

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Air merupakan elemen dasar yang sangat krusial bagi keberlangsungan hidup seluruh makhluk hidup, namun saat ini diperkirakan terdapat 844 juta orang di seluruh dunia yang tidak memiliki akses terhadap sumber air minum primer yang layak[1]. Krisis ini diperparah dengan data yang menunjukkan bahwa pasokan air yang tidak aman bertanggung jawab atas 3,575 juta kematian setiap tahunnya, yang juga menghambat pertumbuhan sosial-ekonomi secara global[2]. Berdasarkan laporan *World Health Organization* (WHO) dan standar Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia (Permenkes RI No. 2 Tahun 2023), konsumsi air dengan kualitas buruk atau terkontaminasi secara langsung menimbulkan berbagai dampak kesehatan fatal bagi manusia. Dampak jangka pendek dari paparan kontaminan mikrobiologi dan zat kimia pada air minum dapat memicu penyakit menular (*waterborne diseases*) seperti diare akut, kolera, disentri, dan tifoid. Sementara dalam jangka panjang, akumulasi zat tercemar dan parameter kimia berbahaya yang melebihi batas aman dapat mengakibatkan kerusakan organ dalam, gangguan perkembangan saraf, peningkatan risiko *stunting* pada anak, hingga memicu penyakit kronis seperti kanker.

Pada tingkat konsumsi domestik, kebutuhan air bersih berbeda antarwilayah. Secara umum, setiap orang membutuhkan 20 liter air setiap hari untuk kebutuhan dasar, seperti minum dan memasak, di luar kebutuhan

sanitasi dan aktivitas rumah tangga lainnya. Angka ini merujuk pada standar minimum kebutuhan air yang direkomendasikan secara internasional oleh *World Health Organization* (WHO) dan *United Nations* (UN) untuk menyelidiki kebutuhan air dasar manusia di daerah dengan sumber daya air yang terbatas, terutama di negara berkembang. Rekomendasi ini terutama berkaitan dengan wilayah Afrika, Asia Selatan, dan Asia Tenggara, termasuk Indonesia[3]. Tingkat akses terhadap air minum layak di Indonesia mencapai sekitar 90% hingga 93% pada awal tahun 2023. Ini menunjukkan bahwa penyediaan air bersih terus menjadi masalah pembangunan. Meskipun demikian, masih ada sekitar 7 hingga 10% penduduk yang belum memiliki layanan air bersih yang ideal. Kondisi ini menunjukkan bahwa pemenuhan akses air bersih secara keseluruhan masih menghadapi banyak tantangan. Hal ini terutama berlaku untuk mencapai target 100% akses air bersih pada tahun 2030 yang ditetapkan dalam Tujuan Pembangunan Berkelanjutan[4].

Pulau Jawa merupakan daerah yang memiliki tekanan terbesar terhadap kebutuhan air bersih di Indonesia, karena jumlah penduduk yang padat, perkembangan kota yang pesat, dan aktivitas industri serta kebutuhan sehari-hari yang sangat tinggi. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa sungai-sungai utama di Pulau Jawa, seperti Sungai Citarum dan Sungai Brantas, mengalami penurunan mutu air karena tercemar. Hal ini menyebabkan persediaan air baku yang layak untuk kebutuhan masyarakat dan proses pembuatan air minum semakin berkurang[5][6][7].

Permasalahan semakin mendesak karena 100% responden dalam survei masyarakat menyatakan bahwa pemantauan kualitas air adalah hal yang sangat penting, namun 82,4% di antaranya merasa sulit melakukan pengecekan karena aksesibilitas yang sulit[8]. Metode pemantauan konvensional melalui uji laboratorium memerlukan waktu antara 1 hingga 2 jam untuk mendapatkan data, sehingga tidak mampu merespons perubahan kondisi air baku yang dinamis secara cepat[9][10]. Keterlambatan informasi ini berisiko menyebabkan kegagalan deteksi kontaminasi yang membahayakan kesehatan serta memicu pemborosan biaya operasional pada instalasi pengolahan air[11].

Parameter utama yang digunakan untuk menilai kualitas air mencakup pH (keasaman), TDS (jumlah zat terlarut), dan *Turbidity* (keruhan). Nilai pH air yang dianggap sehat dan cocok untuk kebutuhan sehari-hari serta kebersihan berada dalam rentang 6,5 sampai 8,5[12]. Nilai pH yang tidak normal bisa menunjukkan adanya bahan kimia beracun atau proses pembusukan organik, sedangkan TDS menggambarkan jumlah partikel yang larut seperti mineral dan logam dalam air. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023, tingkat TDS untuk keperluan higiene sanitasi harus di bawah 300 mg/L[13]. Secara umum, untuk air yang digunakan dalam keperluan higiene dan sanitasi, nilai TDS tidak boleh melebihi 1000 ppm. Jika nilai TDS melebihi angka tersebut, maka air tersebut dikategorikan sebagai "Tidak Layak" atau dianggap kotor[14]. Kekeruhan menunjukkan adanya partikel yang mengapung di air, yang bisa menghalangi masuknya cahaya dan

mengganggu kehidupan makhluk hidup di dalamnya[15]. Berdasarkan aturan terbaru (Permenkes Nomor 2 Tahun 2023), ambang batas kekeruhan untuk air sanitasi adalah kurang dari 3 NTU, sedangkan batas maksimal kekeruhan air minum yang ditentukan oleh badan kesehatan adalah 5 NTU[16]. Dalam beberapa model eksperimen, air dianggap masih bersih jika tingkat kekeruhannya kurang dari 25 NTU, dan dianggap kotor jika melebihi batas tersebut[17].

Sebagai perusahaan daerah yang bertanggung jawab dalam penyediaan air bersih, Perumda Air Minum Tirta Bahari Kota Tegal memiliki kewajiban untuk memastikan bahwa air yang didistribusikan kepada pelanggan memenuhi standar kualitas yang telah ditetapkan serta layak untuk dikonsumsi. Berdasarkan hasil observasi yang dilakukan, sistem pengelolaan air minum dimulai dari pengambilan air baku (hulu), proses pengolahan di instalasi pengolahan air, hingga pendistribusian ke pelanggan (hilir). Dalam proses tersebut, terdapat beberapa faktor yang berpotensi memengaruhi kualitas air, seperti kondisi sumber air baku, efektivitas proses filtrasi dan desinfeksi, kondisi jaringan pipa distribusi, serta kemungkinan terjadinya kebocoran atau kontaminasi sekunder. Pengujian kualitas air yang dilakukan secara berkala memang telah memenuhi prosedur standar, namun sistem monitoring berbasis teknologi yang terintegrasi dari hulu hingga hilir dinilai dapat meningkatkan efektivitas pengawasan serta mempercepat respons terhadap potensi penurunan kualitas air.

Sebagai solusi, diperlukan implementasi teknologi *Internet of Things* (IoT) yang mampu melakukan pengawasan kualitas air secara otomatis, nirkabel, dan terus-menerus selama 24 jam. Implementasi teknologi IoT yang mengintegrasikan berbagai sensor seperti pH, TDS, dan *turbidity* menjadi solusi mutakhir untuk mengatasi keterbatasan pemantauan kualitas air secara konvensional, di mana sistem berbasis mikrokontroler hemat daya kini dapat dikombinasikan dengan kecerdasan lokal guna mendukung kesiapsiagaan pemantauan lingkungan secara *real-time*[18]. Selain itu, perkembangan teknologi kecerdasan buatan khususnya *machine learning* dan *deep learning* sudah banyak digunakan dalam menganalisis data sensor karena kemampuannya mempelajari pola *nonlinear* dari data historis *multisensor* selama 24 jam untuk menghasilkan prediksi jangka panjang yang lebih tepat[19]. Salah satu metode *deep learning* yang sangat efektif untuk memproses data tabular parameter fisik-kimia secara mendalam adalah *Deep Neural Network* (DNN). Struktur komputasi DNN yang fleksibel dengan lapisan-lapisan tersembunyi (*hidden layers*) sangat andal diimplementasikan pada arsitektur prosesor *embedded* berbiaya murah untuk mengenali pola data yang kompleks[20].

Namun, kompleksitas arsitektur *deep neural network* konvensional sering kali menuntut sumber daya komputasi dan memori yang besar, sehingga menjadi tantangan utama saat akan diterapkan pada perangkat *edge*[21]. Masalah keterbatasan kapasitas pemrosesan dan konsumsi daya yang ketat ini dapat diatasi melalui teknik kompresi model (*network*

compression) demi mewujudkan kecerdasan buatan yang ramah energi (*Green AI*)[22]. Kemajuan teknologi komputasi saat ini memungkinkan model dijalankan langsung di perangkat dengan menerapkan konsep *Tiny Machine Learning (TinyML)* melalui *framework* sumber terbuka seperti *TensorFlow Lite Micro* yang dirancang khusus untuk mengatasi keterbatasan memori pada sistem tertanam[23]. Integrasi teknik kompresi dapat dilakukan secara sekuensial, dimulai dari *magnitude-based weight pruning* untuk memotong elemen bobot yang tidak signifikan mendekati nol, lalu dilanjutkan dengan *post-training quantization (INT8)* untuk mengubah presisi matematika dari *float32* menjadi *integer 8-bit*[24]. Pendekatan *pruning* dan kuantisasi ini terbukti mampu memangkas ukuran penyimpanan file model secara drastis serta mempercepat inferensi lokal pada mikrokontroler tanpa menyebabkan penurunan akurasi yang ekstrem[25].

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem klasifikasi kualitas air menggunakan metode *Deep Neural Network (DNN)* yang dilatih menggunakan dataset parameter sensor air (pH, TDS, dan *turbidity*). Model DNN yang telah optimal kemudian dikompresi menggunakan metode *manual magnitude pruning* dan dikonversi menggunakan *TensorFlow Lite Full Integer Quantization (INT8)* agar dapat ditanamkan pada perangkat mikrokontroler dengan sumber daya rendah seperti ESP32. Melalui pendekatan *TinyML* ini, proses prediksi kelayakan air dapat dilakukan secara mandiri di sisi pengguna (*edge AI*) tanpa

ketergantungan pada server pusat, sehingga memberikan solusi pemantauan kualitas air yang lebih cepat, efisien, dan hemat energi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, adapun permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana mengompresi model DNN tersebut menggunakan kombinasi teknik *manual magnitude-based pruning* dan *Post-Training Full Integer Quantization* (INT8) lewat *framework TensorFlow Lite*?
2. Bagaimana mengimplementasikan (*deploy*) file model *.tflite* hasil kuantisasi tersebut ke dalam perangkat mikrokontroler ESP32 menggunakan konsep *TinyML*?
3. Bagaimana performa hasil pengujian model (metrik akurasi dan ukuran file) setelah dijalankan di dalam lingkungan perangkat keras ESP32 secara lokal?

1.3 Batasan Masalah

Dalam batasan masalah yang dihadapi diperlukan ruang lingkup permasalahan, hal ini bertujuan agar pembatasan tidak terlalu meluas. Maka ruang lingkup yang akan dibahas yaitu:

1. Penelitian ini menggunakan modul mikrokontroler ESP32 untuk proses *deployment* model. Namun, penelitian ini tidak menggunakan fisik sensor kualitas air (pH, TDS, dan *turbidity*) nyata. Input data sensor digantikan menggunakan data sekunder (dataset tabular) yang disimulasikan atau dikirim ke memori ESP32.

2. Algoritma kecerdasan buatan yang digunakan terbatas pada metode *Deep Neural Network* (DNN) untuk klasifikasi biner dengan dua kelas output, yaitu "Layak" dan "Tidak Layak".
3. Optimasi model berfokus pada dua teknik sekuensial, yaitu *Manual Magnitude-Based Pruning*, dilanjutkan dengan metode *Post-Training Full Integer Quantization* (INT8).
4. Model yang telah dikonversi menjadi format .tflite (INT8) akan diunggah dan dijalankan langsung di dalam *board* mikrokontroler ESP32 untuk menguji kemampuan proses inferensi lokal (*on-device inference*), mengacu pada batasan komputasi arsitektur mikrokontroler

1.4 Tujuan Dan Manfaat

1.4.1 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem klasifikasi kualitas air cerdas pada perangkat *edge* dengan memanfaatkan pendekatan *Tiny Machine Learning* (TinyML). Secara spesifik, penelitian ini berfokus pada perancangan model *Deep Neural Network* (DNN) untuk klasifikasi biner kelayakan air berdasarkan parameter pH, TDS, dan *turbidity*. Model tersebut kemudian dioptimalkan kinerjanya melalui teknik *manual magnitude-based pruning* dan konversi *TensorFlow Lite Full Integer Quantization* (INT8) agar dapat ditanamkan (*deploy*) dan disimulasikan langsung di dalam mikrokontroler ESP32. Melalui metode ini, diharapkan dapat dibuktikan bahwa kompresi jaringan mampu menghasilkan model yang

sangat ringan, hemat energi, dan adaptif untuk eksekusi komputasi lokal tanpa ketergantungan pada server pusat.

1.4.2 Manfaat

Adapun manfaat dari implelementasi Kompresi *Model Deep Neural Network* dengan *Pruning* dan *Quantization* Untuk Klasifikasi Kualitas Air Berbasis ESP32 adalah sebagai berikut:

1. Bagi Mahasiswa

- a. Memberikan pemahaman mendalam mengenai alur kerja pemuatan (*deployment*) model kecerdasan buatan dari lingkungan *software* komputer ke dalam arsitektur sistem tertanam dengan memori terbatas
- b. Memberikan pengalaman kepada mahasiswa dalam menerapkan teknik kompresi jaringan tingkat lanjut, khususnya *manual magnitude-based pruning* dan *Post-Training Full Integer Quantization*
- c. Mengaplikasikan teori yang diperoleh selama perkuliahan ke dalam implementasi nyata pada bidang kecerdasan buatan

2. Bagi Universitas Harkat Negeri Tegal

- a. Menjadi salah satu referensi atau bahan kajian bagi mahasiswa dan dosen dalam pengembangan penelitian yang berkaitan dengan teknologi *Internet of Things* (IoT).
- b. Meningkatkan kontribusi universitas dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi yang bermanfaat bagi masyarakat.

3. Bagi Industri

- a. Memberikan solusi teknologi yang dapat membantu industri dalam mengontrol dan memantau kualitas air
- b. Meningkatkan kualitas penelitian dan pengembangan teknologi khususnya pada bidang *machine learning* dan *Internet of Thing*

1.5 Sistematika Penulisan Laporan

Laporan Tugas Akhir ini terdiri dari 6 (enam) bab, yang masing-masing bab diuraikan dengan perincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, rumusan masalah, Batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dijelaskan tentang penelitian terkait yaitu berupa materi tentang penelitian yang serupa dengan

penelitian yang dilakukan dan membahas teori-teori tentang kajian yang diteliti.

BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini membahas tentang langkah-langkah yang dapat dilakukan dengan bantuan beberapa metode, teknik, serta alat yang digunakan seperti prosedur penelitian, metode pengumpulan data, serta tempat dan waktu penelitian.

BAB IV ANALISIS DAN PERANCANGAN SISTEM

Bab ini membahas mengenai analisi dan perancangan sistem, mencakup identifikasi kebutuhan sistem, serta proses perancangan sistem yang dilakukan

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi penjelasan mengenai hasil implementasi sistem yang telah dirancang serta pembahasann terhadap hasil pengujian sistem.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan kesimpulan dari pembahasan pada bab-bab sebelumnya serta memberikan saran untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.