K = \frac{M \cdot T}{S}$$

$$ET_c = K_c \cdot E_{To}$$

Dimana: IR adalah kebutuhan air irigasi ditingkat persawahan (mm/hari), M adalah kebutuhan air untuk mengganti kehilangan air akibat evaporosi dan perkolasi disawah yang sudah dijenuhkan (mm/hari), E_o adalah evaporasi air terbuka selama penyiapan lahan (mm/hari), P adalah perkolasi, T adalah jangka waktu penyiapan lahan (hari), S adalah kebutuhan air untuk penjenuhan ditambah dengan lapisan air 50 mm yakni 200 + 50 = 250 mm, ET_c adalah penggunaan air/evaporasi konsumtif (mm/hari), K_c adalah koefisien tanaman, E_{To} adalah evapotransporasi potensial (mm/hari).

Perkolasi merupakan faktor yang menentukan kebutuhan air tanaman (Etc). Laju perkolasi sangat tergantung pada sifat tanah. Penyelidikan perkolasi di lapangan sangat diperlukan untuk mengetahui secara benar angka perkolasi yang terjadi. Berdasarkan Standar Perencanaan Irigasi KP-01 (2013), pada tanah lempung dengan karakteristik pengelolaan (*puddling*) yang baik, laju perkolasi dapat mencapai 1-3 mm/hari. Dalam penelitian ini, besar laju perkolasi ditetapkan 1 mm/hari. Penggantian lapisan air dilakukan setelah pemupukan dan sesuai kebutuhan. Jika tidak ada penjadwalan semacam itu, lakukan penggantian sebanyak 2 kali, masing-masing 50 mm (atau 3,3 mm/hari selama 1/2 bulan) selama sebulan dan dua bulan setelah transplantasi [12].

Kebutuhan air untuk irigasi dihitung berdasarkan kebutuhan air untuk penyiapan tanaman, pertumbuhan tanaman, dan informasi pola tanam tahunan (sudah diketahui pada awal masa tanam dan luas daerah irigasi). Perkiraan banyaknya air untuk irigasi didasarkan pada jenis tanaman, jenis tanah, cara pemberian air, cara pengelolaan tanah, banyaknya turun hujan, waktu penanaman, iklim, pemeliharaan saluran bangunan dan eksploitasi.

$$NFR_{padi} = ET_c + P + WLR - Re$$

$$NFR_{palawija} = ET_c - Re$$

$$DR = \frac{NFR}{e \times 8,64}$$

Dimana: NFR_{padi} adalah kebutuhan air untuk padi (mm/hari), NFR_{palawija} adalah kebutuhan air untuk palawija (mm/hari), ET_c adalah evaporasi tanaman (mm/hari), WLR adalah penggantian lapis air (mm/hari), P adalah perkolasi (mm/hari), Re adalah curah hujan efektif (mm/hari), DR adalah kebutuhan pengambilan air pada sumbernya (lt/dt/ha), NFR adalah kebutuhan air untuk tanaman dilahan tersier (mm/hari), e adalah efisiensi irigasi secara keseluruhan (%).

Debit andalan merupakan debit minimal yang diharapkan selalu tersedia di sungai dengan probabilitas terpenuhi pada tingkat tertentu. Besarnya debit andalan yang digunakan yaitu 80%, yang berarti kemungkinan terpenuhinya debit minimal sebesar debit andalan itu sebesar 80%, yang juga berarti kemungkinan tidak terpenuhi atau kegagalan sebesar 20% untuk menilai tersedianya air terkait dengan kebutuhan pengambilan.

Curah hujan efektif adalah curah hujan yang jatuh pada suatu daerah dan dapat dipergunakan oleh tanaman untuk pertumbuhannya [12]. Besarnya curah hujan efektif untuk tanaman padi diambil curah hujan yang probabilitasnya terpenuhi 80% (R₈₀), sedangkan untuk tanaman palawija 50% (R₅₀).

$$R_e = \frac{0,7 \times R_{80}}{15} \times 100\% \qquad R_{80} = \frac{m}{n + 1} \times 100\%$$

$$R_e = \frac{0,7 \times R_{50}}{15} \times 100\% \qquad R_{50} = \frac{m}{n + 1} \times 100\%$$

Dimana: Re adalah curah hujan efektif (mm), R₅₀ adalah probabilitas 50% curah hujan efektif untuk tanaman palawija (%), R₈₀ adalah probabilitas 80% curah hujan efektif untuk tanaman padi (%).

Untuk memenuhi kebutuhan air pada tanaman, penentuan pola tanam merupakan hal yang harus dipertimbangkan dan metode yang digunakan adalah imbalan air. Imbalan air (neraca air) adalah perbandingan antara ketersediaan air dan kebutuhan air sebagai dasar operasional pengelolaan air pada suatu daerah yang ditinjau, apakah dalam keadaan surplus atau defisit air. Dengan imbalan air ini diharapkan dapat diketahui potensi air suatu daerah dan level kekritisan airnya.

$$\Delta S = Inflow - Outflow$$

Dimana: ΔS adalah perubahan tampungan (m³), *Inflow* adalah debit ketersediaan air (m³/s), *Outflow* adalah debit kebutuhan air (m³/s).

Simulasi operasi bendung merupakan suatu teknik pemodelan pelepasan air pada bendung untuk menyuplai kebutuhan air di hilir (*outflow*) berdasarkan kapasitas bendung dan ketersediaan air yang masuk ke bendung. Prosedur simulasi operasional bendung adalah sebagai berikut.

1. Menentukan bulan periode operasional bendung dimana periode simulasi dilakukan satu kali dalam sebulan.
2. Menentukan jumlah hari dalam masing-masing bulan.
3. Menentukan *inflow* (ketersediaan air irigasi).
4. Menentukan *outflow* (kebutuhan air irigasi).
5. Menentukan luas genangan yang nilainya tergantung pada luas permukaan bendung.
6. Menentukan nilai evaporasi.
7. Menghitung nilai evaporasi di kali dengan luas permukaan air.
8. Menghitung kebutuhan air irigasi + evaporasi waduk.
9. Menghitung $(\Delta S) = \text{total } inflow - \text{total } outflow$.
10. Menentukan volume tampungan awal (volume yang ada di bendung), setelah beroperasi melayani total *outflow* tidak memperhatikan volume tampungan normal dan volume tampungan minimum.
11. Menghitung vol.tampungan awal (vol.awal) = $\Delta S + \text{Vol. tampungan awal bendung}$.
12. Menentukan volume tampungan minimum bendung (vol.min).
13. Menentukan memenuhi atau tidak memenuhinya hasil simulasi bendung yang dilakukan pada periode bulanan.
 - Jika vol.awal berada dibawah vol.min bendung, maka bendung mampu memenuhi kebutuhan area irigasinya,
 - Jika vol.awal berada dibawah vol.min bendung, maka bendung tidak dapat memenuhi kebutuhan area irigasinya.

3. METODE PENELITIAN

Lokasi penelitian ini dilakukan pada D.I Baran yang berlokasi di Desa Guwokajon, Kecamatan sawit, Kabupaten Boyolali mengairi D.I dengan luas area 179 ha. Pasokan air irigasi pada Bendung Baran diambil dari *intake* Kali Tempel.

Pengumpulan data pada penelitian ini yaitu data sekunder. Data sekunder merupakan pendekatan kajian pustaka terhadap data yang diperoleh dari instansi pemerintah Balai PSDA Bengawan Solo (BPSDA-BS), meliputi data curah hujan, data klimatologi, data teknis Bendung Baran, dan skema/*layout* jaringan irigasi. Data curah hujan berupa data curah hujan bulanan pada 10 tahun terakhir (2013-2022) di Stasiun Waduk Cengklik. Data Klimatologi berupa data lama penyinaran matahari, kelembapan udara, temperatur udara rata-rata harian dan kecepatan angin.

Analisis pada penelitian ini dilakukan 3 tahap yaitu analisis ketersediaan air pada DI Baran terhadap kebutuhan air irigasi menggunakan metode FJ. Mock, analisis kebutuhan air irigasi pada DI Baran menggunakan metode KP-01, dan simulasi operasi Bendung Baran terhadap ketersediaan air dan kebutuhan air irigasi.

4. PEMBAHASAN

Analisis Data Hujan

Sebelum data curah hujan digunakan dilakukan uji konsistensi dengan menggunakan metode RAPS. Hasil perhitungan RAPS menunjukkan bahwa data curah hujan yang digunakan selama 10 tahun (2013-2022) adalah konsisten. Data curah hujan bulanan selama 10 tahun disajikan pada Tabel 2 dan data jumlah hari hujan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 2. Curah Hujan Bulanan

No	Tahun	Curah Hujan Bulanan (mm)											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
1	2013	461	247	159	270	270	131	102	0	0	187	249	232
2	2014	276	209	239	169	115	149	70	0	0	2	194	303
3	2015	202	178	138	258	0	20	130	0	0	4	80	202
4	2016	155	310	198	82	200	135,3	123	44	165	219	374	247
5	2017	339	586	395	494	141	169	115	199	97	146	348	328
6	2018	397	461	239	105	11	58	0	0	94	0	56	158
7	2019	549	368	344	159	5	0	0	0	0	0	34	319
8	2020	341	173	411	176	83	9	87	20	15	171	164	355,5
9	2021	546	283	370	197	341	258	26	81	167	83	281	239
10	2022	483	292	288	274	283	265	0	64	105	261	149	229
	Jumlah	3749	3107	2781	2211	1449	1144	6430	4080	6430	1073	1929	2613
	Rerata	374,90	310,70	278,10	221,10	144,90	119,43	64,30	40,80	64,30	107,30	192,90	261,25

Tabel 3. Jumlah Hari Hujan Bulanan

No	Tahun	Curah Hujan Bulanan (mm)											
		Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agt	Sep	Okt	Nov	Des
1	2013	19	13	11	13	8	7	4	0	0	7	8	12
2	2014	18	15	12	9	4	7	1	0	0	9	9	14
3	2015	8	14	9	19	0	2	10	0	0	1	7	8
4	2016	10	20	12	8	12	10	8	4	7	11	16	11
5	2017	14	20	15	12	6	8	6	5	5	5	19	13
6	2018	21	20	10	10	2	3	0	0	5	0	6	14
7	2019	21	13	17	5	1	0	0	0	0	0	2	13
8	2020	14	16	13	9	7	1	9	1	2	7	13	22
9	2021	23	23	22	14	9	14	2	4	6	8	19	16
10	2022	21	12	19	12	11	13	0	4	8	13	15	12
	Jumlah	169	166	140	111	60	65	40	18	33	52	114	135
	Rerata	16,9	16,6	14	11,1	6	6,5	4,0	1,8	3,3	5,2	11,4	13,5

Analisis Evapotranspirasi

Data klimatologi bulanan digunakan sebagai data input pada pengolahan analisis evapotranspirasi. Hasil perhitungan evapotranspirasi acuan pada rerata setengah bulanan pada bulan Januari tahun 2013-2022 dengan metode Penman-Monteith sebagai berikut.

1. Nilai tekanan uap air jenuh, $e_s = 4,39$ Kpa
2. Nilai tekanan uap aktual, untuk nilai RH dilihat pada bulan Januari sebesar 72%, $e_a = 3,18$ Kpa
3. Selisih tekanan uap, $e_s - e_a = 1,21$ Kpa
4. Kemiringan kurva, $\Delta = 0,25$ kpa/°c
5. Panas laten untuk penguapan, $\lambda = 2,43$ MJ/kg
6. Konstanta psikometrik, $\gamma = 0,07$ kpa/°c
7. Factor penutup awan, $f = 0,17$
8. Emisivitas, $\epsilon' = 0,09$
9. Sudut deklinasi, $\delta = -0,37$ rad
10. Jarak relative antara bumi dan matahari, $dr = 1,03$ rad
11. Rudut saat matahari terbenam, $\omega_s = 1,62$ rad
12. Radiasi matahari ekstraterrestrial, $R_a = 38,79$ MJ/m²/hari
13. Radiasi matahari, $R_s = 11,154$ MJ/m²/hari
14. Radiasi gelombang pendek, $R_{ns} = 8,589$ MJ/m²/hari
15. Radiasi gelombang panjang, $R_{nl} = 0,63$ MJ/m²/hari
16. Radiasi matahari netto diatas permukaan tanaman, $R_n = 7,96$ MJ/m²/hari
17. Evapotranspirasi tanaman acuan, $E_{to} = 4,09$ mm/hari.

Adapun hasil perhitungan evapotranspirasi acuan bulanan tahun 2013-2022 untuk tanaman dapat dilihat pada Tabel 4.

Analisis Ketersediaan Air Bendung Baran Dengan Metode FJ.Mock

Berdasarkan hasil perhitungan evapotranspirasi maka ketersediaan air dapat dihitung dengan menggunakan metode FJ. Mock selama 10 tahun (2013-2022). Berikut adalah perhitungan ketersediaan air di bulan Januari tahun 2013-2022.

1. Menentukan curah hujan bulanan
2. Menentukan jumlah hari hujan bulanan
3. Menentukan nilai evapotranspirasi potensial bulanan januari sebesar $E_{To} = 125,67$ mm/bulan.
4. Menentukan *Exposed Surface* (m) tata guna lahan untuk DAS Kali Tempel dengan nilai m yang digunakan 50 %.
5. Menghitung evapotranspirasi terbatas (Ee).

$$Ee = \left(\frac{m}{20}\right) \cdot (18 - n) \cdot E_{To} = \left(\frac{45\%}{20}\right) \cdot (18 - 16,90) \cdot 125,665 = 3,11 \text{ mm/bulan}$$

6. Menghitung nilai evapotranspirasi actual (Ea)
 $Ea = E_{To} - Ee = 125,665 - 3,110 = 122,555$ mm/bulan
7. Menghitung jumlah imbalanced air (Δs)
 $\Delta s = R - Ea = 374,900 - 122,555 = 252,345$ mm/bulan
8. Menghitung nilai limpasan badai (SR)
 $SR = Pf \times R = 0,50 \times 374,900 = 18,745$ mm/bulan
9. Menghitung nilai sisa dari air hujan (WS)
 $WS = R - SR = 374,900 - 18,745 = 356,155$ mm/bulan

10. Menghitung nilai air yang meresap kedalam tanah (I)
 $if = 40\%$
 $I = if \times WS = 0.4 \times 356,155 = 142,462 \text{ mm/bulan}$
11. Menghitung nilai volume air tanah $0.5(1+K) I$
 $0,5(1+K) I = 0,8 \times I = 0,8 \times 142,462 = 113,970 \text{ mm/bulan}$
12. Menghitung nilai selisih volume air tanah bulan ke n-1 dengan volume air tanah diawal bulan (V_{n-1})
 $V_{n-1} = 79,420 - 113,970 = -34,550 \text{ mm/bulan}$
13. Menghitung nilai penyimpanan air tanah (*Water storage*)
 $Water\ storage = K \times V_{n-1} = 0,6 \times (-34,550) = -20,730 \text{ mm/bulan}$
14. Menghitung nilai volume air tanah (V_n)
 $V_n = (0,8 \times i) + (k \times V_{n-1}) = 113,970 + (-20,730) = 93,240 \text{ mm/bulan}$
15. Menghitung nilai perubahan volume didalam tanah (ΔV_n)
 $\Delta V_n = V_n - (V_{n-1}) = 93,240 - (-20,730) = 113,970 \text{ mm/bulan}$
16. Menghitung nilai *base flow* (BF)
 $BF = I - \Delta V_n = 142,462 - 113,970 = 28,492 \text{ mm/bulan}$
17. Menghitung nilai air yang melimpas kesungai (DR)
 $DR = WS - I = 356,155 - 142,462 = 213,693 \text{ mm/bulan}$
18. Menghitung nilai total limpasan (RO)
 $RO = BF + DR + SR = 28,492 + 213,693 + 18,745 = 260,930 \text{ mm/bulan}$
19. Menghitung nilai debit bulanan (Q Bulan)

$$Q_{Bulan} = \frac{RO \times A \times 1000}{60 \times 60 \times 24 \times 31} = \frac{260,930 \times 56,400 \times 1000}{60 \times 60 \times 24 \times 31} = 5,495 \text{ m}^3/\text{dt}$$

Hasil debit bulanan untuk 10 tahun (2013-2022) di bulan januari sebesar 5,495 m³/dt. Adapun hasil perhitungan debit selama 10 tahun (2013-2022) untuk seluruh bulan yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 4. Hasil Perhitungan Evapotranspirasi

Bulan	J	Suhu Udara (°C)	Kec. Angin (m/s)	RH (%)	Lama Penyinaran (%)	Tekanan Udara (Kpa)	es (kPa)	ea	es-ea	Δ Kpa/°C	λ (MJ/kg)	γ (Kpa/°C)	f	ϵ'	δ (rad)	dr	ρ_a (rad)	Ra MJ/m ² /hari	Rs	Rns	Rnl	Rn	ETo (mm/hr)	ETo (mm/year)	ETo (mm/bulan)
Jan	15	30,6	3,2	72	8	99,69	4,39	3,18	1,21	0,25	2,43	0,07	0,17	0,09	-0,37	1,03	1,62	38,79	11,15	8,59	0,63	7,96	4,05	1479,61	125,67
Feb	46	31,5	3,8	73	19	99,69	4,62	3,35	1,27	0,26	2,43	0,07	0,27	0,08	-0,23	1,02	1,60	38,96	13,36	10,29	0,94	9,34	4,71	1718,71	131,85
Mar	74	31,6	5,2	64	21	99,69	4,64	2,97	1,67	0,26	2,43	0,07	0,29	0,10	-0,05	1,01	1,58	37,97	13,51	10,41	1,21	9,20	6,02	2198,81	186,75
Apr	105	31,8	4,0	74	20	99,69	4,71	3,48	1,23	0,27	2,43	0,07	0,28	0,08	0,17	0,99	1,55	35,23	12,42	9,56	0,95	8,61	4,48	1635,38	138,90
May	135	32,1	4,9	73	26	99,69	4,80	3,52	1,28	0,27	2,43	0,07	0,33	0,08	0,33	0,98	1,53	32,09	12,20	9,40	1,10	8,30	4,78	1746,48	148,33
Jun	166	31,9	5,5	74	27	99,69	4,72	3,51	1,21	0,27	2,43	0,07	0,35	0,08	0,41	0,97	1,51	30,25	11,71	9,02	1,14	7,88	4,73	1727,04	146,68
Jul	196	31,1	4,0	65	19	99,69	4,52	2,92	1,60	0,26	2,43	0,07	0,27	0,10	0,38	0,97	1,52	30,88	10,60	8,16	1,13	7,03	4,83	1763,14	149,75
Aug	227	32,2	9,4	72	19	99,69	4,82	3,47	1,35	0,27	2,42	0,07	0,27	0,08	0,24	0,98	1,54	33,57	11,65	8,97	0,93	8,04	6,14	2239,48	190,20
Sep	258	32,2	7,8	72	25	99,69	4,82	3,49	1,33	0,27	2,42	0,07	0,32	0,08	0,04	0,99	1,57	36,62	13,69	10,54	1,08	9,46	5,98	2184,34	179,53
Oct	288	32,5	7,5	80	21	99,69	4,89	3,93	0,96	0,28	2,42	0,07	0,29	0,06	-0,17	1,01	1,59	38,35	13,64	10,50	0,77	9,73	4,91	1791,19	152,13
Nov	319	32,4	7,5	80	27	99,69	4,85	3,88	0,98	0,27	2,42	0,07	0,34	0,06	-0,33	1,02	1,62	38,66	14,83	11,42	0,94	10,48	5,12	1869,53	153,66
Dec	348	31,5	7,5	83	14	99,69	4,62	3,83	0,79	0,26	2,43	0,07	0,23	0,07	-0,41	1,03	1,63	38,53	12,31	9,48	0,63	8,85	4,24	1548,33	131,50

Tabel 5. Hasil Perhitungan Ketersediaan Air

No	Keterangan	Satuan	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sept	Oct	Nov	Dec		
I Data Meteorologi																
1	Curah Hujan Bulanan (R)	mm/bulan	374,900	310,700	278,100	221,100	144,900	119,430	64,300	40,800	64,300	107,300	192,900	261,250		
2	Jumlah Hari hujan (n)	hari	16,900	16,600	14,000	11,100	6,000	6,500	4,000	1,800	3,300	5,200	11,400	13,500		
Evapotranspirasi Actual (Ea)																
3	Evapotranspirasi potensial (Eto)	mm/bulan	125,665	131,846	186,749	138,896	148,331	146,680	149,746	190,203	179,535	152,129	153,660	131,502		
III Limit Evapotranspirasi																
4	Permukaan Lahan Terbuka (m) (20-50%)	%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%		
5	$E_e = (m/20) \times (18 - n)$		3,456	4,615	18,675	23,959	44,499	42,171	52,411	77,032	65,979	48,681	25,354	14,794		
6	$E_a = E_t - E_e$	mm/bulan	122,210	127,232	168,074	114,936	103,832	104,510	97,335	113,171	113,556	103,448	128,306	116,708		
7	$\Delta s = R - E_a$	mm/bulan	252,690	183,468	110,026	106,164	41,068	14,920	-33,035	-72,371	-49,256	3,852	64,594	144,542		
8	$SR = PF \times R$	PF = 5%	18,745	15,535	13,905	11,055	7,245	5,972	3,215	2,040	3,215	5,365	9,645	13,063		
9	Water Surplus (R-SR)	mm/bulan	356,155	295,165	264,195	210,045	137,655	113,459	61,085	38,760	61,085	101,935	183,255	248,188		
IV Limpasan dan Penyimpanan																
10	Infiltrasi (I)(0,40 X WS)	If (40%)	0,40	mm	142,462	118,066	105,678	84,018	55,062	45,383	24,434	15,504	24,434	40,774	73,302	99,275
11	$0.5(1+K)I = 0.8 \times I$	k = (0-1)	0,60	mm	113,970	94,453	84,542	67,214	44,050	36,307	19,547	12,403	19,547	32,619	58,642	79,420
12	Water Storage	Vn-1 =	-34,550	mm/bulan	-20,730	-20,730	-20,730	-20,730	-20,730	-20,730	-20,730	-20,730	-20,730	-20,730		
13	Volume penyimpanan (Vn)			mm	93,240	73,723	63,813	46,485	23,320	15,577	-1,183	-8,327	-1,183	11,889	37,912	58,690
14	$\Delta v_n = V_n - V_{n-1}$			mm	113,970	94,453	84,542	67,214	44,050	36,307	19,547	12,403	19,547	32,619	58,642	79,420
15	$BF = I - \Delta v_n$			mm	28,492	23,613	21,136	16,804	11,012	9,077	4,887	3,101	4,887	8,155	14,660	19,855
16	DRO (Direct Run Off)			mm	213,693	177,099	158,517	126,027	82,593	68,075	36,651	23,256	36,651	61,161	109,953	148,913
17	Luas Daerah Tadah Hujan			km ²	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4	56,4
18	$Run\ Off = BF + DR + SR$			mm	260,930	216,247	193,558	153,886	100,850	83,123	44,753	28,397	44,753	74,681	134,258	181,830
19	Debit bulanan rata-rata	(m ³ /dt)			5,495	5,041	4,076	3,240	2,124	1,750	0,942	0,935	0,942	1,573	2,827	3,829

Analisis Kebutuhan Air

Perhitungan kebutuhan air dilakukan dengan tahapan analisis curah hujan efektif dengan metode KP-01, analisis kebutuhan air penyiapan lahan, dan analisis nilai kebutuhan air untuk masa tanam padi.

1. Analisis curah hujan efektif dengan metode KP-01

Berdasarkan data curah hujan bulanan dan data jumlah hari hujan, dilakukan perhitungan probabilitas curah hujan. Data curah hujan diurutkan dari terbesar ke terkecil kemudian diinterpolasikan untuk mendapatkan probabilitas 80% untuk tanam padi dan 50% untuk palawija. Curah hujan efektif dapat diperkirakan sebesar 70% dari curah hujan minimum bulanan dengan periode ulang 10 tahunan.

$$\text{Perhitungan curah hujan efektif untuk tanaman padi: Januari I} = \frac{0,7 \times R_{80}}{\text{Periode pengamatan}} = \frac{0,7 \times 79,52}{15} = 5,30 \text{ mm/hari}$$

$$\text{Perhitungan curah hujan efektif untuk tanaman palawija: Januari I} = \frac{0,7 \times R_{50}}{\text{Periode pengamatan}} = \frac{0,7 \times 106,40}{15} = 7,09 \text{ mm/hari}$$

2. Kebutuhan air penyiapan lahan

Persiapan lahan dimulai pada bulan November Periode I dengan nilai ETo sebesar 4,42 mm/hari dengan tabel pemenuhan (S) 250 mm. Nilai perkolasi sebesar 2 mm/hari dan lama penyiapan lahan (T) 30 hari.

a. Mencari perhitungan kebutuhan air pengganti evaporasi (Eo)

$$E_o = 1,1 \times E_{to} = 1,1 \times 4,42 = 4,87 \text{ mm/hari}$$

b. Mencari perhitungan kebutuhan air perkolasi (M)

$$M = E_o + P = 4,87 + 1 = 5,87 \text{ mm/hari}$$

c. Mencari Perhitungan Nilai k

$$k = \frac{M \times T}{S} = \frac{5,87 \times 30}{250} = 0,70 \text{ mm/hari}$$

d. Mencari perhitungan kebutuhan air di sawah (IR)

$$IR = \frac{M \cdot e^k}{(e^k - 1)} = \frac{5,87 \cdot e^{0,70}}{(e^{0,70} - 1)} = 11,61 \text{ mm/hari}$$

e. Mencari perhitungan NFR pada saat penyiapan lahan Bulan November periode 1

$$NFR = IR - R_e = 11,61 - 1,85 = 9,76 \text{ mm/hari} = 1,13 \text{ lt/dt/ha}$$

f. Menghitung nilai kebutuhan air di intake (DR).

Digunakan efisiensi irigasi sebesar 55%, berikut perhitungan bulan November.

$$DR = \frac{NFR}{E_f} = \frac{1,13}{0,55} = 2,05 \frac{\text{lt}}{\text{dt}}/\text{ha}$$

g. Menghitung nilai kebutuhan air irigasi (KAI)

$$KAI = DR \times \text{Luas areal irigasi} = 2,05 \times 179 = 367,49 \text{ lt/dt} = 0,36 \text{ m}^3/\text{dt}$$

3. Menghitung nilai kebutuhan air untuk masa tanam padi
 - a. Masa tanam dimulai pada periode pertama bulan Desember dengan nilai ETo 3,72 mm/hari, Hujan Efektif 3,58 mm/hari, Perkolasi 1 mm/hari, dan WLR dipakai 1,7 mm/hari
 - b. Koefisien tanaman menggunakan FAO dengan Varietas Unggul yang diinterpolasikan untuk mendapatkan nilai koefisien tanaman pada periode setengah bulanan atau 15 harian, berikut perhitungannya.
 $Kc = 0 + (((15-0)/(15-0)) \times (1,1-0)) = 1,10 \text{ mm/hari}$
 - c. Menghitung kebutuhan konsumtif tanaman Padi (ETc)
 $Etc = ETo \times Kc = 3,72 \times 1,10 = 4,09 \text{ mm/hari}$
 - d. Menghitung nilai NFR untuk Masa Tanam bulan Desember periode pertama
 $NFR = Etc + P + WLR - Re = 4,09 + 1 + 1,70 - 3,58 = 13,35 \text{ mm/hari} = 1,54 \text{ lt/dt/ha}$
 - e. Menghitung kebutuhan air di intake (DR).
 $DR = \frac{NFR}{Ef} = \frac{1,54}{0,55} = 2,81 \frac{\text{lt}}{\text{dt}}/\text{ha}$
 - f. Menghitung kebutuhan air irigasi (KAI)
 $KAI = DR \times \text{Luas areal irigasi} = 2,81 \times 179 = 502,64 \text{ lt/dt} = 0,50 \text{ m}^3/\text{dt}$

Adapun hasil analisis kebutuhan air irigasi dengan metode KP-01 dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Kebutuhan Air Irigasi

No	Uraian	Satuan	Masa Tanam Padi																							
			Nov		Dec		Jan		Feb		Mar		Apr		May		Jun		Jul		Aug		Sep		Oct	
			1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	Evapotranspirasi (Eto)	mm/hari	4,42	4,42	3,72	3,72	1,68	3,37	3,95	3,95	4,11	4,11	3,66	3,66	3,60	3,60	3,46	3,46	3,17	3,17	3,81	3,81	4,23	4,23	4,13	4,13
2	Koef. Tanaman (Kc)	mm/hari	0,00	0,00	1,10	1,10	1,10	1,10	0,95	0,95	0,00	0,00	1,10	1,10	1,05	1,05	0,95	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10
	Keb. Air Konsumtif																									
3	Etc = Eto * Kc	mm/hari	0,00	0,00	4,09	4,09	1,85	3,70	3,75	3,75	0,00	0,00	4,03	4,03	3,78	3,78	3,28	3,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,41
	Eo = 1.1 * Eto	mm/hari	4,87	4,87	4,09	4,09	1,85	3,70	4,34	4,34	4,52	4,52	4,03	4,03	3,96	3,96	3,80	3,80	3,48	3,48	4,19	4,19	4,65	4,65	4,54	4,54
4	Perkolasi	mm/hari	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Keb. Air Penyiaapan Lahan																									
	M = Eo + P	mm/hari	5,87	5,87	5,09	5,09	2,85	4,70	5,34	5,34	5,52	5,52	5,03	5,03	4,96	4,96	4,80	4,80	4,48	4,48	5,19	5,19	5,65	5,65	5,54	5,54
	k = M * (T/S)	mm/hari	0,70	0,70	0,61	0,61	0,34	0,56	0,64	0,64	0,66	0,66	0,60	0,60	0,60	0,60	0,58	0,58	0,54	0,54	0,62	0,62	0,68	0,68	0,67	0,67
5	a = e ^k	mm/hari	2,02	2,02	1,84	1,84	1,41	1,76	1,90	1,90	1,94	1,94	1,83	1,83	1,81	1,81	1,78	1,78	1,71	1,71	1,86	1,86	1,97	1,97	1,94	1,94
	b = e ^k -1	mm/hari	1,02	1,02	0,84	0,84	0,41	0,76	0,90	0,90	0,94	0,94	0,83	0,83	0,81	0,81	0,78	0,78	0,71	0,71	0,86	0,86	0,97	0,97	0,94	0,94
	a/b	mm/hari	1,98	1,98	2,19	2,19	3,45	2,32	2,11	2,11	2,06	2,06	2,21	2,21	2,23	2,23	2,28	2,28	2,40	2,40	2,16	2,16	2,03	2,03	2,06	2,06
	IR	mm/hari	11,61	11,61	11,14	11,14	9,84	10,90	11,29	11,29	11,40	11,40	11,10	11,10	11,06	11,06	10,96	10,96	10,77	10,77	11,19	11,19	11,48	11,48	11,41	11,41
6	Penggantian Lap. Air (RW)	mm/hari	0,00	0,00	1,70	1,70	0,00	0,00	1,70	1,70	0,00	0,00	1,70	1,70	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70	1,70	0,00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70
7	Keb. Air Bruto	mm/hari	11,61	11,61	16,93	16,93	11,69	14,61	16,74	16,74	11,40	11,40	16,82	16,82	14,84	14,84	15,95	15,95	12,47	12,47	11,19	11,19	11,48	11,48	13,52	13,52
8	Hujan Eff (KP 01)	mm/hari	1,85	1,62	3,58	4,00	5,30	2,84	5,11	4,02	5,70	3,53	2,99	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00	1,82	0,66	0,00	0,00	0,00	1,05	0,00	1,36
9	Keb. Air Netto (KP 01)	mm/hari	9,76	9,98	13,35	12,93	6,39	11,76	11,62	12,72	5,70	7,87	13,84	15,56	14,84	14,84	15,95	15,95	10,65	11,82	11,19	11,19	11,48	10,43	13,52	12,17
10	Konversi satuan	ltr/dt/ha	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
	Keb. Air Netto (KP 01)	ltr/dt/ha	1,13	1,16	1,54	1,50	0,74	1,36	1,34	1,47	0,66	0,91	1,60	1,80	1,72	1,72	1,85	1,85	1,23	1,37	1,30	1,30	1,33	1,21	1,56	1,41
11	Efisiensi Irigasi (IE)	%	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
12	Keb. Air Intake (KP 01)	ltr/dt/ha	2,05	2,10	2,81	2,72	1,34	2,47	2,44	2,68	1,20	1,66	2,91	3,27	3,12	3,12	3,35	3,35	2,24	2,49	2,35	2,35	2,41	2,19	2,84	2,56
13	Luas Areal Irigasi	ha	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00	179,00
14	KAI (KP 01)	ltr/dt	367,49	375,92	502,64	487,03	240,60	442,92	437,62	478,96	214,48	296,43	521,01	586,03	558,89	558,89	600,53	600,53	401,19	445,02	421,54	421,54	432,18	392,64	509,19	458,12
15	KAI (KP 01)	m ³ /dt	0,367	0,376	0,503	0,487	0,241	0,443	0,438	0,479	0,214	0,296	0,521	0,586	0,559	0,559	0,601	0,601	0,401	0,445	0,422	0,422	0,432	0,393	0,509	0,458

Analisis Simulasi Operasi Bendung

Perhitungan simulasi operasi Bendung Baran didasarkan pada jumlah hari, inflow, kebutuhan air irigasi, kebutuhan air baku, dan kebutuhan air gelontor. Adapun data efisiensi operasi Bendung Baran yang digunakan antara lain:

1. Volume tampungan maksimum sebesar 136,60 m dpi
2. Volume tampungan normal sebesar 128,80 m dpi
3. Volume tampungan minimum sebesar 114,00 m dpi
4. Volume tampungan awal sebesar 113,880 m³
5. Luas genangan digunakan luas permukaan air bendung, yaitu sebesar 1,35 km

Berdasarkan data-data diatas didapatkan hasil simulasi operasional bendung Baran dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Simulasi Operasi Bendung Baran

Bulan	Jumlah hari	Inflow	KAI	Evaporasi Bendung	Luas Genangan	Kehilangan air Bendung	T.outflow	Δs= in-out	Vol.Tamp awal Bendung	Vol. Tampung minimum	Ket M/TM
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
									113,880		
Jan	31	5,495	0,684	4,000	135,000	0,000	0,684	4,811	118,691	114,000	MEMENUHI
Feb	28	5,041	0,917	10,359	135,000	0,000	0,917	4,125	118,005	114,000	MEMENUHI
Mar	31	4,076	0,511	13,253	135,000	0,000	0,511	3,565	117,445	114,000	MEMENUHI
Apr	30	3,240	1,107	9,857	135,000	0,000	1,107	2,133	116,013	114,000	MEMENUHI
May	31	2,124	1,118	10,527	135,000	0,000	1,118	1,006	114,886	114,000	MEMENUHI
Jun	30	1,750	1,201	10,410	135,000	0,000	1,201	0,549	114,429	114,000	MEMENUHI
Jul	31	0,942	0,846	10,627	135,000	0,000	0,846	0,096	113,976	114,000	TIDAK MEMENUHI
Aug	31	0,935	0,843	13,498	135,000	0,000	0,843	0,092	113,972	114,000	TIDAK MEMENUHI
Sep	30	0,942	0,825	13,166	135,000	0,000	0,825	0,118	113,998	114,000	TIDAK MEMENUHI
Oct	31	1,573	0,967	10,796	135,000	0,000	0,967	0,605	114,485	114,000	MEMENUHI
Nov	30	2,827	0,990	11,268	135,000	0,000	0,990	1,837	115,717	114,000	MEMENUHI
Dec	31	3,829	0,990	9,332	135,000	0,000	0,990	2,839	116,719	114,000	MEMENUHI

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis ketersediaan air, Bendung Baran mampu melayani kebutuhan air irigasi dengan rata-rata debit bulanan sebesar 2,73 m³/detik, dimana debit terbesar dibulan Januari sebesar 5,495 m³/detik, sedangkan debit terendah dibulan Agustus sebesar 0,93 m³/detik. Berdasarkan hasil analisis kebutuhan air irigasi, menunjukkan bahwa debit bulanan rata-rata sebesar 0,44 m³/detik, dimana debit tertinggi sebesar 0,60 m³/detik pada periode kedua bulan Juni, sedangkan debit terendah sebesar 0,21 m³/detik yaitu pada periode pertama bulan Maret. Berdasarkan hasil simulasi operasi, pada bulan Juli dan Agustus ketersediaan air dan kebutuhan air irigasi pada masa tanam padi tidak memenuhi, hal ini dikarenakan minimnya curah hujan, terdapat beberapa jaringan irigasi yang rusak, dan penimbunan sampah. Hasil perhitungan perubahan volume tampungan (Δs) ditambah dengan volume tampungan awal Bendung Baran berada dibawah tampungan minimum Bendung Baran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Sitompul and R. Efrida, "Evaluasi Ketersediaan Air DAS Deli Terhadap Kebutuhan Air (Water Balanced)," *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-UNAND)*, vol. 14, pp. 121-129, 2018.
- [2] P. J. Osly, I. Ihsani, R. E. Ririhena and F. D. Araswat, "Analisis Kebutuhan Air dan Ketersediaan Air Kabupaten Monokwari Dengan Model Mock," *Jurnal Infrastruktur*, vol. 5 (2), pp. 59-67, 2019.
- [3] L. Dwiwanan, N. and U. , "Analisa Ketersediaan dan Kebutuhan Air Irigasi Di Daerah Irigasi Terdu," *JeLAST : Jurnal Teknik Kelautan , PWK , Sipil, dan Tambang*, vol. 6, pp. 215-223, 2019.
- [4] N. K. Sari and G. R. Prima, "Evaluasi Kebutuhan dan Ketersediaan Air Irigasi Dalam Rangka Peningkatan Hasil Pertanian (Studi Kasus: Daerah Irigasi Cikunten II)," *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 18, pp. 49-58, 2023.
- [5] P. P. Susanti, T. Marhendi and I. , Sistem Operasi Bendung Arca Dalam Pemenuhan Kebutuhan Air Irigasi Daerah Irigasi Kedung Limus, Skripsi. Program Teknik Sipil Fakultas Teknik dan Sains Universitas Muhammadiyah Purwokerto, 2020.
- [6] A. Priyonugroho, "Analisis Kebutuhan Air Irigasi (Studi Kasus Pada Daerah Irigasi Sungai Air Keban Daerah Kabupaten Empat Lawang)," *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, vol. 2, pp. 457-470, 2014.
- [7] E. Mawardi, Desain Hidraulik Bendung Tetap Untuk Irigasi Teknis, Bandung: Alfabeta, 2002.
- [8] Kementerian PUPR, Modul 5 Hidrologi Ketersediaan Air dan Kebutuhan Air, Bandung: Pusat Pendidikan dan Pelatihan Sumber Daya Air, 2017.
- [9] S. Sosrodarsono and K. Takeda, Hidrologi Untuk Pengairan, Jakarta: Pradna Paramita, 2003.
- [10] D. Swastika, D. A. Wulandari and I. Sriyana, "Simulasi Operasi Waduk Batutegei Provinsi Lampung," *Cantilever: Jurnal Penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, vol. 11, pp. 81-91, 2023.
- [11] J. Wiraman, M. Idris and S. Chairani, "Analisis Evapotranspirasi dengan Menggunakan Metode Thornthwaite, Blaney Criddle, Hargreaves, dan Radiasi," *Rona Teknik Pertanian*, vol. 6, pp. 451-457, 2013.
- [12] Y. Sutopo and K. S. Utomo, "Kebutuhan air untuk irigasi," in *Irigasi dan Bangunan Air*, Semarang, LPPM, Universitas Negeri Semarang, 2019, pp. 110-128.
- [13] Kementerian PUPR, Standar perencanaan Irigasi KP-01, Jakarta: Kementerian PUPR, 2013.

ANALISIS INFRASTRUKTUR PENDUKUNG PARIWISATA DI LABUAN BAJO, KABUPATEN MANGGARAI BARAT DAN KABUPATEN ENDE

*Triapriyono Kaidu¹, Firnimus Konstantinus Bhara², Alfredo Satriawan Kabupung³

^{1,2,3}Teknik, Nusa Nipa, Maumere

*) Email: kaidutriapriyono@gmail.com

ABSTRACT

Tourism has the potential to be developed into a leading sector in East Nusa Tenggara, especially since some tourist destinations are already known worldwide, such as Komodo National Park and the iconic Kelimutu National Park, which contribute significantly to the region's tourism revenue. The development of tourism is evidenced by the increase in the number of tourists after the COVID-19 pandemic. The number of tourist visits in Labuan Bajo, West Manggarai Regency, increased by 69.20% in 2022, and in Ende Regency, the number of tourists increased by 86.02% in 2022. This research aims to analyze the sufficiency of tourism activity supporting infrastructure in Labuan Bajo, West Manggarai Regency, and Ende Regency. Data collection was carried out in these two locations by distributing questionnaires to 44 international tourists, domestic tourists, and tour guides to assess the sufficiency of tourism infrastructure in Labuan Bajo and 44 international tourists, domestic tourists, and tour guides to assess the sufficiency of tourism infrastructure in Ende. The assessment instrument used the American Society of Civil Engineers criteria. The results from the 44 respondents overall showed that the supporting infrastructure for tourism activities in Labuan Bajo, West Manggarai Regency, received a rating of 73.52% with a grade of "Sufficient," whereas the supporting infrastructure for tourism activities in Ende Regency received a rating of 69.12% with a grade of "Poor." A comparison between the study conducted in 2017 and the study in 2023 regarding tourism infrastructure in Labuan Bajo, West Manggarai Regency, showed an improvement. This improvement is observed in the final average scores of the 12 analyzed infrastructures. In 2017, the tourism infrastructure received a final grade of "Poor," while in 2023, the tourism infrastructure in Labuan Bajo, West Manggarai Regency, received a final grade of "Sufficient" with a rating of 73.52%.

Keyword: Tourism, Infrastructure, American Society of Civil Engineers, Labuan Bajo, Ende Regency.

ABSTRAK

Pariwisata memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi sektor unggulan di Nusa Tenggara Timur khususnya beberapa destinasi wisata sudah dikenal dunia, seperti Taman Nasional Komodo hingga ikon Taman Nasional Kelimutu yang menjadi salah satu pemasukan pendapatan daerah sektor pariwisata. Perkembangan pariwisata ditunjukkan dari meningkatnya jumlah wisatawan setelah pandemi COVID-19 berakhir. Jumlah kunjungan wisatawan di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat pada tahun 2022 meningkat sampai 69.20% dan kabupaten Ende pada tahun 2022 jumlah wisatawan meningkat 86,02%. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kecukupan infrastruktur pendukung aktivitas pariwisata di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat dan kabupaten Ende. Pengumpulan data dilakukan di dua tempat yaitu Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat dan kabupaten Ende secara langsung dengan menyebarkan kuesioner yang ditujukan kepada responden. Subjek dalam penelitian ini adalah 44 wisatawan mancanegara, wisatawan domestik dan *tour guide* untuk menilai kecukupan infrastruktur pariwisata di Labuan Bajo dan 44 wisatawan mancanegara, wisatawan domestik dan *tour guide* untuk menilai kecukupan infrastruktur pariwisata di kabupaten Ende. Instrumen penilaian menggunakan *American Society of Civil Engineers*. Hasil dari penelitian dari 44 responden menunjukkan secara keseluruhan infrastruktur pendukung aktivitas pariwisata di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai barat memperoleh *rating* (73,52%) dengan *grade* "Cukup", sedangkan 44 responden menunjukkan secara keseluruhan infrastruktur pendukung aktivitas pariwisata di kabupaten Ende memperoleh *rating* (69,12%) dengan *grade* "Buruk". Hasil perbandingan studi yang dilakukan pada tahun 2017 dan studi pada tahun 2023 infrastruktur pariwisata di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat menunjukkan ada peningkatan. Peningkatan itu dilihat dari hasil akhir nilai rata-rata dari 12 infrastruktur yang telah dianalisis, yang mana infrastruktur pariwisata di tahun 2017 mendapat nilai akhir "D" (Buruk). Sedangkan infrastruktur pariwisata di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat di tahun 2023 mendapat nilai akhir "C" (Cukup) dengan *rating* 73.52.

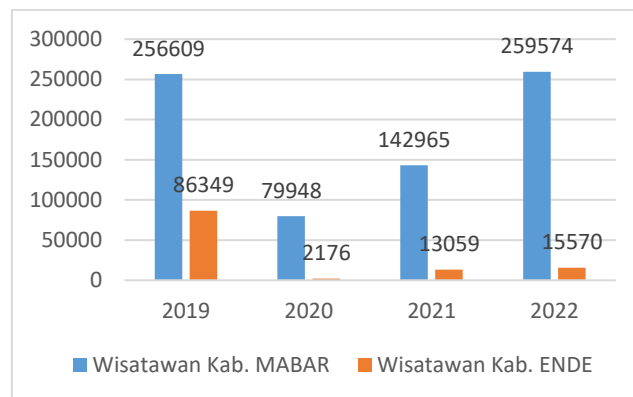
Kata kunci: Pariwisata, infrastruktur, *American Society of Civil Engineers*, Labuan Bajo, Kabupaten Ende.

1. PENDAHULUAN

Pariwisata telah menjadi salah satu sektor ekonomi yang signifikan dalam perekonomian Indonesia, dengan berbagai destinasi yang menarik wisatawan dari seluruh dunia salah satu Labuan Bajo, yang terletak di Kabupaten Manggarai Barat, terkenal dengan wisata Taman Nasional Komodo dan Kabupaten Ende terkenal dengan wisata Taman Nasional Kelimutu, Indonesia, telah menjadi salah satu tujuan pariwisata yang populer di Indonesia karena keindahan alamnya dan potensi atraksi wisata bahari seperti Pulau Komodo sehingga menjadi destinasi yang semakin mendapat perhatian wisatawan untuk menjadi tempat favorit menjadi tujuan wisata.

Pengembangan pariwisata adalah serangkaian upaya untuk menciptakan keterpaduan pemanfaatan sumberdaya pariwisata yang berbeda – beda, memadukan seluruh aspek non-pariwisata yang secara langsung maupun tidak

langsung berkaitan dengan kelangsungan pembangunan pariwisata [1]. Dengan adanya pertumbuhan pariwisata sangat yang pesat di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat dan Kabupaten Ende menyebabkan peningkatan jumlah wisatawan yang berkunjung setiap tahunnya. Hal ini diindikasikan dari jumlah wisatawan di tahun 2015 – 2019 sebesar 76.13%, sedangkan di tahun 2020 mengalami penurunan cukup signifikan jumlah wisatawan sebesar -220.97% diakibatkan oleh pandemi COVID-19 Kabupaten Manggarai dan di tahun 2022 setelah masa pandemi COVID-19 berakhir jumlah wisata meningkat sebesar 69.20%. Sedangkan Kabupaten Ende jumlah wisatawan di tahun 2015 – 2019 sebesar 27.09% dan di tahun 2020 turun cukup signifikan sebesar -3868.24% diakibatkan pandemi COVID-19 dan di tahun 2022 jumlah wisatawan yang mengunjungi Kabupaten Ende naik sebesar 86.02%. Dengan rincian seperti tampak gambar berikut:



Sumber: Data Primer (2023)

Gambar 1. Jumlah Kunjungan Wisatawan ke Kab. Mabar dan Kab. Ende

Meningkatnya jumlah wisatawan setelah pandemi COVID-19 berakhir. Sebagai akibatnya, infrastruktur pariwisata di kedua daerah ini mengalami tekanan dan tantangan yang besar. Penting untuk memastikan bahwa infrastruktur pariwisata Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat dan Kabupaten Ende memenuhi standar yang diperlukan untuk mendukung pertumbuhan berkelanjutan dan penyediaan infrastruktur yang baik dalam menunjang aktivitas pariwisata sehingga menarik lebih banyak kunjungan wisatawan. Kunjungan wisatawan yang semakin meningkat membutuhkan upaya untuk peningkatan kualitas destinasi wisata dan komponen pendukung yang memadai setiap tahun [2]. Menurut Gunawan *et al* [3] dengan ada banyaknya kunjungan wisatawan dapat mendorong industri baru yang dapat membuka peluang kerja, pendapatan, standar hidup, dan mengaktifkan sektor produksi. kunjungan wisatawan juga dapat mendorong pertumbuhan pariwisata.

Infrastruktur pariwisata menjadi salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan. Menurut Zadel [4] Perkembangan pariwisata tidak terlepas dari adanya daya tarik wisata sampai adanya jenis pengembangan yang ditunjangi oleh penyediaan fasilitas dan aksesibilitas. Kualitas infrastruktur pariwisata yang memadai sangat penting untuk memastikan pengalaman wisatawan yang aman dan nyaman, sambil juga menjaga kelestarian lingkungan dan budaya setempat. Menurut Hesna *et al* [5] kenyamanan pengunjung akan terpenuhi apabila terdapat perilaku masyarakat yang pariwisata dan terdapat infrastruktur yang mendukung pelayanan wisata. Infrastruktur yang baik juga memberi dampak pada semua sektor ekonomi termasuk pariwisata [6]. Diikuti pembangunan infrastruktur dalam mendukung pertumbuhan pariwisata. Pembangunan infrastruktur juga mempunyai pengaruh pada pertumbuhan ekonomi wilayah [7].

Pentingnya suatu infrastruktur dalam perkembangan suatu daerah tidak hanya meningkatkan kualitas pariwisata, tapi juga meningkatkan ekonomi di suatu wilayah. Untuk memperbesar pendapatan asli daerah maka pemerintah perlu mengembangkan dan memfasilitasi tempat pariwisata agar sektor pariwisata dapat memberikan sumbangan bagi pembangunan ekonomi [8]. Menurut Kaming & Raharjo [9], saat infrastruktur dalam sebuah wilayah tersebut tercukupi dan memenuhi syarat, maka wilayah tersebut mampu mencapai stabilitas ekonomi dan pertumbuhan ekonomi yang tinggi, peningkatan produk domestik bruto serta menurunkan tingkat pengangguran.

Menurut Hesna *et al* [5] kunci utama untuk menciptakan sebuah daerah dengan industri pariwisata yang baik adalah terwujudnya kenyamanan pengunjung. Kenyamanan pengunjung akan bisa terlaksana jika dua variabel berikut terpenuhi yakni adanya budaya dan perilaku masyarakat yang ramah dan adanya infrastruktur yang saling berkesinambungan antara destinasi pariwisata. Oleh karena itu dibutuhkan infrastruktur yang mendukung untuk menjamin pengalaman wisata yang aman, nyaman, dan memuaskan bagi wisatawan.

Salah satu organisasi yang berperan penting dalam menetapkan standar infrastruktur adalah *American Society of Civil Engineers (ASCE)*. *ASCE* telah mengembangkan berbagai standar yang relevan untuk infrastruktur pariwisata, seperti fasilitas pelabuhan, jalan, air bersih, drainase, dan lain sebagainya. Oleh karena itu, analisis infrastruktur pariwisata di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat dan Kabupaten Ende berdasarkan Standar *ASCE* akan memberikan wawasan tentang kecukupan, keandalan, dan keamanan infrastruktur yang ada, serta membantu mengidentifikasi area-area yang memerlukan perhatian maupu perbaikan guna meningkatkan kualitas layanan bagi wisatawan. Menurut Aneldus & Heny [8] dalam penelitiannya diharapkan kepada pemerintah Kabupaten Manggarai Barat untuk memperhatikan unsur 4A dalam pengembangan pariwisata kabupaten Manggarai Barat yaitu *attration* (atraksi), *amenities* (fasilitas), *accessibility* (aksebilitas), dan *anciliary* (pelayanan tambahan).

2. METODE

Penelitian ini adalah penelitian kuantitatif menggunakan data primer. Teknik pengumpulan data, yaitu data yang dikumpulkan langsung dengan menggunakan kuesioner yang diisi langsung oleh para responden. Lokasi penelitian ini ada dua tempat yaitu Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Bara dan kabupaten Ende. Subjek dalam penelitian ini untuk lokasi di Labuan bajo, kabupaten Manggarai Barat adalah 44 responden yang terdiri dari para wisatawan domestik, wisatawan asing, dan *tour guide*. Sedangkan lokasi di kabupaten Ende juga 44 responden yang terdiri dari para wisatawan domestik, wisatawan asing, dan *tour guide*. Kuesioner berisikan tentang pertanyaan tentang tanggapan responden terhadap kecukupan infrastruktur sebagai pendukung pariwisata di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat dan Kabupaten Ende. Data skunder yang digunakan yaitu publikasi ilmiah, media masa dan internet.

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

Mean ini berguna untuk menentukan peringkat tertinggi para responden dalam memberikan prioritas terhadap isi kuesioner, dilakukan suatu tahapan terlebih dahulu yaitu dengan membuat tabel (tabulasi data) yang berisikan mengenai data yang telah diperoleh dari responden. *Mean* didapat dengan menjumlahkan data seluruh individu dalam kelompok, kemudian dibagi dengan jumlah individu yang ada di kelompok tersebut.

Untuk mengetahui kecukupan infrastrktur pariwisata. *Rating* yang diberikan penilaian kecukupan infrastruktur sebagai pendukung pariwisata di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai dan kabupaten Ende menggunakan standar *American Society of Civil Engineers (ASCE)* adalah sebuah organisasi profesional yang didedikasikan untuk memajukan ilmu pengetahuan dan praktek teknik sipil, yang mencakup bidang seperti desain dan konstruksi infrastruktur sipil, sistem transportasi, lingkungan, dan lainnya. Standar yang dikeluarkan oleh *American Society of Civil Engineers* adalah standar desain struktur bangunan, jembatan, jalan, sistem air, sistem drainase, dan sebagainya. Standar-standar ini dirancang untuk memastikan keselamatan, keberlanjutan, dan efisiensi dalam pembangunan infrastruktur. Berikut ini rating yang diberikan penilaian kecukupan infrastruktur sebagai pendukun pariwisata di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai dan Kabupaten Ende ini terdiri dari enam *grade* (tingkatan) disajikan dalam tabel 1.

Tabel 1. Rubik Penilaian Infrastruktur

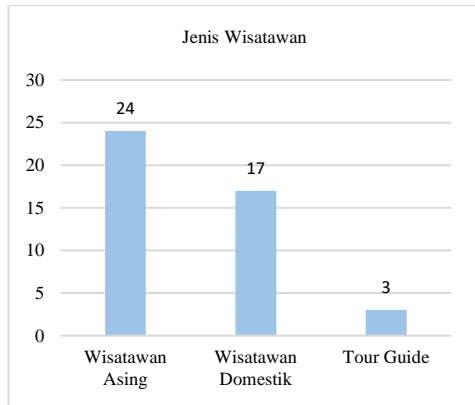
<i>Definition</i>	<i>Grade</i>	<i>Rating</i>	<i>Term</i>
<i>Infrastructure fulfills current goals and needs very well and anticipates the upcoming)</i>	A	90-100%	<i>Exceptional fit for the future</i>
<i>Small changes are needed so that infrastructure meets its goals and current and anticipate future</i>	B	80-89%	<i>good: adequate for now</i>
<i>Larger changes are needed so that the infrastrukture meets the goals and anticipates the upcoming)</i>	C	70-79%	<i>mediocre: require attention</i>
<i>Fundamental changes are needed so tha the infrastrukture meets current goals and needs and anticipates the upcoming</i>	D	51-69%	<i>poor: at risk</i>
<i>Totally not adequate to fulfill the need of infrastructure</i>	E	<50%	<i>very bad</i>
<i>Not recognize the infrastructure</i>	F	0%	<i>do not know</i>

Sumber: [10]

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

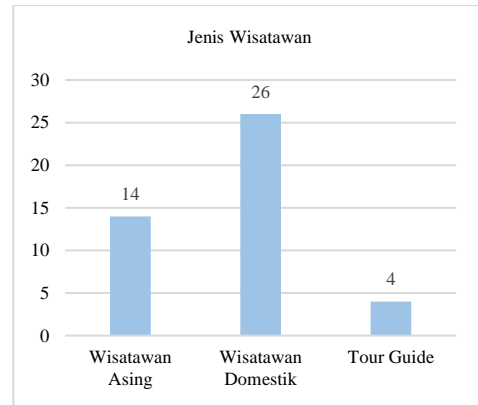
Data Umum Responden

Pengambilan data dari responden, responden yang berpartisipasi dalam penelitian ini di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat lebih dominan wisatawan asing terlihat pada gambar 2. Sedangkan untuk kabupaten Ende responden yang berpartisipasi dalam studi ini lebih dominan wisatawan domestik terlihat pada gambar 3.



Sumber: Pengolahan Data (2023)

Gambar 2. Jenis wisatawan Labuan Bajo



Sumber: Pengolahan Data (2023)

Gambar 3. Jenis wisatawan kabupaten Ende

Penilaian Infrastruktur Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat

Hasil analisis kecukupan infrastruktur pariwisata Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat berdasarkan data yang diberikan oleh 44 responden. Penilaian diberi dalam bentuk rating dan grade seperti ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis Kecukupan Infrastruktur Pariwisata Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat

No	Infrastruktur	mean	Standar Deviation	Rating (%)	Grade
1	Bandar Udara	3.86	0.63	77.3	C
2	Terminal Bus	1.0	0.60	20.00	E
3	Jembatan dan Jalan	4.41	0.49	88.18	B
4	Hotel	4.52	0.50	90.45	A
5	Buangan Sampah	3.23	0.67	64.55	C
6	Resto	4.00	0.68	80.00	B
7	Telekomunikasi & TIK	3.98	0.59	79.55	C
8	Ruang Terbuka Hijau/Ruangan Publik	4.09	0.67	81.81	B
9	Konektivitas/Transit	3.75	0.53	75.00	C
10	Rumah Sakit	3.50	0.50	70.00	C
11	Pelabuhan Laut	3.50	0.50	78.18	C
12	Homestay	3.86	0.76	77.27	C
	Total Mean			3.67	
	Rating			73.52%	
	Grade				C

Sumber: Hasil pengolahan data (2023)

Terlihat pada tabel 2, hasil kecukupan infrastruktur menunjukkan bahwa rating hotel sudah sangat baik dengan rating 90.45% grade A. Responden meyakini hotel yang merupakan salah satu infrastruktur yang tersedia sangat baik dan mendukung di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat. Resto, ruang terbuka hijau jalan dan jembatan mendapatkan rating baik memenuhi kebutuhan wisatawan. Infrastruktur yang perlu harus ditingkatkan seperti bandar udara, buangan sampah telekomunikasi, konektivitas/transit, rumah sakit, pelabuhan laut, dan homestay dimana responden menyatakan ratingnya cukup. Sedangkan untuk infrastruktur terminal bus mendapat rating sangat buruk, perlu sangat diperhatikan oleh pemerintah dalam meningkatkan layanan kepada wisatawan sehingga mendapat kenyamanan dan keamanan sehingga dapat mendukung pariwisata di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat.

Penilaian Infrastruktur Kabupaten Ende

Terlihat pada tabel 3, hasil analisis kecukupan infrastruktur pariwisata di kabupaten Ende. Berdasarkan penilaian 44 responden menyatakan infrastruktur bandar udara, jalan, jembatan, telekomunikasi, ruang terbuka hijau, rumah sakit, pelabuhan laut, dan homestay cukup mendukung pariwisata di kabupaten Ende dimana mendapatkan *rating* cukup.

Tabel 3. Hasil Analisis Kecukupan Infrastruktur Pariwisata Kabupaten Ende

No	Infrastruktur	Mean	Standar Deviation	Rating (%)	Grade
1	Bandar Udara	3.56	0.75	71.40	C
2	Terminal Bus	3.00	0.64	60.00	D
3	Jembatan dan Jalan	3.86	0.73	77.27	C
4	Hotel	3.13	0.85	62.73	D
5	Buangan Sampah	3.31	0.63	66.36	D
6	Resto	3.20	0.76	64.09	D
7	Telekomunikasi & TIK	3.70	0.59	74.09	C
8	Ruang Terbuka Hijau/Ruangan Publik	3.93	0.66	78.63	C
9	Konektivitas/Transit	3.04	0.86	60.00	D
10	Rumah Sakit	3.79	0.85	75.91	C
11	Pelabuhan Laut	3.68	0.51	73.63	C
12	Homestay	3.22	0.52	64.55	C
	Total Mean			3.46	
	Rating			69.12%	
	Grade			D	

Sumber: Hasil pengolahan data (2023)

Infrastruktur terminal bus, hotel, buangan sampah, resto, dan konektivitas/transit mendapat *rating* buruk. Untuk secara keseluruhan, kecukupan infrastruktur penunjang pariwisata dinilai *grade* buruk dengan *rating* 69.12% menunjukkan bahwa para responden meyakini infrastruktur tersebut belum mendukung pariwisata di kabupaten Ende dan perlu melaukan peningkatan agar dapat mendukung pariwisata di kabupaten Ende di tahun - tahun mendatang.

Perbandingan Infrastruktur Pariwisata

Tabel 4, menyajikan perbandingan tentang infrastruktur pariwisata di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat dengan kabupaten Ende. Terlihat infrastruktur di Labuan Bajo dinilai responden hanya hotel sangat baik, infrastruktur resto, ruang terbuka hijau, jalan dan jembatan dinilai baik, bandara udara, buangan sampah, telekomunikasi, konektivitas, rumah sakit, pelabuhan laut, homestay dinilai “cukup”, dan terminal bus dinilai buruk atau tidak memadai. Sedangkan infrastruktur pariwisata di kabupaten Ende hanya di nilai cukup dan buruk. Bandara, jalan, jembatan, telekomunikasi, ruang terbuka hijau, rumah sakit, pelabuhan laut dan homestay dinilai “cukup”, infrastruktur yang lain dinilai buruk atau tidak memadai.

Tabel 4. Perbandingan Rating dan Grade

NO	Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat			Kabupaten Ende		
	Infrastruktur	Rating (%)	Grade	Infrastruktur	Rating (%)	Grade
1	Pelabuhan Udara	77.27	C	Pelabuhan Udara	71.40	C
2	Terminal Bus	20.00	E	Terminal Bus	60.00	D
3	Jembatan & Jalan	88.18	B	Jembatan & Jalan	77.27	C
4	Hotel	90.45	A	Hotel	62.73	D
5	Buangan Sampah	64.55	C	Buangan Sampah	66.36	D
6	Resto	80.00	B	Resto	64.09	D
7	Telekomunikasi & TIK	79.55	C	Telekomunikasi & TIK	74.09	C
8	Ruang Terbuka Hijau	81.81	B	Ruang Terbuka Hijau	78.63	C
9	Konektivitas/Transit	75.00	C	Konektivitas/Transit	60.00	D
10	Rumah Sakit	70.00	C	Rumah Sakit	75.91	C
11	Pelabuhan laut	78.18	C	Pelabuhan laut	73.63	C
12	Homstay	77.27	C	Homstay	64.55	C

Sumber: Hasil pengolahan data (2023)

Perbandingan infrastruktur pariwisata di labuan bajo, kabupaten manggarai barat dengan kabupaten ende terlihat adanya perbedaan. Perbedaan dapat dilihat dari hasil akhir nilai rata-rat dari 12 infrastruktur yang telah di analisis. Pada Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat mendapat nilai akhir “C” (Cukup) dengan *rating* 72.80% sedangkan di kabupaten Ende mendapatkan nilai “D” (Buruk) dengan *rating* 69.12% dari rata-rata 12 infrastruktur yang di analisis. Berdasarkan dari hasil analisis data menunjukkan bahwa, sejauh ini cukup mendukung pariwisata di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat dibandingkan dengan infrastruktur yang pariwisata yang ada di kabupaten Ende dinilai masih buruk.

Perbandingan Dengan Studi Di Tahun 2017

Perbandingan kedua studi yang dilakukan di tahun yang berbeda, yakni di tahun 2017 dan di tahun 2023 dengan lokasi penelitian yang sama, yaitu Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat. Ada peningkatan infrastruktur yang signifikan dari tahun 2017 ke tahun 2023 terlihat infrastruktur jalan dan jembatan dari buruk menjadi baik, hotel dari baik menjadi baik sekali, buangan sampah dari buruk sekali menjadi cukup, resto dari cukup menjadi baik, telekomunikasi dan TIK dari buruk sekali menjadi cukup, ruang terbuka hijau dari buruk sekali menjadi baik, konektivitas/transit, pelabuhan laut dan homestay dari buruk menjadi cukup. Sedangkan infrastruktur bandara, terminal bus dan rumah sakit tidak mengalami peningkatan.

Tabel 5. Perbandingan studi di tahun 2017 dengan di tahun 2023

NO	Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat (2017)			Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat (2023)		
	Infrastruktur	Rating (%)	Grade	Infrastruktur	Rating (%)	Grade
1	Pelabuhan Udara	71.20	C	Pelabuhan Udara	77.27	C
2	Terminal Bus	26.67	E	Terminal Bus	20.00	E
3	Jembatan & Jalan	54.20	D	Jembatan & Jalan	88.18	B
4	Hotel	81.78	B	Hotel	90.45	A
5	Buangan Sampah	26.20	E	Buangan Sampah	64.55	C
6	Resto	70.67	C	Resto	80.00	B
7	Telekomunikasi & TIK	43.56	E	Telekomunikasi & TIK	79.55	C
8	Ruang Terbuka Hijau	45.80	E	Ruang Terbuka Hijau	81.81	B
9	Konektivitas/Transit	64.00	D	Konektivitas/Transit	75.00	C
10	Rumah Sakit	70.22	C	Rumah Sakit	70.00	C
11	Pelabuhan laut	51,56	D	Pelabuhan laut	78.18	C
12	Homstay	55,00	D	Homstay	77.27	C

Sumber: Kaidu [11]

Hasil perbandingan yang ditampilkan pada tabel 5, adanya peningkatan yang signifikan dari tahun 2017 ke tahun 2023 terhadap penilaian responden tentang infrastruktur pariwisata yang ada di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat. Peningkatan itu dilihat dari hasil akhir nilai rata-rata dari 12 infrastruktur yang telah dianalisis, yang mana infrastruktur pariwisata di tahun 2017 mendapat nilai akhir “D” (Buruk). Sedangkan infrastruktur pariwisata di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat di tahun 2023 mendapat nilai akhir “C” (Cukup) dengan *rating* 73.52%.

4. KESIMPULAN

Dari hasil analisis kecukupan infrastruktur pendukung pariwisata Taman Nasional Komodo di Labuan bajo, kabupaten Manggarai Barat dan Taman Nasional Kelimutu di kabupaten Ende pembahasan diatas mengenmai infrastruktur pariwisata Labuan Bajo, kabupaten Manggarai barat dan kabupaten Ende dapat disimpulkan:

1. Infrastruktur pendukung pariwisata Taman Nasional Komodo di Labuan Bajo, kabupaten Manggarai Barat diperoleh *grade* akhir dari studi ini secara keseluruhan adalah “C”, dengan *rating* 73,52%. Infrastruktur yang masih harus ditingkatkan adalah bandar udara, terminal bus, buangan sampah, telekomunikasi & Tik, konektivitas/transit, rumah sakit, pelabuhan laut, homestay.
2. Sedangkan untuk infrastruktur pendukung pariwisata Taman Nasional Kelimutu di kabupaten Ende diperoleh *grade* akhir dari 12 infrastruktur secara keseluruhan adalah “D”, dengan *rating* 69.12%. seluruh infrastruktur tersebut harus perlu ditingkatkan lagi, agar lebih menunjang aktivitas wisatawan.

Saran

Berdasarkan kesimpulan tersebut, maka dapat diberi beberapa saran, yaitu:

1. Bagi pemerintah daerah Kabupaten Manggarai Barat dan Kabupaten Ende perlu meningkatkan kualitas pembangunan infrastruktur pariwisata diseluruh objek-objek wisata sehingga terciptanya kenyamanan bagi

wisatawan saat berkunjung dan prioritas infrastruktur pariwisata tidak hanya wisata bahari, tetapi juga meliputi semua objek pariwisata baik budaya maupun alam

2. Untuk studi selanjutnya mengenai kecukupan infrastruktur pariwisata berdasarkan standar ASCE atau mengguna standar yang lain dan tidak hanya 12 infrastruktur tersebut.
3. Adanya studi selanjutnya mengetahui faktor apa saja yang mempengaruhi lamanya wisatan tinggal dan dikaitkan dengan kecupan infrastruktur infrastruktur pendukung pariwisata. Sehingga pemerintah daerah Kabupaten Manggarai Barat dan Kabupaten Ende dapat merancang strategi dalam untuk memenuhi kebutuhan wisatan agar lama tinggal di Tempat wisata

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kodoatie, R.J. 2005. *Pengantar Manajemen Infrastruktur. Pustaka Pelajar: Yogyakarta*
- [2] Valeriani, D., & Putri, A. K. (2020). Tourism Sector Development in Belitung Regency: The Tourist's Perception. *Society*, 8(1), 109–122. <https://doi.org/10.33019/society.v8i1.157>
- [3] Gunawan, J., Wahab, N. A., & Elmiati, E. (2016). Health Tourism in Belitung Indonesia: A SWOT Analysis. *Belitung Nursing Journal*, 2(2), 27-30. <https://doi.org/10.33546/bnj.12>
- [4] Zadel, Zrinka, and Sinisa Bogdan. 2013. Economic impact of cultural Tourism. *UTMS Journal of Economics*, 4(3):355-36
- [5] Y. Hesna, A. Suraji, B. Istijono, B. Hidayat, and T. Ophyandri, "Kajian Kapasitas Infrastruktur : Suatu Upaya Peningkatan Pariwisata Sumatera Barat," *IPTEK J. Proc. Ser.*, vol. 3, no. 5, pp. 296–300, Dec. 2017
- [6] Kaming, P. F., Kaldu, T., Payung, F. R., & Salenus, C. (2019). *Analisis Infrastruktur Pariwisata: Kasus di Yogyakarta*. I (Volume I), 450–461. [http://e-journal.uajy.ac.id/id/eprint/21905%0Ahttp://e-journal.uajy.ac.id/21905/1/KoNTekS 13.pdf](http://e-journal.uajy.ac.id/id/eprint/21905%0Ahttp://e-journal.uajy.ac.id/21905/1/KoNTekS%2013.pdf)
- [7] Prasetyo, R. B., & Fridaus, M. (2009). Pengaruh Infrastruktur Pada Pertumbuhan Ekonomi Wilayah Indonesia. *Ekonomi Dan Kebijakan Pembangunan*, 2(April), 222–236.
- [8] Aneldus, S. Y., & Heny, M. (2018). Pengaruh Sektor-Sektor Pariwisata Terhadap Kabupaten Manggarai Barat. *Ekonomi Pembangunan Unud*, 1603–1630.
- [9] Kaming, P. F., & Raharjo, F. (2017). Komparasi Kecukupan Infrastruktur di Koridor Jawa. *Rekayasa Sipil Vol. 6*, 6(1), 9–18.
- [10] ASCE (2021). Report Card for America's Infrastructure, diakses 1 juli 2023 <https://www.infrastructurereportcard.org/making-the-grade/report-card-history/2009-report-card/>
- [11] Kaidu, T (2017) Studi Kecukupan Infrastruktur Pariwisata pada Kabupaten Manggarai Barat, Nusa Tenggara Timur, TGA, FT UAJY.

PEMANFAATAN BUBUK GAMPING SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN TERHADAP SIFAT MEKANIK BETON

*Yohanes Laka suku¹, Marselinus Y. Nisanson², Maria Andriani Moi³

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Flores, Ende, Nusa Tenggara Timur

³Alumni Program Studi Teknik Sipil, Universitas Flores, Ende, Nusa Tenggara Timur

*) Email: yohanessuku@gmail.com

ABSTRACT

The study on the utilization of limestone powder as a substitute or replacement material for cement in concrete mixtures aims to determine its effect on the mechanical properties of concrete, namely compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength. The limestone powder used is derived from limestone from the village of Lengko Lolok, East Manggarai Regency, with substitution proportions of 0%, 5%, 10%, and 15% by weight of cement. The compressive, splitting tensile, and flexural strengths of the concrete were measured at 14 and 28 days. The results show that concrete without limestone powder substitution achieved an average compressive strength of 20.2 MPa, meeting the planned target. However, the addition of limestone powder from the village of Lengko Lolok, East Manggarai Regency, generally decreased the average compressive, splitting tensile, and flexural strengths of the concrete. Nonetheless, the addition of limestone powder had a positive effect in accelerating the increase in early-age flexural strength of the concrete.

Keyword: Lime Powder; Compressive Strength; Tensile Strength; Flexural Strength

ABSTRAK

Penelitian tentang pemanfaatan bubuk gamping sebagai bahan substitusi atau pengganti semen pada campuran beton, bertujuan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat mekanik beton, yakni kuat tekan, tarik belah dan lentur beton. Bubuk gamping yang digunakan berasal dari batu gamping desa Lengko Lolok kabupaten Manggarai Timur dengan proporsi substitusi terhadap berat semen sebesar 0%, 5%, 10% dan 15%. Kuat tekan, tarik belah dan lentur beton diukur dengan pengujian pada beton usia 14 hari dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beton tanpa substitusi bubuk gamping mencapai kuat tekan rata-rata 20,2 MPa, sesuai dengan target yang direncanakan. Namun, penambahan bubuk gamping dari batu gamping desa Lengko Lolok, Kabupaten Manggarai Timur, umumnya menurunkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur rata-rata beton. Meskipun demikian, penambahan bubuk gamping menunjukkan efek positif dalam mempercepat peningkatan kuat lentur beton pada usia awal.

Kata kunci: Bubuk Gamping; Kuat Tekan; Kuat Tarik; Kuat Lentur.

1. PENDAHULUAN

Beton sebagai bahan bangunan banyak digunakan untuk membangun bangunan seperti gedung, jembatan, bendungan dan sarana prasarana umum lainnya. Penggunaan beton sebagai bahan beton banyak diminati karena mudah dalam pembuatannya, kuat menahan gaya tekan, tahan terhadap perubahan cuaca dan suhu dan harganya relatif murah dibandingkan bahan bangunan lainnya. Beton terdiri dari dua bagian utama yaitu pasta semen dan agregat, dimana pasta semen terdiri dari semen portland, air dan juga dapat ditambah dengan bahan tambahan (admixture) dan agregat terdiri dari agregat kasar (batu pecah) dan agregat halus (pasir).

Kualitas beton sangat tergantung dari kualitas bahan pembentuknya, dan untuk mendapatkan kualitas beton dengan kuat tekan yang tinggi harus direncanakan dengan baik sesuai dengan tatacara yang diatur dalam standar perencanaan campuran beton. Tatacara perencanaan campuran beton saat ini diatur dalam SNI 7656:2012 yang mana tatacara ini mengikuti tatacara yang diatur dalam *American Concrete Institute* (ACI) 211.1-91. Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi pada bidang teknologi beton mendorong dilakukan penelitian pemanfaatan bahan lain sebagai substitusi semen untuk meningkatkan kualitas mutu beton dan efisiensi dalam pembuatannya seperti bubuk gamping, abu terbang (*fly ash*) dan abu arang kayu, [1], [2].

Penggunaan bubuk gamping dalam pembuatan campuran beton sudah banyak diteliti, antara lain oleh [3] diperoleh bahwa penambahan serbuk batu gamping sebesar 15% dengan factor air semen, fas 0,4 meningkatkan kuat tekan sebesar 0,95% dan pada fas 0,5 sebesar 1,71%. [4] melakukan penelitian dengan menggunakan batu gamping sebagai agregat halus dan agregat kasar pada campuran beton, hasil penelitian diperoleh kuat tekan, f'c dengan fas 0,2 sebesar 55,13 MPa dari target rencana 50 MPa. Dengan demikian penggunaan bubuk gamping baik sebagai bahan substitusi semen maupun agregat halus dan kasar dalam pembuatan beton dapat dilakukan, hal ini diperkuat oleh penelitian yang dilakukan oleh [5] menyatakan bahwa semen alternatif dari bahan batu gamping dan *fly ash* dapat dijadikan sebagai bahan pengganti semen Portland hal ini karena dalam serbuk batu gamping mengandung mineral yang serupa dengan semen yakni kalsium karbonat beserta silika, aluminium dan magnesia.

Pemanfaatan bubuk gamping sebagai substitusi semen dapat menghemat biaya pembuatan beton dan juga merupakan pembangunan yang berwawasan lingkungan yang belum banyak diketahui oleh masyarakat khususnya masyarakat di Pulau Flores. Ketersediaan batu gamping di Pulau Flores cukup banyak dan tersebar di beberapa wilayah, salah satunya di desa Lengko Lolok kabupaten Manggarai Timur. Penelitian ini bertujuan untuk mencari tahu apakah batu gamping dari desa Lengko Lolok kabupaten Manggarai Timur dapat digunakan sebagai bahan substitusi semen pada campuran beton normal, adapun sifat mekanik beton yang diteliti adalah kuat tekan, tarik belah dan kuat lentur yang terjadi akibat substitusi bubuk gamping terhadap semen.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Batu Gamping

Batu gamping atau batu kapur merupakan salah satu mineral industri yang banyak digunakan untuk konstruksi sebagai bahan bangunan, landasan jalan raya dan kereta api dan sebagai pengganti agregat dan semen dalam campuran beton karena dalam batu gamping mengandung kalsium karbonat ($CaCO_3$), beserta silika (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3) dan magnesium oksida (MgO) yang serupa dengan semen [3], [4], [5].

Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton merupakan ciri terpenting untuk mengukur kualitas dan mutu suatu beton. Untuk mendapat suatu nilai kuat tekan beton yang sesuai rencana maka harus direncanakan proporsi campuran agregat kasar, halus, semen dan air. Nilai kuat tekan beton didapat dari percobaan uji tekan terhadap benda uji berbentuk selinder yang berukuran diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, nilainya adalah besarnya beban tekan yang menyebabkan benda uji hancur dibagi dengan luas benda uji, dihitung dengan menggunakan persamaan 1 berikut:

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

dengan f'_c = Kuat tekan beton (MPa), P = Beban tekan beton (N) dan A = Luas penampang benda uji (mm^2)

Kuat Tarik Belah Beton

Kuat tarik beton merupakan salah satu sifat mekanik penting pada struktur beton karena dapat mempengaruhi ukuran, retak dan lendutan yang terjadi pada beton akibat pengaruh beban luar. Nilai kuat tarik beton selalu lebih kecil dari nilai kuat tekannya [6]. Pengujian kuat tarik beton secara langsung lebih sulit dilakukan dibandingkan kuat tekannya, karena masalah pada penjempitan (*gripping*) benda uji pada mesin. Pengujian kuat tarik dengan cara pembelahan silinder oleh suatu desakan kearah diameternya yang dikenal dengan istilah tarik Brazilien atau kuat tarik belah dan merupakan cara yang relatif mudah untuk dilakukan [7]. Nilai kuat tarik dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$f'_{ct} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (2)$$

dengan f'_{ct} = Kuat tarik belah beton (MPa), P = Beban maksimum (N), L = Panjang benda uji silinder (mm) dan D = Diameter silinder (mm)

Kuat Lentur Beton

Lentur Beton (*Modulus of Rupture*) Pengujian kuat lentur menggunakan benda uji balok tanpa tulangan pada umur beton 28 hari. Menurut SNI 4431-2011 Pembebanan dilakukan 1/3 bentang untuk mendapatkan lentur murni [8]. Kuat lentur dapat dihitung dengan persamaan berikut jika bidang patah terletak di daerah pusat (daerah 1/3 jarak titik perletakan bagian tengah).

$$f_{lt} = \frac{PL}{bh^2} \quad (3)$$

Jika patahan benda uji berada diluar pusat (1/3 jarak titik perletakan bagian tengah), dan jarak titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari jarak antara titik perletakan maka dapat menggunakan persamaan berikut :

$$f_{lt} = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (4)$$

dengan f_{lt} = Kuat lentur (MPa), P = Beban maksimum (N), L = Panjang bentang (mm), b = Lebar balok (mm), h = Tinggi balok (mm) dan a = Jarak rata-rata antara tampang lintang patah dan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada bagian tarik specimen (mm).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di laboratorium bahan dan konstruksi program studi teknik sipil Universitas Flores, adapun tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan bahan dan alat, bahan yang digunakan yakni agregat kasar, agregat halus, semen, air dan bubuk gamping dan alat-alat untuk memeriksa sifat fisik dan mekanik agregat kasar dan halus serta alat uji kuat tekan, tarik belah dan lentur.
2. Pemeriksaan sifat fisik dan mekanik agregat kasar dan halus, pemeriksaan meliputi pemeriksaan gradasi, berat jenis, absorsi, kadar air, kadar lumpur, dan berat isi.
3. Perencanaan dan pembuatan benda uji, terdiri dari perencanaan campuran beton mutu 20 MPa menggunakan metode [9], pembuatan benda uji, dan perawatan beton.
4. Pengujian kekuatan beton, terdiri dari pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah menggunakan selinder beton diameter 150 mm dan tinggi 300 mm dan kuat lentur beton menggunakan balok beton ukuran 150 mm x 150 mm x 600 mm [8], [10], [11], pada usia 14 hari dan 28 hari, terlihat pada gambar 1.
5. Analisa data, hasil pengujian yang telah dilakukan dianalisis dan disimpulkan berdasarkan tujuan dari penelitian.



Sumber: Penulis, 2024

Gambar 1. Pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan lentur

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Agregat

Hasil pengujian sifat mekanik agregat kasar dapat dilihat pada tabel 1 dan untuk agregat halus pada tabel 2. Berdasarkan tabel 1, hasil pengujian sifat fisik agregat kasar memenuhi batas interval yang disyaratkan sehingga material tersebut bisa langsung digunakan.

Tabel 1. Hasil pengujian agregat kasar

No	Jenis Pengujian	Hasil	Batas	Keterangan
1	Berat jenis, SSD	2,31	1,6 - 3,2	memenuhi
2	Kadar lumpur	0,72 %	0,2% - 1%	memenuhi
3	Berat isi	1,49 gr/cm ³	1,4-1,9 gr/cm ³	memenuhi
4	Keausan	9,45%	15% - 50%	memenuhi
5	Kadar air	1,81 %	0,5% - 2%	memenuhi
6	Penyerapan	2,89 %	0,2% - 4%	memenuhi

Sumber: Penulis, 2024

Tabel 2. Hasil pengujian agregat halus

No	Jenis Pengujian	Hasil	Batas	Keterangan
1	Berat jenis, SSD	2,64	1,6 - 3,2	memenuhi
2	Kadar lumpur	1,76 %	0,2% - 5%	memenuhi
3	Berat isi	1,42 gr/cm ³	1,4-1,9 gr/cm ³	memenuhi
4	Modulus kehalusan	3,32	2,2 - 3,1	tinggi
5	Kadar air	3,35 %	3% - 5%	memenuhi
6	Penyerapan	0,49 %	0,2% - 2%	memenuhi

Hasil pengujian agregat halus pada tabel 2, diperoleh bahwa nilai modulus kehalusan melampaui batas atas dari syarat yang ditetapkan, namun demikian agregat halus ini masih bisa digunakan, karena menurut penelitian yang dilakukan oleh [12] dan [13] diperoleh bahwa modulus kehalusan pasir tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan beton.

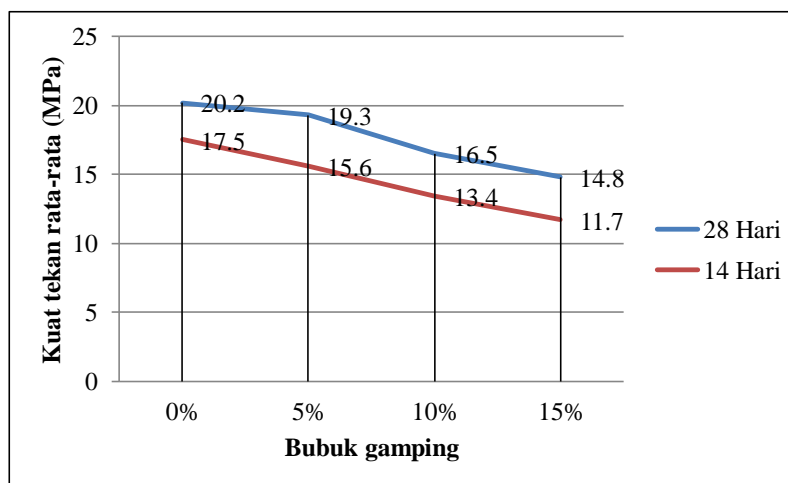
Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan rata-rata pada beton berumur 14 hari dan 28 hari disajikan pada tabel 3 dan gambar 2. Tabel dan gambar tersebut menampilkan hasil pengujian kuat tekan rata-rata beton pada dua waktu berbeda, yaitu saat umur 14 hari dan 28 hari. Data tersebut dikelompokkan berdasarkan persentase campuran bubuk kapur gamping (bubuk kapur) yang digunakan dalam pembuatan beton.

Tabel 3. Kuat tekan beton rata-rata tanpa dan dengan bubuk gamping

Bubuk Gamping	Kuat tekan rata-rata (MPa)		Prosentase kekuatan (%)	
	14 Hari	28 Hari	14 Hari	28 Hari
0%	17,5	20,2	86,7	100
5%	15,6	19,3	77,2	99,5
10%	13,4	16,5	66,3	81,7
15%	11,7	14,8	57,9	73,3

Sumber: Penulis, 2024



Sumber: Penulis, 2024

Gambar 2. Kuat tekan rata-rata beton tanpa dan dengan bubuk gamping

Berdasarkan tabel 3 dan gambar 2 diatas, diperoleh nilai kuat tekan rata-rata tanpa substitusi bubuk gamping sebesar 20,2 MPa, sesuai target kuat tekan yang direncanakan yakni sebesar 20 MPa. Pada data tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase bubuk gamping dalam campuran beton, maka kuat tekan rata-rata beton cenderung menurun pada kedua waktu pengujian, baik pada umur 14 hari maupun 28 hari. Berdasarkan data tersebut juga dapat disimpulkan bahwa penambahan bubuk gamping hingga 5% pada campuran beton masih mempertahankan sebagian besar kekuatan beton tersebut, dengan persentase kekuatan relatif diatas 99% dan laju peningkatan kuat tekan akibat substitusi bubuk gamping terhadap semen menjadi lebih kecil dibandingkan beton tanpa bubuk gamping.

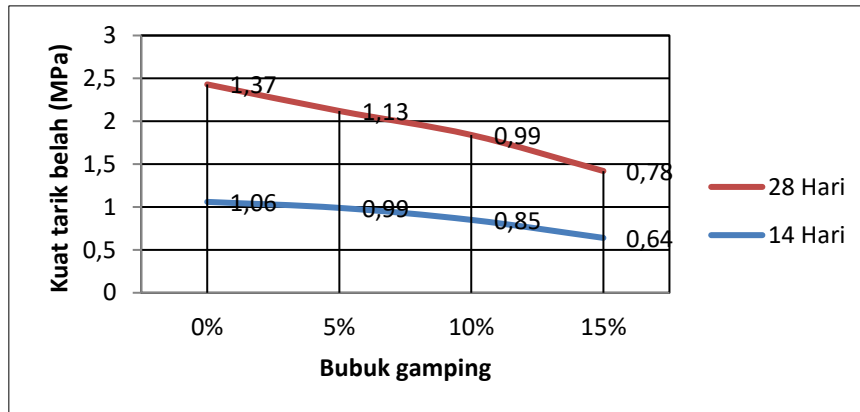
Kuat Tarik Belah Beton

Hasil uji kuat tarik belah beton disajikan pada tabel 4 dan gambar 3 pada dua waktu yang berbeda, yaitu pada umur 14 hari dan 28 hari, dengan variasi persentase bubuk gamping dalam campuran beton. Data dalam tabel dan gambar tersebut memberikan gambaran tentang bagaimana penambahan bubuk gamping mempengaruhi kuat tarik belah beton pada berbagai tahap pengerasan.

Tabel 4. Kuat tarik belah beton tanpa dan dengan bubuk gamping

Bubuk Gamping	Kuat tarik belah rata-rata (MPa)		Prosentase kekuatan (%)	
	14 Hari	28 Hari	14 Hari	28 Hari
0%	1,06	1,37	77,4%	100%
5%	0,99	1,13	72,3%	82,5%
10%	0,85	0,99	62,0%	72,3%
15%	0,64	0,78	46,7%	56,9%

Sumber: Penulis, 2024



Sumber: Penulis, 2024

Gambar 3. Kuat tarik belah rata-rata beton tanpa dan dengan bubuk gamping

Berdasarkan tabel dan grafik di atas, dapat diamati bahwa penambahan bubuk gamping dalam campuran beton cenderung memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kuat tarik belah beton, dimana penambahan bubuk gamping menghasilkan penurunan kuat tarik belah beton. Sebagai contoh, pada umur 28 hari, beton tanpa tambahan bubuk gamping dijadikan sebagai referensi dengan persentase kekuatan 100%. Namun, dengan penambahan bubuk gamping sebesar 5%, 10%, dan 15%, terjadi penurunan persentase kekuatan relatif menjadi 82,5%, 72,3%, dan 56,9% secara berturut-turut. Ini menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase bubuk gamping yang ditambahkan ke dalam campuran beton, semakin signifikan pula penurunan kuat tarik belah beton.

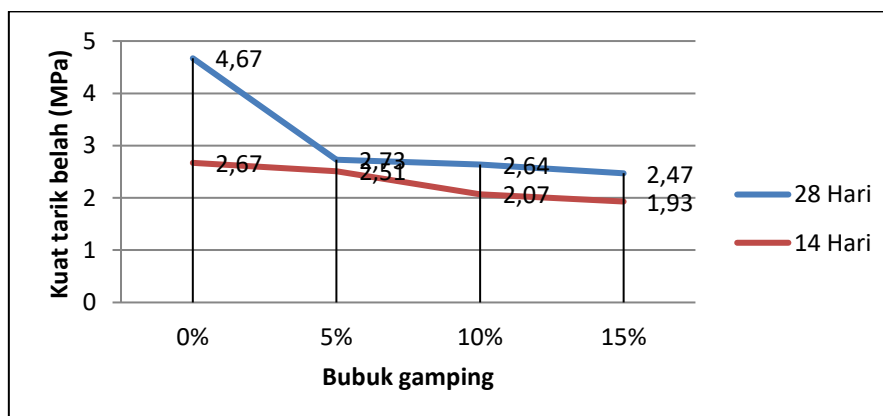
Kuat Lentur Beton

Hasil uji kuat lentur rata-rata beton pada dua waktu pengujian, yaitu pada umur 14 hari dan 28 hari, dengan berbagai persentase penambahan bubuk gamping dalam campuran beton disajikan pada tabel 5 dan gambar 4 berikut.

Tabel 5. Kuat lentur beton tanpa dan dengan bubuk gamping

Bubuk Gamping	Kuat lentur rata-rata (MPa)		Prosentase kekuatan (%)	
	14 Hari	28 Hari	14 Hari	28 Hari
0%	2,67	4,67	57,2%	100%
5%	2,51	2,73	53,7%	58,5%
10%	2,07	2,64	44,3%	56,5%
15%	1,93	2,47	41,3%	52,9%

Sumber: Penulis, 2024



Sumber: Penulis, 2024

Gambar 5. Kuat lentur beton rata-rata dengan bubuk gamping

Berdasarkan data yang ditunjukkan dalam Tabel 5 dan Gambar 6, terlihat bahwa penambahan bubuk gamping sebagai substitusi semen menyebabkan penurunan kuat lentur beton. Pada substitusi sebesar 5%, terjadi penurunan kuat lentur beton sebesar 41,5%. Penurunan ini meningkat pada substitusi yang lebih tinggi, yaitu 43,5% pada

substitusi 10% dan 47,1% pada substitusi 15%. Meskipun demikian, dari gambar 5 terlihat bahwa penambahan bubuk gamping memiliki efek positif dalam mempercepat peningkatan kuat lentur beton pada usia awal. Pada usia 14 hari, selisih antara kuat lentur beton tanpa bubuk gamping (0%) dari kekuatan maksimalnya pada usia 28 hari sebesar 2,0 Mpa, dengan penambahan bubuk gamping 5%, 10% dan 15%, mempunyai selisih sebesar 0,2 MPa, 0,6 Mpa dan 1,1 Mpa dari kekuatan maksimal pada usia 28 hari. Percepatan peningkatan kuat lentur pada usia awal menunjukkan bahwa bubuk gamping dapat bermanfaat untuk aplikasi yang memerlukan percepatan peningkatan kekuatan lentur awal beton.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat disimpulkan beberapa hal terkait pengaruh penambahan bubuk gamping pada kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton sebagai berikut.

1. Beton tanpa substitusi bubuk gamping memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 20,2 MPa, sesuai dengan target yang direncanakan.
2. Penambahan bubuk gamping dari batu gamping desa Lengko Lolok kabupaten Manggarai Timur dalam campuran beton cenderung menurunkan kuat tekan, tarik belah dan lentur rata-rata beton.

Penambahan bubuk gamping memiliki efek positif dalam mempercepat peningkatan kuat lentur beton pada usia awal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Gobhe, Y. L. Suku, and V. M. Radja, "Pengaruh Penambahan Tinja Sapi Sebagai Campuran Dalam Pembuatan Batu Bata," *Teknosiar*, vol. 17, no. 2, pp. 20–28, 2023, doi: <https://doi.org/10.37478/teknosiar.v17i2>.
- [2] M. Cunradiana, F. X. Ndale, and Y. L. Suku, "Pengaruh Penggunaan Tepung Bata Ringan Pada Campuran Beton Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton," *Teknosiar*, vol. 14, no. 1, pp. 20–27, 2020, doi: [10.37478/teknosiar.v14i1.1132](https://doi.org/10.37478/teknosiar.v14i1.1132).
- [3] G. B. Putro and Y. Nurchasanah, "Tinjauan Kuat Tekan Beton Dengan Serbuk Batu Gamping Sebagai Bahan Tambah Pada Campuran Beton," *Artikel Ilmiah Matiks*, vol. 6, no. 2, pp. 16–21, 2011.
- [4] J. Jabair, "Pemanfaatan Batu Gamping Enre kang Dalam Campuran Beton Kekuatan Tinggi," *Journal of Applied Civil and Environmental Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 8, 2022, doi: [10.31963/jacee.v2i1.3362](https://doi.org/10.31963/jacee.v2i1.3362).
- [5] F. P. Marzuky and E. Jogaswara, "Potensi Semen Alternatif Dengan Bahan dasar Padalarang dan Fly Ash Suralaya untuk Konstruksi Rumah Sederhana," *Sustainability Dalam Bidang Material, Rekayasa Dan Konstruksi Beton*, pp. 107–129, 2001.
- [6] Y. L. Suku, "Pemodelan dan Analisis Perilaku Balok Beton Bertulang yang Berbeda Diameter Akibat Variasi Tata Letak Tulangannya," *Media Komunikasi Teknik Sipil*, vol. 24, no. 1, p. 20, 2018, doi: [10.14710/mkts.v24i1.17303](https://doi.org/10.14710/mkts.v24i1.17303).
- [7] M. N. M. Kosakoy, S. E. Wallah, and R. Pandaleke, "Perbandingan Nilai Kuat Tarik Langsung Dan Tidak Langsung Pada Beton Yang Menggunakan Fly Ash," *Jurnal Sipil Statik*, vol. 5, no. 7, pp. 383–392, 2017.
- [8] Badan Standardisasi Nasional, "Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan, SNI 4431-2011," *SNI 4431-2011*, pp. 1–16, 2011.
- [9] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa*. 2012.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, "Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder, SNI 1974-2011," *SNI 1974-2011*, pp. 1–20, 2011.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, "Metode Pengujian Kuat Tarik Belah Beton SNI 03-2491-2002," *SNI 03-2491-2002*, pp. 1–9, 2002.
- [12] B. G. Dimalouw and P. Saellan, "Tinjauan Kembali Mengenai Pengaruh Modulus Kekhalusan Pasir terhadap Kuat Tekan Beton," *Teknik Sipil*, vol. 2, no. 3, pp. 15–26, 2016.
- [13] G. Hariyanto, H. Ashad, and A. Alifuddin, "Pengaruh Modulus Kekhalusan Terhadap Kuat Tekan Beton," *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, vol. 6, no. 3, pp. 193–202, 2021, doi: [10.33096/jtsm.v6i3.346](https://doi.org/10.33096/jtsm.v6i3.346).

EVALUASI EROSI TANAH BERVEGETASI DENGAN ALAT RAINFALL SIMULATOR (TES EKSPERIMENTAL DI LABORATORIUM)

Iftasya Shafa Azzahra¹, Yuda Romdania², *Ahmad Herison³, Subuh Tugiono⁴, Gung Bagus J Murda⁵

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Lampung

^{2,3,4}Dosen Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Lampung

⁵Mahasiswa Magister Teknik Sipil, Universitas Lampung, Lampung

^{*}) Email: ahmad.herison@eng.unila.ac.id

ABSTRACT

Rain is part of the most dangerous hydrological cycle because it can cause erosion. Research at the TP PKK Collective Garden, Bandar Lampung City, indicates a lack of nutrients due to erosion caused by rainwater runoff, coupled with quite steep land conditions. The purpose of the study was to analyze the influence of slope variations and rainfall intensity on erosion rates and control efforts. The method used in this study is a rainfall simulator. The results of the study were that the smallest erosion rate occurred at a rainfall intensity of 0.75 liters/minute and a slope of 8% occurred at 0.04 Tons/Ha while the largest erosion rate occurred at a rainfall intensity of 1.75 liters/minute and a slope of 45% occurred at 0.59 Tons/Ha, it can be seen that the intensity of rainfall and slope have a significant influence on the soil erosion rate, The rate of erosion is increasing along with these two factors. The conclusion is that high-intensity rainfall and steep slopes increase the rate of erosion that can damage soil structures, so it is necessary to carry out conservation techniques to reduce the rate of erosion and maintain soil fertility, such as maintenance

Keyword: Hydrological Cycle, Vegetation, Runoff, Rainfall, Slope Gradient

ABSTRAK

Hujan adalah bagian dari siklus hidrologi yang paling berbahaya karena dapat menyebabkan erosi. Penelitian di Kebun Kolektif TP PKK Kota Bandar Lampung mengindikasikan kekurangan unsur hara akibat erosi yang disebabkan oleh limpasan air hujan, ditambah dengan kondisi lahan yang cukup curam. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengaruh variasi kemiringan dan intensitas curah hujan terhadap laju erosi serta upaya pengendaliannya. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *rainfall simulator*. Hasil dari penelitian adalah laju erosi terkecil terjadi pada intensitas curah hujan 0,75 liter/menit dan kemiringan lereng 8% terjadi sebesar 0,04 Ton/Ha sedangkan laju erosi paling besar terjadi yaitu pada intensitas curah hujan 1,75 liter/menit dan kemiringan lereng 45% terjadi sebesar 0,59 Ton/Ha, terlihat bahwa intensitas curah hujan dan kemiringan lereng mempunyai pengaruh signifikan terhadap laju erosi tanah, laju erosi semakin meningkat seiring dengan kedua faktor tersebut. Kesimpulannya adalah curah hujan dengan intensitas tinggi dan kemiringan lereng yang curam meningkatkan laju erosi yang dapat merusak struktur tanah, sehingga perlu dilakukan teknik konservasi untuk mengurangi laju erosi dan menjaga kesuburan tanah, seperti pemeliharaan vegetasi penutup tanah dan penyuluhan teknik konservasi tanah bagi petani dan masyarakat.

Kata kunci: Siklus Hidrologi, Vegetasi, Limpasan, Curah Hujan, Kemiringan Lereng

1. PENDAHULUAN

Siklus hidrologi merupakan elemen penting dalam mengontrol pergerakan air, yang paling berbahaya dari siklus hidrologi adalah hujan [1] [2]. Terjadinya hujan dapat menimbulkan bencana alam, energi dari curah hujan dapat membuat pengikisan tanah yang di lalunya dan menimbulkan erosi [3] [4] [5]. Intensitas curah hujan yang tinggi perlu diwaspadai karena dapat mengakibatkan terjadinya fenomena alam yaitu erosi.

Hujan adalah peristiwa alam di mana tetesan air jatuh dari atmosfer ke permukaan bumi [6]. Setelah hujan turun, air hujan akan menyerap ke dalam lapisan tanah (infiltrasi), sementara sisanya mengalir di permukaan tanah (*runoff*) [7] [8] [4]. Ketika hujan masuk ke dalam tanah, tekanan air pori negatif akan meningkat, yang mengakibatkan peningkatan berat kandungan tanah atau meningkatkan kadar air tanah. Jika kemiringan topografinya curam atau berada di lereng bukit, erosi mungkin dapat terjadi [9] [10] [11]. Di wilayah tertentu yang kemiringan topografinya curam atau terletak di lereng bukit, potensi terjadinya erosi timbul karena intensitas curah hujan pada wilayah tersebut sangat tinggi [6] [12] [13]. Erosi menyebabkan penurunan kesuburan tanah di suatu tempat.

Erosi terjadi ketika tanah berpindah dari satu tempat ke tempat lain, menyebabkan tanah tidak dapat menyerap air hujan [14] [15]. Proses erosi oleh air hujan dimulai ketika energi air hujan jatuh pada permukaan tanah maka dapat memisahkan partikel-partikel tanah dari berat tanah yang lebih besar [16]. Hal ini dapat menurunkan produktivitas pertanian dan perkebunan karena partikel tanah di bidang pertanian dan perkebunan hanyut oleh energi kinetik air hujan [17] [18] [1]. Untuk memahami lebih dalam tentang dinamika erosi tanah dan menemukan solusi yang efektif, diperlukan penelitian yang akurat.

Salah satu cara untuk mengetahui besarnya jumlah tanah yang tererosi perlu dilakukan penelitian di lapangan menggunakan curah hujan alami, namun hal ini akan menjadi kesulitan karena jumlah curah hujan di suatu wilayah tidak menentu dan waktunya tidak pasti. Selain itu, penelitian yang dilaksanakan di lapangan memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit [19]. Sehingga, perlu dilakukan penelitian menggunakan simulasi hujan buatan menggunakan alat *rainfall simulator*. Alat ini dapat menghasilkan curah hujan dengan karakteristik serupa yang dapat meminimalisir waktu serta biaya yang dibutuhkan untuk penelitian [20] [21] [22].

Kebun Kolektif TP PKK Kota Bandar Lampung dipilih karena memiliki kemiringan yang curam yang memungkinkan terjadinya erosi besar. Selain itu, lokasi tersebut merupakan tempat pembibitan dengan masalah kekurangan unsur hara yang diduga akibat erosi tanah.

Mungkin ada beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan alat *rainfall simulator* untuk mengukur laju erosi namun belum ada penelitian yang menggunakan variasi intensitas curah hujan dan kemiringan lereng, sehingga ini menjadi temuan baru (*novelty*). Tujuannya adalah menganalisis pengaruh variasi kemiringan dan intensitas curah hujan terhadap laju erosi serta upaya pengendaliannya.

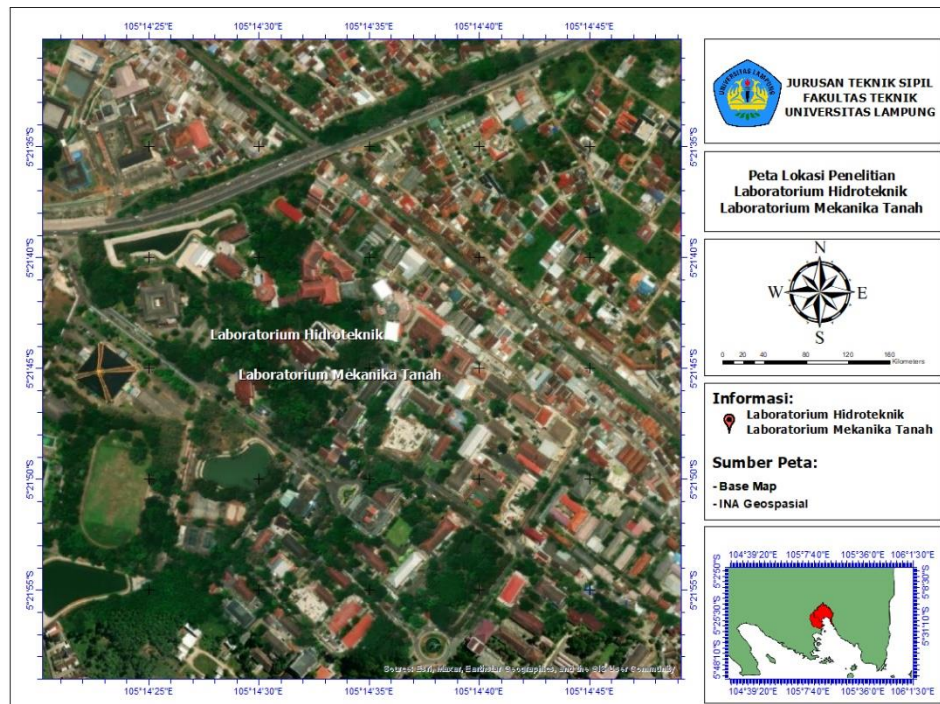
2. METODE PENELITIAN

Lokasi

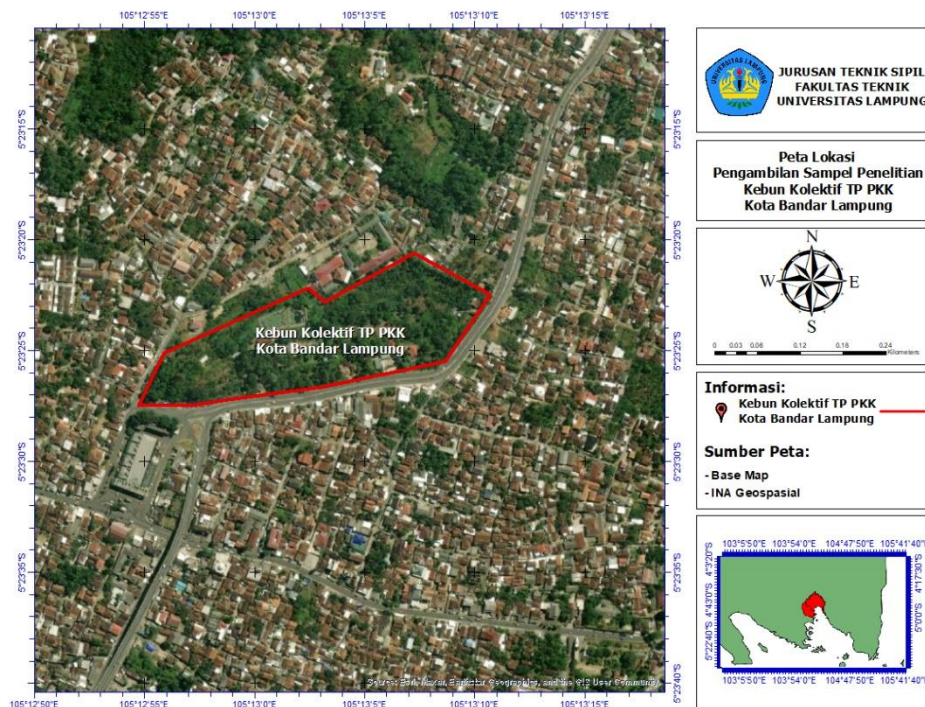
Lokasi penelitian dilakukan di Laboratorium Hidroteknik dan Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Laboratorium tersebut digunakan untuk pengujian simulasi hujan buatan pada alat *rainfall simulator* untuk mengetahui besarnya berat material tanah permukaan yang tergerus dengan kemiringan lereng yang berbeda-beda dan mendapatkan debit limpasan akibat pengaruh intensitas curah hujan. Sedangkan sampel tanah diambil di Kebun Kolektif TP PKK Jl. Intan Kesuma, Kemiling Permai, Kec. Kemiling, Kota Bandar Lampung. Lihat Gambar 1 & Gambar 2.

Pengambilan Data

Metode *rainfall simulator* digunakan dalam penelitian ini. Data didapatkan dari sampel tanah vegetasi dari Kebun Kolektif TP PKK Kota Bandar Lampung. Sampel tanah bervegetasi tersebut berukuran 50 cm x 60 cm x 10 cm yang dapat dilihat pada Gambar 3, dengan keadaan tidak terganggu. Setelah itu, sampel tanah bervegetasi diproses menggunakan alat *rainfall simulator* di laboratorium hidroteknik dengan mengatur intensitas curah hujan 0,75 liter/menit, 1 liter/menit, 1,25 liter/menit, 1,5 liter/menit, dan 1,75 liter/menit serta kemiringan lereng diatur sebesar 8%, 15%, 30%, 35%, dan 45%, untuk mengukur laju erosi yang terjadi pada sampel tanah bervegetasi tersebut.



Gambar 1. Lokasi Penelitian



Gambar 2. Lokasi Pengambilan Sampel Tanah



Gambar 3. Cetakan Pengambil Sampel Tanah

Pengolahan Data

Data primer yang diperoleh melalui observasi langsung di lapangan. Pengolahan data dilakukan dengan menghitung volume limpasan yang tertampung selama 10 menit pengamatan. Setelah data volume limpasan dikumpulkan, langkah selanjutnya adalah melakukan pengujian di laboratorium mekanika tanah untuk mendapatkan nilai berat tanah yang tererosi.

Persamaan Perhitungan

Laju aliran permukaan pada erosi dipengaruhi oleh panjang, kecuraman dan bentuk lereng. Sehingga perlu menentukan derajat dan persentase kemiringan terlebih dahulu sebelum menjalankan alat *rainfall simulator* untuk memastikan bahwa penelitian yang dilakukan mencerminkan kondisi di lapangan, sehingga data diperoleh dapat menganalisis pengaruh kondisi lereng terhadap laju erosi. Persamaan yang digunakan untuk menghitung ketinggian alat untuk kemiringan menggunakan persamaan 1 dapat dilihat sebagai berikut [23]:

$$S (\%) = \frac{\Delta H}{A} \times 100\% \quad (1)$$

dengan S = Kemiringan lereng, ΔH = Beda tinggi dan A = Jarak panjang

Setelah didapatkan nilai berat tanah dan volume limpasan, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan konsentrasi sedimen. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan persamaan 3. Setelah konsentrasi sedimen dihitung, dilakukan perhitungan laju erosi. Perhitungan laju erosi ini menggunakan persamaan 4 [24]:

$$C = \frac{b-a}{v} \tag{2}$$

dengan C = Konsentrasi sedimen (gr/L), a = Berat pan (gr), b = Berat pan+ Tanah kering (gr) dan V = Volume aliran (l)

$$E = \frac{c \times v}{1.000.000} \times A \tag{3}$$

dengan E = Laju erosi (Ton/Ha), C = Konsentrasi sedimen (gr/L), V = Volume limpasan (l) dan A = Luas sampel uji (Ha)

Analisis Data

Analisis data dilakukan setelah pengolahan data selesai. Analisis datanya meliputi perbandingan antar variabel laju erosi sebagai berikut:

- a) Pengaruh intensitas curah hujan terhadap laju erosi.
- b) Pengaruh kemiringan lereng terhadap laju erosi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengukuran Data Volume Limpasan dan Berat Tanah

Sebelum dilakukan pengolahan data perlu di lakukan perhitungan ketinggian untuk kemiringan alat yang menggunakan persamaan 1. Hasil perhitungan ketinggian alat ditunjukkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Ketinggian Alat

Kemiringan %	ΔH (Cm)	A (cm)
8	5,7	
15	10,7	
30	21,4	71,2
35	24,9	
45	32,0	

Sampel air dan tanah yang tererosi dari permukaan tanah dikumpulkan dan diukur volumenya. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan gelas ukur untuk mendapatkan data yang akurat mengenai jumlah material yang tererosi. Hasil volume limpasan ditunjukkan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Volume Limpasan

Intensitas Curah Hujan (L/menit)	Volume Limpasan (L)				
	8%	15%	30%	35%	45%
0,75	1,07	1,13	1,22	1,31	1,37
1	1,18	1,25	1,34	1,43	1,49
1,25	1,30	1,37	1,46	1,55	1,61
1,5	1,41	1,49	1,58	1,67	1,73
1,75	1,53	1,61	1,70	1,79	1,85

Setelah pengukuran dilakukan, sampel-sampel tersebut disimpan dalam botol yang diberi label sesuai dengan intensitas curah hujan dan kemiringan lereng. Pengujian lebih lanjut dilakukan di laboratorium mekanika tanah Universitas Lampung. Dalam pengujian ini, volume limpasan sebesar 100ml diambil dari setiap sampel untuk menentukan nilai berat tanah yang tererosi. Berat Tanah ditunjukkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengukuran Erosi Tanah Bervegetasi

Intensitas Curah Hujan (L/menit)	Volume Aliran (L)	Berat Tanah (gr)				
		8%	15%	30%	35%	45%
0,75		11,01	11,08	11,12	11,22	11,30
1		11,13	11,25	11,35	11,43	11,53
1,25	0,1	11,28	11,38	11,45	11,52	11,64
1,5		11,39	11,47	11,56	11,65	11,70
1,75		11,49	11,59	11,67	11,77	11,85

Hasil Pengolahan Data Konsentrasi Sedimen dan Laju Erosi

Setelah data-data penelitian terkumpul, langkah berikutnya adalah melakukan perhitungan untuk menentukan besarnya konsentrasi sedimen. Dalam perhitungan ini, volume aliran yang digunakan untuk setiap sampel hujan adalah sebesar 100ml atau 0,1liter, dan berat pan yang digunakan adalah sebesar 10,89gr. Perhitungan ini dilakukan dengan menggunakan persamaan 2. Hasil pengolahan data konsentrasi sedimen ditunjukkan dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengolahan Data Konsentrasi Sedimen

Intensitas Curah Hujan (L/Menit)	Berat Pan (gr)	$C = \frac{w-a}{b-a}$ (gr/L)				
		8%	15%	30%	35%	45%
0,75	10,89	1,2	1,9	2,3	3,3	4,1
1		2,4	3,6	4,6	5,4	6,4
1,25		3,9	4,9	5,6	6,3	7,5
1,5		5,0	5,8	6,7	7,6	8,1
1,75		6,0	7,0	7,8	8,8	9,6

Dari hasil perhitungan konsentrasi sedimen, data tersebut digunakan untuk menghitung laju erosi dengan menggunakan volume limpasan pada Tabel 1 dari masing-masing sampel dan luas tanah yang digunakan sebesar 0,00003Ha. Perhitungan ini dilakukan menggunakan persamaan 3. Setelah itu didapatkan nilai laju erosi yang akurat berdasarkan konsentrasi sedimen dan volume limpasan yang terukur. Hasil pengolahan data laju erosi dapat dilihat pada Tabel 5.

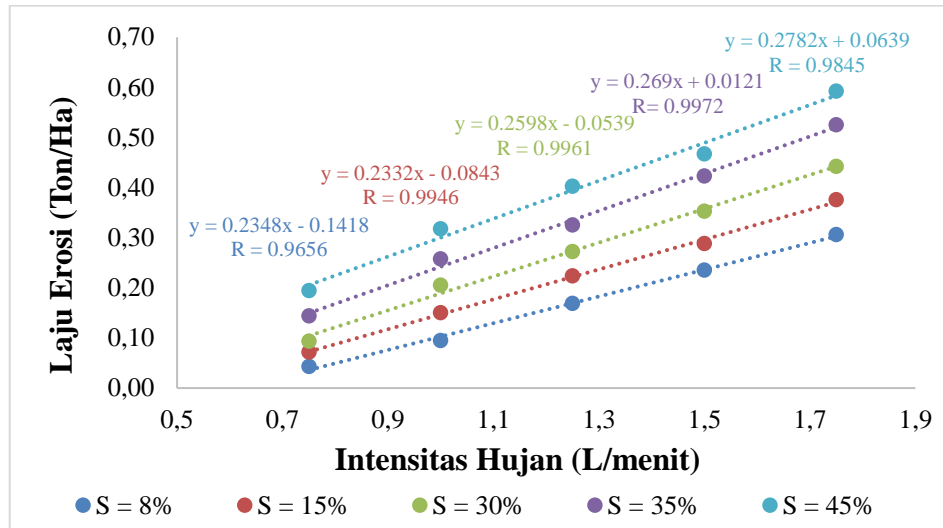
Tabel 5. Hasil Pengolahan Data Laju Erosi

Intensitas Curah Hujan (L/Menit)	A (Ha)	$E = \frac{C \times V}{1.000.000} : A$ (Ton/Ha)				
		8%	15%	30%	35%	45%
0,75	0,00003	0,04	0,07	0,09	0,14	0,19
1		0,09	0,15	0,21	0,26	0,32
1,25		0,17	0,22	0,27	0,33	0,40
1,5		0,24	0,29	0,35	0,42	0,47
1,75		0,31	0,38	0,44	0,53	0,59

Analisis Hubungan Antara Laju Erosi dan Intensitas Curah Hujan

Pada gambar 4 terlihat bahwa terjadi peningkatan laju erosi (y) pada ke lima data seiring bertambahnya intensitas curah hujan (x) yang menunjukkan kesejajaran garis meskipun pada intensitas curah hujan 1,5 liter/menit terjadi penyebaran yang kemungkinan erosi terjadi lebih besar. Persamaan regresi linear yang didapatkan adalah $y = 0,2348x - 0,1418$ pada intensitas curah hujan 0,75 liter/menit dengan koefisien determinasi $R = 0,9656$, untuk nilai laju erosi terkecil di intensitas ini terjadi pada kemiringan 8% sebesar 0,04Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada kemiringan 45% sebesar 0,19Ton/Ha, pada kondisi ini tanah memiliki cukup waktu untuk menyerap air, dan erosi yang terjadi biasanya disebabkan oleh aliran permukaan yang lemah atau di area dengan penutup tanah yang kurang mengikat ketahanan tanah. Intensitas curah hujan 1 liter/menit didapatkan persamaan regresi linear $y = 0,2332x - 0,0843$ dengan koefisien determinasi $R = 0,9946$, untuk nilai laju erosi terkecil di intensitas ini terjadi pada 0,09Ton/Ha dan laju erosi terbesar 0,32Ton/Ha, untuk nilai laju erosi terkecil pada intensitas ini di kemiringan 8% sebesar 0,09Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada kemiringan 45% sebesar 0,32Ton/Ha. Intensitas curah hujan 1,25 liter/menit didapatkan persamaan regresi linear $y = 0,2598x - 0,0539$ dengan koefisien determinasi $R = 0,9961$, untuk nilai laju erosi terkecil di intensitas ini terjadi pada kemiringan 8% sebesar 0,17Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada kemiringan 45% sebesar 0,40Ton/Ha, peningkatan curah hujan mengakibatkan peningkatan aliran permukaan, intensitas ini cukup untuk mulai mengangkut partikel tanah yang lebih besar dari sebelumnya. Intensitas curah hujan 1,5 liter/menit didapatkan regresi linear $y = 0,269x - 0,0121$ dengan koefisien determinasi $R = 0,9972$, untuk nilai laju erosi terkecil di intensitas ini terjadi pada kemiringan 8% sebesar 0,24Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada kemiringan 45% sebesar 0,47Ton/Ha, hujan dengan intensitas ini menyebabkan aliran permukaan yang kuat, sehingga dapat meningkatkan kemampuan aliran air untuk mengikis dan mengangkut partikel tanah. Intensitas curah hujan 1,75 liter/menit didapatkan regresi linear $y = 0,2782x - 0,0639$ liter/menit dengan koefisien determinasi $R = 0,9845$, untuk nilai laju erosi terkecil di intensitas ini terjadi pada kemiringan 8% sebesar 0,31Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada kemiringan 45% sebesar 0,59Ton/Ha, aliran permukaan yang sangat kuat dan cepat membawa lebih banyak sedimen, mengakibatkan peningkatan erosi

yang besar, pada kondisi ini erosi parit kemungkinan dapat terjadi, terutama di lereng yang curam dan area yang tidak dilindungi vegetasi.



Gambar 4. Hubungan Antara Laju Erosi dengan Intensitas Curah Hujan

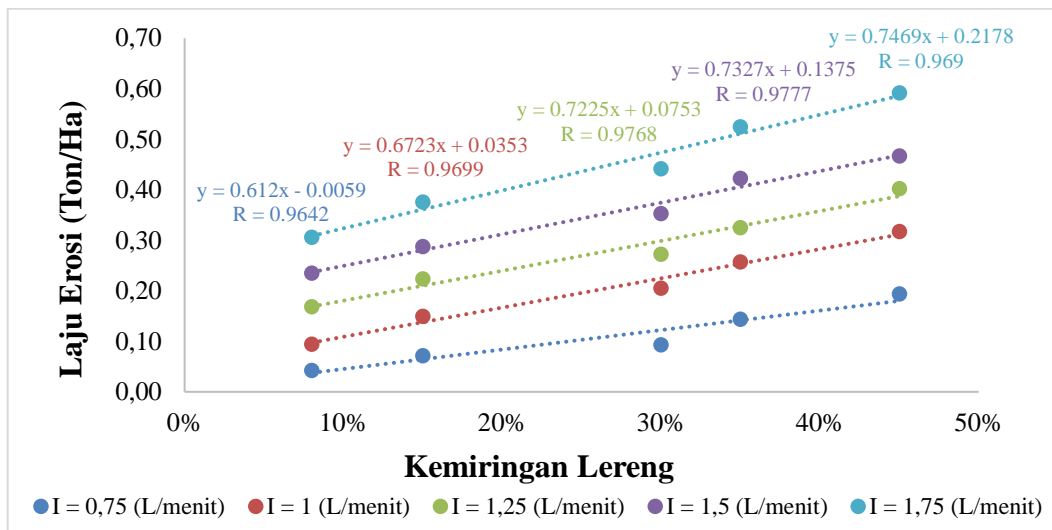
Dalam membuat garis *trendline* tersebut, nilai dari koefisien determinasi (R) yang mendekati angka 1 menunjukkan bahwa garis *trendline* yang dibentuk sangat akurat dalam mewakili data yang tersedia.

Hasil analisis menunjukkan bahwa tingkat curah hujan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kecepatan erosi tanah, dimana laju erosi meningkat seiring dengan intensitas curah hujan. Hal ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor yaitu:

- a) Aliran Permukaan (*Runoff*)
Intensitas curah hujan yang lebih tinggi menghasilkan aliran permukaan yang lebih cepat dan kuat. Aliran ini memiliki kapasitas yang lebih besar untuk mengikis dan mengangkut partikel tanah, sehingga meningkatkan laju erosi.
- b) Penetrasi Air
Pada intensitas curah hujan yang lebih rendah, sebagian besar air hujan dapat terinfiltrasi ke dalam tanah, sehingga meminimalisir aliran permukaan dan laju erosi. Namun pada intensitas yang lebih tinggi, laju infiltrasi tanah tidak dapat mengimbangi laju curah hujan, menyebabkan banyak aliran permukaan.
- c) Jenis Tanah
Tanah yang berbeda memiliki sifat yang berbeda dalam hal kemampuan menyerap air dan ketahanan terhadap erosi. Tanah lempung, misalnya, cenderung lebih tahan terhadap erosi dibandingkan dengan tanah pasir yang lebih mudah tererosi.
- d) Struktur Tanah dan Vegetasi
Penutup vegetasi yang baik dan struktur tanah yang stabil dapat mengurangi laju erosi dengan menahan partikel tanah dan memperlambat aliran permukaan.

Strategi pengelolaan lahan yang mempertimbangkan tingkat curah hujan menjadi sangat penting untuk dilakukan. Langkah-langkah seperti memperbanyak tanaman penutup lahan, pembuatan sengkedan, dan pemeliharaan vegetasi alami dapat dilakukan untuk mengendalikan laju erosi, terutama daerah yang rentan terhadap hujan dengan intensitas tinggi.

Analisis Hubungan Antara Laju Erosi dan Kemiringan Lereng



Gambar 5. Hubungan Antara Laju Erosi dengan Kemiringan Lereng

Pada gambar 5 terlihat bahwa terjadi peningkatan laju erosi pada kelima data seiring bertambahnya kemiringan lereng yang menunjukkan kesejajaran garis meskipun pada kemiringan 30% terjadi penyebaran yang kemungkinan erosi terjadi lebih besar. Persamaan regresi linear yang didapatkan adalah $y = 0,612x - 0,0059$ pada kemiringan lereng 8% dengan koefisien determinasi $R = 0,9642$, untuk nilai laju erosi terkecil di kemiringan ini terjadi pada intensitas curah hujan 0,75 liter/menit sebesar 0,04 Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada intensitas curah hujan 1,75 liter/menit sebesar 0,31 Ton/Ha, aliran air permukaan pada kemiringan ini cenderung lambat, air hujan memiliki waktu yang lebih banyak untuk meresap ke dalam tanah, mengurangi kekuatan untuk mengangkut partikel tanah. Kemiringan lereng 15% didapatkan persamaan regresi linear $y = 0,6723x + 0,0353$ dengan koefisien determinasi $R = 0,9699$, untuk nilai laju erosi terkecil di kemiringan ini terjadi pada intensitas curah hujan 0,75 liter/menit sebesar 0,07 Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada intensitas curah hujan 1,75 liter/menit sebesar 0,38 Ton/Ha. Kemiringan lereng 30% didapatkan persamaan regresi linear $y = 0,7315x - 0,0721$ dengan koefisien determinasi $R = 0,9781$, untuk nilai laju erosi terkecil di kemiringan ini terjadi pada intensitas curah hujan 0,75 liter/menit sebesar 0,09 Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada intensitas curah hujan 1,75 liter/menit sebesar 0,44 Ton/Ha, dengan peningkatan kemiringan kecepatan aliran air meningkat, sehingga laju erosinya juga bertambah, perlu dilakukan upaya pembuatan sengkedan yang lebih rapat dan vegetasi penutup diperlukan untuk mengurangi dan erosi. Kemiringan lereng 35% didapatkan regresi linear $y = 0,7327x - 0,1375$ dengan koefisien determinasi $R = 0,9777$, untuk nilai laju erosi terkecil di kemiringan ini terjadi pada intensitas curah hujan 0,75 liter/menit sebesar 0,14 Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada intensitas curah hujan 1,75 liter/menit sebesar 0,53 Ton/Ha, lereng yang curam menghasilkan aliran air permukaan yang cepat dan berenergi, yang dapat mengangkut partikel tanah dengan lebih efisien, upaya konservasi yang lebih tepat seperti penanaman tanaman berakar dalam dan penggunaan struktur penahan tanah sangat penting untuk mengurangi laju erosi. Kemiringan lereng 45% didapatkan regresi linear $y = 0,7469x - 0,2178$ liter/menit dengan koefisien determinasi $R = 0,969$, untuk nilai laju erosi terkecil di kemiringan ini terjadi pada intensitas curah hujan 0,75 liter/menit sebesar 0,19 Ton/Ha dan laju erosi terbesar terjadi pada intensitas curah hujan 1,75 liter/menit sebesar 0,59 Ton/Ha, kemiringan curam ini menyebabkan aliran air permukaan yang sangat kuat sehingga mengakibatkan erosi tanah yang signifikan, teknik konservasi yang tepat seperti penggunaan geotekstil, penahan tanah, dan vegetasi dengan akar dalam diperlukan untuk mengurangi laju erosi secara efektif.

Garis *trendline* pada grafik hubungan antara laju erosi dengan kemiringan lereng menunjukkan nilai koefisien determinasi (R) yang mendekati angka 1, artinya bahwa garis *trendline* yang dibentuk sangat akurat dalam mewakili data yang tersedia.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kemiringan lereng berpengaruh besar terhadap laju erosi tanah, di mana lebih tinggi kemiringan lereng, air hujan akan lebih mudah mengalir dengan kecepatan tinggi di permukaan tanah. Hal ini menyebabkan erosi menjadi lebih cepat dan intensif, terlihat dari beberapa faktor yaitu:

a) Kecepatan Aliran Permukaan

Semakin curam lereng, semakin cepat air hujan mengalir di permukaan tanah. Kecepatan aliran ini meningkatkan kekuatan erosi air, yang mengikis dan mengangkut partikel tanah dengan lebih efektif. Pada lereng yang sangat curam, bahkan hujan dengan intensitas rendah dapat menyebabkan erosi yang signifikan.

b) Infiltrasi Tanah

Pada lereng yang lebih datar, air hujan memiliki banyak waktu untuk meresap ke dalam tanah, mengurangi aliran permukaan dan risiko erosi. Sebaliknya, pada lereng yang curam, air hujan lebih cenderung mengalir di permukaan daripada meresap, sehingga dapat meningkatkan laju erosi.

c) Penutup Vegetasi

Vegetasi berperan penting dalam menahan tanah dan mengurangi erosi. Pada lereng yang curam, vegetasi dapat membantu memperlambat aliran permukaan dan menahan partikel tanah. Namun, jika vegetasi hilang atau rusak, lereng curam menjadi sangat rentan terhadap erosi.

Rekomendasi Praktik Konservasi Tanah Berdasarkan Hasil Penelitian

Dari hasil penelitian tentang hubungan antara kemiringan lereng dan tingkat curah hujan dengan laju erosi tanah, berikut adalah beberapa rekomendasi praktik konservasi tanah yang dapat diterapkan untuk mengurangi risiko erosi di lokasi Kebun Kolektif TP PKK:

a) Penanaman Vegetasi Penutup Tanah

Pada lokasi penelitian kondisi tanah hanya terdapat beberapa jenis tanaman tetapi variatifnya vegetasi tersebut tidak membuat akar tanaman itu saling memperkuat ketahanan tanah. Oleh karena itu, penting sekali variasi dari tanaman seperti vegetasi akar dalam, rumput dan semak untuk memikat struktur tanah agar tidak tererosi.

b) Sengkedan

Pembuatan sengkedan pada lereng dengan kemiringan sedang hingga curam. Sengkedan dapat memperlambat aliran permukaan, mengurangi kekuatan erosi air, dan memungkinkan air meresap lebih dalam ke tanah.

c) Pengelolaan Air Hujan

Memperbanyak saluran drainase, parit dan kolam penampungan air untuk mengarahkan aliran air dan mengurangi erosi. Dengan memperluas infrastruktur ini, aliran air hujan dapat dialirkan secara terkendali.

d) Penggunaan Struktur Penahan Erosi

Pembuatan struktur seperti tanggul, dam kecil dan parit-parit, sehingga dapat mengurangi kecepatan aliran air dan menahan sedimen.

e) Edukasi dan Pelatihan Petani

Program pendidikan dan pelatihan untuk petani di lokasi tersebut mengenai teknik konservasi tanah, pengelolaan air dan praktik pertanian berkelanjutan, sehingga lebih mampu mengadopsi praktik konservasi tanah yang efektif.

4. KESIMPULAN

Kesimpulannya adalah curah hujan dengan intensitas tinggi dan kemiringan lereng yang curam meningkatkan laju erosi yang dapat merusak struktur tanah, sehingga perlu dilakukan teknik konservasi untuk mengurangi laju erosi dan menjaga kesuburan tanah, seperti pemeliharaan vegetasi penutup tanah dan penyuluhan teknik konservasi tanah bagi petani dan masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ramadhani, D., Mulyanto, D., dan Sudarto, L. Analisis Tingkat Bahaya Erosi dengan Metode USLE untuk Arahan Konservasi Tanah di Daerah Lereng Banyuwangi Jawa Timur. *Jurnal Tanah dan Air*. 2019. 16(1). <https://doi.org/10.31315/jta.v16i1.4005>.
- [2] Sabriyati, D., & Hadi, M. P. (2022). Kajian Hidrologi Debit Puncak Penyebab Banjir Bandang Menggunakan Pemodelan Hidrograf Satuan Sintesis-SCS (HSS-SCS). *Jurnal Akuatiklestari*, 5(2), 80–90. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v5i2.4527>
- [3] Dali, Abd. S. A., Pendang, A., & Musa, R. (2023). Uji Tingkat Erosi Tanah dengan Variasi Intensitas Curah Hujan Menggunakan Alat Rainfall Simulator. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 55–66. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v3i1.14>
- [4] Respatiningrum, A. W., Limantara, L. M., & Andawayanti, U. (2021). Analisis Debit Limpasan dan Indeks Erosivitas Hujan pada Metode USLE Akibat Variasi Intensitas Hujan dengan Alat Rainfall Simulator. In *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sumber Daya Air* (Vol. 1, Issue 2). <https://jtresda.ub.ac.id/>
- [5] Tumangkeng, Warouw Verry R.Ch, & Mawara Jody M. (2021). Analisis Pengaruh Curah Hujan Terhadap Erosi Pada Tanah Tanpa Mulsa Dan Diberi Mulsa Analisis Of The Effect Of Rainfall On Erosion On Soil Without Mulch And Mulched. *Jurnal Cocos*. <https://doi.org/10.35791/cocos.v3i3.33172>
- [6] Fitrianingrum, R. (2023). Analisis Curah Hujan Di Wilayah Sungai Rokan. https://www.researchgate.net/publication/374902855_Analisis_Curah_Hujan_Di_Wilayah_Sungai_Rokan

- [7] Hidayat, A. K., Irawan, P., Ikhsan, J., Atmadja, S., & Sari, N. K. (2021). Analisis dan Pemetaan Limpasan Permukaan di DAS Citanduy Hulu dengan Metode SCSN. *Rona Teknik Pertanian*, 14(1), 73–86. <https://doi.org/10.17969/rtp.v14i1.17699>
- [8] Pramasela, Limantara, L. M., & Wahyuni Sri. (2022). Analisis Volume Limpasan Permukaan dan Erosi Tanah dengan Model Soil Conservation Service (SCS) dan Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) Menggunakan Alat *Rainfall simulator*. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sumber Daya Air*, 2. 10.21776/ub.jtresda.2022.002.01.33
- [9] Mulyandari, E., Susila, H. (2020). Validasi Data Curah Hujan Satelit Trmm dan Persiann dalam Analisis Debit Banjir Rencana di Das Telaga Lebur. *Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, 25(22), 2598–2257. <https://doi.org/10.36728/jtsa.v25i2.794>
- [10] Mrubata, K., Nciizah, A.D., Wakindiki, I.I.C. Mudau, F.N. (2024) ‘Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil sealing and crusting, erosion, and phosphorus solubilizing bacteria’, *Scientific African*, 23(August 2023), e02064. Availableat:<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2024.e02064>.
- [11] Aisah, E., & Gofar, N. (2022). Studi Pengaruh Curah Hujan Terhadap Stabilitas Lereng Menggunakan Program Perisi. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 18(2), 133. <https://doi.org/10.25077/jrs.18.2.133-147.2022>
- [12] Fitriansyah, F., Widuri, E.S. and Ulmi, E.I. (2020) ‘Analisa Kebutuhan Air Irigasi Untuk Tanaman Padi Dan Palawija Pada Daerah Irigasi Rawa (DIR) Danda Besar Kabupaten Barito Kuala’, *Media Ilmiah Teknik Sipil*, Volume 8 Nomor 2 Juni 2020 Hal. 79-87 Availableat:<https://doi.org/https://doi.org/10.33084/mits.v8i2.1405>.
- [13] Lestari, L. M., Ichsan Andi Chairil, & Aji Irwan Mahkam Lesmono. (2022). Analisis Tingkat Bahaya Erosi Pada Lahan Garapan Kelompok Tani Hutan Makmur Desa Mekar Sari. *Jurnal Tengawang*, 12 (2). <http://dx.doi.org/10.26418/jt.v12i2.52283>
- [14] Santi, S., & Seran, L. M. F. (2022). Analisis Erosi Pada Das Noelmina Menggunakan Metode Usle. *Jurnal Teknik Sipil*, 2(1). 10.30822/eternitas.v2i1.1716
- [15] Siswanto, S., Wijaya, K. and Afifuddin, M.A. (2023) ‘Pendugaan Erosi Dan Analisis TingkatBahaya Erosi Dengan Metode Universal Soil Loss Equation (Usle) Di Berbagai Penggunaan Lahan Di Wilayah Kecamatan Pujon’, *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*, 25(2), 82–90. Available at: <https://doi.org/10.31186/jipi.25.2.82-90>.
- [16] Herawati, E. (2020). *Permodelan Erosi di Daerah Aliran Sungai Dengan Menggunakan Penginderaan Jarak Jauh*. https://www.researchgate.net/publication/340654695_Permodelan_Erosi_di_Daerah_Aliran_Sungai_Mnggunakan_Penginderaan_Jarak_Jauh
- [17] Andriyani, I., Wahyuningsih, S., & Karim, M. D. (2019). Prediksi Laju Sedimentasi dan Erosi di Sub DAS Kemuning Menggunakan *Rainfall Simulator*. *AgriTECH*, 39(3), 179. <https://doi.org/10.22146/agritech.41507>
- [18] Krisnayanti, K., Made Atmaja, D., & Damar Windu Kurniawan Prodi survei dan Pemetaan Jurusan Geografi, W. (2022). Pemetaan Tekstur Tanah Di Kabupaten Bangli. In *Jurnal ENMAP (Environment & Mapping) ENMAP* (Vol. 3, Issue 2). <https://doi.org/10.23887/em.v3i2.52804>
- [19] Amin, M., & Ardila, M. (2022). Jurnal Agricultural Biosystem Engineering Uji Kinerja Portable Rainfall Simulator pada Berbagai Tekanan Pompa Performance Test of Portable Rainfall Simulator on Various Pump Pressures. *Jurnal Agricultural Biosystem Engineering*, 1. <https://jurnal.fp.unila.ac.id/index.php/ABE/index>
- [20] Bosio, R., Cagninei, A., & Poggi, D. (2023). Large Laboratory Simulator of Natural Rainfall: From Drizzle to Storms. *Water (Switzerland)*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/w15122205>
- [21] de Carvalho, D. F., Alves, A. S., Macedo, P. M. S., de Oliveira, P. T. S., & Schultz, N. (2023). Soil and Water Losses with Simulated Rainfall Considering Experimental Plots and Rainfall Patterns. *Soil Systems*, 7(4), 87. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040087>
- [22] Koch, T., Chiffard, P., Aartsma, P., & Panten, K. (2024). A review of the characteristics of rainfall simulators in soil erosion research studies. In *MethodsX* (Vol. 12). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102506>
- [23] Reher, T., Lavaert, C., Willockx, B., Huyghe, Y., Bisschop, J., Martens, J.A., Diels, J., *et al.* (2024) ‘Potential of sugar beet (*Beta vulgaris*) and wheat (*Triticum aestivum*) production in vertical bifacial, tracked, or elevated agrivoltaic systems in Belgium’, *Applied Energy*, 359(December 2023), 122679. Availableat:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122679>
- [24] Maha, R.R., Wicaksono, A.P., Nugroho, N.E., Lukito, H., Suharwanto, (2023) ‘Pengaruh Kemiringan Lereng terhadap Nilai Laju Erosi di PT Darma Henwa Bengalon Coal Project’, *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumian SATU BUMI*, 4(1), 117–124. Available at: <https://doi.org/10.31315/psb.v4i1.8832>.

EVALUASI BANGUNAN PENGAMAN LERENG SUNGAI CILIWUNG RUAS KALIBATA DENGAN MENGGUNAKAN ANALISIS BERDASARKAN LOAD RESISTANCE FACTOR DESIGN

*Furqaan Harjanto¹, Agus Darmawan Adi², Hary Christady Hardiyatmo³

^{1,2,3}Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

*) Email: furqaanharjanto@mail.ugm.ac.id

ABSTRACT

Retaining walls are structures commonly used to retain soil with steeper slopes than the soil itself can withstand. The method was applied to the slope of the Kalibata Section of the Ciliwung River using a non-gravity retaining wall. However, the construction experienced landslides during floods, so this research aims to determine the type of retaining wall construction that can be used, as well as the stability of each type of retaining wall construction. The analysis was conducted on the cut with code P.07 using soil data in the form of drill results with code BH-24, and laboratory data from the test results of the drill at three different sample depths. The analysis used the Load Resistance Factor Design method with the help of GEO5 software. The results of the analysis in all load combinations show that the semi-gravity cantilever type of retaining wall cannot be used because it does not meet the sliding stability, eccentricity and bearing capacity in all load combinations. The cantilevered non-gravity type does not meet the Service 1 combination due to the large horizontal displacement value, so anchor reinforcement is used. In the Strength 1 combination with anchors, the penetration depth was 18.4 meters with anchors installed at a depth of 2.5 meters from the surface, and a horizontal displacement of 2.7 centimeters.

Keyword: Stability, Earth retaining structure, Load Resistance Factor Design (LRFD), GEO5

ABSTRAK

Dinding penahan tanah merupakan struktur yang biasa digunakan untuk menahan tanah dengan kemiringan lereng yang lebih curam melebihi yang dapat ditahan oleh tanah itu sendiri. Metode tersebut diterapkan pada lereng Sungai Ciliwung Ruas Kalibata yang menggunakan dinding penahan tanah tipe non gravitasi. Namun konstruksi tersebut mengalami longsor saat terjadi banjir, sehingga penelitian ini memiliki tujuan untuk mengetahui jenis konstruksi penahan tanah yang dapat digunakan, serta stabilitas masing – masing jenis konstruksi penahan tanah. Analisis dilakukan pada potongan dengan kode P.07 menggunakan data tanah berupa hasil bor dengan kode BH-24, dan data laboratorium hasil pengujian dari bor tersebut pada tiga kedalaman sampel yang berbeda. Analisis menggunakan metode Load Resistance Factor Design dengan bantuan software GEO5. Hasil analisis pada semua kombinasi beban menunjukkan jenis dinding penahan tanah tipe semi gravitasi kantilever tidak dapat digunakan karena tidak memenuhi stabilitas geser, eksentrisitas dan daya dukung pada semua kombinasi beban. Untuk jenis non gravitasi kantilever tidak memenuhi terhadap kombinasi Layan 1 dikarenakan nilai perpindahan horizontal yang besar, sehingga digunakan perkuatan ankur. Pada kombinasi Kuat 1 dengan ankur, memberikan hasil kedalaman penetrasi sebesar 18.4 meter dengan ankur dipasang pada kedalaman 2.5 meter dari permukaan, dan perpindahan horizontal sebesar 2.7 centimeter.

Kata kunci: Stabilitas, Dinding penahan tanah, Load Resistance Factor Design (LRFD), GEO5

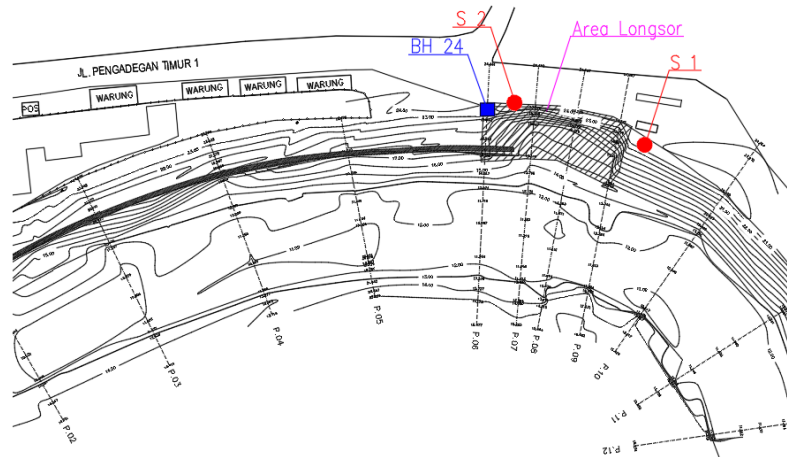
1. PENDAHULUAN

Desain dari dinding penahan tanah secara tradisional menggunakan pendekatan *allowable stress design* (ASD) dengan prinsip dari ASD adalah membatasi tegangan yang bekerja agar tidak lebih dari tegangan izin yang telah dibagi dengan faktor keamanan. Faktor keamanan pada metode ASD tidak mempertimbangkan kepastian prediksi beban yang bekerja karena nilai faktor keamanan ASD didasarkan pada pengalaman dan penilaian dari individu. *National Cooperative Highway Research Program* (1986) melakukan penelitian dan menyimpulkan bahwa pendekatan ASD memberikan hasil yang tidak konsisten, dan tidak mengikuti filosofi desain dan pengetahuan yang terbaru, sehingga *American Association of State Highway and Transportation Official* (1994) mengadopsi pendekatan baru yaitu *load resistance factor design* (LRFD) yang dimana faktor tahanan dan faktor beban dari LRFD ditentukan berdasarkan dari statistik aktual untuk mendapatkan nilai keamanan yang seragam.

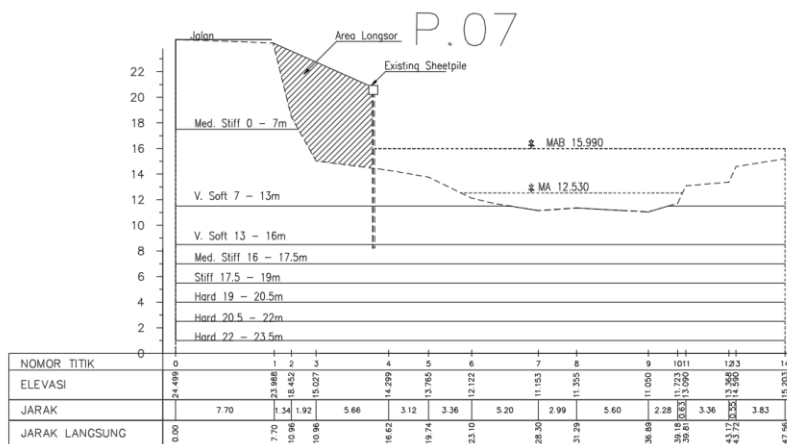
Pada kasus lereng Sungai Ciliwung ruas Kalibata, dinding penahan tanah jenis turap digunakan sebagai struktur penahan tanah untuk melindungi lereng sungai tersebut. Pada April 2022, terjadi longsor pada turap Sungai Ciliwung ruas Kalibata dan menyebabkan rusaknya jalan dan beberapa fasilitas umum yang berada pada lereng tersebut, sehingga memberikan dampak yang besar bagi masyarakat di sekitar area lereng Sungai Ciliwung. Dengan adanya longsor pada lereng Sungai Ciliwung, maka perlu dilakukan analisis terkait dengan jenis dinding penahan yang nantinya digunakan untuk bangunan pengaman lereng menggantikan turap yang telah longsor. Analisis akan dilakukan untuk jenis dinding penahan tanah semi gravitasi kantilever dan non gravitasi menggunakan metode *load resistance factor design*.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di Sungai Ciliwung Ruas Kalibata yang dimana terjadi longsor pada penanganan lereng sungai eksisting menggunakan konstruksi turap. Data penyelidikan tanah yang digunakan dalam penelitian ini berupa data dari pihak BBWS Ciliwung – Cisadane melalui hasil penyelidikan lapangan yaitu uji *Standard Penetration Test* (SPT) dengan kode BH 24, uji *Cone Penetration Test* (CPT) dengan kode S1 dan S2, serta pengujian laboratorium dari sampel tidak terganggu hasil uji bor lapangan pada beberapa kedalaman. Sedangkan untuk data potongan dan tampak didapatkan dari dokumen review drawing PT. Tuah Agung Anugrah [14] pada kode potonga P.07 dan data tanah lain didapatkan dari dokumen laporan review desain oleh PT. Tuah Agung Anugrah [15]. Layout lokasi penyelidikan tanah dan potongan melintang lereng dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1. Layout lokasi penyelidikan tanah [15]



Gambar 2. Potongan melintang lereng P.07 [15]

Dalam penelitian ini, analisis menggunakan bantuan perangkat lunak GEO5 dengan metode *load resistance factor design* (LRFD). Perangkat lunak GEO5 memungkinkan melakukan analisis pada pendekatan LRFD pada beberapa kombinasi beban dan tinjauan seperti stabilitas geser, eksentrisitas, daya dukung dan stabilitas global. Keruntuhan dinding penahan tanah akibat piping juga dapat dianalisis dengan membandingkan gradien hidrolis kritis dan gradien hidrolis. Untuk jenis dinding penahan tanah berupa dinding semi gravitasi (dinding semi gravitasi kantilever) maka analisis dilakukan dengan menggunakan metode LRFD dengan tinjauan yang dilakukan terhadap defleksi dan stabilitas global pada kombinasi beban Layan 1, tinjauan geser, daya dukung eksentrisitas dan piping pada Kuat 1 dan pengaruh gempa pada Ekstrim 1. Untuk jenis dinding penahan tanah tipe non gravitasi, tinjauan yang dilakukan adalah terhadap terhadap stabilitas global dan defleksi pada kombinasi beban layan 1, kedalaman penetrasi, stabilitas global dan piping pada kombinasi Kuat 1 dan pengaruh gempa pada Ekstrim 1. Pada kombinasi Layan 1, apabila nilai defleksi tidak memenuhi persyaratan, maka akan ditambahkan dengan perkuatan pada dinding berupa angkur. Tinjauan pada dinding penahan tanah tipe gravitasi dan tipe non gravitasi juga ditambahkan terkait dengan adanya pengaruh hidrolis pada dinding, yaitu adanya piping pada tipe non gravitasi, sedangkan pada tipe gravitasi, dilakukan control drainase menggunakan *weep hole*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Interpretasi Data

Data yang digunakan tersebut merupakan data sekunder yang diperoleh dari pihak BBWS Ciliwung – Cisadane berupa data pengujian lab hasil dari uji bor BH -24 dengan hasil uji serta korelasi parameter seperti pada Tabel 3.1. Korelasi parameter mengacu pada penelitian dari Look [11].

Tabel 1. Hasil korelasi parameter tanah

N SPT	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	γ_{bulk} (kN/m ³)			$\gamma_{saturated}$ (kN/m ³)		
			Korelasi	Uji Lab	Dipakai	Korelasi	Uji Lab	Dipakai
10	Med Stiff Clay	0 - 7	18.00	17.76	17.76	18.00	17.95	17.95
3	Very Soft Clay	7 - 13	15.00	15.50	15.50	16.00	16.52	16.52
1	Very Soft Clay	13 - 16	15.00	15.99	15.99	16.00	16.50	16.50
11	Med Stiff Clay	16 - 17.5	18.00	-	18.00	18.00	-	18.00
16	Stiff Clay	17.5 - 19	19.00	-	19.00	19.00	-	19.00
27	Very Stiff	19 - 20.5	20.00	-	20.00	20.00	-	20.00
34	Very Stiff	20.5 - 22	20.00	-	20.00	20.00	-	20.00
47	Hard Clay	22 - 23.5	20.00	-	20.00	20.00	-	20.00
60	Hard Clay	23.5 - 26.5	20.00	-	20.00	20.00	-	20.00
60	Very Dense Sand	26.5 - 29.5	21.00	-	21.00	23.00	-	23.00

Tabel 1. (Lanjutan)

N SPT	Jenis Tanah	Kedalaman (m)	C (kN/m ²)			ϕ (°)		
			Korelasi	Uji Lab (UU)	Dipakai	Korelasi	Uji Lab (UU)	Dipakai
10	Med Stiff Clay	0 - 7	50.00	40.22	40.22	23.00	3.80	3.80
3	Very Soft Clay	7 - 13	15.00	24.53	24.53	18.00	5.70	5.70
1	Very Soft Clay	13 - 16	5.00	21.58	21.58	16.00	3.80	3.80
11	Med Stiff Clay	16 - 17.5	55.00	-	55.00	-	-	4.00
16	Stiff Clay	17.5 - 19	80.00	-	80.00	-	-	6.00
27	Very Stiff	19 - 20.5	135.00	-	135.00	-	-	6.00
34	Very Stiff	20.5 - 22	170.00	-	170.00	-	-	7.00
47	Hard Clay	22 - 23.5	235.00	-	235.00	-	-	8.00
60	Hard Clay	23.5 - 26.5	300.00	-	300.00	-	-	10.00
60	Very Dense Sand	26.5 - 29.5	-	-	1.00	43.00	-	43.00

Pemilihan Jenis Dinding Penahan Tanah

Lokasi yang berada pada tepi sungai, dan adanya jalan untuk lalu lintas kendaraan, memberikan lahan yang sempit, sehingga membatasi jenis penahan tanah yang dapat digunakan di lapangan. Dinding penahan tanah jenis gravitasi, dan non gravitasi dapat digunakan sebagai struktur penahan lereng sungai [9]. Terdapat beberapa kriteria batasan tinggi yang dapat ditahan untuk jenis dinding penahan tanah. Untuk jenis dinding gravitasi (pasangan batu), tinggi dinding yang umum digunakan adalah 2 – 3 meter. Untuk semi gravitasi (kantilever), tinggi dinding yang dapat ditahan mencapai 7 meter [11]. Dengan kondisi lapangan dimana tinggi tanah yang ditahan adalah ± 7 meter, maka struktur penahan tanah tipe gravitasi pasangan batu tidak dapat digunakan dan dipilih tipe semi gravitasi kantilever. Untuk dinding non gravitasi, kedalaman penetrasi mengikuti tinggi tanah yang ditahan, sehingga semakin tinggi tanah yang ditahan, maka kedalaman penetrasi yang diperlukan akan semakin besar, hal ini berpengaruh terhadap penggunaan dinding non gravitasi jenis turap precast dikarenakan panjang total yang umum digunakan adalah 12 meter. Dengan tinggi tanah ± 7 meter, maka berdasarkan dari penelitian Look, kedalaman penetrasi minimum adalah 2.5H yaitu sebesar ± 17.5 meter [11], hal ini membuat panjang total struktur lebih dari 12 meter, sehingga untuk tipe non gravitasi digunakan jenis secant pile. Dinding tipe non gravitasi dibagi menjadi dua kategori : (a) kantilever dan (b) dengan angkur [4]. Galian yang melebihi 6 meter, beban yang diterima pada turap akan meningkat, sehingga moment yang terjadi pada dinding akan sangat besar dan menyebabkan dimensi konstruksi akan sangat besar, sehingga perlu digunakan perkuatan angkur untuk mengurangi moment, selain itu juga untuk mengurangi nilai perpindahan horizontal [4].

Tinjauan Keruntuhan Hidrolis Dinding Penahan Tanah

Air pada keadaan statis didalam tanah, akan mengakibatkan tekanan hidrostatis yang arahnya keatas (*uplift*), tetapi ketika air mengalir melewati lapisan tanah, aliran air akan mendesak partikel tanah partikel tanah sebesar tekanan rembesan hidrodinamis yang bekerja menurut arah alirannya. Keadaan dimana butiran – butiran tanah halus terangkut oleh adanya aliran air, maka akan menyebabkan terjadinya pipa – pipa didalam tanah yang disebut

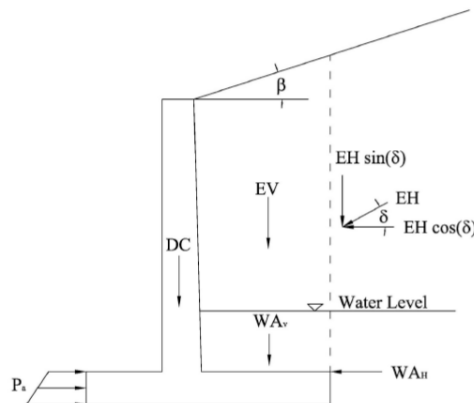
dengan piping [8]. Stabilitas dari turap sangat sensitif terhadap aliran rembesan [17]. Dengan adanya aliran rembesan, maka akan terjadi adanya reduksi tekanan tanah pasif dan meningkatkan tekanan tanah aktif, sehingga meningkatkan resiko ketidakstabilan dari dinding penahan tanah akibat dari *piping* atau *heave*. Adanya peningkatan elevasi muka air, maka faktor keamanan terhadap stabilitas dinding menjadi menurun [13]. Dinding penahan tanah tipe gravitasi, agar menghindari ketidakstabilan dinding penahan tanah akibat dari infiltrasi air, maka penggunaan sistem drainase pada dinding gravitasi dengan *weep hole* dan pipa *perforated* yang terletak pada tumit dinding [5]. Keamanan terhadap piping (SFP), dapat dicari dengan Persamaan (1) [6] sebagai berikut:

$$SF_p \leq \frac{i_c}{i} \tag{1}$$

Dengan : i = gradien hidraulik, $i = \frac{\Delta h}{l}$; i_c = gradien hidraulik kritis, $i_c \leq \frac{\gamma'}{\gamma_w}$; γ' = Berat jenis tanah pada lokasi munculnya air (kN/m³); γ_w = Berat jenis air (kN/m³); Δh = Beda tinggi energi (m); l = Panjang lintasan aliran (m)

Load Resistance Factor Design

Desain dari struktur penahan tanah secara tradisional didesain dengan menggunakan metode *Allowable Stress Design* (ASD) yang dimana semua ketidakpastian dalam beban dan kekuatan material dikombinasikan dalam satu jenis faktor keamanan [1]. *Load Resistance Design Factor* (LRFD) merupakan metode yang dikembangkan dengan memberikan pendekatan yang dimana potensi kegagalan dan kondisi layan dapat dievaluasi dengan mempertimbangkan ketidakpastian yang terkait dengan beban dan kekuatan material. Secara umum, desain LRFD harus berada pada kondisi dimana beban yang telah dikalikan dengan faktor beban, harus lebih kecil daripada kekuatan material yang telah dikalikan dengan faktor reduksi. Kondisi batas dalam analisis LRFD untuk desain dinding penahan tanah adalah Kuat 1 (*Strength 1*), Layan 1 (*Service 1*), dan Ekstrim 1 (*Extreme 1*). Jenis beban yang bekerja pada dinding penahan tanah pada metode LRFD adalah beban mati struktur (DC), tekanan tanah horizontal (EH), beban tambahan timbunan (ES), beban vertikal timbunan (EV), beban hidup (LL), beban air (WA) dan beban gempa (EQ) dengan komponen pada Gambar 3 [1].



Gambar 3. Faktor LRFD untuk dinding penahan tanah [16]

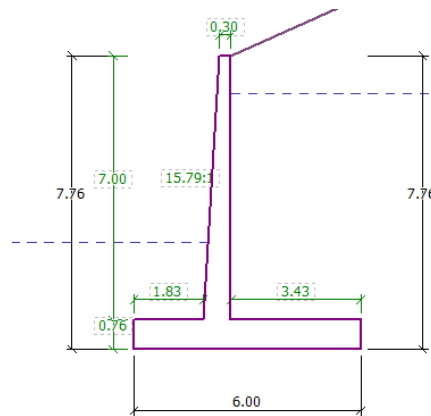
Elemen struktur harus dievaluasi terhadap 11 kombinasi beban, namun tidak semua kombinasi tersebut dapat digunakan pada dinding penahan tanah [17]. Kombinasi beban yang dapat digunakan pada struktur penahan tanah adalah kuat 1, kuat 4, layan 1 dan ekstrim 1. Namun untuk kombinasi kuat 4 hanya digunakan ketika beban mati dinding penahan tanah sangat besar (dinding gravitasi) sehingga untuk jenis kantilever, hanya digunakan kuat 1. Kombinasi beban yang berpengaruh terhadap proses desain hanyalah kombinasi beban kuat 1 dan ekstrim 1 [10]. Pada kombinasi beban kuat 1, dibedakan menjadi kuat 1-a dan kuat 1-b untuk faktor beban maksimum dan minimum, faktor minimum tersebut memberikan eksentrisitas terbesar dan faktor maksimum memberi tekanan tanah terbesar. Tabel kombinasi beban yang digunakan adalah seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Kombinasi beban LRFD [2]

Kombinasi	DC	EH	ES	EV	LL
Kuat 1 (Max)	1.25	1.5	1.5	1.35	1.75
Kuat 1 (Min)	0.9	0.9	0.75	1	1.75
Layan 1	1	1	1	1	1
Ekstrem 1 (Max)	1.25	1	1	1	1.75
Ekstrem 1 (Min)	0.9	0.9	0.75	1	1.75

Analisis Dinding Penahan Tanah Tipe Semi Gravitasi Kantilever

Dimensi untuk asumsi awal dengan tinggi tanah yang ditahan oleh dinding penahan tanah adalah 7.76m [3], maka lebar dari kaki dinding penahan tanah adalah pada rentang 3.7 - 5.5m dan diambil nilai 6m dengan detail dimensi seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Dimensi dinding penahan tanah

Stabilitas geser dinding penahan tanah dapat dicari dengan persamaan 2, dimana V adalah gaya vertikal terfaktor dan $\tan\delta$ adalah nilai dari $\tan\phi$ untuk struktur cor ditempat yang bertemu dengan tanah dan $0.8 \tan\phi$ untuk struktur pracetak.

$$R_{\tau} = V \tan \delta \tag{2}$$

Gaya vertikal dan horizontal terfaktor dinding penahan tanah dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Gaya vertikal terfaktor Kuat 1 Min

Gaya	Gaya vertikal (kN)	Koef. LRFD	Gaya terfaktor (kN)
Berat dinding	206.21	0.9	185.59
Berat tanah	177.88	1	177.88

Tabel 4. Gaya horizontal terfaktor Kuat 1 Min

Gaya	Gaya horizontal (kN)	Koef. LRFD	Gaya terfaktor (kN)
Beban merata tanah 1	262.98	1.5	394.47
Tekanan aktif tanah 2	51.77	1.5	77.66
Kohesi tanah 2	-192.73	1.5	-289.1
Tekanan air	295.37	1	295.37
Beban merata fungsi jarak	1.89	1.75	3.31

Berdasarkan Persamaan 2, tahanan geser nominal adalah 36.28 kN, dengan gaya horizontal total adalah 481.72 kN, maka struktur tidak aman terhadap geser. Pada tinjauan eksentrisitas, dicari dengan Persamaan 3 berikut.

$$e = \frac{B}{2} - \frac{M_R - M_D}{V} \tag{3}$$

B adalah lebar telapak dinding penahan tanah, M_R adalah moment tahanan dan M_D adalah moment dorong. Nilai eksentrisitas tidak boleh melebihi $B/4$. Moment tahanan dan moment dorong dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Moment tahanan

Gaya	Gaya vertikal terfaktor (kN)	Lengan moment (m)	Moment (kNm)
Berat dinding	185.59	2.69	499.24
Berat tanah	177.88	4.29	763.1

Tabel 6. Moment dorong

Gaya	Gaya horizontal terfaktor (kN)	Lengan moment (m)	Moment (kNm)
Beban merata tanah 1	394.47	2.17	856
Tekanan aktif tanah 2	77.66	1.45	112.61
Kohesi tanah 2	-289.1	2.17	-627.35
Tekanan air	295.37	2.59	765.01
Beban merata fungsi jarak	3.31	2.61	8.64

Dengan menggunakan Persamaan 3, didapatkan eksentrisitas yang terjadi adalah 2.59 meter, dengan batas eksentrisitas maksimum adalah 1.5 meter, sehingga tidak aman terhadap eksentrisitas. Pada tinjauan daya dukung,

tekanan yang terjadi pada tanah dicari menggunakan Persamaan 4, sedangkan daya dukung dicari dengan Persamaan 5.

$$\sigma_v = \frac{\Sigma V}{B-2e} \tag{4}$$

$$q_n = cN_{cm} + \gamma D_f N_{qm} C_{wq} + 0.5 \gamma B N_{\gamma m} C_{w\gamma} \tag{5}$$

Dengan c adalah kohesi, N_{cm} , N_{qm} dan $N_{\gamma m}$ adalah perkalian dari faktor kapasitas untuk kohesi, beban tambahan dan berat jenis, lalu faktor koreksi bentuk telapak dinding, faktor kemiringan beban dan koreksi kuat geser dasar dinding, γ adalah berat jenis tanah, D_f adalah kedalaman telapak, C_{wq} dan $C_{w\gamma}$ adalah faktor koreksi muka air tanah. Gaya yang vertikal yang bekerja pada Tabel 7.

Tabel 7. Gaya vertikal terfaktor Kuat 1 Max

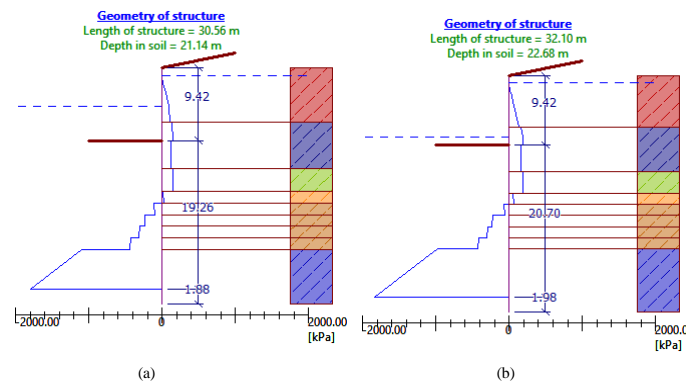
Gaya	Gaya vertikal (kN)	Koef. LRFD	Gaya vertikal terfaktor (kN)
Berat dinding	206.21	1.25	257.76
Berat tanah	177.88	1.5	266.82

Menggunakan Persamaan 3, didapatkan tekanan tanah adalah 641.26 kN/m², menggunakan Persamaan 4, daya dukung tanah adalah 303.85 kN/m², sehingga struktur tidak aman terhadap daya dukung. Kombinasi yang paling berpengaruh terhadap desain adalah kombinasi Kuat 1 [10]. Dengan hasil analisis pada kondisi Kuat 1 yang menunjukkan bahwa dinding penahan tanah tidak memenuhi stabilitas eksternal, maka pada kombinasi Layan 1 dan Ekstrem 1 akan memberikan hasil yang tidak memenuhi, sehingga analisis pada kombinasi selain Kuat 1 tidak dilakukan.

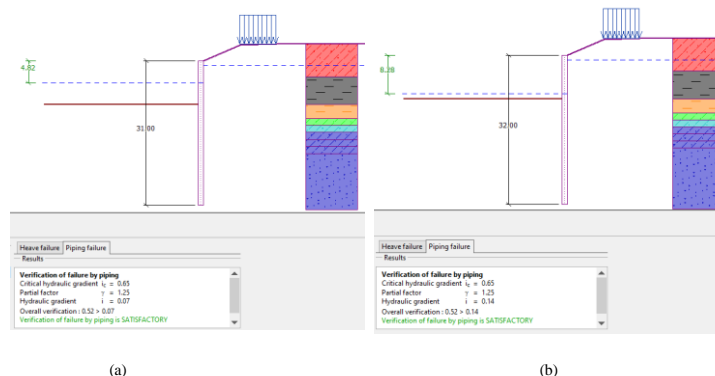
Analisis Dinding Penahan Tanah Tipe Non Gravitasi

Hasil analisis kedalaman penetrasi pada kombinasi Kuat 1 dilakukan dengan membandingkan moment pendorong dari tekanan tanah aktif dengan moment penahan dari tekanan tanah pasif dengan hasil analisis pada Gambar 5. Pada kondisi muka air normal, kebutuhan penetrasi sedalam 22.68 meter, sedangkan pada kondisi banjir sebesar 21.14 meter sehingga struktur yang dapat digunakan adalah secant pile karena melebihi 12 meter batas untuk penggunaan *precast*.

Hasil analisis terhadap stabilitas piping memberikan hasil seperti pada Gambar 6. Gradient hidraulik kritis sebesar 0.65, sedangkan gradient hidraulik saat banjir adalah 0.07 dan saat muka air normal adalah 0.14, sehingga konstruksi tersebut aman terhadap bahaya *piping*.

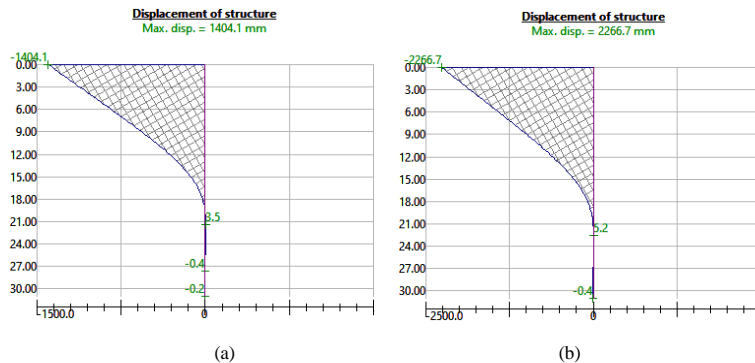


Gambar 5. Hasil analisis kedalaman penetrasi: (a) muka air banjir, (b) muka air normal

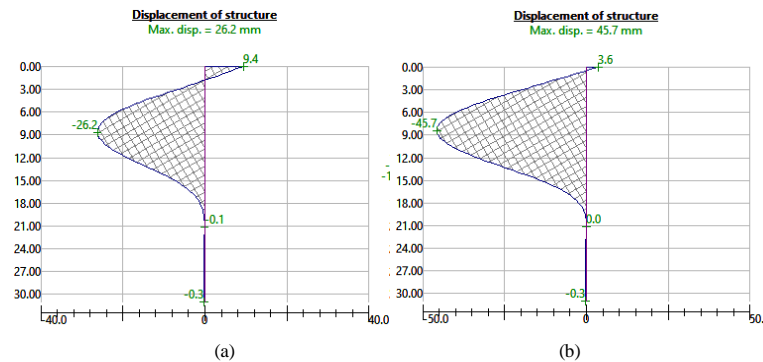


Gambar 6. Hasil analisis piping: (a) muka air banjir, (b) muka air normal

Pada kombinasi Layan 1, analisis digunakan untuk menentukan perpindahan horizontal (*displacement*). *Displacement* maksimum adalah 0.5% dari H [3], sehingga dibatasi pada 4.7cm dengan hasil pada Gambar 7. Diameter *secant pile* yang digunakan adalah 80 cm dengan jarak *secondary pile* sebesar 1.2 m. didapatkan nilai *displacement* sebesar 140.4 cm untuk muka air banjir dan 226.6 untuk muka air normal, sehingga perlu diberi perkuatan berupa angkur untuk mengurangi *displacement* tersebut. Properties dari angkur yang digunakan adalah sesuai dengan dokumen review desain oleh PT.Tuah Agung Anugrah yang dimana angkur dipasang pada kedalaman 2.5m dari permukaan tanah dengan hasil analisis pada Gambar 8. Dengan adanya perkuatan angkur, nilai *displacement* menjad 2.6 cm pada kondisi banjir dan 4.5 cm untuk kondisi muka air normal, sehingga memenuhi persyaratan telah sesuai [3].



Gambar 7. Hasil displacement: (a) muka air banjir, (b) muka air normal



Gambar 8. Hasil displacement dengan angkur: (a) muka air banjir, (b) muka air normal

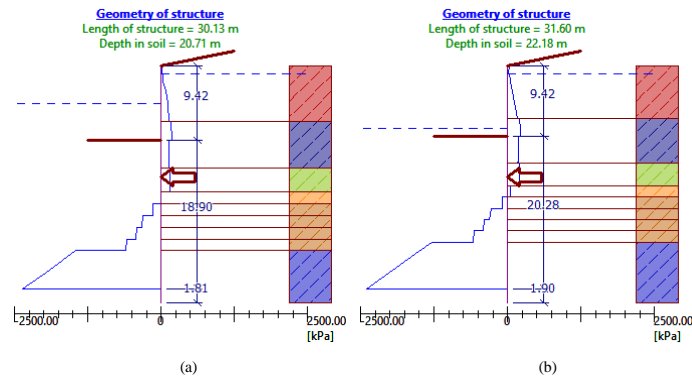
Pada kombinasi Ekstrem 1, bahwa percepatan seismik horizontal (k_h) dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut [12]:

$$K_h = 0.5 \frac{PGAM}{g} \tag{6}$$

Nilai percepatan puncak di permukaan tanah dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut [7].

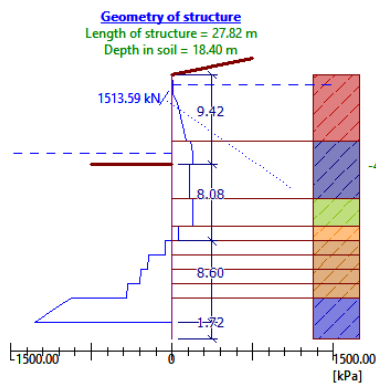
$$PGAM = F PGA \times PGA \tag{7}$$

Dengan nilai K_h merupakan koefisien percepatan gempa horizontal, PGAM merupakan percepatan puncak di permukaan tanah, g merupakan percepatan gravitasi, PGA merupakan percepatan puncak di permukaan tanah dan FPGA merupakan faktor amplifikasi untuk PGA. Kombinasi Ekstrem 1 menghasilkan panjang penetrasi seperti pada Gambar 9, dengan kondisi banjir dibutuhkan adalah 20.71m, sedangkan pada muka air normal dibutuhkan 22.18m. Nilai tersebut masih lebih kecil dibandingkan kombinasi Kuat 1, sehingga kedalaman yang mengacu pada kombinasi Kuat 1.

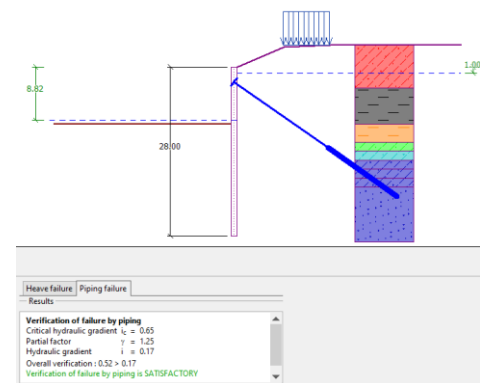


Gambar 9. Hasil analisis kedalaman penetrasi: (a) muka air banjir, (b) muka air normal

Penggunaan angkur akan mengubah nilai kedalaman penetrasi. Analisis pada optimasi desain akibat angkur dilakukan pada kondisi muka air normal kombinasi Kuat 1 karena di kondisi tersebut merupakan kondisi kritis dengan hasil analisis dinding penahan tanah non gravitasi angkur pada Gambar 10, didapatkan panjang total struktur 27.82 meter dan penetrasi 18.4 meter.

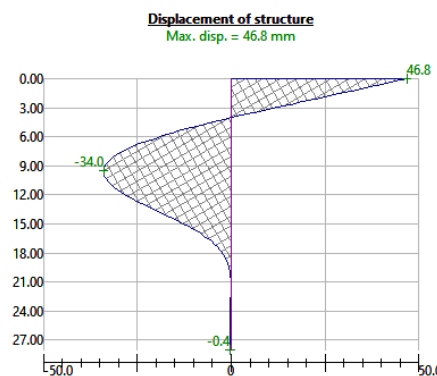


Gambar 10. Kedalaman penetrasi dengan angkur



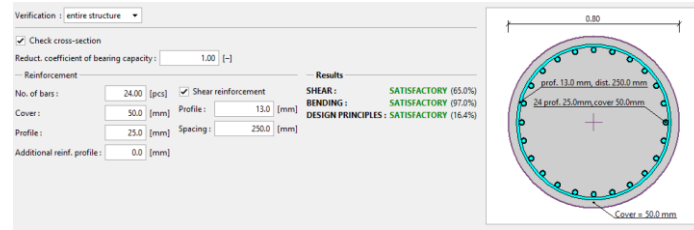
Gambar 11. Hasil analisis *piping* optimasi

Gradient hidraulik kritis pada desain optimasi adalah sebesar 0.65, gradient hidraulik yang terjadi adalah 0.17, sehingga struktur aman terhadap piping seperti Gambar 11. Pada kombinasi Layan 1, perpindahan yang terjadi adalah 4.6 cm seperti Gambar 12, sehingga memenuhi kriteria SNI [3].



Gambar 12. Perpindahan pada kombinasi Layan 1

Dengan menggunakan struktur tipe secant pile, maka perlu dicek keamanan terhadap kegagalan struktur. Pengecekan kegagalan struktur dilakukan pada kombinasi beban Kuat 1 dan Ekstrem 1 dengan hasil pada Gambar 13 dan 14. Pada kombinasi Kuat 1, dibutuhkan 24 tulangan diameter 25 mm dengan tulangan sengkang diameter 13mm dan jarak 250mm, sedangkan pada kombinasi Ekstrem 1 dibutuhkan 30 tulangan diameter 25mm dengan tulangan sengkang diameter 13mm dan jarak 250mm.



Gambar 13. Tulangan kombinasi Kuat 1



Gambar 14. Tulangan kombinasi Ekstrim 1

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil analisis yang telah dilakukan, beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Dinding penahan tanah tipe semi gravitasi kantilever tidak dapat digunakan dikarenakan stabilitas pada semua kombinasi beban tidak memenuhi.
2. Jenis dinding penahan tanah yang cocok digunakan adalah jenis non gravitasi dan dipilih jenis secant pile dikarenakan panjang total struktur yang diperlukan adalah 28 meter, sehingga penggunaan jenis turap tidak memungkinkan karena terbatas oleh panjang maksimum turap adalah 12 meter.
3. Hasil analisis pada dinding secant pile kantilever memberikan nilai defleksi yang besar pada kombinasi Layan 1 melebihi nilai maksimum yang disyaratkan, sehingga perlu diberikan perkuatan angkur untuk mengurangi nilai defleksi.
4. Hasil analisis dinding penahan tanah terhadap piping memberikan hasil bahwa dinding penahan tanah non gravitasi dengan panjang total struktur 28m telah aman terhadap piping dengan nilai gradient hidraulik sebesar 0.17 yang dimana nilai tersebut masih lebih kecil dari gradient hidraulik kritis sebesar 0.65.

Berdasarkan dari kesimpulan tersebut, terdapat beberapa hal yang nantinya dapat dikembangkan, yaitu bagaimana perbandingan desain antara penggunaan *load resistance factor design* (LRFD) dengan *allowable stress design* (ASD), apakah dengan menggunakan metode LRFD, dapat memberikan hasil desain yang lebih ekonomis.

DAFTAR PUSTAKA DAN PENULISAN PUSTAKA

- [1] Aggour, M. S. (2004). LRFD Resistance Factors for Maryland Retaining Walls. Report No. MD-04-SP308B4D, College Park: University of Maryland.
- [2] American Association of State Highway and Transportation Officials. (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Customary U.S. Units. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- [3] Badan Standarisasi Nasional. (2017). SNI 8460 Persyaratan Perancangan Geoteknik. Bandung: Badan Standarisasi Nasional.
- [4] Das, B. M. (2019). Principles of Foundation Engineering, 9th Edition, SI Edition. Boston: Cengage Learning, Inc.
- [5] Dwicahyani, A. (2017). Perancangan Kriteria Desain Seismik Dinding Penahan Tanah Dan Perkuatan Geosintetik, Tesis, Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- [6] European Committee For Standardization. (2004). EN 1997-1: Eurocode 7: Geotechnical design - Part 1: General rules. Brussels: European Committee For Standardization.
- [7] Fakhruddin Shobari, A., Mufti, I. J., Khoirullah, N., Zakaria, Z., Sophian, R. I., & Mulyo, A. (2019). Hubungan Nilai Koefisien Gempa Horizontal (K_h) Dengan Nilai Safety Factor (FS) Daerah Cilengkrang, Jawa Barat. *Padjajaran Geoscience Journal* Vol.3, No.4 (2019) ISSN: 2597-4033.

- [8] Hardiyatmo, H.C. (2017). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- [9] Julien, P. Y. (2018). *River Mechanics*, Second Edition. United Kingdom: Cambridge University Press.
- [10] Kalateh-Ahani, M., & Sarani, A. (2019). Performance-based optimal design of cantilever retaining walls. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 63(2), 660–673. <https://doi.org/10.3311/PPci.13201>.
- [11] Look, B. (2014). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables* (2nd Edition). London: Taylor & Franchis Group.
- [12] Martiani, D. N., Arif, M., & Wahyudi, H. (2021). Alternatif Perencanaan Perbaikan Kelongsoran Lereng pada TPA Melonguane, Kabupaten Kepulauan Talaud. *Jurnal Teknik ITS Vol.10, No.2* (2021) ISSN: 2337-3539, 10.
- [13] Permatasari, C., Arif, M., Agustia, R., & Deya Safitri, F. (2023). Pengaruh Fluktuasi Muka Air Terhadap Stabilitas Dinding Dan Bahaya Piping Pada Bangunan Air. *Proceeding Civil Engineering Research Forum Vol. 2, No.2* (2023) ISSN: 2962-2697.
- [14] PT. Buah Agung Anugrah (2021a). *Laporan Review Desain Supervisi Perkuatan Tebing Kali Ciliwung Ruas Kalibata*. Jakarta: PT. Buah Agung Anugrah.
- [15] PT. Buah Agung Anugrah (2021b). *Review Drawing Perkuatan Tebing Kali Ciliwung Ruas Kalibata*. Jakarta: PT. Buah Agung Anugrah.
- [16] Shamsabadi, A., Dasmeh, A., & Taciroglu, E. (2018). *Guidelines for Analysis and LRFD-based Design of Earth Retaining Structures*. Los Angeles: University of California
- [17] Tawfik, E. F., Hamid, T. B., & Sherif Aggour, M. (2007). Design of Cantilever Retaining Walls in Unsaturated Soils Using AASHTO Load and Resistance Factor Design (LRFD) Method. *Geo-Denver 2007*. GSP 170.
- [18] Veiskarami, M., & Zanj, A. (2014). Stability of sheet-pile walls subjected to seepage flow by slip lines and finite elements. *Geotechnique*, 64(10),759-775. <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.020>.

PERBANDINGAN KUAT TEKAN BETON MUTU SEDANG 21 MPA BERDASARKAN SNI 03 2834: 2000, SNI 7656:2012, DAN AHSP 2023

Hindira Maharani¹, *Dadang Dwi Pranowo², Catur Bejo Santoso³, M. Shofiul Amin⁴, Mohamad Galuh Khomari⁵

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Banyuwangi, Kota Banyuwangi,

^{*)}Email: dadangdp@poliwangi.ac.id

ABSTRACT

Concrete mix design in Indonesia follows national standards that have evolved from SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, to AHSP 2023. This study aims to compare the efficiency and quality of concrete produced using these three standards. Concrete, as a primary construction material, has quality dependent on its mix composition. These three standards regulate concrete mix proportions with different approaches, potentially affecting cement content and compressive strength. Using a comparative experimental method, this research created cylindrical concrete samples based on the three standards, then tested and compared the results, particularly in terms of concrete compressive strength. Testing results at 28 days showed that SNI 03 2834: 2000 produced the highest compressive strength (27.956 MPa), SNI 7656: 2012 demonstrated the best consistency with a compressive strength of 27.552 MPa and the lowest standard deviation (2.93%), while AHSP 2023 yielded lower compressive strength but closest to the 21 MPa target (24.590 MPa). All three methods achieved compressive strengths above 21 MPa at 28 days, meeting the requirements for medium-quality concrete, each with distinct advantages.

Keyword: Concrete compressive strength, SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, AHSP 2023

ABSTRAK

Desain campuran beton di Indonesia mengacu pada standar nasional yang telah mengalami perubahan, dari SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, hingga AHSP 2023. Penelitian ini bertujuan membandingkan *efisiensi* dan mutu beton yang dihasilkan dari ketiga standar tersebut. Beton, sebagai material konstruksi utama, memiliki kualitas yang bergantung pada komposisi campurannya. Ketiga standar ini mengatur proporsi campuran beton dengan pendekatan berbeda, yang dapat mempengaruhi jumlah semen dan kuat tekan. Menggunakan metode eksperimen komparatif, penelitian ini membuat sampel beton *silinder* berdasarkan ketiga standar, kemudian menguji dan membandingkan hasilnya, terutama dalam hal kuat tekan beton. Hasil pengujian pada umur 28 hari menunjukkan bahwa 03 2834: 2000 menghasilkan kuat tekan tertinggi (27,956 MPa), SNI 7656: 2012 menunjukkan konsistensi terbaik dengan kuat tekan 27,552 MPa dan *deviasi* standar terendah (2,93%), sementara AHSP 2023 menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah namun paling mendekati target 21 MPa (24,590 MPa). Ketiga metode mencapai kuat tekan di atas 21 MPa pada umur 28 hari, memenuhi syarat mutu beton sedang dengan masing-masing keunggulan berbeda.

Kata kunci: Kuat tekan beton, SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, AHSP 2023

1. PENDAHULUAN

Bahan konstruksi yang sangat penting, beton merupakan kombinasi dari semen *Portland* atau semen *hidraulik* lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan, yang menghasilkan suatu massa [1]. Beton merupakan bahan material yang hampir 60% digunakan dalam pekerjaan konstruksi dan dipadukan dengan baja [2]. Popularitas beton dalam dunia konstruksi tidak lepas dari karakteristiknya, yaitu kemampuannya untuk membentuk struktur yang kokoh dan tahan lama. Ketika menghasilkan kualitas beton, faktor yang paling signifikan adalah *resistensi* terhadap tekanan. Hubungan antara kekuatan tekan dan mutu beton bersifat *linier positif* beton dengan kemampuan menahan tekanan yang lebih besar umumnya dinilai memiliki kualitas yang lebih unggul. Di Indonesia, desain campuran beton telah mengalami *evolusi* melalui beberapa standar nasional. Awalnya, SNI 03 2834: 2000 menjadi acuan, yang merupakan adaptasi dari metode DOE (*Department of Environment*) 1975 asal Inggris. Standar ini mencakup spesifikasi agregat, proporsi campuran, nilai slump, dan faktor air semen (FAS) maksimal 0,55. Pada tahun 2012, terjadi perubahan dengan diadopsinya SNI 7656: 2012, yang merupakan modifikasi dari ACI (*American Concrete Institute*) 211.1-91. Standar ini menetapkan persyaratan seperti karakteristik material, proporsi campuran, nilai slump, kuat tekan minimal 20 MPa, FAS maksimal 0,50, dan toleransi *deviasi* standar kuat tekan 3,5 MPa. Terbaru, pemerintah mengeluarkan AHSP (Analisis Harga Satuan Pekerjaan) 2023, yang memuat standar baru untuk *spesifikasi* beton mutu tertentu yang dikeluarkan pada tanggal 30 Agustus 2023 [3]. Perbedaan antara AHSP 2023 dengan standar sebelumnya berpotensi mempengaruhi karakteristik beton yang dihasilkan. Mengingat kadar semen dalam campuran dapat mempengaruhi mutu beton, setiap metode menghasilkan komposisi semen yang berbeda-beda. Untuk mencapai efisiensi optimal, diperlukan jumlah air mani yang tepat namun tetap menghasilkan kualitas tinggi. Penelitian ini dilakukan di laboratorium teknik sipil Politeknik Negeri Banyuwangi, menggunakan pendekatan *eksperimental komparatif*. Sampel beton

dibuat berdasarkan tiga standar berbeda, kemudian diuji dan dibandingkan hasilnya, terutama dalam aspek kuat tekan beton. Tujuan penelitian ini adalah *efisiensi* dan mutu beton yang dihasilkan dari metode SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, dan AHSP 2023.

Tujuan Penelitian

Tujuan masalah yaitu mengetahui perbandingan nilai kuat tekan beton normal mutu sedang 21 MPa berdasarkan SNI 03 2834: 2000, SNI 03 7656: 2012, dan AHSP 2023.

Tinjauan Pustaka

Beton merupakan campuran antara semen *portland* atau semen, pasir, krikil dan air dengan bahan tambahan membentuk massa pada, beton yang mempunyai berat isi (2.200 – 2.500) kg/m³ [4]. Proporsi beton yang tidak mengandung bahan tambahan kimia dan bahan-bahan selain semen *hidraulis* diubah dengan mencampurkan bahan-bahan seperti abu terbang, pozolan alam, tepung terak tanur tinggi, serbuk silika, atau semen yang berbeda [5].

Desain Campuran Beton (*Mix Design*)

Rancangan komposisi beton, atau yang sering disebut sebagai desain campuran, merupakan proses perencanaan proporsi bahan-bahan penyusun beton untuk mencapai karakteristik yang diinginkan. Pendekatan yang dikembangkan oleh *America concrete institute* (ACI) dengan mempertimbangkan beberapa faktor kunci, termasuk target kekuatan tekan, tingkat kekentalan (*slump*), dimensi agregat maksimum, rasio air-semen, serta *variabilitas* kekuatan yang diukur melalui standar *deviasi*. Metodologi ACI dimulai dengan penentuan rasio air semen berdasarkan kekuatan yang dijanjikan, diikuti dengan perhitungan jumlah udara, semen, dan agregat yang diperlukan. Di sisi lain, metode yang dikembangkan oleh *Departemen Of Evironment* (DOE) mendasarkan pendekatan mereka pada hubungan antara kekuatan tekan beton dan proporsi air-semen. Dalam metode ini, penentuan kuantitas bahan dilakukan berdasarkan berat, dengan urutan perhitungan dimulai dari penentuan jumlah udara, diikuti oleh semen, kemudian agregat halus, dan terakhir agregat kasar.

Uji Keleccakan (*Slump Test*)

Terdapat 6 variasi pengecoran dengan dua kondisi pengecoran yang berbeda, yaitu *dry mixing* (kondisi kering) di mana air ditambahkan pada tahap akhir, dan *wet mixing* (kondisi basah) di mana air ditambahkan pada setiap pemasangan material [6]. Pengujian konsistensi adukan beton segar dapat dilakukan melalui metode uji *slump*, yang mengukur tingkat kekentalan dalam satuan milimeter. Prosedur ini, yang diatur dalam standar nasional, memainkan peran krusial dalam pengawasan mutu beton segar, khususnya berkaitan dengan kemudahan pengerjaannya. Proses pengujian melibatkan penggunaan alat berbentuk kerucut terpancung. Adukan beton dimasukkan ke dalam kerucut ini secara bertahap, terbagi menjadi tiga lapisan. Setiap lapisan dipadatkan dengan cara ditusuk sebanyak 25 kali menggunakan batang khusus. Setelah kerucut terisi penuh, cetakan diangkat secara perlahan dan *vertikal*. Perbedaan ketinggian antara puncak kerucut sebelum diangkat dan puncak adukan setelah kerucut diangkat diukur, dan hasil pengukuran ini disebut sebagai nilai *slump*. Nilai *slump* yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan nilai yang telah ditentukan dalam perencanaan campuran beton. Kesesuaian antara nilai aktual dan nilai rencana sangat penting untuk memastikan beton memiliki tingkat kemudahan pengerjaan yang tepat, sesuai dengan metode pemadatan yang akan digunakan di lokasi konstruksi.

Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton yang ditentukan oleh perencanaan struktur (benda uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm), untuk digunakan dalam perencanaan struktur beton, dinyatakan dalam satuan MPa [7]. Biasanya ditentukan berdasarkan persyaratan teknis maupun ekonomis dari suatu proyek konstruksi. Nilai ini menjadi acuan awal yang harus dipenuhi oleh pelaksana konstruksi dalam mencapai kuat tekan beton yang diinginkan. Sementara itu, kuat tekan beton yang ditargetkan f'_{cr} adalah kuat tekan rata-rata yang di harapkan dapat mencapai angka yang lebih besar dari nilai. Dengan kata lain, f'_{cr} merupakan target kuat, tekan rata-rata beton yang ingin dicapai dan biasanya ditetapkan 5-10% lebih besar dari nilai f'_c . berikut rumus kuat tekan beton dan rumus perhitungan *deviasi* standar diuraikan dengan persamaan:

$$F = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Dimana :

= Kuat tekan beton (MPa)

P = Gaya tekan aksial dinyatakan dalam newton (N)

$$A = \text{Luas Penampang melintang benda uji dinyatakan dalam mm}^2$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X_i - X_{rt})^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Dimana:

- S = Deviasi standar (Kg/cm²)
- X_i = Kuat tekan masing masing benda uji (Kg/cm²)
- X_{rt} = Rata-rata kuat tekan beton (Kg/cm²)
- N = Jumlah benda uji

Pengujian Karakteristik Material

Pengujian material dilakukan untuk mengetahui *karakteristik* material yang akan digunakan dalam pencampuran adukan beton, pengujian agregat halus, pengujian agregat kasar dan semen *portland*. Meliputi berat jenis, kadar air resapan, berat volume, pengujian analisa saringan, pengujian kadar lumpur dan kelembapan.

2. METODE PENELITIAN

Metode-metode *mix design* yang berlaku di tingkat internasional seperti ACI (*American Concrete Institute - Amerika*), DOE (*Department of Environment - Inggris*), telah melalui proses yang sangat panjang dan mahal, melibatkan penelitian dan eksperimen selama bertahun-tahun [8]. Hasilnya adalah metode yang disepakati dan menjadi standar acuan. Metode penelitian yang digunakan yaitu metode *eksperimental* laboratorium uji bahan. Penelitian ini dilakukan dengan membuat variasi campuran beton normal dengan kuat tekan 21 Mpa berdasarkan SNI 2834-2000, SNI 7656: 2012 dan AHSP 2023. Campuran beton kemudian dibuat menjadi benda uji *silinder* dan di uji kuat tekan setelah umur 3 hari, 14 hari dan 28 hari. penelitian diawali dengan *studi literatur* mengenai beton dari jurnal dan buku *refresnsi*, SNI terkait beberapa aturan dan tata cara , dan metode *mix design* (desain campuran beton) beton. Bahan yang akan digunakan untuk pengujian meliputi semen, agregat halus, agregat kasar, dan air. Selanjutnya, dilakukan pengujian karakteristik bahan-bahan tersebut. Tahap selanjutnya perencanaan campuran beton normal kuat tekan 21 MPa berdasarkan SNI 2834-2000, SNI 7656: 2012, dan AHSP 2023 Rencana campuran beton tersebut kemudian digunakan untuk membuat benda uji beton berbentuk silinder berukuran 15 cm x 30 cm. dilanjutkan membuat benda uji dengan menentukan nilai slump dan penuangan beton segar kedalam *silinder* Benda uji beton dilakukan perawatan dengan metode wet-curing hingga mencapai umur 28 hari. Setelah itu benda uji diuji uat tekan diukur untuk mendapatkan data kuat tekan dari masing-masing variasi campuran beton. Data kuat tekan beton diolah dan dibahas untuk mendapatkan kesimpulan mengenai perbandingan ketiga SNI dalam merencanakan campuran beton normal kuat tekan 21 MPa. Jumlah benda uji dan variasi benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Benda Uji dan Variasi Metode

Variasi Campuran Beton	Waktu Pengujian (Hari)			Jumlah
	3	14	28	
Metode SNI 2834-2000	3	3	3	9
Metode SNI 7656: 2012	3	3	3	9
Metode AHSP 2023	3	3	3	9
Total Jumlah Sempel				27

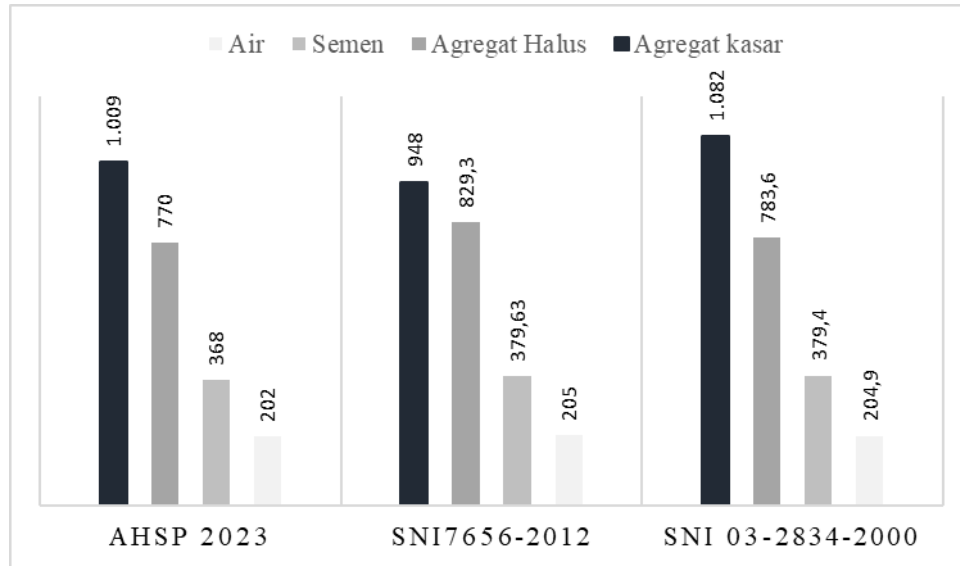
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Komposisi Rancangan Campuran

Berdasarkan kalkulasi perhitungan Sesuai metode yang telah dilakukan, diperoleh perbandingan komposisi campuran beton sesuai dengan tiga metode *mix design* yang berbeda, yaitu SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, dan AHSP 2023. Hasil perhitungan ini mencakup proporsi bahan-bahan penyusun beton untuk volume 1 m³. Perbandingan rinci dari metode ketiga disajikan dalam Tabel 2, yang memuat informasi mengenai jumlah air, semen, agregat halus, dan agregat kasar yang diperlukan untuk setiap metode. Untuk memberikan gambaran visual yang lebih jelas, perbandingan ini juga diilustrasikan dalam bentuk *grafik* pada Gambar 1 yang menyertainya. Penyajian data dalam format tabel dan *grafik* ini memungkinkan analisis komprehensif terhadap perbedaan komposisi antar metode, *memfasilitasi evaluasi efisiensi* penggunaan material, dan memberikan wawasan mengenai potensi karakteristik beton yang dihasilkan dari masing-masing metode *mix design* tersebut.

Tabel 2. Rancangan Kebutuhan Material

No.	Material	Metode Rancangan		
		SNI 03 2834: 2000	SNI 7656: 2012	AHSP 2023
1.	Air (liter)	204,9	205	202
2.	Semen (kg)	379,4	379,63	368
3.	Agregat halus (kg)	783,6	829,3	770
4.	Agregat kasar (kg)	1.082	948	1.009



Gambar 1. Grafik Perbandingan Rencana Proporsk Campuran Beton 1 m³

Hasil Slump Test

Tinggi *slump* diukur sebagai selisih antara tinggi kerucut *abrams* (15 cm) dengan tinggi adukan beton yang tersisa setelah mengalami penurunan. Semakin rendah nilai *slump*, semakin kaku adukan beton tersebut, sedangkan nilai *slump* yang lebih tinggi menunjukkan adukan beton yang lebih cair dan mudah untuk dituang dan dipadatkan, Berikut adalah detail hasil pengukuran tinggi *slump* untuk masing-masing SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012 dan AHSP 2023, pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai *Slump* Didapatkan Dari 3 Metode Rancangan

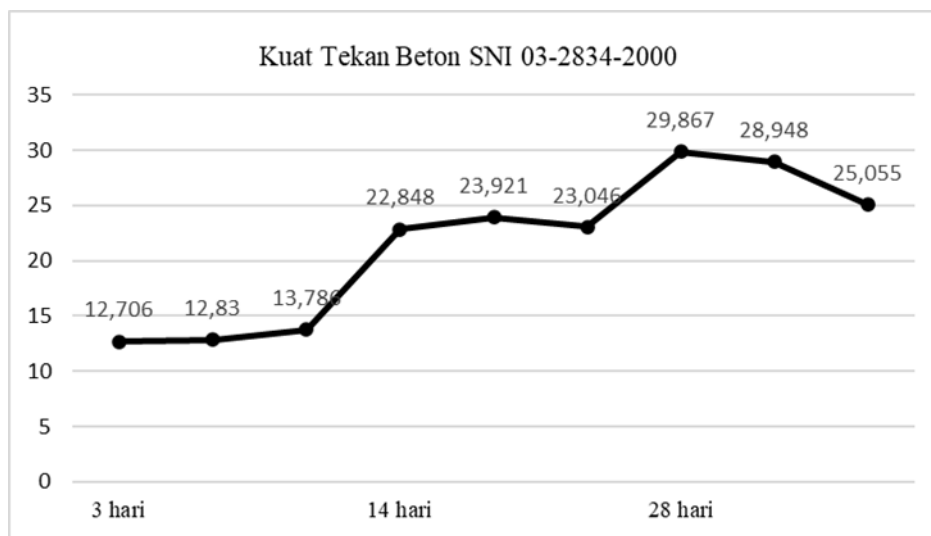
No	Metode	Rerata tinggi <i>slump</i> (mm)
1	SNI 03 2834: 2000	100
2	SNI 7656: 2012	100
3	AHSP 2023	100

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian untuk metode SNI 03-2834 disajikan secara rinci dalam Tabel 4, dengan *visualisasi grafik* yang dapat dilihat pada Gambar 2. Sementara itu, data yang diperoleh dari penerapan metode SNI 7656 dirangkum dalam Tabel 5 dan diilustrasikan melalui Gambar 3. Terakhir, untuk metode AHSP 2023, hasil pengujian kuat tekan dapat ditemukan dalam Tabel 6, dengan representasi visual yang ditampilkan pada Gambar 4.

Tabel 4. Hasil Uji Kuat Tekan Beton SNI 03 2834:2012

No. Benda Uji	Berat	Ukuran	Tanggal		Umur	Beban	Kuat Tekan Beton	Rata-rata Kuat Tekan	Deviasi standar
	Gram	Ø	Buat	Uji	Hari	kN	MPa	MPa	%
1.	12,480	15	13/04/24	16/04/24		224,53	12,706		
2.	12,601	15	13/04/24	16/04/24	3	226,73	12,830	13,107	4,42
3.	12,454	15	13/04/24	16/04/24		243,78	13,786		
4.	12,654	15	27/04/24	11/04/24		403,76	22,848		
5.	12,530	15	27/04/24	11/04/24	14	422,72	23,921	23,276	2,40
6.	12,630	15	27/04/24	11/04/24		407,26	23,046		
7.	12,601	15	27/04/24	24/06/24		527,79	29,867		
8.	12,582	15	27/04/24	24/06/24	28	511,56	28,948	27,956	9,12
9.	12,634	15	27/04/24	24/06/24		442,76	25,055		

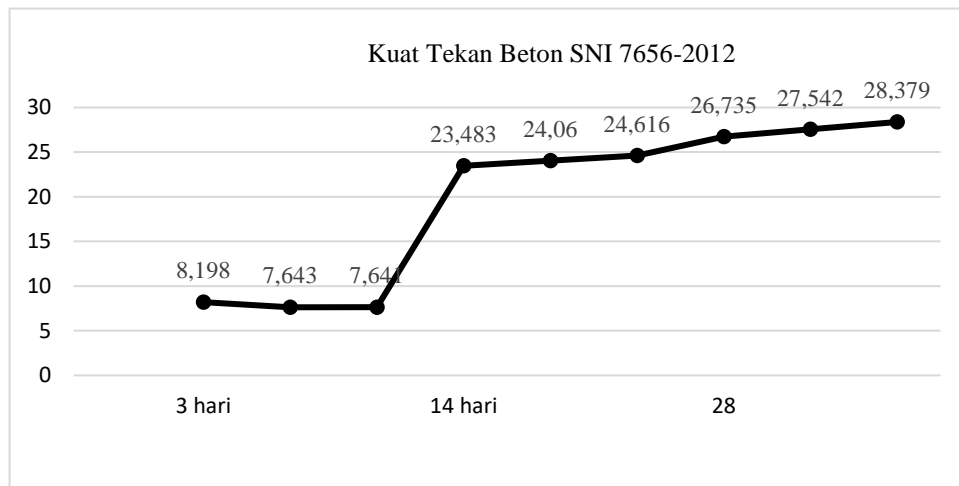


Gambar 2. Grafik Hasil Kuat tekan Beton SNI 03 2834: 2000

Dari table dan grafik menunjukkan hasil uji kuat tekan beton pada umur 3, 14, dan 28 hari. Pada umur 3 hari, rata-rata kuat tekan mencapai 13,107 MPa dengan deviasi standar 4,42%. Kuat tekan meningkat *signifikan* pada umur 14 hari menjadi 23,276 MPa dengan deviasi standar 2,40%. Pada umur 28 hari, kuat tekan rata-rata mencapai 27,956 MPa dengan deviasi standar 9,12%. Grafik menunjukkan peningkatan kuat tekan yang konsisten seiring bertambahnya umur beton, dengan kenaikan tajam antara umur 3 dan 14 hari.

Tabel 5. Hasil Uji Kuat Tekan Beton SNI 7656: 2012

No. Benda Uji	Berat	Ukuran	Tanggal		Umur	Beban	Kuat Tekan Beton	Rata-rata Kuat Tekan	Deviasi standar
	Gram	Ø	Buat	Uji	Hari	kN	MPa	%	%
1	12,390	15	13/04/24	16/04/24		144,87	8,198		
2	12,398	15	13/04/24	16/04/24	3	135,06	7,643	7,827	3,83
3	12,362	15	13/04/24	16/04/24		135,02	7,641		
4	12,70	15	08/04/24	22/04/24		414,97	23,483		
5	12,540	15	08/04/24	22/04/24	14	425,31	24,060	24,053	2,32
6	12,766	15	08/04/24	22/04/24		435,00	24,616		
7	12,510	15	08/04/24	22/04/24		472,45	26,735		
8	12,700	15	08/04/24	22/04/24	28	486,69	27,542	27,552	2,93
9	12,770	15	08/04/24	22/04/24		501,50	28,379		

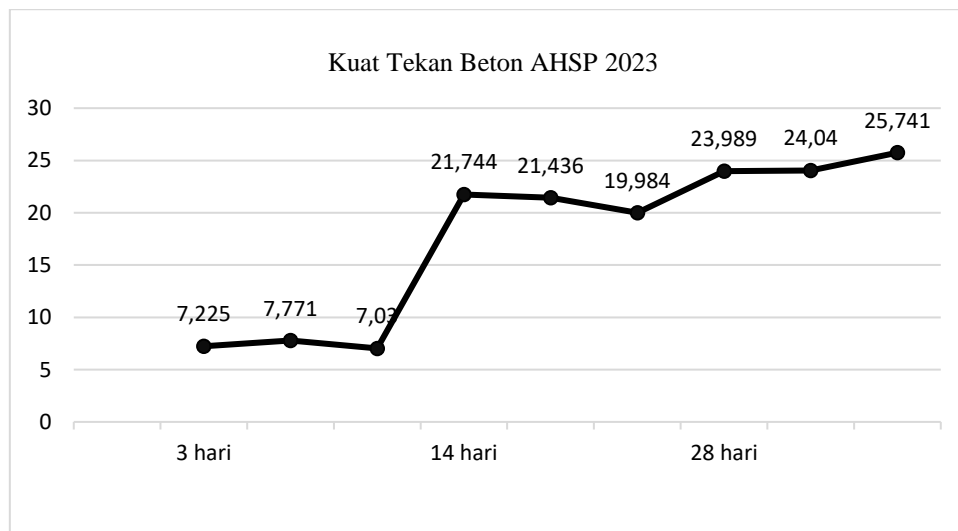


Gambar 3. Grafik Hasil Kuat tekan Beton SNI 7656: 2012

Tabel 4 dan Gambar 3 menunjukkan hasil uji kuat tekan beton pada umur yang sama. Pada umur 3 hari, rata-rata kuat tekan adalah 7,827 MPa dengan *deviasi* standar 3,83%. Kuat tekan meningkat drastis pada umur 14 hari menjadi 24,053 MPa dengan *deviasi* standar 2,32%. Pada umur 28 hari, kuat tekan rata-rata mencapai 27,552 MPa dengan *deviasi* standar 2,93%. Grafik menunjukkan peningkatan kuat tekan yang sangat signifikan antara umur 3 dan 14 hari, dengan peningkatan lebih moderat antara 14 dan 28 hari.

Tabel 6. Hasil Uji Kuat Tekan Beton AHSP 2023

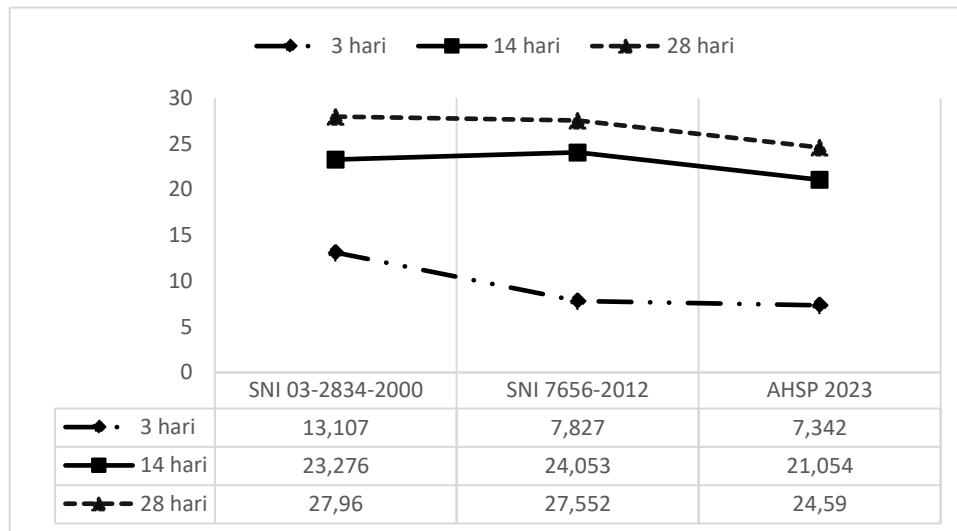
No. Benda Uji	Berat	Ukuran	Tanggal		Umur	Beban	Kuat Tekan Beton	Rata-rata Kuat Tekan	<i>Deviasi</i> standar
	Gram	Ø	Buat	Uji	Hari	kN	MPa	%	%
1.	12,446	15	13/04/24	16/04/24	3	127,67	7,225	7,342	5,03
2.	12,342	15	13/04/24	16/04/24		137,31	7,771		
3.	12,570	15	13/04/24	16/04/24		124,22	7,030		
4.	12,650	15	08/04/24	22/04/24	14	384,20	21,744	21,054	4,41
5.	12,676	15	08/04/24	22/04/24		378,14	21,436		
6.	12,480	15	08/04/24	22/04/24		353,14	19,984		
7.	12,530	15	08/04/24	22/04/24	28	424,10	23,989	24,590	3,98
8.	12,820	15	08/04/24	22/04/24		424,82	24,040		
9.	12,391	15	08/04/24	22/04/24		454,87	25,741		



Gambar 4. Grafik Hasil Uji Tekan Beton AHSP 2023

Hasil pengujian kuat tekan beton disajikan dalam *grafik* pada Gambar 4.4 berikut. *Grafik* ini menampilkan perbandingan kuat tekan beton yang dihasilkan dari tiga metode berbeda SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, dan AHSP 2023. Pengujian dilakukan pada tiga tahap umur beton, yaitu 3 hari, 14 hari, dan 28 hari. Tujuan grafik ini adalah untuk memvisualisasikan perkembangan kuat tekan beton dari masing-masing metode seiring bertambahnya umur beton.

Berdasarkan *grafik* Gambar 5 data kuat tekan beton dari tiga metode campuran berbeda (SNI 03 2834: 2000, SNI 7656: 2012, dan AHSP 2023), terlihat peningkatan kuat tekan yang konsisten seiring bertambahnya umur beton pada 3, 14, dan 28 hari. Menurut SNI 03 2834: 2000, kuat tekan awal tertinggi terjadi pada umur 3 hari (13,107 MPa), sementara kuat tekan akhir tertinggi terjadi pada umur 28 hari (27,956 MPa). SNI 7656: 2012 di dapatkan hasil terbaik pada umur 14 hari (24,053 MPa) dan mencapai kuat tekan akhir (27,552 MPa) yang hampir setara dengan SNI 03 2834: 2000. Sementara itu, AHSP 2023 konsisten menghasilkan kuat tekan yang lebih rendah namun tetap mencapai di atas 21 MPa pada 28 hari (24,590 MPa). Meskipun AHSP 2023 menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata paling mendekati target 21 MPa dengan selisih terkecil 3,590 MPa, SNI 7656: 2012 menunjukkan konsistensi terbaik dengan *deviasi* standar terendah sebesar 2,93% pada 28 hari, diikuti oleh AHSP 2023 (3,98%) dan SNI 03 2834: 2000 (9,12%). Hal ini menunjukkan bahwa SNI 7656: 2012 menunjukkan keseimbangan yang baik antara kekuatan tinggi dan konsistensi hasil uji tekan.



Gambar 5. Grafik Data Kuat Tekan Beton Rata-rata Dari Tiga Metode Campuran

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian pada umur 28 hari, perbandingan nilai kuat tekan beton normal mutu sedang 21 MPa menggunakan tiga metode mix design menunjukkan variasi yang signifikan. Metode SNI 03 2834: 2000 menunjukkan kinerja terbaik dengan kuat tekan tertinggi (27,956 MPa), meskipun memiliki deviasi standar tertinggi (9,12%). SNI 7656: 2012 menghasilkan kuat tekan 24,053 MPa dan memiliki konsistensi terbaik dengan deviasi standar terendah (2,93%). Sementara itu, AHSP 2023 menghasilkan kuat tekan 24,590 MPa, yang paling mendekati target 21 MPa. Secara keseluruhan, ketiga metode berhasil mencapai kuat tekan di atas 21 MPa pada umur 28 hari, memenuhi syarat mutu beton sedang yang ditargetkan, dengan masing-masing metode menunjukkan keunggulan dalam aspek yang berbeda seperti kekuatan maksimal, konsistensi, atau kedekatan dengan target kuat tekan yang diinginkan.

Saran

Untuk proyek yang memerlukan kekuatan awal tinggi, disarankan menggunakan metode SNI 03 2834: 2000. Jika konsistensi hasil dan efisiensi penggunaan semen menjadi prioritas, metode SNI 7656: 2012 bisa menjadi pilihan yang baik. AHSP 2023 dapat dipertimbangkan untuk proyek dengan persyaratan kekuatan yang lebih rendah dan fokus pada penghematan biaya, namun perlu dilakukan optimalisasi mix design untuk meningkatkan kekuatan beton.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standarisasi Nasional, SNI 03-2834-2000 Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2000.
- [2] A. Santoso, Darmono, Faqih Ma'arif and Sumarjo, "Studi Perbandingan Rancang Campur Beton Normal Menurut SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012," *Jurusan Pendidikan Teknik Sipil dan Perencanaan FT UNY*, pp. 105-115, 2017.
- [3] Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Analisa Harga Satuan Pekerjaan, Jakarta: Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2023.
- [4] Badan Standarisasi Nasional, Tata cara pemilihan campuran untuk beton normal, beton berat dan beton massa. SNI 7656:2012, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional, 2012.
- [5] J. R. Pansya, Suhendra, E. Dahlan, R. R. Aldiyansyah and R. Saputra, "Kuat Tekan Beton Mutu 21,7 MPa Berdasarkan SNI 7656:2012 dan AHSP Tahun 2022," *Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Batanghari*, pp. 135-139, 2022.
- [6] J. Foulhudan, D. Nurtanto and Krisnamurti, "Perbandingan Mix Design SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012 Ditinjau Dari Proses Pengecoran Beton Normal," *Jurusan Teknik Sipil Universitas Jember*, pp. 99-107, 2022.
- [7] Elia Hunggurami, Margareth E. Bolla and Papy Messakh, "Perbandingan Desain Campuran Beton Normal Menggunakan SNI 03-2834-2000 dan SNI 7656:2012," *Teknik Sipil*, pp. 165-172, 2017.
- [8] Y. R. Alkhaly, "Perbandingan Rancangan Campuran Beton," *Jurusan Teknik Sipil Universitas Malikussaleh*, pp. 11-18, 2016.

PENGARUH PENAMBAHAN *SILICA FUME* TERHADAP CAMPURAN BETON MEMADAT SENDIRI (*SELF COMPACTING CONCRETE*) MUTU TINGGI

Nadya Putri Astika Ningrum¹, *Dadang Dwi Pranowo², Wahyu Naris Wari³, Ahmad Utanaka⁴, Mohamad Galuh Komari⁵

^{1,2,3,4,5}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Banyuwangi, Kota Banyuwangi,

^{*)} Email: dadangdp@poliwangi.ac.id

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC) is a type of concrete that has the ability to flow and compact itself without using a vibrator. SCC concrete requires adjustment of aggregates, aggregate proportions, and superplasticizer admixture substances in order to obtain the appropriate solidity without using a vibrator. In most cases, the raw material of concrete mixtures includes rough aggregates, finely aggregated cement, and water. However, in some situations, the properties of concrete mixtures can be affected by admixture and other additives, such as superplasticizer and other adjuvants of silica fume. In this study, silica smoke is used as an additive to SCC concrete aimed at determining the strong influence of silica fume pressure on SCC mixture concrete. The research was carried out by adding silica fume with a percentage of 0%, 5%, and 10% of the weight of semen as well as superplasticizer with 0.5% of the mass of the semen. The mixture design method used the ACI (American Concrete Institute) method with strong pressure plans 41 MPa tested strong pressure at age 7, 14, and 28 days. The results showed that strong pressure with normal concrete variation has a strong average pressure of 39.90 MPa at age 28 days. However, strong pressure values with 5% silica fume variation experience a significant decrease to 30.72 MPa in age 28. The pressure strength value with the silica fume variation is 10% higher compared to the previous variation, averaging 36.185 MPa. This suggests that the addition of silica fume to the self-compacting concrete can cause the pressure value of the concrete to decrease.

Keyword: Concrete, Compressive Strength, High Quality, Self Compacting Concrete, Silica Fume

ABSTRAK

Self Compacting Concrete (SCC) adalah jenis beton yang memiliki kemampuan untuk mengalir dan memadat sendiri tanpa menggunakan bantuan vibrator. Beton SCC memerlukan pengaturan agregat, proporsi agregat, dan zat admixture superplastiziser agar didapatkan kekentalan yang sesuai tanpa menggunakan bantuan vibrator. Pada kebanyakan kasus bahan pokok campuran beton meliputi agregat kasar, agregat halus, semen, dan air. Namun, dalam beberapa situasi tertentu, sifat campuran beton dapat dipengaruhi oleh admixture dan bahan tambah lainnya, seperti superplasticizer dan bahan tambah lainnya silica fume. Dalam penelitian ini, silica fume digunakan sebagai bahan tambah pada beton SCC yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh kuat tekan silica fume terhadap campuran beton SCC. Penelitian ini dilakukan dengan menambah silica fume dengan persentase 0%, 5%, dan 10% dari berat semen serta superplasticizer dengan persentase 0.5% dari berat semen. Metode rancangan campuran menggunakan metode ACI (American Concrete Institute) dengan kuat tekan rencana 41 MPa diuji kuat tekan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil menunjukkan bahwa kuat tekan dengan variasi beton normal memiliki kuat tekan rata – rata 39.90 MPa pada umur 28 hari. Tetapi, nilai kuat tekan dengan variasi silica fume 5% mengalami penurunan yang signifikan mencapai 30,72 MPa pada umur 28 hari. Nilai kuat tekan dengan variasi silica fume 10% lebih tinggi dibandingkan dengan variasi sebelumnya, rata – rata 36,185 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan silica fume terhadap beton Self Compacting Concrete dapat menyebabkan nilai kuat tekan beton menurun.

Kata kunci: Beton, Kuat Tekan, Mutu Tinggi, Self Compacting Concrete, Silica Fume

1. PENDAHULUAN

Dalam bidang konstruksi perkembangan teknologi setiap tahun semakin pesat, baik desain ataupun metode yang digunakan. Dari perkembangan tersebut banyak ditemukan modifikasi beton dari berbagai penelitian yang telah dilakukan, yang dijadikan acuan untuk meningkatkan kinerja pembangunan. Dengan pesatnya pembangunan, saat ini dituntut untuk menggunakan beton dengan kualitas bahan yang baik dan bermutu, mudah dalam pengerjaannya, serta memenuhi kebutuhan dalam proses konstruksi bangunan.

Namun, pada konstruksi bangunan tidak sedikit terdapat permasalahan yang terjadi pada beton yang digunakan. Permasalahan tersebut seperti, segregasi, pengeroposan, dan keretakan. Ada beberapa solusi yang untuk mengatasi masalah ini salah satunya dengan menggunakan campuran beton Self Compacting Concrete. *Self Compacting*

Concrete (SCC) adalah kemampuan beton yang mampu mengalir dan memadat sendiri tanpa menggunakan bantuan *vibrator*. Beton SCC merupakan beton yang memiliki kemampuan untuk mengisi, melewati, mengalir, dan mempertahankan beton homogenitas tanpa terjadi segregasi tanpa perlu dilakukan pemadatan tambahan [1]. Pada umumnya bahan pokok campuran beton meliputi koral, pasir, semen, dan air. Dalam kondisi tertentu, penambahan bahan tambah diperlukan yang berpotensi meningkatkan mutu campuran beton. Bahan tambah admixture tersebut berupa *superplasticizer* dan tambahan bahan lainnya seperti *silica fume* atau *fly ash*.

Dari permasalahan diatas, tujuan dari penelitian ini untuk mengkaji pengaruh penambahan *silica fume* terhadap kuat tekan beton mutu tinggi yang diharapkan dapat mengalami perubahan yang berdampak pada kinerja dan sifat yang diinginkan dan dapat digunakan untuk menggantikan sebagian material utama penyusun beton. Serta salah satu alternatif mengurangi komposisi penggunaan agregat dengan ukuran agregat yang lebih kecil agar dapat mengisi celah diantara tulangan. Dengan metode yang digunakan yaitu metode ACI. Pada penelitian ini *silica fume* digunakan sebagai bahan aditif pada beton SCC. Dengan persentase *silica fume* 5% dan 10%, serta *superplasticizer* 0,5%.

Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas didapatkan perumusan masalah yaitu bagaimana pengaruh penambahan *silica fume* terhadap kuat tekan beton memadat sendiri dengan mutu tinggi?

Tujuan Penelitian

Dari rumusan masalah diatas, tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh penambahan *silica fume* terhadap kuat tekan beton memadat sendiri dengan mutu tinggi.

Beton

Berdasarkan SNI 2847-2013 beton adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat kasar, dan air dengan tanpa bahan tambahan (*admixture*). [2] Beton banyak digunakan sebagai bahan utama bangunan karena sifat beton yang mudah dibentuk dan menyesuaikan cetakan.

Self Compacting Concrete (SCC)

Self Compacting Concrete merupakan beton yang dapat mengalir dengan sendirinya yang dapat dicetak pada bekisting tanpa menggunakan *vibrator*. [3] Beton ini menggunakan pengaturan ukuran agregat, proporsi agregat dan bahan tambah *superplasticizer* untuk mencapai nilai kelecakan beton tertentu yang memungkinkannya mengalir sendiri tanpa bantuan alat pemadat. Dari segi mutu *Self Compacting Concrete* memiliki keunggulan yaitu sangat encer (dengan bahan tambah zat aditif dapat menahan nilai slump dengan waktu yang lama), kuat tekan beton dapat digunakan untuk mutu tinggi, dapat mengurangi permeabilitas dari beton sehingga permukaan beton jadi lebih halus. [4] Pada umumnya *Self Compacting Concrete* merupakan jenis beton yang mempunyai tingkat pengerjaan (*workability*) dan memiliki kekuatan awal yang besar, sehingga memerlukan faktor air semen yang rendah.

Kuat Tekan

Uji kuat tekan penting untuk diketahui, sebab dari sifat kuat tekan dapat diketahui atau diperkirakan kedepannya, sehingga dapat digunakan sesuai dengan kegunaannya. Untuk mengetahui mutu dan klasifikasinya dilakukan pengujian kuat tekan terhadap beton yang akan diambil datanya. Besarnya kuat tekan pada benda uji silinder dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Keterangan: $f'c$ = kuat tekan beton benda uji silinder (MPa), P = beban desak maksimum (N), A = luas permukaan benda uji silinder (cm²)

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan yaitu dengan melakukan pengujian di laboratorium uji bahan. Penelitian ini diawali dengan studi literatur dari berbagai buku dan jurnal yang sesuai. Setelah dilakukan studi literatur, dilakukan pengujian karakteristik material agregat halus, agregat kasar, semen, dan *silica fume*. Untuk pengujian agregat diantaranya berat jenis, berat volume, analisa saringan, kadar air resapan, kelembaban, dan kadar lumpur. Sedangkan untuk semen dan *silica fume* diantaranya berat jenis, berat volume, konsistensi normal, dan waktu ikat. Setelah dilakukan pengujian karakteristik material,

selanjutnya merancang rancangan campuran beton. Dengan nilai kuat tekan 41 MPa dengan menggunakan metode (*American Concrete Institute*). Setelah rancangan campuran selesai, dilanjutkan dengan pelaksanaan pembuatan benda uji. Benda uji yang digunakan yaitu benda uji silinder dengan dimensi 15 x 30 cm. Setelah dilakukan pembuatan benda uji untuk mengetahui kecacakan dari beton tersebut dilakukan pengujian *slump*. Pengujian *slump* pada beton SCC berbeda dengan pengujian *slump* pada umumnya. Beton SCC menggunakan pengujian *slump flow*, *V-Funnel Test*, dan *L-box*. Dimana memiliki nilai *slump flow* antara 500 – 750 mm. Setelah itu beton dituang ke dalam silinder. Setelah itu benda uji dibiarkan selama 24 jam. Setelah 24 jam silinder dibuka dan beton direndam didalam air untuk dilakukan *curing*. Perawatan dilakukan sesuai dengan umur yang telah ditentukan yaitu 7, 14, dan 28. Setelah itu dilakukan pengujian kuat tekan sesuai dengan umur beton yaitu 7, 14, dan 28. Untuk setiap benda uji diberi kode identifikasi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Sampel Benda Uji

Klasifikasi	Nama	Umur Beton	Jumlah Sampel Setiap Variasi	Campuran	Total
Beton Normal SCC	BN	7	3	0%	9
		14	3		
		28	3		
Beton SCC + <i>Silica Fume</i> + <i>Superplasticizer</i>	SF 5%	7	3	SF 5% + SP 0.5%	9
		14	3		
		28	3		
Beton SCC + <i>Silica Fume</i> + <i>Superplasticizer</i>	SF 10%	7	3	SF 10% + SP 0.5%	9
		14	3		
		28	3		

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kebutuhan Campuran

Setelah dilakukan perhitungan rancangan campuran didapatkan komposisi campuran untuk 1 m³. Berikut hasil perhitungan kebutuhan 1m³ dan 9 benda uji untuk varian campuran beton normal. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Kebutuhan Campuran Beton Variasi Beton Normal

Volume	Proporsi Campuran					
	Volume Silinder	Air	Semen	Pasir	Kerikil	SP 0.5%
1 m ³	0,00529	170,8	478,48	7690,10	1093,10	2,39
9 Benda Uji	0,04761	8,13	22,67	32,86	52,05	0,114

Berikut hasil perhitungan kebutuhan campuran beton dengan variasi *silica fume* 5% dan *superplasticizer* 0,5% dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kebutuhan Campuran Beton Variasi *Silica Fume* 5%

Volume	Proporsi Campuran					
	Air	Semen	Pasir	Kerikil	SF 5%	SP 0.5%
1 m ³	170,8	452,28	7690,10	1093,10	23,92	2,39
9 Benda Uji	8,13	21,53	32,86	52,05	1,14	0,108

Nilai *Slump Test*

Adapun hasil pengujian nilai *slump* yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Nilai *Slump* Beton

Benda Uji	<i>Flow</i> (cm)	<i>V-Funnel</i> (detik)	<i>L-Shape Box</i>
			PA: $\frac{H1}{H2}$
Normal	50	11	1
SF 5%	53	9	0,83
SF 10%	50	12	0,8

Dari tabel diatas didapatkan nilai *slump flow* untuk variasi beton normal dengan diameter 50 cm, variasi beton dengan persentase *silica fume* 5% didapatkan nilai *slump flow* dengan diameter 53 cm, dan variasi beton dengan persentase *silica fume* 10% didapatkan nilai *slump flow* dengan diameter 50 cm.

Nilai *V-Funnel Test* untuk variasi beton normal didapatkan waktu 11 detik untuk menghabiskan beton yang ada didalamnya, variasi beton dengan persentase *silica fume* 5% didapatkan waktu 11 detik untuk menghabiskan beton yang ada didalamnya, dan variasi beton dengan persentase *silica fume* 10% didapatkan waktu 11 detik untuk menghabiskan beton yang ada didalamnya.

Nilai *L-Box Test* untuk variasi beton normal didapatkan 1 cm , variasi beton dengan persentase *silica fume* 5% didapatkan 0,83 cm, dan variasi beton dengan persentase *silica fume* 10% didapatkan 0,8 cm.

Hasil Pengujian Kuat Tekan

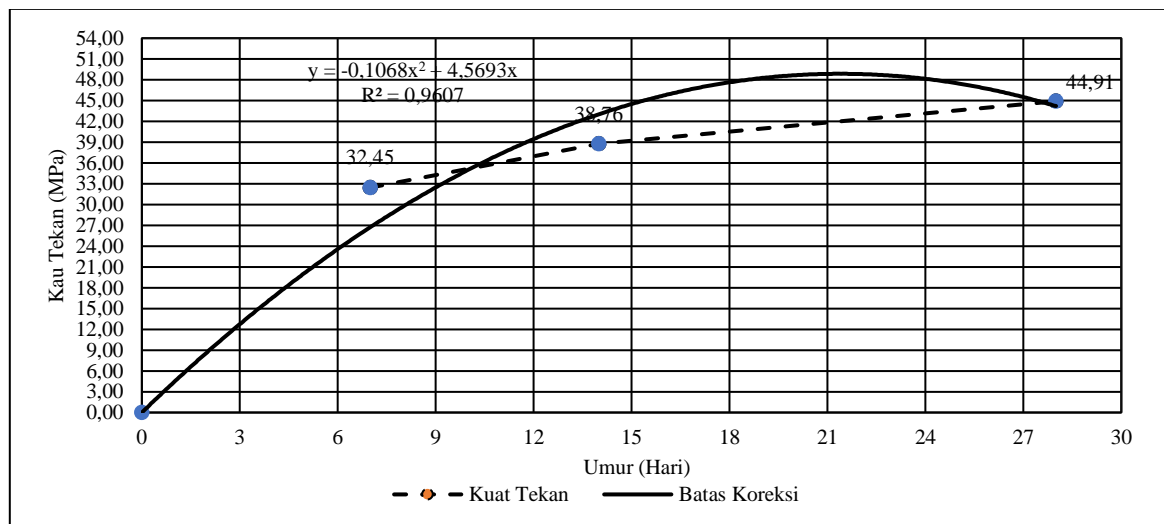
Pengujian kuat tekan beton dilakukan sesuai dengan umur yang sudah ditentukan yaitu 7, 14, dan 28 hari. Pengujian kuat tekan benda uji ini dilakukan bertujuan untuk memperoleh nilai kuat tekan beton terhadap benda uji yang sudah dibuat.

1. Variasi Beton Normal

Hasil pengujian kuat tekan benda uji variasi beton normal dapat dilihat pada **Tabel 5** dan grafik pengujian kuat tekan dapat dilihat pada **Gambar 1**.

Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Tekan Variasi Beton Normal

Kode Benda Uji	Berat (gram)	Volume Silinder (m ³)	Tanggal		Umur Hari	Beban kN	Kuat Tekan Beton MPa	Rata-rata Kuat Tekan MPa	Standar Deviasi Mpa	Koefisien Variasi %
			Buat	Uji						
N	12,38	0,00529	28/5/24	3/6/24	7	638,569	29,03	32,45	3,28	0,101
	12,46	0,00529	28/5/24	3/6/24		578,478	32,74			
	12,35	0,00529	28/5/24	3/6/24		512,946	35,57			
N	12,34	0,00529	12/6/24	25/6/24	14	724,815	33,21	38,76	4,83	0,124
	12,55	0,00529	12/6/24	25/6/24		586,914	41,02			
	12,49	0,00529	12/6/24	25/6/24		742,873	42,04			
N	12,8	0,00529	28/5/24	24/6/24	28	772,667	43,72	44,91	1,03	0,022
	12,67	0,00529	28/5/24	24/6/24		804,923	45,55			
	12,49	0,00529	28/5/24	24/6/24		803,389	45,46			



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Umur 7 Hari

$$\begin{aligned}
 \text{Kuat Tekan } (f_c') &= \frac{P}{A} \\
 &= \frac{804,932 \text{ kN} \times 1000}{(0,25 \times 3,14 \times 150^2)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{804.932 \text{ N}}{17.662,5} \\
 &= 45,572 \text{ n/mm}^2 \\
 &= 45,57 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

1. Rata – rata

$$\begin{aligned}
 X_{rt} &= \frac{\sum X_i}{n} \\
 &= \frac{29,03 + 32,74 + 35,57}{3} \\
 &= 32,45
 \end{aligned}$$

2. Standar Deviasi

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_{rt})^2}{n - 1}}$$

(nilai kuat tekan – rata-rata kuat tekan)²

1. $(29,03 - 32,45)^2 = 11,696$

2. $(32,74 - 32,45)^2 = 0,084$

3. $(35,57 - 32,45)^2 = 9,734$

$Total = 11,696 + 0,084 + 9,734 = 21,514$

$$Sd = \sqrt{\frac{21,514}{3 - 1}} = \sqrt{\frac{21,514}{2}} = 3,279 \text{ kgf/cm}^2$$

3. Koefisien Variasi

$$\begin{aligned}
 \text{Kovarian} &= \frac{Sd}{X_{rt}} \times 100\% \\
 &= \frac{3,279}{32,45} \times 100 \\
 &= 0,101
 \end{aligned}$$

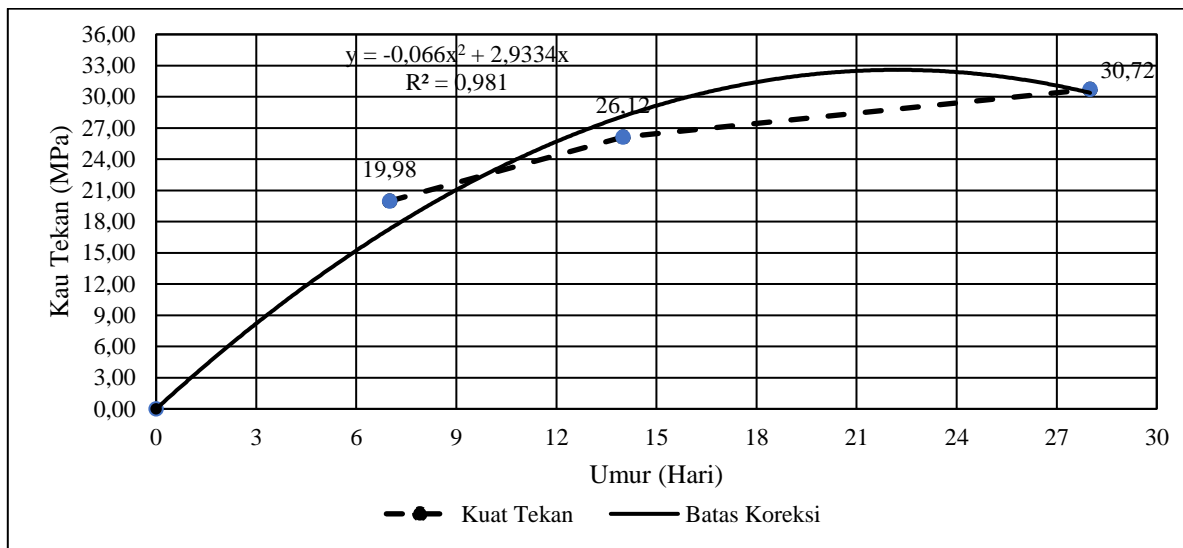
Dari **Tabel 5** didapatkan hasil pengujian kuat tekan untuk benda uji umur 7, 14 dan 28 hari. Grafik pada **Gambar 1** menunjukkan bahwa hasil pengujian kuat tekan untuk variasi beton normal mengalami peningkatan pada setiap umurnya dan telah memenuhi mutu rencana 41 MPa, dimana rata – rata kuat tekan 7 hari sebesar 32,44 MPa dengan standar deviasi 3,28 MPa dan koefisien variasi sebesar 0,101%. Pengujian kuat tekan pada umur 14 hari mengalami peningkatan dengan tekan rata – rata kuat tekan sebesar 38,76 MPa dengan standar deviasi sebesar 4,83 MPa dan koefisien variasi sebesar 0,124%. Pengujian kuat tekan pada umur 28 hari mengalami peningkatan dengan nilai kuat tekan rata – rata sebesar 44,91 MPa dengan standar deviasi sebesar 1,03 MPa dan koefisien variasi sebesar 0,022%. Berikut contoh perhitungan nilai kuat tekan variasi beton normal dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

2. Variasi Beton dengan *Silica Fume* 5%

Hasil pengujian kuat tekan benda uji variasi beton normal dapat dilihat pada **Tabel 6** dan grafik pengujian kuat tekan dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Tabel 6. Pengujian Kuat Tekan Variasi Beton dengan *Silica Fume* 5%

Kode Benda Uji	Berat (gr)	Volume Silinder (m ³)	Tanggal		Umur Hari	Beban kN	Kuat Tekan Beton Mpa	Rata-rata Kuat Tekan Mpa	Standar Deviasi MPa	Koefisien Variasi %
			Buat	Uji						
SF 5%	11,86	0,00529	6/6/24	12/6/24	7	318,02	17,543	19,98	7,99	0,399
	12,35	0,00529	6/6/24	12/6/24		341,38	19,32			
	12,04	0,00529	6/6/24	12/6/24		407,83	23,08			
SF 5%	12,49	0,00529	6/6/24	19/6/24	14	446,11	25,25	26,12	1,26	0,048
	12,17	0,00529	6/6/24	19/6/24		454,80	25,74			
	11,99	0,00529	6/6/24	19/6/24		484,02	27,39			
SF 5%	12,45	0,00529	6/6/24	3/7/24	28	518,48	28,887	30,72	2,88	0,093
	12,04	0,00529	6/6/24	3/7/24		569,80	32,24			
	12,70	0,00529	6/6/24	3/7/24		548,18	31,021			



Gambar 2. Grafik Pengujian Kuat Tekan Variasi Beton dengan *Silica Fume* 5%

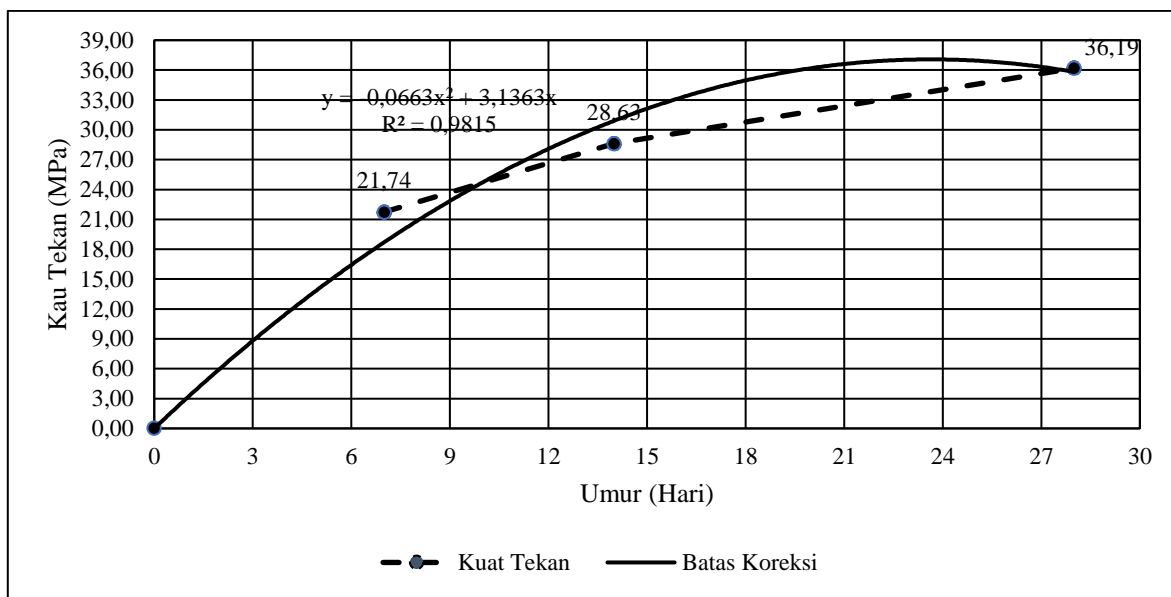
Dari **Tabel 6** didapatkan hasil pengujian kuat tekan untuk benda uji umur 7, 14 dan 28 hari. Grafik pada **Gambar 2** menunjukkan bahwa hasil pengujian kuat tekan untuk variasi beton dengan *silica fume* 5% mengalami peningkatan pada setiap umurnya. Namun, mengalami penurunan nilai kuat tekan yang drastic dari variasi beton normal. Benda uji variasi *silica fume* 5% tidak memenuhi mutu rencana 41 MPa, dimana rata – rata kuat tekan umur 7 hari sebesar 19,98 MPa dengan standar deviasi 4,99 MPa dan koefisien variasi sebesar 0.399%. Nilai kuat tekan pada umur 14 hari mengalami peningkatan dibandingkan dengan benda uji umur 7 hari dengan kuat tekan rata – rata sebesar 26.12 MPa dengan standar deviasi sebesar 1.26 MPa dan koefisien variasi sebesar 0.048%. Pengujian kuat tekan pada umur 28 hari mengalami peningkatan dibandingkan dengan benda uji umur 14 hari dengan kuat tekan rata – rata sebesar 30.72 MPa dengan standar deviasi sebesar 2.88 MPa dan koefisien variasi sebesar 0.093%.

3. Variasi Beton dengan *Silica Fume* 10%

Hasil pengujian kuat tekan benda uji variasi beton normal dapat dilihat pada **Tabel 7** dan grafik pengujian kuat tekan dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Tabel 7. Pengujian Kuat Tekan Variasi Beton dengan *Silica Fume* 10%

Kode Benda Uji	Berat (gr)	Volume Silinder (m ³)	Tanggal		Umur Hari	Beban kN	Kuat Tekan Beton MPa	Rata-rata Kuat Tekan MPa	Standar Deviasi MPa	Koefisien Variasi %
			Buat	Uji						
SF 10%	12,3	0,00529	11/6/24	17/6/24	7	370,33	20,96	21.74	1.38	0.063
	12,36	0,00529	11/6/24	17/6/24		412,47	23,34			
	12,19	0,00529	11/6/24	17/6/24		369,87	20,93			
SF 10%	12,41	0,00529	11/6/24	24/6/24	14	465,99	26,37	28.63	2.01	0.070
	12,16	0,00529	11/6/24	24/6/24		519,13	29,32			
	12,31	0,00529	11/6/24	24/6/24		533,69	30,20			
SF 10%	12,22	0,00529	11/6/24	8/7/2024	28	631,45	35,73	36.19	0,60	0,016
	12,18	0,00529	11/6/24	8/7/2024		635,96	35,96			
	12,22	0,00529	11/6/24	8/7/2024		651,45	36,86			



Gambar 3. Grafik Pengujian Kuat Tekan Variasi Beton dengan *Silica Fume* 10%

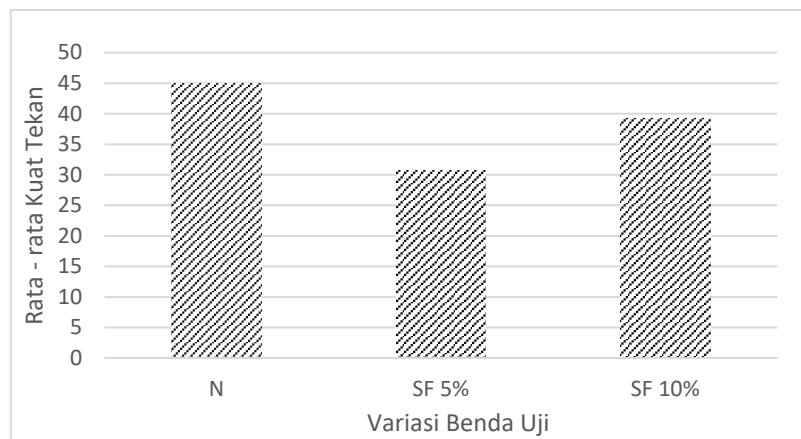
Dari **Tabel 7** didapatkan hasil pengujian kuat tekan untuk benda uji umur 7, 14 dan 28 hari. Grafik pada **Gambar 3** menunjukkan bahwa hasil pengujian kuat tekan untuk variasi beton dengan *silica fume* 10% mengalami peningkatan pada setiap umurnya. Namun, mengalami penurunan nilai kuat tekan dari variasi beton normal. Benda uji variasi *silica fume* 10% tidak memenuhi mutu rencana 41 MPa, dimana rata-rata kuat tekan umur 7 hari sebesar 21,74 MPa dengan standar deviasi 1.38 MPa dan koefisien variasi sebesar 0,063%. Nilai kuat tekan pada umur 14 hari mengalami peningkatan dibandingkan dengan benda uji umur 7 hari dengan kuat tekan rata-rata sebesar 28,63 MPa dengan standar deviasi sebesar 2,01 MPa dan koefisien variasi sebesar 0.07%. Pengujian kuat tekan pada umur 28 hari mengalami peningkatan dibandingkan dengan benda uji umur 14 hari dengan kuat tekan rata-rata sebesar 36,19 MPa dengan standar deviasi sebesar 2.88 MPa dan koefisien variasi sebesar 0.093%. Variasi beton dengan *silica fume* 10% mengalami peningkatan kuat tekan dari variasi beton dengan *silica fume* 5%.

Rekapitulasi Hasil Kuat Tekan

Dari seluruh pengujian kuat tekan yang telah dilakukan, diperoleh rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton semua variasi dari setiap umur beton. Hasil rekapitulasi tersebut dapat dilihat pada **Tabel 8** dan grafik hasil rekapitulasi dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Tabel 8. Hasil Rekapitulasi Kuat Tekan

Kode Campuran	Nilai Kuat Tekan Beton (MPa)		
	7 Hari	14 Hari	28 Hari
N	32,45	38,76	44,91
SF 5%	19,98	26,12	30,72
SF 10%	21,74	28,63	36,19



Gambar 4. Rata – rata Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari

Dari **Tabel 4.** rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan diatas didapatkan nilai rata – rata kuat tekan pada benda uji variasi normal mendapatkan nilai tertinggi dibandingkan dengan variasi benda uji dengan bahan tambah *silica fume* 5% dan 10% yang mengalami penurunan secara signifikan. Dimana penurunan nilai kuat tekan tersebut disebabkan karena besarnya persentase bahan tambah *silica fume* dan ukuran agregat kasar tidak sesuai. Dimana semakin tinggi persentase *silica fume* maka nilai kuat tekan semakin tinggi. Serta, semakin kecil ukuran agregat maka semakin mudah untuk beton mengalir dengan sendirinya dan beton menjadi lebih kuat.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan *silica fume* pada beton *self compacting concrete* dapat mempengaruhi kuat tekan benda uji. Benda uji dengan variasi beton normal memiliki rata – rata kuat tekan yang tinggi pada umur 28 hari sebesar 44.91 MPa. Sehingga, nilai kuat tekan ini memenuhi nilai kuat tekan yang direncanakan. Namun, pada benda uji variasi beton dengan *silica fume* 5% pada umur 28 hari mengalami penurunan mutu yang drastis yaitu dengan rata – rata kuat tekan sebesar 30.72 MPa. Sehingga, nilai kuat tekan ini tidak memenuhi nilai kuat tekan yang direncanakan. Pada pada benda uji variasi beton dengan *silica fume* 10% pada umur 28 hari mengalami peningkatan nilai kuat tekan sebesar 36,19 MPa. Namun, walaupun mengalami peningkatan kuat tekan dari benda uji dengan *silica fume* 5%, namun kuat tekan tersebut tidak sesuai dengan kuat tekan rencana. Kesimpulannya, semakin tinggi persentase *silica fume* kuat tekan semakin tinggi. Namun, harus diperhatikan kembali kualitas dan ukuran agregat yang sesuai dengan karakteristik beton.

Berdasarkan kesimpulan hasil penelitian, maka dapat dikemukakan saran diantaranya.

1. Penerapan dilapangan harus dilakukan secara makssimal dan teliti, jika terjadi kesalahan sedikit saja dapat menyebabkan penurunan kualitas beton dan terjadi bleeding yang dapat mempengaruhi nilai kuat tekan beton.
2. Pemilihan kualitas material dan penggunaan persentase bahan tambah harus diperhatikan kembali agar mendapatkan hasil yang maksimal.
3. Sebaiknya perlu dilakukan penelitian lanjutan mengenai metode yang digunakan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. J. Bina Marga, Spesifikasi Khusus - Interim SKh-1.7.23 Beton Memadat Sendiri (Self Compacting Concrete), JAKARTA SELATAN: Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017.
- [2] B. S. Nasional, SNI 2847:2013, Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, Jakarta : Badan Standarisasi Nasional, 2013.
- [3] K. Rusyandi, J. Mukodas dan Y. Gunawan, “Perancangan Beton Self Compacting Concrete (Beton Memadat Sendiri) Dengan Penambahan Fly Ash dan Structuro,,” *Jurnal Konstruksi*, vol. 10, 2012.
- [4] J. Kalompo, "3.1 Beton SCC (Self Compacting Concrete)," 2017. [Online]. Available: <https://e-journal.uajy.ac.id/11926/4/TS145023.pdf>. [Accessed Tuesday July 2024].

ANALISIS KESELAMATAN JALAN DENGAN PENDEKATAN AUDIT KESELAMATAN JALAN PADA JALAN LOKAL DI KOTA TEGAL

Bani Irsyad¹, Raudina Rillawani Putri², *Suprpto Hadi³, Salsabilla Varadinta⁴, Muhammad Rifqi Nazzaya⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Rekayasa Sistem Transportasi Jalan, Politeknik Keselamatan Transportasi Jalan, Kota Tegal

^{*)}Email: hadi@pktj.ac.id

ABSTRACT

Road Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni, which is located in Tegal City, Central Java, is a road with a secondary local function which is an alternative way to get to primary arterial roads. By being an alternative road, this road section must meet adequate road safety standards. To improve road safety, it is necessary to carry out road safety audits. This research aims to see the level of road safety in Tegal City, specifically on the Road Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni. Descriptive quantitative methods were applied to research obtained from the Hawkeye survey and processed using the Hawkeye Processing Toolkit software to analyze the data. The research results show that the Road Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni, in the aspect of road equipment facilities, there are 7 road equipment facilities in a damaged condition, in the aspect of the level of road unevenness in the medium category it has a percentage of 45% of the total length of the road section, and for the aspect of the transverse slope on the Road Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni has not met the standard for the transverse slope of asphalt pavement. Increasing safety on the Road Sultan Hasanudin is carried out by handling and further improving road equipment and road pavement facilities, so that on the Road Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni does not have the potential to cause traffic accidents due to deficiencies in road infrastructure or dangerous road conditions.

Keyword: Safety, Audit, Hawkeye, IRI

ABSTRAK

Ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni yang terletak di Kota Tegal, Jawa Tengah merupakan salah satu jalan dengan fungsi lokal sekunder yang menjadi alternatif untuk menuju ke ruas jalan arteri primer. Dengan menjadi jalan alternatif, ruas jalan ini harus memenuhi standar keselamatan jalan yang memadai. Untuk meningkatkan keselamatan jalan perlu dilakukan audit keselamatan jalan. Penelitian ini bertujuan untuk melihat tingkat keselamatan jalan di Kota Tegal tepatnya pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni. Metode kuantitatif deskriptif diterapkan pada penelitian yang diperoleh dari survei *Hawkeye* dan diolah menggunakan software *Hawkeye Processing Toolkit* untuk menganalisa datanya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni pada aspek fasilitas perlengkapan jalan terdapat sebanyak 7 fasilitas perlengkapan jalan dalam kondisi rusak, pada aspek tingkat ketidakrataan jalan pada kategori sedang memiliki prosentase sebanyak 45% dari total panjang ruas jalan, dan untuk aspek dari kemiringan melintang pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni belum memenuhi standar kemiringan melintang perkerasan aspal. Peningkatan keselamatan pada ruas Jalan Sultan Hasanudin dilakukan dengan penanganan dan perbaikan lebih lanjut terhadap fasilitas perlengkapan jalan dan perkerasan jalan, sehingga pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni tidak berpotensi menyebabkan kecelakaan lalu lintas akibat adanya defisiensi infrastruktur jalan atau kondisi jalan yang membahayakan.

Kata kunci: Keselamatan, Audit, *Hawkeye*, IRI

1. PENDAHULUAN

Kota Tegal terletak di Provinsi Jawa Tengah dengan luas daerah sebesar 39,68 km² dan populasi sebanyak 292.778 jiwa pada tahun 2023. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kota Tegal, angka kecelakaan lalu lintas di Kota Tegal saat tahun 2022 tercatat sebanyak 379 kasus, sedangkan pada tahun 2021 sebanyak 272 kasus. Faktor terbesar yang menyebabkan kecelakaan adalah manusia (92%), kendaraan (5%), dan infrastruktur jalan dan lingkungan (3%) [1]. Sekitar 35% insiden kecelakaan di jalan raya terjadi akibat adanya hubungan antara manusia dan kondisi permukaan jalan [2]. Studi telah menunjukkan bahwa kondisi perkerasan jalan dan kekesatan jalan berkontribusi terhadap keselamatan serta tingkat kecelakaan lalu lintas [3]. Masalah keselamatan yang menjadi pemicu kecelakaan lalu lintas harus diperbaiki oleh otoritas jalan dalam tahapan operasi dan pemeliharaan dengan tujuan untuk mengantisipasi kecelakaan lalu lintas terjadi kembali di tempat yang sama [4]. Ruas Jalan Sultan Hasanudin – Jalan KH. Abdul Ghoni yang terletak di Kota Tegal, Jawa Tengah merupakan salah satu jalan dengan fungsi lokal sekunder yang menjadi alternatif untuk menuju ke ruas jalan arteri primer. Dengan menjadi jalan alternatif, ruas jalan ini harus memenuhi standar keselamatan jalan yang memadai. Dengan demikian, ruas jalan ini dapat menjadi alternatif yang lebih aman bagi pengguna jalan dan menurunkan risiko kecelakaan lalu lintas [5]. Oleh karena itu perlu adanya audit keselamatan jalan yang berguna untuk menentukan kemungkinan terjadinya kecelakaan akibat kondisi jalan [6]. Menurut Direktorat Jenderal Bina Marga Tahun 2024 Audit Keselamatan Jalan

(AKJ) merupakan aktivitas pemeriksaan formal terhadap potensi kecelakaan dan kinerja keselamatan dari suatu perencanaan jalan atau jalan yang telah terbangun. Audit Keselamatan Jalan (AKJ) berfokus pada perbaikan geometri, struktur bangunan, dan fasilitas pendukung jalan yang dapat menimbulkan konflik lalu lintas dan kecelakaan [7].

Penelitian ini bertujuan untuk melihat tingkat keselamatan jalan di Kota Tegal tepatnya pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni dengan menggunakan mobil *Hawkeye* 2000 series, dengan adanya penelitian ini dapat mengetahui apakah Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni memiliki ciri-ciri jalan yang berkeselamatan, dengan melihat dari faktor ketidakrataan jalan, fasilitas perlengkapan jalan, dan geometrik jalan.

Fasilitas Perlengkapan Jalan

Fasilitas perlengkapan jalan dibangun dengan tujuan untuk meningkatkan keselamatan berlalu lintas dan memudahkan mobilitas para pengguna jalan. Fasilitas ini memberikan informasi kepada pengguna jalan mengenai aturan dan petunjuk yang diperlukan untuk menciptakan aliran lalu lintas yang aman, teratur, dan efisien. [8].

Nilai IRI/ Ketidakrataan Jalan

IRI atau ketidakrataan jalan merupakan ukuran ketidakrataan permukaan jalan. Nilai ini didapatkan dengan menghitung total naik turunnya permukaan jalan secara memanjang, lalu membaginya dengan Panjang ruas jalan yang diukur. Penting untuk mengukur tingkat kekesatan jalan karena bentuk permukaan jalan yang tidak sempurna dapat mengakibatkan kendaraan bergetar saat melintasi ruas jalan tersebut. [10]. Berikut merupakan hubungan nilai IRI dengan kondisi ketidakrataan jalan yang ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 8. Hubungan Nilai IRI Dengan Kondisi Jalan

Kondisi Jalan	IRI (m/km)	Kebutuhan Penanganan
Baik	IRI rata-rata ≤ 4	Pemeliharaan Rutin
Sedang	$4 \leq$ IRI rata-rata ≤ 8	Pemeliharaan Berkala
Rusak Ringan	$8 \leq$ IRI rata-rata ≤ 12	Peningkatan Jalan
Rusak Berat	IRI rata-rata > 12	Peningkatan Jalan

Sumber: Panduan Survei Kondisi Jalan Direktorat Jenderal Bina Marga 2011

Kemiringan Normal Perkerasan Jalan

Kemiringan melintang perkerasan jalan pada jalan lurus di Indonesia menurut Bina Marga dalam Pedoman Desain Geometrik Jalan Nomor 20/SE/Db/2021. Jenis perkerasan ditunjukkan pada tabel 2.

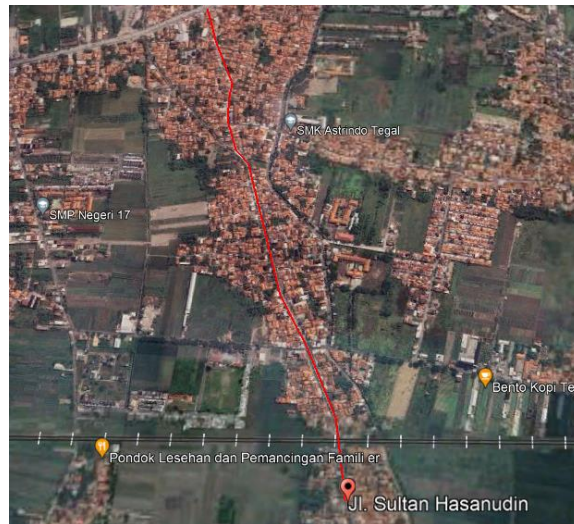
Tabel 9. Kemiringan Melintang Perkerasan Tipikal Pada Jalan Lurus

Jenis Perkerasan	Kemiringan Melintang (%)
Tanah Liat	5
Kerikil (Gravel) Water bound macadam	4
Burtu / Burda	3
Aspal	2-3
Beton Semen	2

Sumber: Pedoman Desain Geometrik Jalan, 2021

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan pada jalan lokal di daerah Kota Tegal. Metode yang digunakan yaitu kuantitatif deskriptif. Survei dilakukan pada ruas Jalan Sultan Hasanudin sampai Jalan KH. Abdul Ghoni dengan total panjang ruas jalan 1.850 meter. Untuk survei ruas jalan terbagi menjadi 2 jalur yaitu normal (Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni) dan opposite (Jalan KH. Abdul Ghoni – Sultan Hasanudin). Berikut merupakan rute ruas jalan yang di survei terlihat pada gambar 1.



Gambar 6. Rute Lokasi Penelitian Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni

Dalam penelitian ini, berikut merupakan langkah-langkah penelitian yang dilakukan:




- a. Data primer yang diperoleh dari survei mencakup geometrik jalan, kondisi ketidakrataan jalan, dan inventaris jalan.
- b. Hasil data yang diperoleh dari survei *Hawkeye* akan diolah menggunakan software *Hawkeye Processing Toolkit*.
- c. Penyajian data IRI melibatkan hasil pengamatan dalam bentuk skala tertentu. Skala ini memperlihatkan tingkat ketidakrataan permukaan jalan yang dapat dirasakan oleh pengguna jalan.
- d. Analisis nilai kemiringan melintang, hasil nilai yang diperoleh dari survei *Hawkeye* berupa nilai *cross slope* yang menggambarkan kemiringan suatu perkerasan jalan eksisting.




3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Fasilitas Perlengkapan Jalan

Fasilitas perlengkapan jalan dilaksanakan dengan memanfaatkan kendaraan *Hawkeye* 2000 series. Hasil dari inspeksi ini menghasilkan informasi sebagai berikut.

Tabel 10. Fasilitas Perlengkapan Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni

No	Daftar Periksa	Jumlah	Kondisi		Dokumentasi	
			Baik	Buruk	Baik	Buruk
1	Rambu Lalu Lintas	17	11	6	-	-
	a. Peringatan	13	7	6		
	b. Perintah	-	-	-	-	-
	c. Larangan	2	2	-		-

No	Daftar Periksa	Jumlah	Kondisi		Dokumentasi	
			Baik	Buruk	Baik	Buruk
	d. Petunjuk	2	2	-		-
2	Marka Jalan	-	-	-	-	-
3	Penerangan Jalan Umum	31	31	-		-
4.	Road Stud	-	-	-	-	-
5.	Lampu Lalu Lintas	-	-	-	-	-
6.	Alat Pengendali dan Pengaman Pengguna Jalan	1	-	1	-	-
	a. Guardrail	-	-	-	-	-
	b. Speed Bump	-	-	-	-	-
	c. Cermin Tikungan	1	-	1	-	
	d. Patok Lalu Lintas	-	-	-	-	-
	e. Rumble Strip	-	-	-	-	-

Sumber: Analisis, 2024

Fasilitas perlengkapan jalan yang terdapat di ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni yaitu terdapat 17 rambu lalu lintas, 31 PJU, dan 1 cermin tikungan. Dari total 17 buah rambu lalu lintas, 31 PJU dan 1 alat pengendali dan pengaman pengguna jalan yang terdapat pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni, terdapat sebanyak rambu lalu lintas kondisi rusak dan 1 cermin tikungan dalam kondisi rusak. Hal tersebut perlu adanya pemeliharaan dan perbaikan secara rutin pada fasilitas perlengkapan jalan di ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH Abdul Ghoni.

Nilai IRI/ Ketidakrataan Jalan

Berikut merupakan data nilai IRI yang diperoleh melalui survei yang dilakukan dengan mobil *Hawkeye 2000* series:

Tabel 4. Ketidakrataan Permukaan Jalan Eksisting Ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni

Keterangan Kondisi Jalan	Panjang Ruas Jalan (m)
Baik	730
Sedang	830
Rusak Ringan	190
Rusak Berat	100

Sumber: Analisis, 2024

Kondisi jalan pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni pada jalur normal sebagian besar termasuk dalam kategori sedang, yaitu sepanjang 830 meter atau 45% dari total panjang ruas, termasuk dalam kategori kondisi sedang.

Tabel 5. Ketidakrataan Permukaan Jalan Eksisting Ruas Jalan KH. Abdul Ghoni – Sultan Hasanudin

Keterangan Kondisi Jalan	Panjang Jalan (m)
Baik	1.100
Sedang	600
Rusak Ringan	90
Rusak Berat	60

Sumber: Analisis, 2024

Kondisi jalan pada ruas Jalan KH. Abdul Ghoni – Sultan Hasanudin pada jalur opposite sebagian besar termasuk dalam kategori baik, yaitu sepanjang 1,1 kilometer atau 59,5% dari total panjang ruas, termasuk dalam kategori kondisi baik.

Kemiringan Normal Perkerasan Jalan

Pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni termasuk jenis perkerasan beton dan aspal. Sesuai dengan Surat edaran Nomor: 20/SE/Db/2021 Tentang Pedoman Desain Geometrik Jalan Kementerian PUPR Direktorat Jenderal Bina Marga dengan nilai kemiringan melintang yaitu 2-3%. Hasil survei kemiringan melintang menggunakan mobil *Hawkeye 2000 series* akan ditunjukkan pada tabel 6.

Tabel 6. Nilai Kemiringan Melintang Jalan Eksisting

Jalur Ruas Jalan	Nilai Kemiringan Melintang (<i>Cross Slove</i>)
Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni (Normal)	0,61
Jalan KH. Abdul Ghoni – Sultan Hasanudin (Opposite)	0,99

Sumber: Analisis, 2024

Berdasarkan hasil survei menggunakan mobil *Hawkeye 2000 series*, pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni pada jalur normal memiliki nilai rata-rata *cross slove* 0,61 sehingga dapat dikatakan sepanjang jalan tersebut terdapat kemiringan melintang yang belum memenuhi standar kemiringan melintang yaitu 2-3%. Sedangkan pada ruas Jalan KH. Abdul Ghoni – Sultan Hasanudin pada jalur opposite memiliki nilai rata-rata *cross slove* 0,99 sehingga dapat dikatakan sepanjang jalan tersebut belum memenuhi standar kemiringan melintang pada perkerasan aspal dan beton sesuai Pedoman Desain Geometrik Jalan.

Pembahasan

Pada hasil audit keselamatan yang telah dilakukan menggunakan mobil *Hawkeye 2000 series* pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni terdapat pada aspek dari fasilitas perlengkapan jalan terdapat 7 fasilitas perlengkapan jalan dalam kondisi buruk, sedangkan pada aspek IRI pada jalur normal termasuk dalam kategori sedang, dan untuk aspek dari kemiringan melintang jalan belum memenuhi standar kemiringan melintang perkerasan aspal. Hasil dari pembahasan dapat ditentukan bahwa ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni termasuk dalam kondisi tidak baik. Hal ini perlu adanya peningkatan keselamatan pada ruas Jalan Sultan Hasanudin dengan dilakukan penanganan dan perbaikan lebih lanjut terhadap fasilitas perlengkapan jalan dan perkerasan jalan, sehingga pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni tidak berpotensi menyebabkan kecelakaan lalu lintas akibat adanya defisiensi infrastruktur jalan atau kondisi jalan yang membahayakan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dari analisis dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil survei fasilitas perlengkapan jalan terdapat sebanyak 6 rambu lalu lintas kondisi buruk dan 1 alat pengendali dan pengguna jalan dalam kondisi rusak. Hal tersebut perlu adanya pemeliharaan dan perbaikan secara berkala pada fasilitas perlengkapan jalan pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni.
2. Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni merupakan salah satu ruas jalan lokal sekunder yang memiliki tingkat kerusakan jalan dengan kondisi ketidakrataan jalan yang sedang. Analisis IRI pada arah normal

menunjukkan suatu ruas jalan dengan kondisi sedang memiliki prosentase 45% dari total panjang ruas jalan yaitu 1.850 meter. Namun terdapat jalan dalam kondisi rusak ringan dengan prosentase 10% dan rusak berat 5% artinya masih terdapat jalan yang rusak dan perlu adanya pemeliharaan secara berkala.

3. Kemiringan melintang pada ruas Jalan Sultan Hasanudin – KH. Abdul Ghoni pada jalur normal memiliki nilai rata-rata *cross slope* 0,61, dan pada jalur opposite memiliki nilai rata-rata 0,99. Sehingga dapat dikatakan sepanjang ruas jalan tersebut terdapat kemiringan melintang yang belum memenuhi standar sesuai Pedoman Desain Geometrik Jalan dengan batas kemiringan melintang yaitu 2-3%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. F. Natalia and N. L. P. S. E. Setyarini, "Audit Keselamatan Jalan Tol Kunciran-Serpong," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 3, no. 3, p. 639, 2020, doi: 10.24912/jmts.v3i3.8387.
- [2] N. L. P. S. E. Setyarini and M. G. Virgantara, "Audit Keselamatan Jalan Tol Tangerang - Merak," *J. Muara Sains, Teknol. Kedokt. dan Ilmu Kesehat.*, vol. 5, no. 1, p. 135, 2021, doi: 10.24912/jmstkik.v5i1.9057.
- [3] D. Puspaningtyas, "Audit Keselamatan Jalan Untuk Penanganan Kawasan Rawan Kecelakaan Lalu Lintas Di Ruas Jalan Poros Kolaka-Tanggetada," vol. 4, no. 2, pp. 91–100, 2023.
- [4] F. Suwanto and A. Nugroho, "Audit Keselamatan Jalan Sebagai Dasar Implementasi Perencanaan Karakteristik Jalan," *J. Proy. Tek. Sipil*, vol. 2, no. 1, pp. 20–24, 2019, doi: 10.14710/potensi.2019.4687.
- [5] D. Syarifudin, "Inspeksi Keselamatan Jalan Di Ruas Jalan Gatot Subroto, Kota Tegal, Jawa Tengah," vol. 2, no. 2, pp. 86–92, 2024.
- [6] B. Nalendra and E. Amrina, "Rekomendasi Audit Keselamatan Jalan terhadap Bangunan Pelengkap dan Perlengkapan Jalan," *J. Talent. Sipil*, vol. 6, no. 1, p. 69, 2023, doi: 10.33087/talentsipil.v6i1.178.
- [7] A. Pembuain, V. M. Matitaputty, R. H. Waas, and Y. Pellaupessy, "Penerapan Audit Keselamatan Jalan Dan Metode Hirarc Untuk Penanganan Lokasi Rawan Kecelakaan," *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 187–198, 2024, doi: 10.24912/jmts.v7i1.27325.
- [8] Suhariyanto, "Analisis Implementasi Data Informasi Geospasial Sebagai Upaya Peningkatan Kebutuhan Perlengkapan Jalan Di Dinas Perhubungan Kabupaten Probolinggo," vol. 3, no. 4, 2020.
- [9] Pemerintah Pusat, *Undang-undang Nomor 22 Tahun 2009 tentang Lalu Lintas Dan Angkutan Jalan*. Indonesia, 2009, p. 203. [Online]. Available: [https://peraturan.bpk.go.id/Download/27961/UU Nomor 22 Tahun 2009.pdf](https://peraturan.bpk.go.id/Download/27961/UU%20Nomor%2022%20Tahun%202009.pdf)
- [10] M. A. Rahman, H. Arifin, and B. O. Sowolino, "Perbandingan Metode International Roughness Index Dengan Pavement Condition Index Untuk Penentuan Kondisi Jalan Nasional Di Kota Wamena (Studi Kasus : Ruas Jalan Wamena – Habema)," *Rang Tek. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2022, doi: 10.31869/rtej.v5i1.2702.

ANALISIS GEOTEKNIK DAN KESTABILAN LERENG TOWER SUTT PT. PLN (Studi kasus: TW. 203 Pembangunan T/L 150 KV GI KAMBANG – GI TAPAN)

Kukuh Kurniawan Dwi Sungkono¹, *Reki Arbianto², Made Eka Prayuda Pande³, Gunarso⁴

^{1,2,4}Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan, Surakarta – Indonesia

³PT. Krakatau Engineering, Cilegon, Banten - Indonesia

^{*}Email: reki.arbianto@lecture.utp.ac.id

ABSTRACT

Slope instability is caused by several lithological and structural factors, slope geometry, relative relief, ground water, as well as changes in use and land cover. Mountainous areas, development and expansion of infrastructure networks can inadvertently cause natural slope shifts, thereby negatively impacting the stability of the excavated slope. Analysis of the geotechnical properties of soil and rock is important for understanding and predicting the possibility of landslides at certain locations. Geotechnical analysis is needed to carry out slope stability analysis which is carried out using GEO5 software. Construction of T/L 150 KV GI Kambang – GI Tapan, Tower TW. 203 with a tower structure at the top of the slope. Based on these conditions, a comprehensive study is needed to analyze the stability of natural slopes due to tower loads. Soil Type, Parameters c' and ϕ' (Drained), Parameters C_u and ϕ (Undrained) and soil properties index are based on CPT test results. The Bishop, Spencer, Janbu and Morgenstern-Price methods on natural slopes, tower loads, Natural with Tower+Pile Loads, Natural Slopes with Tower+Pile Loads, Earthquake Loads produce a safe condition against failure in Short-Term (Construction) and Long-Term conditions. Term (Operational). Analysis of the Fellenius method on natural slopes and tower loads in Short-Term (Construction) and Long-Term (Operational) conditions shows unsafe conditions. The safety factors resulting from the Bishop, Spencer, Janbu and Morgenstern-Price methods do not show significant differences in values. Based on the analysis, the average safe value without earthquake load is $SF = 1.8$ and with earthquake load is $SF..$

Keyword: slope stability, tower, CPT, Geo5

ABSTRAK

Ketidakstabilan lereng disebabkan beberapa faktor litologi dan struktur, geometri lereng, relief relatif, kondisi air tanah, serta perubahan penggunaan dan tutupan lahan. Pada daerah pegunungan, pembangunan dan perluasan jaringan infrastruktur dapat secara tidak sengaja menyebabkan kondisi pergeseran lereng alami, sehingga berdampak negatif terhadap stabilitas lereng yang digali. Menganalisis sifat geoteknik tanah dan batuan sangat penting untuk memahami dan memperkirakan kemungkinan terjadinya tanah longsor di lokasi tertentu. Analisis geoteknik diperlukan dalam melakukan analisis stabilitas lereng yang dibantu menggunakan software GEO5. Pembangunan T/L 150 KV GI Kambang – GI Tapan, Tower TW. 203 pada daerah perbukitan dengan struktur tower berada pada puncak lereng. Berdasarkan kondisi ini, diperlukan studi komprehensif guna menganalisis stabilitas lereng alami akibat adanya beban tower. Jenis Tanah, Parameter c' dan ϕ' (Drained), Parameter C_u dan ϕ (Undrained) dan Indeks properties tanah didasarkan pada hasil pengujian Sondir. Metode Bishop, Spencer, Janbu dan Morgenstern-Price pada lereng alami, beban tower, Alami Dengan Beban Tower+Pile, Lereng Alami Dengan Beban Tower+Pile, Beban Gempa menghasilkan keadaan aman terhadap kegagalan di kondisi Short-Term (Construction) maupun Long-Term (Operational). Analisis metode Fellenius pada lereng alami dan beban tower kondisi Short-Term (Construction) maupun Long-Term (Operational) menunjukkan kondisi tidak aman. Faktor keamanan yang dihasilkan dari Metode Bishop, Spencer, Janbu dan Morgenstern-Price tidak menunjukkan perbedaan nilai yang signifikan. Berdasarkan analisis nilai angka aman rata-rata tanpa beban gempa sebesar $SF = 1,8$ dan dengan beban gempa sebesar $SF = 1,2$.

Kata kunci: stabilitas lereng, tower, CPT, Geo5

1. PENDAHULUAN

Pemerataan pembangunan di Indonesia terus dilakukan guna pemerataan kesejahteraan masyarakat. PT PLN (Persero) sebagai perusahaan penyedia jasa kelistrikan terbesar di Indonesia didorong untuk pemerataan infrastruktur listrik sampai ke pelosok negeri. Pembangunan infrastruktur listrik melalui proyek pembangunan Sistem Udara Tegangan Tinggi (SUTT) menghadapi banyak tantangan pada pelaksanaannya. Topografi jalur pembangunan SUTT sering kali melalui daerah-daerah perbukitan dengan lereng terjal dan berpotensi terjadi kelongsoran [1], [2]. Kegagalan pada lereng dan menyebabkan tanah longsor berdampak bahaya yang dapat menyebabkan cedera, kematian, degradasi lingkungan dan kerusakan infrastruktur [3]. Salah satu penyebab tanah longsor adalah pembebanan yang terjadi pada puncak lereng atau penggalian lereng yang mengakibatkan lereng menjadi tidak stabil [4].

Ketidak stabilan lereng disebabkan beberapa faktor litologi dan struktur, geometri lereng, relief relatif, kondisi air tanah, serta perubahan penggunaan dan tutupan lahan. Pada daerah pegunungan, pembangunan dan perluasan jaringan infrastruktur dapat secara tidak sengaja menyebabkan kondisi pergeseran lereng alami, sehingga berdampak negatif terhadap stabilitas lereng yang digali [5]. Analisis geoteknik tanah sangat penting dilakukan

untuk memahami dan memprediksi keamanan dan stabilitas lereng. Berbagai metode diusulkan untuk menentukan keamanan lereng terhadap keruntuhan, salah satunya dengan metode numerik.

Menganalisis sifat geoteknik tanah dan batuan sangat penting untuk memahami dan memperkirakan kemungkinan terjadinya tanah longsor di lokasi tertentu. Berbagai teknik telah diusulkan untuk menentukan kerentanan lereng terhadap keruntuhan, termasuk pemetaan geomorfologi, analisis statistik, dan metode numerik. Karakterisasi tanah sangat penting untuk analisis stabilitas lereng di zona bahaya tanah longsor. Hal ini dapat mencakup identifikasi struktur tanah yang mendasari, sifat tanah, dan faktor lingkungan yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan lereng. Parameter tanah geoteknik yang mempengaruhi stabilitas lereng meliputi komposisi tanah, kedalaman, ketahanan geser, porositas, permeabilitas, ukuran butir, kadar air, dan kandungan bahan organik [6].

Pembangunan T/L 150 KV GI Kambang – GI Tapan, Tower TW. 203 berada pada daerah perbukitan dengan konstruksi struktur tower berada pada puncak lereng. Gambar 1 disajikan konstruksi pondasi dan struktur tower yang berada di tepi puncak lereng. Berdasarkan kondisi ini, diperlukan studi komprehensif guna menganalisis stabilitas lereng alami akibat adanya beban tower. Selain itu data geoteknik yang dapat dilakukan adalah Sondir atau *Cone Penetrometer Test* (CPT) di lokasi tower. Analisis geoteknik diperlukan dalam melakukan analisis stabilitas lereng yang dibantu menggunakan *software GEO5*.

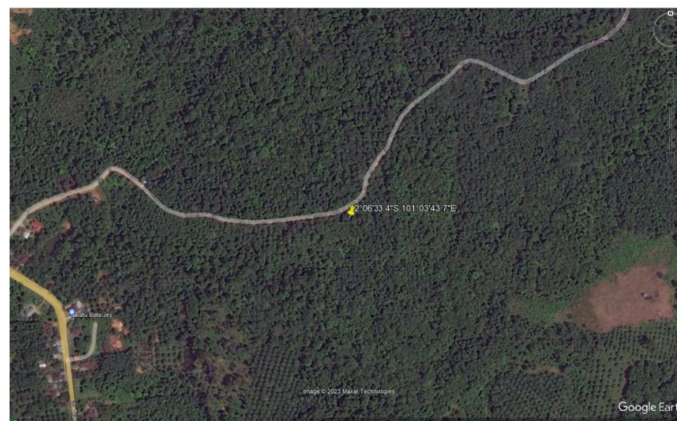


Gambar 1. Lokasi Tower TW. 203, GI Kambang – GI Tapan

2. METODE

Area Analisis

Lokasi tower yang akan dilakukan analisis adalah Tower TW.203 berada di Desa Bukit Buai Tapan, Kecamatan Basa Ampek Balai Tapan, Kabupaten Pesisir Selatan. lokasi tower TW. 203 berpotensi longsor karena jarak jurang tebing ke tower sekitar 1.4 m dengan status waspada. Koordinat tower berada pada 2°06'33.4''S dan 101°03'43.7''E disajikan pada Gambar 2.

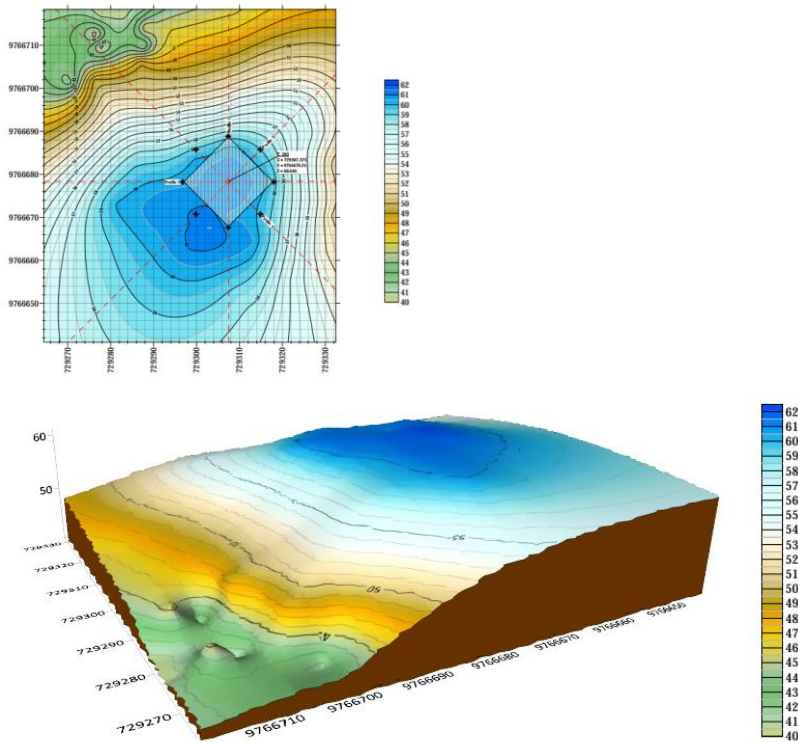


Gambar 2. Koordinat lokasi Tower TW. 203

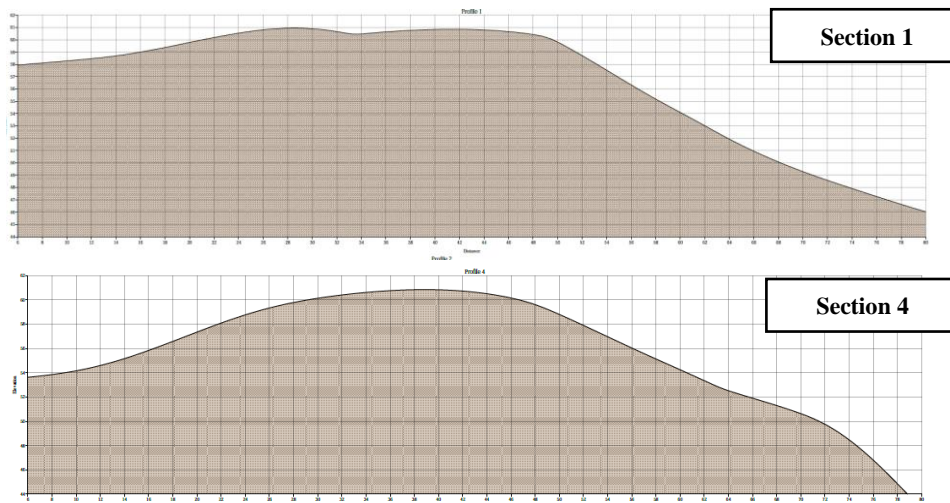
Konsep Geometris

Data yang digunakan dalam pemodelan elevasi didasarkan pada koordinat hasil pengukuran. Data kontur 2D dan 3D disajikan pada Gambar 3. Untuk analisis stabilitas lereng ditentukan menggunakan profil kemiringan yang

paling curam (kritis), yaitu *section profile* 1 dan *section profile* 4. Kondisi ini dipilih karena berpotensi atau rentan terhadap longsor atau kegagalan lereng, sehingga analisis stabilitas difokuskan pada area ini untuk memastikan keamanan dan keandalan struktur atau area tersebut. Gambar 4 menyajikan *section profile* lereng 1 dan 4.



Gambar 3. Kontur 2D dan 3D



Gambar 4. *Section profile* 1 dan 4 Tower TW. 203

Pemodelan dan Konsep Geoteknik

Faktor keamanan setiap *section* profil dievaluasi dengan interpolasi dari database yang telah ditetapkan berdasarkan model geoteknik menggunakan di GEO5. Penyelidikan tanah yang dilakukan, sebanyak dua titik sondir di Tower TW.203 untuk kebutuhan analisa lereng, yaitu titik Sondir A dan Titik Sondir B (Gambar 5). Parameter desain pada analisis didasarkan pada hasil penyelidikan tanah yang dilakukan dengan pengujian Sondir. Parameter desain diantaranya adalah:

- a. Penentuan Jenis Tanah: didasarkan pada hubungan tahanan konus dan rasio gesekan yang di rekomendasikan oleh Robertson dan Campanella, 1983 [7].

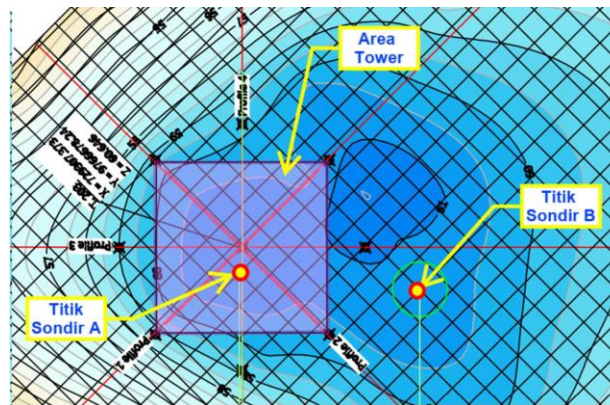
- b. Penentuan Parameter c' dan ϕ' (Drained): Korelasi q_c dengan sudut geser (ϕ') oleh Mayerhof, 1956 [8] dan korelasi q_c dengan kohesi efektif (c') tanah lempung menggunakan parameter yang ditentukan oleh software GEO5.
- c. Penentuan Parameter C_u dan ϕ (Undrained): pPenentuan parameter C_u menggunakan Persamaan 1 dan parameter ϕ berdasarkan Tabel 1.

$$C_u = \frac{q_c \sigma_v}{N_{kt}} \quad (1)$$

dimana,

- q_c tahanan konus
- σ_v tegangan efektif
- N_{kt} factor konus (10 – 18)

- d. Penentuan indeks properties tanah: properties tanah digunakan pendekatan menggunakan nilai tipikal berat volume kering & berat volume jenuh berdasarkan AS 4678-2002 dan Nilai-nilai tipikal n , e , w dan γ untuk tanah asli oleh Terzaghi, K, 1943 [9].



Gambar 5. Lokasi penyelidikan tanah Tower TW. 203

Tabel 1. Hubungan jenis tanah dan sudut geser dalam direkomendasikan oleh Braja M. Das [9]

Jenis Tanah	Sudut Geser Dalam
Kerikil kepasiran	35° – 40°
Kerikil Kerakal	35° – 40°
Pasir Padat	35° – 40°
Pasir Lepas	30°
Lempung Kelanauan	25° – 30°
Lempung	20° – 25°

Pembebanan

Beban lereng yang akan digunakan terdiri dari dua jenis beban, yaitu beban tower dan tambahan beban Gempa. Beban Tower TW.203 masuk dalam tipe Tower BB2+9 yang berasal dari beban reaksi pemodelan struktur tower. Koefisien gempa diperoleh berdasarkan Peta Zonasi Gempa di Indonesia dengan perhitungan koefisien gempa, $kh = F_{pga} \times PGA \times 0.5$. Berdasarkan nilai q_c Sondir A dan B, kondisi lapisan tanah Tower TW.203 masuk dalam kelas situs Tanah sedang (SE) dengan nilai $S_s = \leq 0,25$ Maka didapatkan nilai $F_{pga} = 2,5$ dan nilai $PGA = 0.16$ Sehingga didapatkan nilai $kh = 0.2$.

Kriteria Angka Keamanan (FK)

Analisis dilakukan dengan beberapa metode, diantaranya Bishop, Fellenius, Spencer, Janbu dan Morgenstern-Price. Kondisi lereng dianalisis berdasarkan beberapa parameter, sebagai berikut:

- a. Kondisi Lereng Alami (udrained dan drained)
- b. Kondisi Lereng dengan beban Tower (udrained dan drained)
- c. Kondisi Lereng dengan Beban Tower dan beban Gempa (undrained)
- d. Kondisi lereng dengan Beban Tower dan beban Gempa yang di berikan perkuatan (undrained)

Kriteria angka keamanan yang disyaratkan mengacu ke SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik, disajikan pada Tabel 2.

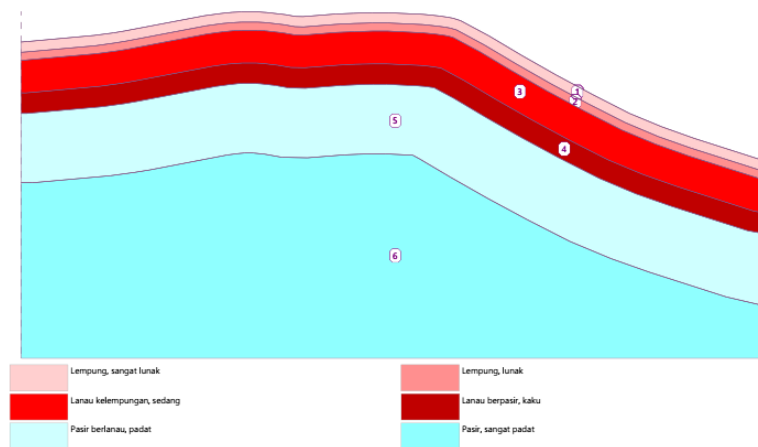
Tabel 2. Kriteria Angka Keamanan [10]

Analisis	Angka Kemanan (min.)
Short Term (During construction), <i>Undrained</i>	1.25
Long Term (Operational), <i>Drained</i>	1.5
Immediate Post-earthquake, <i>Undrained</i>	1.1

3. HASIL PEMBAHASAN

Analisis Slope Section Profile 1

Pemodelan material tanah pada simulasi numerik menggunakan Mohr-Coulumb Material Model. Penentuan parameter tanah dan parameter material perlu dilakukan analisis data, berdasarkan hasil pengujian lapangan berupa sondir. Kondisi yang digunakan adalah Undrained dan Drained. Analisis stabilitas lereng ini menggunakan metode Keseimbangan batas dengan bantuan software Geo5-Slope stability analysis. Gambar 6 merupakan pemodelan lapisan tanah pada program Geo5. Adapaun lapisan tanah 1 adalah lempung dengan konsistensi sangat lunak, tanah 2 adalah lempung lunak, tanah 3 adalah lanau kelempungan konsistensi sedang, tanah 3 adalah lanau berpasir, konsistensi kaku, tanah 5 adalah pasir berlanau, padat, tanah 6 adalah pasir sangat padat.

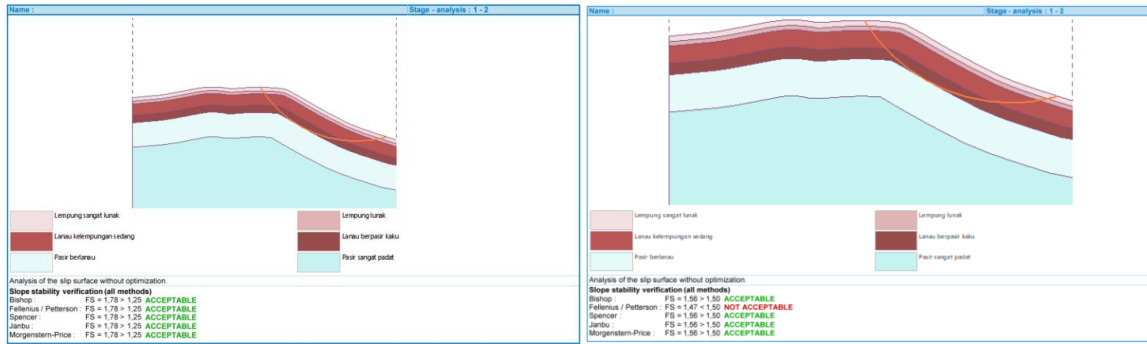


Gambar 6. Section profile 1 TW 203 pada Geo5

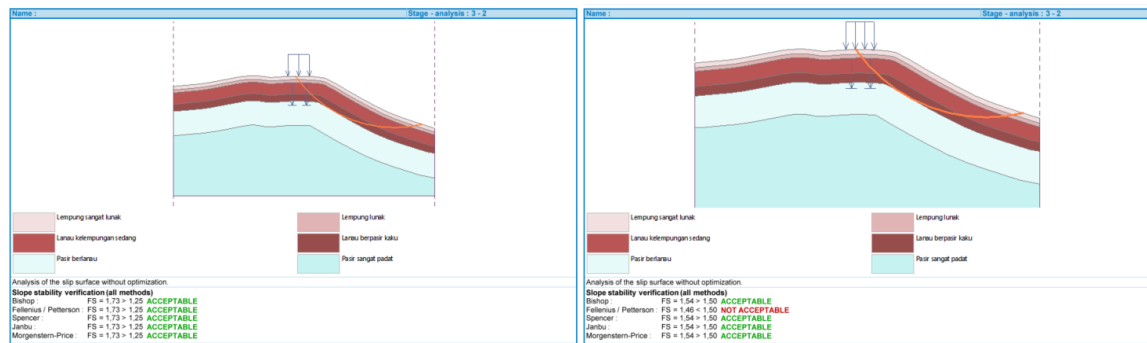
Hasil analisis stabilitas lereng pada *section profile 1* disajikan Tabel 3. Analisis lereng alami kondisi *Short-Term* dan *Long-Term* pada semua metode menunjukkan angka aman lebih dari nilai yang disyaratkan, kecuali pada metode Fellenius kondisi *Long-Term*. Analisis lereng dengan pembebanan tower dan pondasi borepile pada semua kondisi (*Short-Term* dan *Long-Term*) memenuhi angka keamanan minimum yang disyaratkan, kecuali pada metode Fellenius kondisi *Long-Term*. Angka keamanan yang lebih kecil pada metode Fellenius dipengaruhi oleh beberapa factor, diantaranya kemiringan lereng, kohesi dan nilai sudut dalam tanah [11]. Pada kondisi gempa (*Earth-quake*) lereng dengan beban tower dan pondasi borepile menunjukkan nilai keamanan yang disyaratkan. Analisis *slip surface Section Profile 1* disajikan pada Gambar 7, 8, 9 dan 10.

Tabel 3. Rekapitulasi hasil Pemodelan dan Analisis *Section Profile 1*

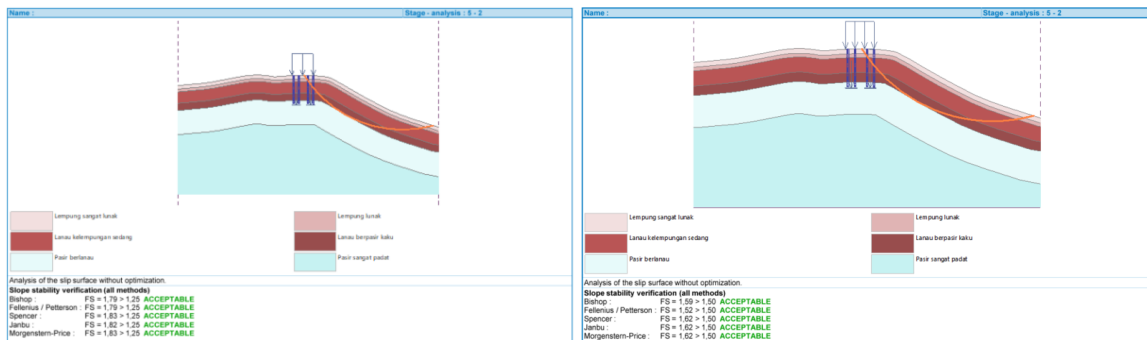
No	Tipe Pemodelan	Kondisi	Metode					Batasan angka aman	Keterangan
			Bishop	Fellenius	Spencer	Janbu	Morgenstern-Price		
1	Lereng Alami	<i>Short-Term</i>	1,78	1,78	1,78	1,78	1,78	1,25	Aman
		<i>Long -Term</i>	1,56	1,47	1,56	1,56	1,56	1,5	Aman
2	Lereng Alami dengan beban Tower	<i>Short -Term</i>	1,73	1,73	1,73	1,73	1,73	1,25	Aman
		<i>Long -Term</i>	1,53	1,46	1,54	1,54	1,54	1,5	Aman
3	Lereng Alami dengan beban Tower dengan borepile	<i>Short -Term</i>	1,79	1,79	1,83	1,82	1,83	1,25	Aman
		<i>Long -Term</i>	1,56	1,52	1,62	1,62	1,62	1,5	Aman
4	Lereng Alami dengan beban Tower dan Beban Gempa	<i>Earth-quake</i>	1,20	1,15	1,14	1,12	1,12	1,1	Aman
5	Lereng Alami dengan beban Tower dengan borepile dan Beban Gempa	<i>Earth-quake</i>	1,23	1,18	1,19	1,16	1,17	1,1	Aman



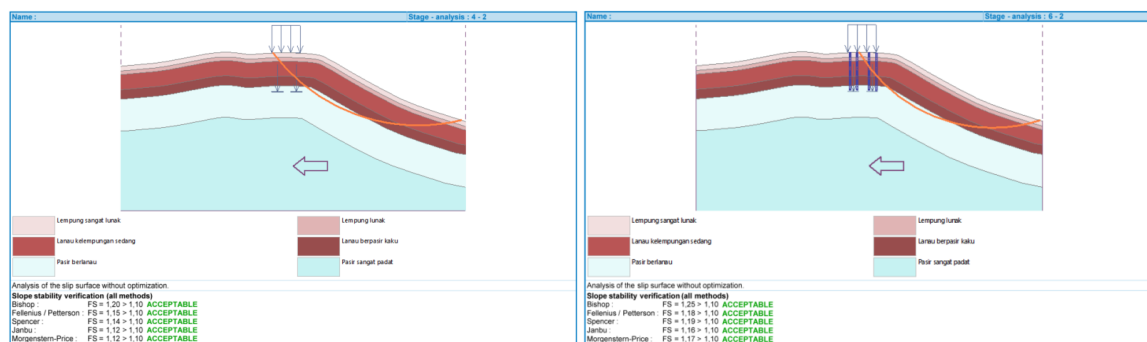
Gambar 7. Profile 1 All Method Short-Term (FK >1,25) dan Long-Term Lereng Alami (FK >1,50)



Gambar 8. Profile 1 All Method Short-Term (FK >1,25) dan Long-Term Lereng Alami dengan Beban Tower (FK >1.50)



Gambar 9. Profile 1 All Method Short-Term (FK >1,25) dan Long-Term Lereng Alami dengan Beban Tower+Pile (FK >1.50)

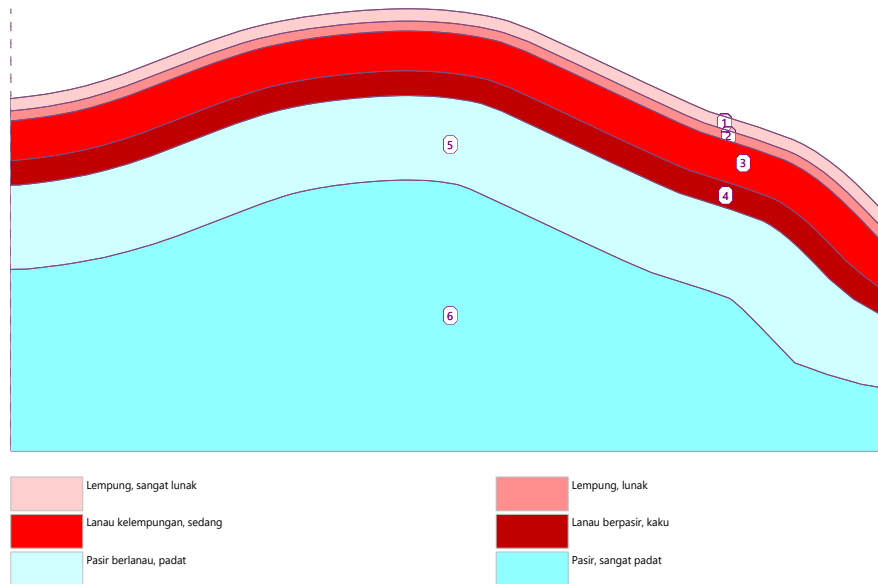


Gambar 10. Profile 1 All Method Short-Term (FK > 1.10) dan Long-Term Lereng Alami dengan Beban Tower+Pile dan Beban Gempa (FK >1.10)

Analisis Slope Section Profile 4

Gambar 11 merupakan pemodelan lapisan tanah pada program Geo5. Adapun lapisan tanah 1 adalah lempung dengan konsistensi sangat lunak, tanah 2 adalah lempung lunak, tanah 3 adalah lanau kelempungan konsistensi

sedang, tanah 3 adalah lanau berpasir dengan konsistensi kaku, tanah 5 adalah pasir padat, tanah 6 adalah pasir sangat padat.

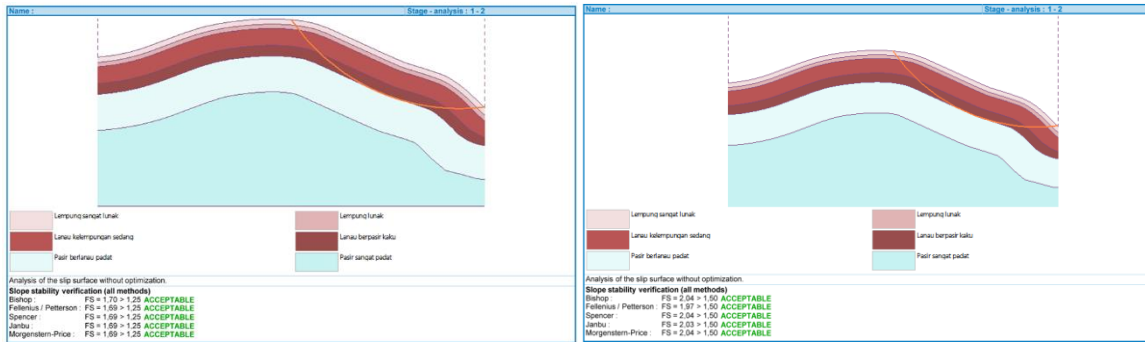


Gambar 11. Section profile 4 TW 203 pada Geo5

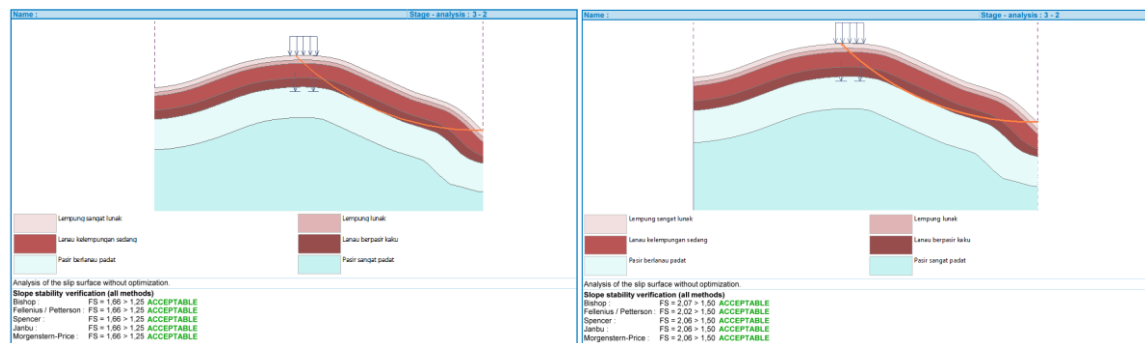
Hasil analisis stabilitas lereng pada *section profile 4* disajikan Tabel 4. Analisis lereng alami kondisi *Short-Term* dan *Long-Term* pada semua metode menunjukkan angka aman lebih dari nilai yang disyaratkan. Analisis lereng dengan pembebanan tower dan pondasi borepile pada semua kondisi (*Short-Term* dan *Long-Term*) memenuhi angka keamanan minimum yang disyaratkan. Pada kondisi gempa (*Earth-quake*) lereng dengan beban tower dan pondasi borepile menunjukkan nilai keamanan yang disyaratkan. Analisis *slip surface Section Profile 1* disajikan pada Gambar 12, 13, 14 dan 15.

Tabel 4. Rekapitulasi hasil Pemodelan dan Analisis *Section Profile 4*

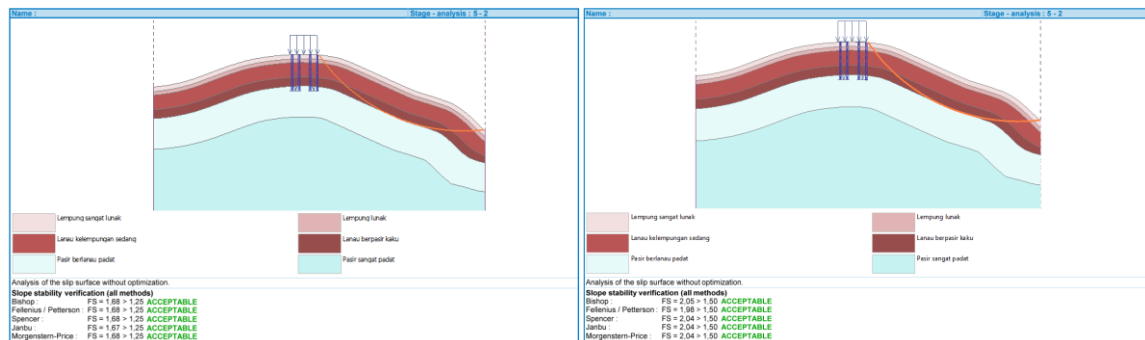
No	Tipe Pemodelan	Kondisi	Metode					Batasan angka aman	Keterangan
			Bishop	Fellenius	Spencer	Janbu	Morgenstern-Price		
1	Lereng Alami	<i>Short-Term</i>	1,7	1,69	1,69	1,69	1,69	1,25	Aman
		<i>Long -Term</i>	1,54	1,97	2,104	2,03	2,04	1,5	Aman
2	Lereng Alami dengan beban Tower	<i>Short -Term</i>	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,25	Aman
		<i>Long -Term</i>	1,54	2,02	2,06	2,06	2,06	1,5	Aman
3	Lereng Alami dengan beban Tower dengan borepile	<i>Short -Term</i>	1,68	1,68	1,68	1,67	1,68	1,25	Aman
		<i>Long -Term</i>	1,54	1,98	2,04	2,04	2,04	1,5	Aman
4	Lereng Alami dengan beban Tower dan Beban Gempa	<i>Earth-quake</i>	1,13	1,25	1,25	1,26	1,25	1,1	Aman
5	Lereng Alami dengan beban Tower dengan borepile dan Beban Gempa	<i>Earth-quake</i>	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,1	Aman



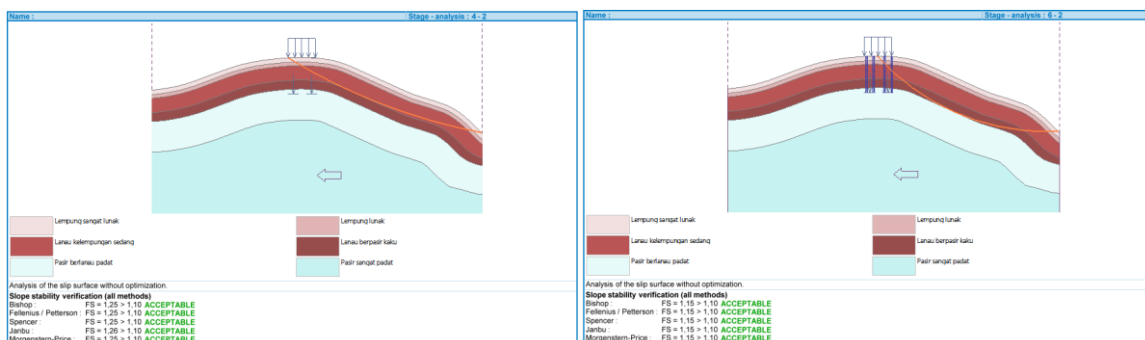
Gambar 12. Profile 4 All Method Short-Term (FK >1,25) dan Long-Term Lereng Alami (FK >1,50)



Gambar 13. Profile 4 All Method Short-Term (FK >1,25) dan Long-Term Lereng Alami Dengan Beban Tower (FK >1,50)



Gambar 14. Profile 4 All Method Short-Term (FK >1,25) dan Long-Term Lereng Alami Dengan Beban Tower+Pile (FK >1,50)



Gambar 15. Profile 4 All Method Short-Term (FK >1,10) dan Long-Term Lereng Alami Dengan Beban Tower+Pile, Dengan Beban Gempa (FK >1,1)

4. KESIMPULAN

Analisis stabilitas lereng (Section Profile 1 dan 4) mencoba berbagai kemungkinan yang terjadi. Beberapa hal yang dapat disimpulkan adalah sebagai berikut:

- a. Metode Bishop, Spencer, Janbu dan Morgenstern-Price pada lereng alami, beban tower, Alami Dengan Beban Tower+Pile, Lereng Alami Dengan Beban Tower+Pile, Beban Gempa menghasilkan keadaan aman terhadap kegagalan di kondisi *Short-Term (Construction)* maupun *Long-Term (Operational)*.
- b. Analisis metode Fellenius pada lereng alami dan beban tower kondisi *Short-Term (Construction)* maupun *Long-Term (Operational)* menunjukkan kondisi tidak aman. Dengan nilai faktor keamanan dibawah nilai yang disyaratkan.
- c. Faktor keamanan yang dihasilkan dari Metode Bishop, Spencer, Janbu dan Morgenstern-Price tidak menunjukkan perbedaan nilai yang signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. F. Robbani, S. H. Puna, W. A. Lestariningsih, and C. E. Larasati, "Analisis Perbedaan Karakteristik Geomorfologi: Studi Kasus Pesisir Ampenan, Kota Mataram dan Desa Sekotong Barat, Lombok Barat," *Geomedia Maj. Ilm. dan Inf. Kegeografian*, vol. 22, no. 1, 2024.
- [2] A. Saepudim, "Analisis geoteknik menggunakan metode geological strength index untuk kestabilan lereng penambangan PT Gunung Bumi Perkasa Sukabumi." Fakultas Sains dan Teknologi UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- [3] A. Wubalem and M. Meten, "Landslide susceptibility mapping using information value and logistic regression models in Goncha Siso Eneses area, northwestern Ethiopia," *SN Appl. Sci.*, vol. 2, no. 5, p. 807, 2020, doi: 10.1007/s42452-020-2563-0.
- [4] X. Xu, Y. Huang, Y. Xing, and Z. Guo, "Investigation of rainfall-induced toe-cut slope failure mechanisms in the southeastern coastal area of China," *Nat. Hazards*, vol. 110, Feb. 2022, doi: 10.1007/s11069-021-05011-1.
- [5] M. Shinoda, Y. Miyata, U. Kurokawa, and K. Kondo, "Regional landslide susceptibility following the 2016 Kumamoto earthquake using back-calculated geomaterial strength parameters," *Landslides*, vol. 16, no. 8, pp. 1497–1516, 2019, doi: 10.1007/s10346-019-01171-1.
- [6] S. T. D. and H. Manzoor, "Shear Strength in Preexisting Landslides," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 136, no. 7, pp. 957–962, Jul. 2010, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000308.
- [7] P. Robertson, "Interpretation of cone penetration tests - A unified approach," *Can. Geotech. J.*, vol. 46, pp. 1337–1355, Nov. 2009, doi: 10.1139/T09-065.
- [8] G. G. Meyerhof, "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils," *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 82, no. 1, pp. 861–866, 1956.
- [9] B. M. Das, *Geotechnical engineering handbook*. J. Ross publishing, 2011.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 8460: 2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik," *Standar Nas. Indones.*, pp. 1–323.
- [11] E. Aprianti, H. Pujiastuti, I. Isfanari, and E. Rahmawati, "Faktor Keamanan Lereng Jalan Raya Pusuk Kecamatan Pemenang Kabupaten Lombok Utara Menggunakan Metode Fellenius Dan Bishop," *Spektrum Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 55–62, 2021, doi: <https://doi.org/10.29303/spektrum.v8i1.201>.

JTSA

Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur

Fakultas Teknik Universitas Tunas Pembangunan Surakarta

