

PENGEMBANGAN SISTEM PEMANTAUAN KETINGGIAN AIR SUNGAI DAN DETEKSI BANJIR BERBASIS *IMAGE PROCESSING* UNTUK MONITORING REAL-TIME DENGAN EVALUASI AKURASI

Chandrasena Setiadi ¹, Tri Susilo Pamungkas ², Dodit Suprianto ³, Isa Mahfudi ⁴

^{1,2,3} Jaringan Telekomunikasi Digital, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

⁴ Teknik Telekomunikasi, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang

Jl. Soekarno Hatta No.9, Jatimulyo, Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia

chandrasenasetiadi@polinema.ac.id

ABSTRAK

Banjir merupakan salah satu bencana alam yang sering terjadi di Indonesia dan memerlukan sistem pemantauan ketinggian air yang mampu bekerja secara cepat, akurat, dan real-time sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan ketinggian air sungai dan deteksi kondisi banjir berbasis *image processing* menggunakan webcam sebagai perangkat akuisisi citra dan Raspberry Pi 5 Model B sebagai unit pemrosesan utama. Metode yang diterapkan meliputi tahapan pre-processing citra, peningkatan kontras menggunakan CLAHE, reduksi noise dengan Gaussian Blur, deteksi tepi menggunakan metode Canny, segmentasi citra, serta deteksi garis permukaan air (*waterline detection*) untuk mengestimasi ketinggian air berdasarkan skala referensi. Nilai estimasi yang diperoleh kemudian digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi air ke dalam kategori normal, siaga, dan banjir. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki nilai Mean Absolute Error (MAE) sebesar 0,10 m dan Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,105 m. Selain itu, sistem mampu mengklasifikasikan kondisi air dengan akurasi sebesar 82,5% serta bekerja pada kecepatan pemrosesan sekitar 12–15 FPS, sehingga memenuhi kebutuhan monitoring secara real-time. Berdasarkan hasil tersebut, sistem yang dikembangkan menunjukkan kinerja yang cukup baik dan berpotensi diterapkan sebagai solusi monitoring ketinggian air sungai berbasis kamera dengan biaya relatif rendah untuk mendukung sistem peringatan dini banjir.

Kata kunci : banjir, *image processing*, ketinggian air, monitoring real-time, *waterline detection*

1. PENDAHULUAN

Banjir merupakan salah satu bencana alam yang paling sering terjadi di Indonesia dan memiliki dampak signifikan terhadap kehidupan masyarakat, lingkungan, serta infrastruktur. Kondisi geografis Indonesia yang memiliki ribuan sungai serta curah hujan yang tinggi menjadikan wilayah ini sangat rentan terhadap bencana banjir, khususnya pada wilayah perkotaan dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi [1].

Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pemantauan ketinggian air yang mampu memberikan informasi secara cepat, akurat, dan real-time sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana serta sistem peringatan dini banjir.

Selama ini, sistem pemantauan ketinggian air sungai umumnya masih menggunakan metode konvensional berbasis sensor fisik maupun pengamatan manual. Metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan, antara lain biaya instalasi yang relatif tinggi, kebutuhan perawatan berkala, serta kerentanan terhadap kerusakan akibat kondisi lingkungan ekstrem [2][3].

Selain itu, metode pengamatan manual juga belum mampu menyediakan informasi secara kontinu dan real-time, sehingga respons terhadap potensi banjir menjadi kurang optimal.

Seiring dengan perkembangan teknologi, pendekatan berbasis computer vision dan image

processing mulai banyak dikembangkan sebagai alternatif dalam pemantauan ketinggian air sungai. Teknologi ini memungkinkan sistem menganalisis citra atau video dari kamera untuk mendeteksi perubahan ketinggian air secara otomatis tanpa memerlukan sensor fisik yang bersentuhan langsung dengan air [1][4].

Pendekatan ini dinilai lebih fleksibel, efisien, serta mampu menyediakan informasi visual yang lebih kaya dibandingkan metode konvensional [5].

Berbagai penelitian sebelumnya telah menunjukkan potensi pendekatan tersebut. Sistem berbasis color object detection dilaporkan mampu mencapai tingkat akurasi hingga 94% pada berbagai kondisi pencahayaan [6].

Selain itu, penggunaan algoritma seperti YOLO juga terbukti mampu meningkatkan kecepatan dan akurasi deteksi secara real-time dalam sistem peringatan dini banjir [1][7].

Penelitian terkini juga menunjukkan bahwa integrasi *image processing* dengan Artificial Intelligence (AI) memungkinkan estimasi ketinggian air dilakukan secara otomatis, berkelanjutan, dan mendekati real-time dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah [8].

Meskipun demikian, implementasi sistem pemantauan berbasis citra masih menghadapi beberapa tantangan, seperti pengaruh variasi pencahayaan, kondisi cuaca, refleksi permukaan air,

kestabilan posisi kamera, serta perlunya evaluasi performa sistem secara kuantitatif, khususnya dalam aspek akurasi deteksi dan kecepatan pemrosesan [9][10].

Selain itu, sebagian penelitian sebelumnya masih berfokus pada deteksi ketinggian air, namun belum banyak yang mengintegrasikan fungsi pemantauan real-time, klasifikasi kondisi banjir, dan evaluasi akurasi dalam satu sistem monitoring yang terintegrasi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem pemantauan ketinggian air sungai dan deteksi banjir berbasis *image processing* untuk monitoring real-time dengan evaluasi akurasi. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan webcam sebagai perangkat akuisisi citra dan Raspberry Pi 5 Model B sebagai unit pemrosesan utama, dengan tahapan pengolahan citra meliputi pre-processing, edge detection, segmentasi citra, dan *waterline detection* untuk mengestimasi ketinggian air. Hasil estimasi selanjutnya digunakan untuk mengklasifikasikan kondisi air menjadi kategori normal, siaga, dan banjir. Dengan pendekatan tersebut, sistem diharapkan mampu memberikan informasi yang cepat, akurat, dan efisien sebagai bagian dari sistem peringatan dini banjir yang aplikatif dan berbiaya relatif rendah.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Berbagai penelitian telah dilakukan terkait pemantauan ketinggian air sungai dan deteksi banjir berbasis *image processing* maupun *computer vision*. Salah satu penelitian menggunakan pendekatan *color object detection* untuk mendeteksi perubahan ketinggian air berdasarkan indikator warna pada skala pengukuran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini mampu mencapai tingkat akurasi hingga 94% dalam berbagai kondisi pencahayaan, sehingga dinilai cukup efektif untuk sistem monitoring sederhana dengan biaya rendah. Namun, metode ini masih memiliki keterbatasan dalam hal sensitivitas terhadap perubahan cahaya dan sudut pandang kamera [6].

Penelitian lain mengimplementasikan algoritma *deep learning*, seperti U-Net, SegNet, dan Fully Convolutional Network (FCN), untuk melakukan segmentasi permukaan air pada citra sungai. Pendekatan ini terbukti mampu meningkatkan akurasi dan ketahanan sistem terhadap gangguan lingkungan dibandingkan metode konvensional berbasis pengolahan citra klasik. Selain itu, penggunaan *deep learning* memungkinkan sistem untuk mengenali pola permukaan air secara lebih kompleks, sehingga memberikan hasil estimasi yang lebih stabil dan konsisten dalam berbagai kondisi lingkungan [2].

Pendekatan lain menggunakan teknik *image processing* berbasis deteksi garis air (*waterline detection*) dan analisis tekstur untuk menentukan ketinggian air dari citra tunggal. Metode ini relatif lebih sederhana dan tidak memerlukan proses

pelatihan seperti *deep learning*, sehingga lebih ringan dari sisi komputasi. Namun, performa metode ini sangat bergantung pada kondisi lingkungan, seperti pencahayaan dan kejernihan air, yang dapat mempengaruhi akurasi deteksi [9].

Beberapa penelitian juga mengintegrasikan teknologi *Internet of Things* (IoT) dengan *image processing* untuk membangun sistem monitoring ketinggian air secara real-time. Sistem ini memungkinkan data hasil deteksi dikirimkan ke server atau aplikasi berbasis web untuk pemantauan jarak jauh. Integrasi ini memberikan keunggulan dalam hal aksesibilitas dan kecepatan penyampaian informasi, sehingga dapat mendukung sistem peringatan dini banjir secara lebih efektif [8].

Meskipun berbagai metode telah dikembangkan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada deteksi ketinggian air saja tanpa mengintegrasikan fitur deteksi banjir secara langsung dalam satu sistem yang terintegrasi. Selain itu, evaluasi performa sistem, khususnya dalam hal akurasi dan kecepatan pemrosesan, belum banyak dibahas secara mendalam. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan sistem yang tidak hanya mampu melakukan pemantauan ketinggian air, tetapi juga dapat mendeteksi kondisi banjir secara otomatis serta dilengkapi dengan evaluasi akurasi untuk memastikan keandalan sistem dalam kondisi nyata.

2.1. Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra digital merupakan teknik untuk menganalisis dan mengekstraksi informasi dari webcam yang terhubung dengan Raspberry Pi 5B sebagai unit pemrosesan utama. Dalam konteks pemantauan ketinggian air, metode ini digunakan untuk mendeteksi objek seperti permukaan air, skala ukur, atau batas sungai secara otomatis. Menurut penelitian oleh Ilmi dkk., pengolahan citra memungkinkan sistem untuk mengidentifikasi informasi visual secara otomatis dan menjadi solusi efektif dalam sistem pemantauan berbasis kamera, khususnya untuk deteksi ketinggian air sungai secara real-time [1].

2.2. Sistem Pemantauan Ketinggian Air

Sistem pemantauan ketinggian air bertujuan untuk mengukur perubahan tinggi permukaan air secara kontinu sebagai indikator potensi banjir. Sistem tradisional biasanya menggunakan sensor fisik seperti ultrasonik atau pressure sensor, namun memiliki keterbatasan dalam hal instalasi dan perawatan. Pendekatan berbasis citra menjadi alternatif karena mampu memberikan data visual yang lebih kaya dan fleksibel tanpa kontak langsung dengan air [6].

2.3. Deteksi Banjir

Deteksi banjir merupakan proses identifikasi kondisi ketika tinggi air melebihi ambang batas tertentu. Sistem ini sangat penting dalam mitigasi bencana karena banjir merupakan salah satu bencana

yang paling merusak. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan teknologi computer vision dan deep learning seperti CNN dan LSTM dapat meningkatkan kemampuan sistem dalam mendeteksi kondisi banjir secara otomatis dan akurat [11].

2.4. Deteksi Objek dan Segmentasi Citra

Dalam sistem berbasis image processing, deteksi objek digunakan untuk mengenali elemen penting seperti garis air (waterline) atau papan ukur. Teknik yang umum digunakan meliputi [12]:

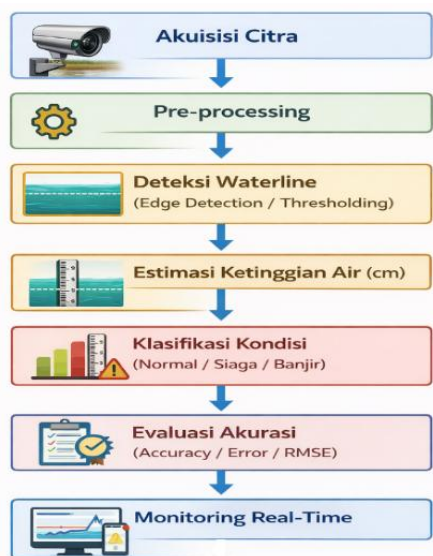
- Edge detection (misalnya Canny)
- Thresholding
- Region-based segmentation

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan berbasis *image processing* untuk melakukan pemantauan ketinggian air sungai dan deteksi banjir secara *real-time*. Sistem dirancang untuk mendeteksi permukaan air melalui citra video dari kamera, kemudian menghitung tinggi muka air berdasarkan skala pengukuran yang telah dikalibrasi. Selanjutnya, sistem melakukan evaluasi akurasi hasil deteksi dengan membandingkan hasil pengukuran sistem terhadap pengukuran aktual.

3.1. Alur Kerja Sistem

Secara umum, alur kerja sistem yang dikembangkan terdiri dari beberapa tahapan utama yang saling terintegrasi untuk menghasilkan informasi ketinggian air secara *real-time*. Tahapan alur kerja sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur sistem pemantauan ketinggian air berbasis image processing

Berdasarkan Gambar 1, tahapan cara kerja sistem ini sebagai berikut :

- Akuisisi Citra. Sistem melakukan pengambilan citra atau video permukaan air sungai secara *real-*

time menggunakan webcam Logitech c920 yang terhubung dengan Raspberry Pi 5 Model B. Perangkat ini berfungsi sebagai unit pemrosesan utama yang menerima data visual dari kamera. Webcam dipasang secara statis pada titik pengamatan dengan sudut dan posisi tertentu agar dapat menangkap area permukaan air dan skala referensi secara optimal. Proses akuisisi dilakukan secara kontinu untuk mendukung pemantauan ketinggian air secara *real-time*.

- Pre-processing Citra. Citra hasil akuisisi diproses terlebih dahulu untuk meningkatkan kualitas dan mempermudah analisis. Tahapan ini meliputi konversi citra ke grayscale, serta penerapan filtering seperti Gaussian Blur untuk mengurangi noise dan meningkatkan kejelasan objek. Selain itu, dilakukan konversi ke ruang warna HSV dan peningkatan kontras menggunakan CLAHE untuk meningkatkan kualitas citra pada kondisi pencahayaan rendah.
- Deteksi Garis Permukaan Air (*Waterline Detection*). Sistem mendeteksi garis batas antara permukaan air dan lingkungan sekitarnya menggunakan metode *edge detection* atau *thresholding*. Garis ini digunakan sebagai indikator utama dalam menentukan posisi ketinggian air pada citra.
- Estimasi Ketinggian Air. Setelah garis permukaan air terdeteksi, sistem menghitung ketinggian air berdasarkan posisi garis tersebut terhadap skala referensi yang telah dikalibrasi sebelumnya. Nilai ketinggian dikonversi dari satuan piksel ke satuan panjang (cm).
- Klasifikasi Kondisi Air. Berdasarkan nilai ketinggian yang diperoleh, sistem mengklasifikasikan kondisi air ke dalam tiga kategori, yaitu normal, siaga, dan banjir. Klasifikasi ini dilakukan dengan membandingkan nilai ketinggian terhadap ambang batas yang telah ditentukan.
- Evaluasi Akurasi Sistem. Untuk mengukur kinerja sistem, dilakukan evaluasi dengan membandingkan hasil estimasi sistem terhadap data referensi (*ground truth*). Parameter evaluasi yang digunakan meliputi nilai akurasi, error, dan *Root Mean Square Error* (RMSE).
- Monitoring Real-Time. Hasil deteksi dan klasifikasi kemudian ditampilkan dalam sistem monitoring secara *real-time*, baik dalam bentuk visualisasi grafik maupun dashboard. Sistem ini memungkinkan pengguna untuk memantau kondisi ketinggian air secara langsung dan cepat.

3.2. Akuisisi Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa citra dan video permukaan air sungai yang diperoleh secara langsung menggunakan webcam Logitech C920 yang terhubung dengan Raspberry Pi 5 Model B sebagai unit pemrosesan utama. Kamera dipasang secara statis pada titik pengamatan dengan posisi dan

sudut tertentu sehingga mampu menangkap area permukaan air serta skala referensi pengukuran secara jelas dan konsisten.

Proses akuisisi data dilakukan secara kontinu dalam mode real-time dengan resolusi dan frame rate tertentu (misalnya 640×480 piksel pada 15–30 fps, disesuaikan dengan kemampuan sistem). Pengambilan data dilakukan pada berbagai kondisi lingkungan, seperti:

- variasi pencahayaan (pagi, siang, malam),
- kondisi cuaca (cerah, mendung, hujan),
- serta tingkat kekeruhan air yang berbeda.

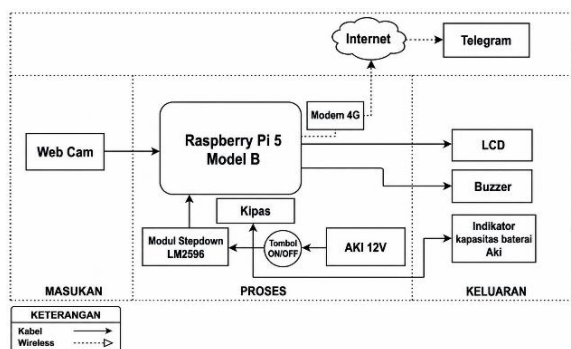
Hal ini bertujuan untuk menguji ketahanan dan stabilitas sistem dalam kondisi nyata yang dinamis.

Selain data citra, digunakan juga data referensi berupa pengukuran ketinggian air secara manual menggunakan alat ukur (misalnya penggaris skala) yang ditempatkan pada lokasi yang sama. Data ini berfungsi sebagai *ground truth* yang digunakan untuk membandingkan hasil estimasi sistem.

Pengambilan data *ground truth* dilakukan secara sinkron dengan proses akuisisi citra, sehingga setiap frame atau sampel citra memiliki pasangan nilai ketinggian air yang sesuai. Data tersebut kemudian digunakan dalam proses evaluasi untuk menghitung tingkat akurasi, error, dan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dari sistem yang dikembangkan.

3.3. Perencanaan Sistem

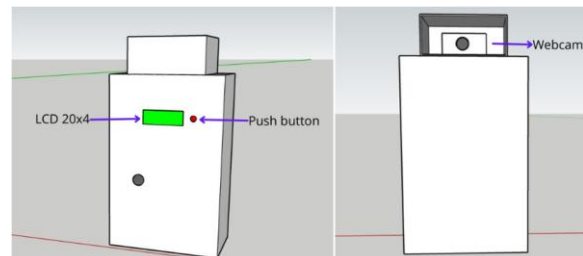
Sistem terdiri dari tiga bagian utama, yaitu masukan, proses, dan keluaran, yang saling terintegrasi untuk menghasilkan informasi kondisi air secara cepat dan akurat yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram blok sistem

Gambar 2 menggambarkan sistem monitoring ketinggian air berbasis pengolahan citra dengan Raspberry Pi 5 Model B sebagai pusat kendali. Sistem terdiri dari tiga bagian utama: input, proses, dan output. Pada bagian input, webcam digunakan untuk mengambil citra permukaan air secara real-time, yang kemudian diproses oleh Raspberry Pi untuk mendeteksi garis air, menghitung ketinggian, dan mengklasifikasikan kondisi (normal, siaga, banjir). Pada bagian proses dan output, sistem didukung oleh aki 12V dengan modul step-down LM2596, tombol ON/OFF, dan kipas pendingin. Raspberry Pi juga

terhubung ke internet melalui modem 4G untuk mengirim data ke Telegram sebagai notifikasi real-time. Hasil monitoring ditampilkan melalui LCD, sementara buzzer memberikan peringatan saat kondisi berbahaya, serta indikator baterai digunakan untuk memantau daya. Sistem ini memungkinkan pemantauan otomatis, real-time, dan terintegrasi jarak jauh. Desain Sistem ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain sistem

3.4. Pengolahan Citra

Tahap pengolahan citra bertujuan untuk mengekstraksi informasi ketinggian air dari citra yang diperoleh secara real-time. Proses ini dilakukan secara bertahap mulai dari peningkatan kualitas citra hingga identifikasi garis permukaan air (*waterline*) sebagai indikator utama ketinggian. Adapun tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Konversi Grayscale. Citra hasil akuisisi yang semula berada dalam format RGB dikonversi menjadi citra grayscale untuk menyederhanakan kompleksitas data dan mempercepat proses komputasi. Pada tahap ini, setiap piksel direpresentasikan dalam satu nilai intensitas keabuan.
- Filtering (*Noise Reduction*). Untuk mengurangi gangguan (*noise*) yang dapat mempengaruhi hasil deteksi, citra grayscale diproses menggunakan metode Gaussian Blur. Proses ini bertujuan untuk menghaluskan citra dan mengurangi detail kecil yang tidak relevan, sehingga mempermudah proses deteksi tepi.
- Deteksi Tepi (*Edge Detection*). Setelah dilakukan filtering, citra diproses menggunakan metode Canny Edge Detection untuk mendeteksi tepi objek. Metode ini digunakan karena mampu menghasilkan deteksi tepi yang lebih akurat dan stabil terhadap noise. Tepi yang terdeteksi mencakup batas antara permukaan air dan lingkungan sekitar, yang menjadi kandidat garis air (*waterline*).
- Segmentasi Citra. Tahap segmentasi dilakukan untuk memisahkan area air dari objek lain dalam citra. Proses ini dapat dilakukan menggunakan teknik thresholding berdasarkan perbedaan intensitas piksel, atau pendekatan berbasis region. Hasil segmentasi akan memperjelas area permukaan air sehingga mempermudah proses identifikasi garis air.
- Deteksi Garis Permukaan Air (*Waterline Detection*). Setelah area air teridentifikasi, sistem

menentukan garis batas antara air dan lingkungan sekitarnya. Proses ini dilakukan dengan menganalisis hasil edge detection dan segmentasi untuk menemukan garis horizontal dominan yang merepresentasikan permukaan air. Posisi garis ini kemudian digunakan sebagai parameter utama dalam perhitungan ketinggian air.

3.5. Estimasi Ketinggian Air

Estimasi ketinggian air dilakukan dengan menentukan posisi garis permukaan air (*waterline*) pada citra, kemudian mengonversinya ke dalam satuan panjang (cm atau meter) menggunakan proses kalibrasi piksel terhadap skala referensi yang terdapat pada citra.

- a. Penentuan Titik Referensi. Sistem menggunakan dua titik referensi pada skala pengukuran yang terlihat pada citra, yaitu:
 - Titik bawah (referensi minimum) dengan koordinat piksel y_1 dan nilai ketinggian H_1
 - Titik atas (referensi maksimum) dengan koordinat piksel y_2 dan nilai ketinggian H_2
 Selain itu, posisi garis air hasil deteksi dinyatakan dalam koordinat piksel y_w .
- b. Kalibrasi Piksel ke Satuan Panjang. Untuk mengonversi nilai piksel ke satuan panjang, dilakukan perhitungan faktor skala berdasarkan dua titik referensi tersebut.

$$S = \frac{H_2 - H_1}{y_2 - y_1} \quad (1)$$

di mana:

- S = faktor skala (cm/pixel)
 - H_1, H_2 = ketinggian referensi (cm)
 - y_1, y_2 = koordinat piksel referensi
- c. Perhitungan Ketinggian Air. Nilai ketinggian air dihitung berdasarkan posisi garis air terhadap titik referensi menggunakan persamaan berikut:

$$H = H_1 + (y_1 - y_w) \times S \quad (2)$$

di mana:

- H = ketinggian air hasil estimasi (cm)
 - y_w = posisi piksel garis air (*waterline*)
 - S = faktor skala
- Persamaan ini mengasumsikan bahwa sistem koordinat citra memiliki titik asal di bagian atas (umum pada citra digital), sehingga semakin kecil nilai y , posisi objek semakin tinggi.
- d. Interpretasi Hasil. Nilai ketinggian air yang diperoleh kemudian digunakan sebagai input dalam proses klasifikasi kondisi air (normal, siaga, atau banjir). Akurasi estimasi sangat dipengaruhi oleh:
 - ketepatan deteksi garis air (*waterline*),
 - kestabilan posisi kamera,
 - serta kejelasan skala referensi pada citra.

3.6. Klasifikasi Kondisi Banjir

Berdasarkan hasil estimasi ketinggian air yang diperoleh dari proses pengolahan citra, sistem melakukan klasifikasi kondisi air untuk mendukung mekanisme peringatan dini banjir. Klasifikasi ini

bertujuan untuk mengelompokkan kondisi ketinggian air ke dalam beberapa tingkat risiko sehingga dapat mempermudah interpretasi dan pengambilan keputusan.

- a. Penentuan Kategori Kondisi. Sistem mengklasifikasikan kondisi ketinggian air ke dalam tiga kategori utama, yaitu:

- Normal. Kondisi di mana ketinggian air berada di bawah ambang batas aman. Pada kondisi ini, tidak terdapat potensi banjir dan aktivitas masyarakat masih dapat berlangsung secara normal.
- Siaga. Kondisi di mana ketinggian air mulai mendekati batas kritis. Pada tahap ini, diperlukan peningkatan kewaspadaan karena terdapat potensi kenaikan debit air yang dapat mengarah pada banjir.
- Banjir. Kondisi di mana ketinggian air telah melebihi ambang batas kritis. Pada kondisi ini, sistem akan mengindikasikan terjadinya banjir dan dapat digunakan sebagai dasar pemberian peringatan dini kepada masyarakat.

- b. Penentuan Ambang Batas. Klasifikasi dilakukan dengan membandingkan nilai ketinggian air hasil estimasi (H) terhadap ambang batas yang telah ditentukan sebelumnya, yaitu:

- T_1 sebagai batas antara kondisi normal dan siaga
 - T_2 sebagai batas antara kondisi siaga dan banjir
- Nilai ambang batas ini ditentukan berdasarkan:
- Data historis ketinggian air di lokasi penelitian,
 - Standar pengamatan dari instansi terkait, atau hasil analisis kondisi lapangan.

- c. Aturan Klasifikasi. Secara matematis, proses klasifikasi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C = \begin{cases} \text{Normal} & H < T_1 \\ \text{Siaga} & T_1 \leq H < T_2 \\ \text{Banjir} & H \geq T_2 \end{cases} \quad (3)$$

di mana:

- C = kategori kondisi air
- H = ketinggian air hasil estimasi
- T_1, T_2 = nilai ambang batas

3.7. Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja sistem dilakukan untuk mengukur tingkat akurasi dan keandalan sistem dalam mengestimasi ketinggian air serta mengklasifikasikan kondisi banjir. Proses evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil keluaran sistem dengan data referensi (*ground truth*) yang diperoleh dari pengukuran manual. Evaluasi dilakukan terhadap sejumlah N data uji yang terdiri dari berbagai kondisi lingkungan (pencahayaannya, cuaca, dan kondisi air) untuk memastikan keandalan sistem secara menyeluruh. Parameter evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini meliputi beberapa metrik kuantitatif sebagai berikut:

- a. Akurasi Klasifikasi. Akurasi digunakan untuk mengukur tingkat keberhasilan sistem dalam

mengklasifikasikan kondisi air (normal, siaga, banjir) dibandingkan dengan kondisi sebenarnya.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (4)$$

di mana:

- TP (*True Positive*): prediksi benar untuk kondisi positif (misalnya banjir)
- TN (*True Negative*): prediksi benar untuk kondisi normal
- FP (*False Positive*): prediksi salah (false alarm)
- FN (*False Negative*): kegagalan mendeteksi kondisi sebenarnya

Untuk kasus multi-class (normal, siaga, banjir), akurasi dihitung sebagai rasio jumlah prediksi yang benar terhadap total seluruh data pengujian.

- b. *Mean Absolute Error* (MAE). MAE digunakan untuk mengukur rata-rata selisih absolut antara nilai estimasi ketinggian air dengan nilai sebenarnya.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |H_i^{est} - H_i^{true}| \quad (5)$$

di mana:

- H_i^{est} = hasil estimasi sistem
- H_i^{true} = nilai ground truth
- n = jumlah data

- c. *Root Mean Square Error* (RMSE). RMSE digunakan untuk memberikan penalti lebih besar terhadap kesalahan yang besar, sehingga lebih sensitif terhadap outlier.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_i^{est} - H_i^{true})^2} \quad (6)$$

Nilai MAE dan RMSE yang kecil menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat kesalahan yang rendah dalam mengestimasi ketinggian air. Semakin kecil nilai RMSE, maka semakin baik performa sistem dalam menangani variasi data, termasuk terhadap outlier.

- d. Waktu Pemrosesan. Waktu pemrosesan digunakan untuk mengukur kecepatan sistem dalam memproses setiap frame citra. Parameter ini penting untuk memastikan sistem mampu bekerja secara real-time. Pengukuran dilakukan dengan menghitung rata-rata waktu yang dibutuhkan untuk memproses satu frame citra:

$$T_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (7)$$

di mana:

- t_i = waktu pemrosesan tiap frame
- n = jumlah frame

- e. *Precision, Recall, dan F1-Score*

Selain akurasi, performa sistem klasifikasi juga dievaluasi menggunakan metrik precision, recall, dan F1-score yang dihitung berdasarkan confusion matrix.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (8)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (9)$$

$$F1 = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (10)$$

Metrik ini digunakan untuk memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap performa

sistem, terutama dalam menangani kesalahan klasifikasi seperti false alarm dan miss detection.

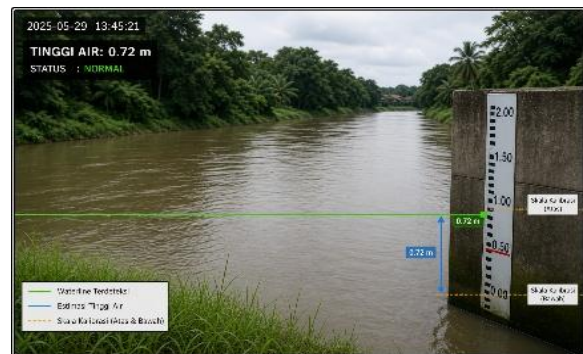
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Implementasi Sistem

Sistem pemantauan ketinggian air sungai berbasis *image processing* telah berhasil diimplementasikan menggunakan perangkat webcam yang terhubung dengan Raspberry Pi 5 Model B. Sistem ini mampu melakukan akuisisi citra secara real-time, mendeteksi garis permukaan air (*waterline*), serta mengestimasi ketinggian air berdasarkan skala referensi yang tersedia pada lokasi pengamatan.



Gambar 4. Citra Input Sistem



Gambar 5. Hasil Deteksi Waterline



Gambar 6. Implementasi Sistem di Lapangan

Gambar hasil implementasi menunjukkan kondisi nyata lingkungan sungai tanpa adanya anotasi tambahan, yang merepresentasikan data input mentah (raw image) yang diterima oleh sistem. Citra ini menjadi dasar dalam proses deteksi dan estimasi ketinggian air. Berdasarkan hasil pengolahan citra, sistem mampu mendeteksi garis permukaan air (*waterline*) dan mengestimasi ketinggian air secara otomatis. Hasil deteksi ditunjukkan melalui garis horizontal yang merepresentasikan posisi permukaan air terhadap skala pengukuran. Merujuk pada Gambar 5, sistem membaca estimasi ketinggian air sebesar 0,72 meter. Nilai ini diperoleh melalui proses konversi posisi piksel garis air terhadap dua titik kalibrasi (skala atas dan bawah) pada papan ukur

4.2. Hasil Pengujian Estimasi Ketinggian Air

Pengujian estimasi ketinggian air dilakukan dengan membandingkan hasil estimasi sistem terhadap data pengukuran manual (*ground truth*) yang diperoleh dari papan ukur di lokasi pengamatan. Pengambilan data dilakukan sebanyak $N = 66$ sampel, dengan variasi kondisi lingkungan seperti perubahan pencahayaan, riak permukaan air, dan posisi kamera. Sebagai representasi, ditampilkan 10 sampel data pengujian pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Estimasi dan Ground Truth

No	Ground Truth (m)	Estimasi (m)	Error (m)
1	0.70	0.76	0.06
2	0.75	0.68	0.07
3	0.80	0.89	0.09
4	0.85	0.77	0.08
5	0.90	1.00	0.10
6	0.95	0.84	0.11
7	1.00	1.12	0.12
8	1.05	0.92	0.13
9	1.10	1.24	0.14
10	1.20	1.05	0.15

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, sistem mampu melakukan estimasi ketinggian air dengan tingkat kesalahan berkisar antara 0.05 m hingga 0.15 m atau sekitar 5–15 cm. Nilai error yang muncul dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti perubahan intensitas pencahayaan, refleksi permukaan air, riak air, serta kestabilan posisi kamera saat proses pengambilan citra berlangsung. Meskipun terdapat selisih pengukuran, hasil estimasi sistem masih menunjukkan pola yang mendekati nilai *ground truth*. Hal ini menunjukkan bahwa metode *waterline detection* berbasis *image processing* masih mampu digunakan untuk pemantauan ketinggian air secara real-time, terutama sebagai sistem peringatan dini (*early warning system*) banjir.

4.3. Evaluasi Akurasi (MAE dan RMSE)

Untuk mengukur tingkat kesalahan estimasi ketinggian air, digunakan metrik MAE dan RMSE. Kedua metrik ini digunakan karena keluaran sistem

berupa nilai numerik kontinu dalam satuan meter atau sentimeter.

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 1, diperoleh nilai error estimasi yang berada pada rentang 0.06 m hingga 0.15 m atau sekitar 6–15 cm. Selanjutnya dilakukan perhitungan MAE dan RMSE untuk mengetahui rata-rata tingkat kesalahan sistem secara keseluruhan. Hasil perhitungan evaluasi diperoleh sebagai berikut:

- MAE = 0.10 m (10 cm)
- RMSE = 0.105 m (10.5 cm)

Nilai MAE sebesar 10 cm menunjukkan bahwa rata-rata selisih antara hasil estimasi sistem dan nilai *ground truth* berada pada kisaran 10 cm. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem masih mampu melakukan estimasi ketinggian air dengan tingkat kesalahan yang relatif moderat untuk kebutuhan monitoring dan peringatan dini banjir secara real-time. Sementara itu, nilai RMSE sebesar 10.5 cm yang mendekati nilai MAE menunjukkan bahwa distribusi error pada sistem relatif stabil dan tidak terdapat perbedaan kesalahan yang terlalu ekstrem (*outlier*). Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar hasil estimasi memiliki tingkat kesalahan yang konsisten pada setiap pengujian. Meskipun demikian, nilai error cenderung meningkat pada kondisi lingkungan tertentu, seperti:

- Permukaan air yang beriak,
- Refleksi cahaya yang tinggi,
- Perubahan intensitas pencahayaan, dan posisi kamera yang kurang stabil.

Kondisi tersebut mempengaruhi proses deteksi garis permukaan air (*waterline detection*) sehingga berdampak pada hasil estimasi ketinggian air. Namun secara keseluruhan, sistem masih menunjukkan performa yang cukup baik untuk diterapkan pada sistem monitoring ketinggian air berbasis *image processing*.

4.4. Evaluasi Waktu Pemrosesan

Pengujian waktu pemrosesan dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam memproses citra secara kontinu dan memastikan sistem dapat bekerja secara *real-time*. Pengujian dilakukan pada Raspberry Pi 5 Model B dengan resolusi citra 640×480 piksel menggunakan webcam Logitech C920 sebagai perangkat akuisisi citra. Waktu pemrosesan dihitung mulai dari proses akuisisi frame, preprocessing citra, deteksi garis permukaan air (*waterline detection*), estimasi ketinggian air, hingga klasifikasi kondisi banjir. Pengukuran dilakukan terhadap beberapa frame pengujian untuk memperoleh rata-rata waktu pemrosesan sistem. Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 2. Evaluasi waktu pemrosesan

Parameter	Hasil
Resolusi Pengujian	640×480 piksel
Rata-rata Waktu Pemrosesan	0.08 detik/frame
Kecepatan Sistem	± 12 –15 FPS
Platform Pemrosesan	Raspberry Pi 5 Model B

Nilai rata-rata waktu pemrosesan sebesar 0.08 detik/frame menunjukkan bahwa sistem membutuhkan waktu sekitar 80 milidetik untuk menyelesaikan seluruh proses pengolahan pada satu frame citra. Dengan waktu pemrosesan tersebut, sistem mampu menghasilkan kecepatan pemrosesan sekitar 12–15 FPS.

Hasil ini menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi kebutuhan monitoring secara *real-time* karena proses deteksi dan estimasi dapat dilakukan secara kontinu tanpa jeda yang signifikan. Penggunaan metode *image processing* klasik seperti konversi HSV, CLAHE, Gaussian Blur, dan Canny Edge Detection membantu menjaga kompleksitas komputasi tetap rendah sehingga masih dapat dijalankan dengan baik pada perangkat *embedded system* seperti Raspberry Pi 5. Namun demikian, kecepatan pemrosesan sistem dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

- a. Resolusi citra yang digunakan,
- b. Kompleksitas proses pengolahan citra,
- c. Kondisi pencahayaan, serta jumlah noise pada citra input.

Pada pengujian dengan resolusi lebih tinggi, waktu pemrosesan cenderung meningkat sehingga FPS sistem mengalami penurunan. Selain itu, kondisi lingkungan dengan refleksi cahaya tinggi dan permukaan air beriak juga menyebabkan proses deteksi membutuhkan waktu komputasi lebih besar akibat munculnya noise tambahan pada citra.

4.5. Evaluasi Klasifikasi Kondisi Air

Evaluasi klasifikasi dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam mengelompokkan kondisi ketinggian air ke dalam tiga kategori, yaitu normal, siaga, dan banjir. Proses klasifikasi dilakukan berdasarkan hasil estimasi ketinggian air yang dibandingkan dengan ambang batas (*threshold*) yang telah ditentukan sebelumnya. Pengujian dilakukan menggunakan data hasil monitoring pada berbagai kondisi lingkungan, seperti perubahan pencahayaan, riak permukaan air, serta variasi tinggi muka air. Hasil klasifikasi sistem kemudian dibandingkan dengan kondisi aktual (*ground truth*) untuk mengetahui tingkat keberhasilan klasifikasi. Hasil pengujian confusion matrix ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Confusion Matrix Hasil Klasifikasi Kondisi Air

Kondisi Aktual	Prediksi Normal	Prediksi Siaga	Prediksi Banjir
Normal	17	4	1
Siaga	3	16	3
Banjir	1	2	19

Berdasarkan hasil confusion matrix pada Tabel 3, diperoleh hasil evaluasi klasifikasi sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Evaluasi Kinerja Klasifikasi

Parameter	Nilai
Accuracy	82.5%
Precision	81.7%
Recall	82.1%
F1-Score	81.9%

Nilai accuracy sebesar 82.5% menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan kondisi air dengan tingkat ketepatan yang cukup baik pada berbagai kondisi pengujian. Sebagian besar data berhasil diklasifikasikan sesuai dengan kondisi aktual, meskipun masih terdapat beberapa kesalahan klasifikasi pada kondisi tertentu.

Pada kategori normal, sistem berhasil mengklasifikasikan 17 data dengan benar, sedangkan beberapa data lainnya salah diprediksi sebagai kondisi Siaga dan banjir. Kesalahan ini umumnya terjadi ketika tinggi air berada mendekati batas ambang kategori sehingga perubahan kecil pada hasil estimasi dapat mempengaruhi hasil klasifikasi.

Pada kategori siaga, sistem berhasil mengidentifikasi 16 data secara benar, namun terdapat beberapa kesalahan klasifikasi ke kategori normal maupun banjir. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi transisi antar level memiliki tingkat kesulitan lebih tinggi dibandingkan kondisi yang berada jauh dari nilai ambang batas.

Sementara itu, pada kategori banjir, sistem mampu mengidentifikasi 19 data dengan benar. Kesalahan klasifikasi pada kategori ini sebagian besar dipengaruhi oleh fluktuasi permukaan air akibat riak dan refleksi cahaya yang menyebabkan posisi *waterline* tidak stabil.

Nilai precision sebesar 81.7% menunjukkan bahwa mayoritas hasil prediksi sistem telah sesuai dengan kondisi sebenarnya, sedangkan nilai recall sebesar 82.1% menunjukkan bahwa sistem cukup baik dalam mendeteksi berbagai kondisi air yang terjadi di lapangan. Selain itu, nilai F1-score sebesar 81.9% menunjukkan bahwa sistem memiliki keseimbangan performa yang cukup baik antara precision dan recall. Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *image processing* berbasis *waterline detection* mampu digunakan untuk klasifikasi kondisi air secara real-time dengan performa yang cukup baik.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pemantauan ketinggian air sungai dan deteksi banjir berbasis *image processing* yang mampu bekerja secara real-time menggunakan webcam dan Raspberry Pi 5 Model B. Sistem mampu mendeteksi garis permukaan air (*waterline*) dan mengestimasi ketinggian air berdasarkan skala referensi pada papan ukur. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat kesalahan estimasi dengan nilai MAE sebesar 0.10 m dan RMSE sebesar 0.105 m, yang masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk kebutuhan monitoring dan sistem peringatan dini banjir. Selain itu, sistem juga mampu mengklasifikasikan kondisi air (normal, siaga, dan banjir) dengan akurasi sebesar 82.5%, serta memiliki kecepatan pemrosesan sekitar 0.08 detik per frame atau 12–15 FPS, sehingga memenuhi kriteria sistem real-time. Meskipun demikian, performa sistem masih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti pencahayaan, refleksi, dan

riak permukaan air, sehingga pengembangan lebih lanjut diperlukan untuk meningkatkan *robustness* sistem, misalnya melalui integrasi metode berbasis deep learning atau peningkatan teknik pengolahan citra.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. A. Ilmi, I. K. Somawirata, and M. Ardita, "Water Level Detection and Flood Early Warning System Using Image Processing," *J. Electr. Eng. Comput.*, vol. 7, no. 1, 2025.
- [2] X. Blanch, J. Grundmann, R. Hedel, and A. Eltner, "AI image-based method for a robust automatic real-time water level monitoring: a long-term application case," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 30, no. 1, pp. 797–824, 2026.
- [3] C. Sun, Y. Wei, W. Wang, Z. Wu, and Y. Li, "Water Level Inversion Detection Method for Water Level Images without a Scale in Complex Environments," *Water*, vol. 26, no. 8, pp. 1176–1202, 2024.
- [4] W. Liu and W. Huang, "Heliyon Evaluation of deep learning computer vision for water level measurements in rivers," *Heliyon*, vol. 10, no. 4, p. e25989, 2024.
- [5] Q. Flood, W. Levels, and V. G. Information, "Quantifying Flood Water Levels Using Image-Based Volunteered Geographic Information," *2Remote Sens.*, vol. 12, no. 4, pp. 706–724, 2021.
- [6] K. Saddami, Y. Nurdin, F. Noviantika, M. Oktiana, and S. Muchallil, "Water Level Detection for Flood Disaster Management Based on Real-Time Color Object Detection," *Kinet. Game Technol. Inf. Syst. Comput. Network, Comput. Electron. Control*, vol. 8, no. 1, pp. 507–516, 2023.
- [7] W. Jung, J. Kim, H. Jo, and S. Lee, "Video-Based Deep Learning Approach for Water Level Monitoring in Reservoirs," *Water*, vol. 17, no. 17, pp. 2525–2541, 2025.
- [8] Z. Hisham *et al.*, "Riverbank Monitoring using Image Processing for Early Flood Warning System via IoT," *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, no. 3, pp. 166–174, 2022.
- [9] Z. Wu, Y. Huang, K. Huang, K. Yan, and H. Chen, "A Review of Non-Contact Water Level Measurement Based on Computer Vision and Radar Technology," *Water*, vol. 15, no. 18, pp. 3233–3253, 2023.
- [10] N. Tawfeeq, J. Harbi, and C. Author, "Advanced Ensemble Deep Learning Framework for Enhanced River Water Level Detection: Integrating Transfer Learning," *J. Robot. Control*, vol. 5, no. 5, pp. 1422–1435, 2024.
- [11] A. M. M. Meghana, B. S. Babu, and V. R. Reddy, "Real Time Flood Monitoring using Image Captioning," *J. Inf. Syst. Eng. Manag.*, vol. 10, no. 36s, pp. 568–576, 2025.
- [12] Q. Zhang, N. Jindapetch, R. Duangsoithong, and D. Buranapanichkit, "A Performance Analysis for Real-Time Flood Monitoring Using Image-Based Processing," vol. 17, no. 2, pp. 793–803, 2020.