

Rancang Bangun Sistem Pakar Pemantau Kualitas Air Berbasis IoT Menggunakan *Fuzzy Classifier*

Muhammad Hisyamudin Ramadhan¹, Gunawan Dewantoro², dan Fransiscus Dalu Setiaji³

Fakultas Teknik Elektronika dan Komputer, Universitas Kristen Satya Wacana
Jl. Diponegoro 52-60, Salatiga, 50711, Indonesia

hisyamudin.ramadhan99@gmail.com¹, gunawan.dewantoro@staff.uksw.edu², fdsetiaji@gmail.com³

Abstract— The classification of water quality is vital to ensure that the water has been properly utilized. As of today, the water treatment plant employs a conventional method by taking water sample, measuring all of water quality parameters, and analyzing each sample. Besides, the conclusion-drawing processes have not been incorporated which might lead to water quality misclassification and prolonged efforts. In this study, an expert system was developed to monitor the water quality in real time fashion, therefore it could be accessed anytime and anywhere. The water quality analysis process was conducted by means of fuzzy classifier, and implemented on Arduino Mega 2560 board. The fuzzy inputs included pH value, total dissolved solid (TDS), and turbidity. A fuzzy inference system was employed to classify the water quality into three classes, namely good (meet the hygiene standards), fair, and poor (polluted). The expert system successfully yielded the inference results with a success rate of 100%. The water quality monitoring and classification could be accessed online through Internet of Things (IoT) platform Thingspeak.

Keywords— water quality, fuzzy classifier, pH, TDS, turbidity

Abstrak— Klasifikasi kualitas air sangat diperlukan untuk memastikan penggunaan air yang diuji sudah sesuai peruntukannya. Selama ini Perusahaan Air Minum Daerah (PDAM) menggunakan metode konvensional dengan cara mengambil sampel air, mengukur semua parameter kualitas air, dan menganalisis satu per satu. Selain itu, proses pengambilan kesimpulan kualitas air belum terintegrasi sehingga dapat menyebabkan misklasifikasi kualitas air dan memperlama pekerjaan. Pada penelitian ini dirancang sebuah sistem pakar untuk memantau kualitas air yang bekerja secara *real time* agar bisa diakses kapanpun dan di manapun. Proses analisis kualitas air dilakukan dengan *fuzzy classifier* yang direalisasikan menggunakan Arduino Mega 2560. Variabel masukan fuzzy meliputi nilai pH, *total dissolved solids* (TDS) atau zat padat terlarut, dan *turbidity* atau kekeruhan. Sebuah sistem inferensi fuzzy digunakan untuk mengklasifikasikan kualitas air ke dalam tiga kelas yaitu baik (memenuhi baku mutu), biasa, dan buruk (tercemar). Sistem pakar sukses memberikan hasil inferensi dengan persentase keberhasilan 100%. Hasil pemantauan serta klasifikasi kualitas air dapat diakses secara daring menggunakan *Internet of Things (IoT) platform ThingSpeak*.

Kata kunci— kualitas air, *fuzzy classifier*, pH, TDS, *turbidity*

I. PENDAHULUAN

Air adalah kebutuhan utama yang dibutuhkan untuk keperluan sehari-hari manusia. Air yang digunakan harus memenuhi persyaratan yang diatur pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 32 tahun 2017 mengenai Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air bagi Keperluan Higiene Sanitasi, seperti yang ditunjukkan pada Tabel I [1]. Air memiliki banyak kegunaan untuk kebutuhan higiene sanitasi meliputi mandi, cuci bahan makanan, cuci piring, cuci pakaian, maupun untuk air minum. Air yang tercemar mengakibatkan banyak dampak buruk, misalnya rusaknya lingkungan hidup, ketidaknyamanan lingkungan, hingga menurunkan tingkat kesehatan dan keselamatan manusia. Penentuan kualitas air masih banyak dilakukan dengan metode konvensional yaitu dengan cara mengukur dan menganalisis satu per satu data hasil pengujian. Hal ini tentu akan membutuhkan waktu yang cukup lama, juga

anggaran yang tidak kecil. Berbagai cara telah dilakukan untuk memantau kualitas air yang meliputi pH, tingkat kekeruhan, temperatur, TDS. Sensor parameter tersebut digunakan bersama mikrokontroler untuk mendapatkan nilai kualitas air yang ditampilkan pada komputer menggunakan kabel [2] - [4].

TABEL I. STANDAR BAKU MUTU KESEHATAN LINGKUNGAN DAN PERSYARATAN KESEHATAN AIR BAGI KEPERLUAN HIGIENE SANITASI

No	Parameter	Satuan	Standar baku mutu
1	Kekeruhan	NTU	25
2	pH	mg/l	6,5-8,5
3	Zat padat terlarut (TDS)	mg/l atau ppm	1000
4	Suhu	°C	Suhu udara \pm 3
5	Rasa	-	Tidak berasa
6	Bau	-	Tidak berbau

Namun hal ini berarti bahwa pengguna harus berada di lokasi pengukuran untuk mengetahui nilai yang diukur. Penggunaan jaringan komunikasi dapat meningkatkan jarak pemantauan hingga beberapa puluh meter secara nirkabel. Komunikasi antar node dapat dilakukan oleh protokol komunikasi Zigbee yang memungkinkan pengguna tidak harus berada di lokasi pengukuran [5] - [7]. Komunikasi nirkabel juga telah dilakukan untuk membangun *wireless sensor network* (WSN) yang terdiri dari beberapa titik sensor yang dapat mengirim data kualitas air secara nirkabel ke komputer *host* [8] - [10]. Jaringan telekomunikasi komersial GSM telah dimanfaatkan untuk pemantauan kualitas air dengan mengirimkan data akuisisi sensor menggunakan *Short Text Message* (SMS). Namun sistem ini sangat bergantung pada infrastruktur telekomunikasi pada daerah tersebut [11] - [13].

Seiring makin meluasnya cakupan utilisasi internet, maka makin marak pula integrasi internet ke berbagai perangkat keras. Dengan teknologi *Internet of Things* (IoT), maka komunikasi antara pengguna dan perangkat keras dapat dilakukan di manapun dan kapanpun [14]. Telah dilakukan beberapa penelitian dan realisasi alat pemantau kualitas air yang berbasis IoT. Sistem pemantau aliran dan ketinggian air diintegrasikan dengan internet, sehingga pelanggan air di rumah dapat memantau menggunakan ponsel pintar [15]. Pemanfaatan internet juga dilakukan pada pemantauan kualitas air dan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap standar World Health Organization (WHO). Data yang diekstrak sensor dikirim ke aplikasi *desktop* menggunakan platform NET [16]. Pada pengolahan air limbah, IoT telah diintegrasikan untuk memantau kualitas air limbah. Data sensor dari beberapa pabrik pengolahan air limbah diolah untuk mendukung pengambilan keputusan [17]. Mekanisme pelaporan data kualitas air telah direalisasikan menggunakan IoT pada konfigurasi *wireless sensor network*. Hal ini membuat pengiriman data menjadi lebih fleksibel dan memiliki performa yang baik [18]. Pada penelitian lainnya, dilakukan suatu pemantauan air dengan menggunakan IoT pada beberapa parameter seperti pH, aliran air, dan kelembaban tanah. Alat tersebut menggunakan modul WiFi ESP8266 berbasis IoT dalam merancang *smart irrigation*. Penggunaan IoT digunakan untuk mengirim dan menerima informasi ke situs *website* melalui internet [19]. Manajemen kualitas air yang cerdas berbasis IoT telah direalisasikan dengan membuat prediksi kualitas air berdasarkan data historis. Dengan adanya fitur prediksi ini, maka kualitas air yang abnormal di masa mendatang dapat diantisipasi dan dijaga pada rentang ideal [20]. Pada penelitian [21], telah dirancang sistem pengontrol air untuk mengurangi masalah pemborosan air dengan memanfaatkan teknologi IoT. Penggunaan beberapa sensor untuk mendapatkan data kemudian mengirim data ke modul WiFi ESP8266 untuk selanjutnya dikirim menuju *cloud*. Data pada *cloud* dikumpulkan dan dianalisa oleh pengguna untuk memecahkan masalah terkait.

Pada penelitian [15] - [21], proses pemantauan telah dapat dilakukan menggunakan platform IoT. Namun tidak semua orang dapat menerjemahkan data sensor tersebut untuk mengklasifikasi kualitas air. *Fuzzy classifier* berperan untuk menerjemahkan data *crisp* yang ada menjadi suatu kelas tertentu. Penerapan *fuzzy classifier* telah dilakukan untuk beberapa bidang, meliputi: klasifikasi makanan [22], pendidikan dan pembelajaran [23], ergonomika [24], kedokteran [25], klasifikasi berbasis citra [26], dan sebagainya.

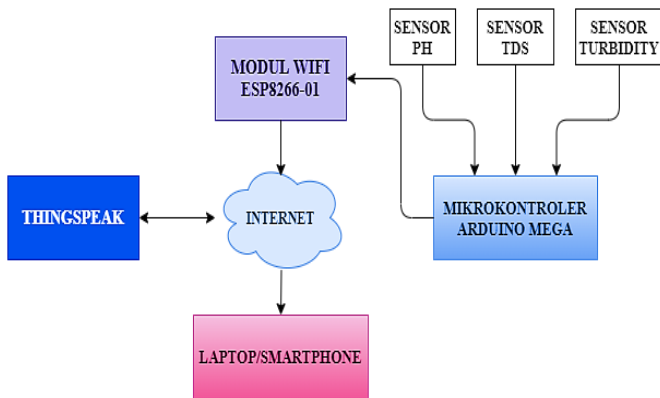
Pada penelitian ini, sebuah sistem pakar berbasis logika fuzzy dibangun untuk klasifikasi kualitas air. Variabel yang diukur berupa nilai keasaman (pH), *total dissolved solids* (TDS), dan *turbidity*. Ketiga variabel ini dipilih karena ketiganya merupakan parameter fisik dan kimia yang paling mempengaruhi kualitas air seperti ditunjukkan pada Tabel I. Parameter tersebut menjadi masukan bagi sistem pakar berbasis fuzzy untuk mengklasifikasikan kualitas air menjadi tiga kelas yaitu: baik (memenuhi baku mutu), biasa, dan buruk (tercemar). Hasil klasifikasi yang telah dihasilkan kemudian ditampilkan pada *platform* IoT ThingSpeak sehingga dapat diakses oleh pengguna kapanpun dan di manapun.

II. METODE

Sistem yang dirancang adalah sistem yang dapat memantau kualitas air secara *real time* berdasarkan parameter yang berasal dari sensor pH, kekeruhan, dan jumlah partikel zat padat terlarut serta memberikan hasil klasifikasi terhadap baik dan buruknya kualitas air tersebut. *Fuzzy classifier* digunakan sebagai algoritma pengambil keputusan untuk memberikan kesimpulan terhadap kualitas air yang dibagi menjadi tiga yaitu: baik (memenuhi baku mutu), biasa, dan buruk (tercemar).

Data hasil pemantauan akan diproses oleh Arduino Mega 2560 lalu dikirim menuju *server* API ThingSpeak untuk diolah lagi secara numerik. Kemudian data tersebut ditampilkan dalam bentuk grafik pada *channel* ThingSpeak serta dapat diunduh dalam format *.csv* yang dapat dibuka menggunakan Microsoft Excel. Sistem yang bekerja secara *real time* akan mempermudah pengguna dalam memantau kualitas air tanpa harus melakukan uji kualitas air secara manual.

Sistem ini terdiri dari tiga perancangan yaitu perancangan perangkat keras, perancangan elektronik, dan perancangan perangkat lunak, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Perangkat keras yang digunakan dalam merancang sistem ini terdiri dari papan Arduino Mega 2560, sensor tiap parameter, modul WiFi ESP8266, dan adaptor AC to DC 9V 2A. Perancangan elektronik dilakukan dengan melakukan proses *wiring* atau menyambungkan semua sensor dan modul WiFi dengan Arduino Mega 2560 sesuai dengan pin yang dipakai. Untuk perangkat lunak yang digunakan berupa program yang dikodekan pada Arduino Integrated Development Environment (IDE) untuk mengolah data dari sensor, mengirim data menggunakan modul WiFi ESP8266 serta perancangan *fuzzy classifier* sebagai bagian dari sistem pakar yang dirancang.



Gambar 1. Diagram blok sistem

A. Tahapan *Fuzzy Classifier*

Proses pada *fuzzy classifier* terdiri dari 4 tahap yaitu proses akuisisi data masukan, fuzzifikasi, proses inferensi fuzzy, dan defuzzifikasi. Pada tahap pertama, data pH, TDS, dan *turbidity* air diukur oleh sensor. Data tersebut merupakan data *crisp* yang menjadi masukan pada proses fuzzifikasi. Pada proses fuzzifikasi, data *crisp* diubah menjadi peubah fuzzy sesuai himpunan fuzzy yang bersesuaian dengan derajat keanggotaan antara 0 – 1. Tiap peubah fuzzy memiliki beberapa himpunan fuzzy yang diberi label linguistik untuk memudahkan perancangan. Selanjutnya, pada proses inferensi fuzzy dibuat satu set aturan yang memberikan relasi antara masukan dan keluaran. Aturan ini bergantung pada pengetahuan dan pengalaman yang dimiliki perancang. Tiap aturan akan menghasilkan nilai α -predikat yang akan digunakan untuk mencari nilai *crisp* peubah keluaran yaitu kualitas air.

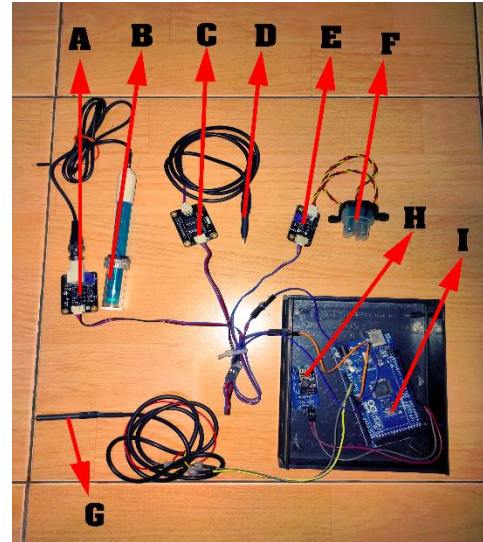
Tahap selanjutnya adalah menghitung nilai defuzzifikasi dengan menggunakan metode *centroid*. Kemudian akan didapatkan hasil yang akan disimpulkan ke dalam tiga kelas yaitu memenuhi baik (memenuhi baku standar), biasa, dan buruk (tercemar). Metode *center of gravity* (CoG) diperoleh dengan cara mencari titik pusat luasan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$z = \frac{\sum_i^K \mu(v_i)v_i}{\sum_i^K \mu(v_i)} \tag{1}$$

di mana z adalah nilai *crisp* hasil defuzzifikasi, v_i adalah nilai keluaran pada aturan ke- i dengan masukan v , $\mu(v_i)$ adalah derajat keanggotaan v_i , dan K adalah banyaknya aturan yang digunakan

B. Perancangan Perangkat Keras

Pada perancangan sistem ini menggunakan *box* berwarna hitam yang terbuat dari plastik. *Box* tersebut berfungsi untuk melindungi komponen dari tetesan air. Realisasi alat dapat diamati pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian dalam *box*

Keterangan Gambar 2:

- A : *Board* sensor pH
- B : Sensor pH
- C : *Board* sensor TDS
- D : Sensor TDS
- E : *Board* sensor *turbidity*
- F : Sensor *turbidity*
- G : Sensor suhu DS18B20
- H : Modul WiFi ESP8266 dan *adapter*
- I : Arduino Mega 2560

C. Perancangan Elektronika

1) Pengendali Utama

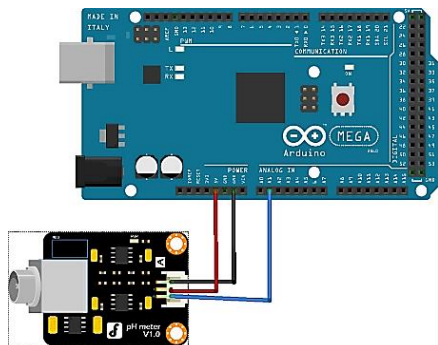
Arduino Mega 2560 digunakan sebagai pengendali utama yang berfungsi untuk melakukan pembacaan data dari semua sensor, melakukan konversi data analog ke data digital, melakukan pengolahan data, mendapatkan hasil klasifikasi kualitas air, dan mengirimkan data sensor yang telah diolah menuju *website* ThingSpeak dengan menggunakan bantuan modul WiFi ESP8266. Tabel II menunjukkan konfigurasi pin mikrokontroler Arduino Mega 2560.

TABEL II. KONFIGURASI PIN ARDUINO MEGA 2560

No	Nama Pin	Fungsi
1	Pin A1	Terhubung dengan sensor pH untuk mengukur pH dari sampel air
2	Pin A2	Terhubung dengan sensor TDS untuk mengukur jumlah zat padat terlarut pada sampel air
3	Pin A3	Terhubung dengan sensor <i>turbidity</i> , untuk mengukur kekeruhan pada sampel air
4	Pin D16 (TX2)	Terhubung dengan RX dari modul ESP8266
5	Pin D17 (RX2)	Terhubung dengan TX dari modul ESP8266
6	<i>Power Jack</i>	Terhubung dengan <i>power supply</i>

2) Sensor pH DFRobot

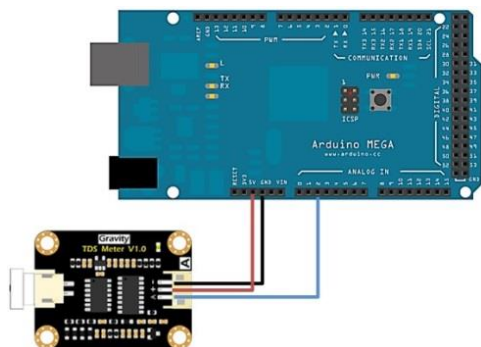
Sensor pH DFRobot adalah sensor pengukur pH analog yang dirancang untuk mengukur pH suatu larutan dan menganalisis keasaman atau alkalinitasnya. Sensor ini umumnya digunakan dalam berbagai aplikasi seperti *aquaponics*, *aquaculture*, dan pengujian air pada lingkungan. Pengkabelan antara sensor pH dengan Arduino Mega 2560 ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Arduino Mega 2560 dengan sensor pH

3) Sensor TDS DFRobot

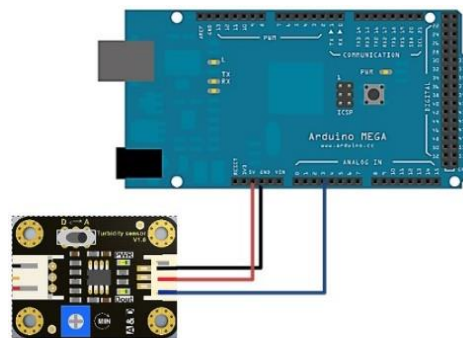
Sensor TDS digunakan untuk menunjukkan banyaknya kuantitas padatan terlarut dalam satuan milligram yang dilarutkan pada satu liter air. Secara umum, semakin tinggi nilai TDS, semakin mudah pula padatan yang terlarut dalam air dan semakin kotor airnya. Oleh karena itu, nilai TDS dapat digunakan sebagai salah satu titik referensi untuk mengukur kebersihan air. Pengkabelan antara sensor TDS dengan Arduino Mega 2560 ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Rangkaian Arduino Mega dengan sensor TDS DFRobot

4) Sensor *Turbidity* DFRobot

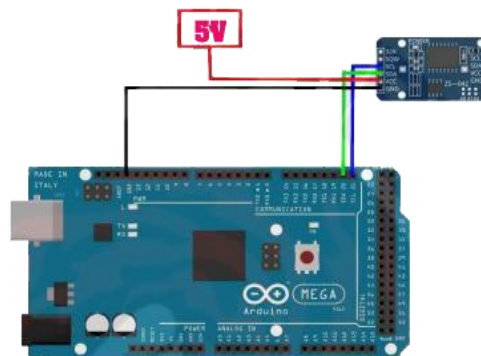
Sensor *turbidity* berfungsi untuk mengukur tingkat kekeruhan air. Sensor tersebut memanfaatkan cahaya yang digunakan untuk mendeteksi partikel tersuspensi pada air berdasarkan tingkat hamburannya. Secara umum, jumlah partikel tersuspensi sebanding dengan tingkat kekeruhan air. Sensor ini dapat menghasilkan keluaran sinyal analog maupun digital. Pengkabelan antara sensor *turbidity* dengan Arduino Mega 2560 ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Rangkaian Arduino Mega dengan sensor *turbidity* DFRobot

5) Koneksi dengan Modul WiFi ESP8266

ESP8266 merupakan modul yang berfungsi untuk menghubungkan Arduino Mega dengan jaringan internet. Koneksi internet dibutuhkan dengan tujuan agar data yang diperoleh dari sensor pH, TDS, dan *turbidity* dapat dikirimkan ke *website* ThingSpeak sehingga data dapat dilihat secara daring. Pengkabelan antara modul WiFi dengan Arduino Mega 2560 ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Rangkaian Arduino Mega dengan modul WiFi ESP8266

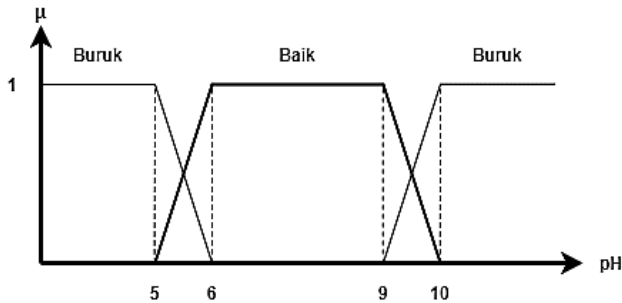
D. Perancangan *Fuzzy Classifier*

Penelitian ini menggunakan suatu sistem pakar berbasis *fuzzy classifier* yang dapat menentukan kualitas air berdasarkan parameter masukan menjadi tiga kelas yaitu: baik (memenuhi baku standar), biasa, dan buruk (tercemar). Pembentukan variabel linguistik dilakukan setelah perancang memiliki pengetahuan tentang rentang ideal masing-masing parameter, seperti ditunjukkan pada Tabel III. Nilai tersebut selanjutnya menjadi batas antar himpunan fuzzy.

TABEL III. BATAS NILAI TDS, *TURBIDITY*, DAN PH

No	Sensor	Batas Nilai	Variabel Linguistik
1	Sensor pH	$pH \leq 6$	Buruk
		$6 < pH < 9$	Baik
		$pH \geq 9$	Buruk
2	Sensor TDS	300 mg/l	Rendah
		1200 mg/l	Tinggi
3	Sensor <i>turbidity</i>	0 NTU	Rendah
		30 NTU	Tinggi

Berdasarkan Tabel III, kemudian dibuat fungsi keanggotaan yang menunjukkan hubungan dari masing-masing variabel linguistik. Untuk fungsi keanggotaan masukan pH, dirancang dua himpunan fuzzy seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Persamaan matematis tiap himpunan fuzzy dari pH ditunjukkan pada (2) dan (3).

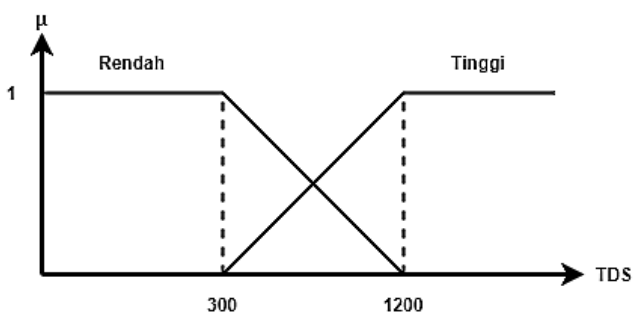


Gambar 7. Fungsi keanggotaan pH

$$\mu_{BURUK}(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 5 \text{ atau } x \geq 10 \\ \frac{6-x}{1} & ; 5 \leq x \leq 6 \\ \frac{x-9}{1} & ; 9 \leq x \leq 10 \\ 0 & ; 6 \leq x \leq 9 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{BAIK}(x) = \begin{cases} 1 & ; 6 \leq x \leq 9 \\ \frac{x-5}{1} & ; 5 \leq x \leq 6 \\ \frac{10-x}{1} & ; 9 \leq x \leq 10 \\ 0 & ; x \leq 5 \text{ atau } x \geq 10 \end{cases} \quad (3)$$

Untuk fungsi keanggotaan masukan TDS, dirancang dua himpunan fuzzy seperti ditunjukkan Gambar 8. Persamaan matematis tiap himpunan fuzzy dari TDS ditunjukkan pada (4) dan (5).

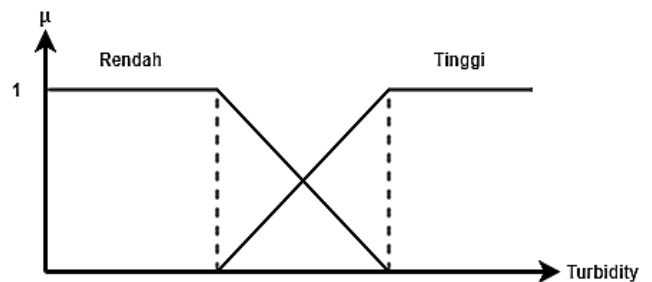


Gambar 8. Fungsi keanggotaan TDS

$$\mu_{RENDAH}(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 300 \\ \frac{1200-x}{900} & ; 300 \leq x \leq 1200 \\ 0 & ; x \geq 1200 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{TINGGI}(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq 300 \\ \frac{x-300}{900} & ; 300 \leq x \leq 1200 \\ 1 & ; x \geq 1200 \end{cases} \quad (5)$$

Untuk fungsi keanggotaan masukan turbidity, dirancang dua himpunan fuzzy seperti ditunjukkan pada Gambar 9. Persamaan matematis tiap himpunan fuzzy dari turbidity ditunjukkan pada (6) dan (7).



Gambar 9. Fungsi keanggotaan turbidity

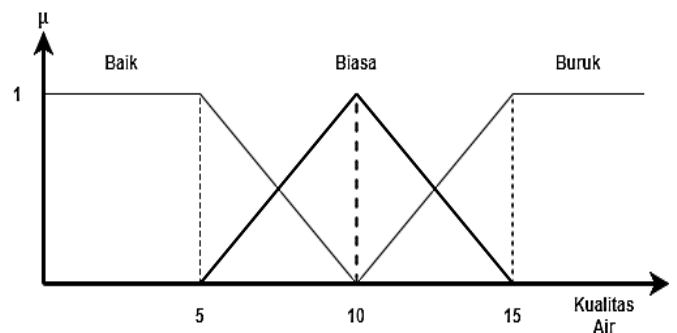
$$\mu_{RENDAH}(x) = \begin{cases} 1 & ; x \leq 0 \\ \frac{30-x}{30} & ; 0 \leq x \leq 30 \\ 0 & ; x \geq 30 \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{TINGGI}(x) = \begin{cases} 0 & ; x \leq 0 \\ \frac{x-0}{30} & ; 0 \leq x \leq 30 \\ 1 & ; x \geq 30 \end{cases} \quad (7)$$

Untuk menentukan kesimpulan kualitas air dari parameter pH, TDS, dan turbidity maka dibuatlah suatu variabel pembatas, yang sesuai dengan jenis kualitas air, yaitu: baik, biasa, dan buruk, seperti ditunjukkan pada Tabel IV. Pada fungsi keanggotaan keluaran kualitas air dirancang tiga himpunan fuzzy seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Persamaan matematis tiap himpunan fuzzy dari kualitas air ditunjukkan pada (8) - (10).

TABEL IV. BATAS NILAI KUALITAS AIR

No	Nilai	Variabel Linguistik
1	5	Baik
2	10	Biasa
3	15	Buruk



Gambar 10. Fungsi keanggotaan kualitas air

$$\mu_{BAIK}(x) = \begin{cases} 1 & ;x \leq 5 \\ \frac{10-x}{5} & ;5 \leq x \leq 10 \\ 0 & ;x \geq 10 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{BIASA}(x) = \begin{cases} 0 & ;x \leq 5 \text{ atau } x \geq 15 \\ \frac{x-5}{5} & ;5 \leq x \leq 10 \\ \frac{15-x}{5} & ;10 \leq x \leq 15 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_{BURUK}(x) = \begin{cases} 0 & ;x \leq 5 \\ \frac{x-10}{5} & ;10 \leq x \leq 15 \\ 1 & ;x \geq 15 \end{cases} \quad (10)$$

Selanjutnya pada tahap penentuan α -predikat dilakukan inferensi aturan fuzzy dengan cara mengevaluasi tiap aturan menggunakan masukan yang dihasilkan dari proses fuzzifikasi. Derajat keanggotaan dari bagian anteseden digunakan untuk menentukan derajat kebenaran bagian konsekuen. Aturan inferensi fuzzy yang dibuat berjumlah 8 buah yang ditunjukkan sebagai berikut:

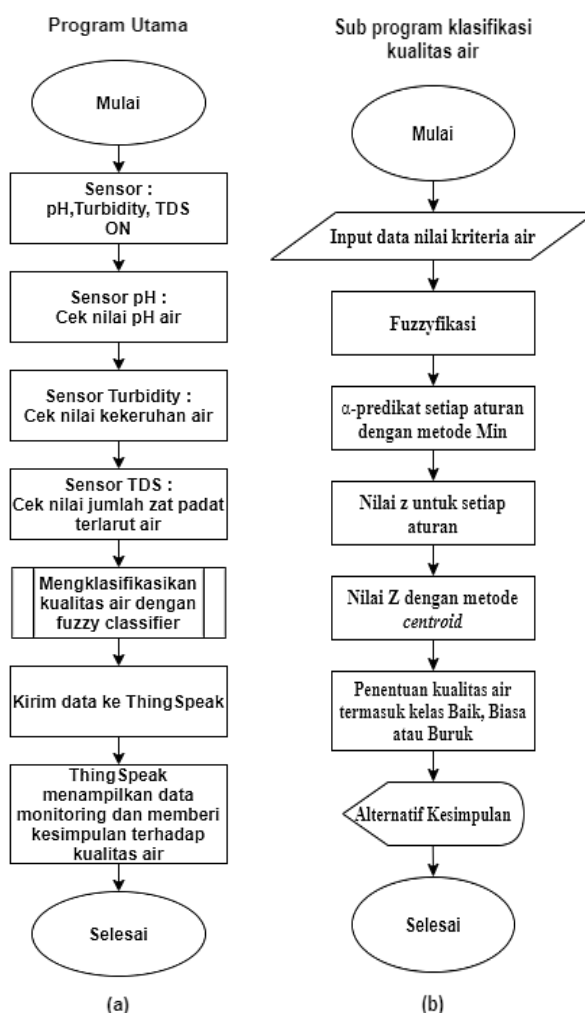
- [R1] IF (TDS RENDAH AND *TURBIDITY* RENDAH AND PH BURUK) THEN AIR BIASA
- [R2] IF (TDS RENDAH AND *TURBIDITY* RENDAH AND PH BAIK) THEN AIR BAIK
- [R3] IF (TDS RENDAH AND *TURBIDITY* TINGGI AND PH BURUK) THEN AIR BURUK
- [R4] IF (TDS RENDAH AND *TURBIDITY* TINGGI AND PH BAIK) THEN AIR BIASA
- [R5] IF (TDS TINGGI AND *TURBIDITY* RENDAH AND PH BURUK) THEN AIR BURUK
- [R6] IF (TDS TINGGI AND *TURBIDITY* RENDAH AND PH BAIK) THEN AIR BIASA
- [R7] IF (TDS TINGGI AND *TURBIDITY* TINGGI AND PH BURUK) THEN AIR BURUK
- [R8] IF (TDS TINGGI AND *TURBIDITY* TINGGI AND PH BAIK) THEN AIR BURUK

Dari hasil α -predikat yang telah didapat, tahap selanjutnya adalah proses defuzzifikasi, yakni mengembalikan ke variabel *crisp* yang diberi notasi z menggunakan (1). Dari hasil perhitungan dengan metode CoG kemudian didapat nilai *crisp* z . Saat menentukan kelas kualitas air yang dipilih, kualitas air ditunjukkan oleh nama linguistik himpunan fuzzy yang derajat keanggotaan lebih besar saat nilai kualitas air sama dengan z . Misalkan jika didapat hasil defuzzifikasi $z=14$, maka berdasarkan Gambar 10 nilai $z=14$ terletak terletak pada himpunan biasa dan buruk. Untuk menentukan derajat keanggotaannya digunakan (9) dan (10). Selanjutnya dipilih himpunan fuzzy yang nilai derajat keanggotaannya yang paling besar untuk menentukan hasil klasifikasi kualitas air, yakni Buruk.

E. Perancangan Perangkat Lunak

Seluruh rangkaian perintah pada sistem ini dijalankan oleh Arduino Mega 2560. Alur kerja dari sisi perangkat lunak dijelaskan melalui diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 11. Berikut adalah penjelasan dari diagram alir cara kerja sistem:

1. Pada kondisi *on*, semua sensor melakukan pemantauan pada sampel air.
2. Arduino Mega 2560 melakukan cek pada sensor, memastikan semua sensor sudah berhasil melakukan pemantauan.
3. Arduino Mega 2560 mengklasifikasikan kualitas air dengan *fuzzy classifier*.
4. Arduino Mega 2560 melakukan cek koneksi WiFi melalui modul WiFi ESP8266. Jika terdapat koneksi WiFi maka akan otomatis tersambung dengan ESP8266.
5. Data air yang sudah diproses oleh Arduino kemudian dikirim menuju API ThingSpeak.
6. ThingSpeak menampilkan data *monitoring* serta menampilkan hasil kesimpulan kualitas air.



Gambar 11. Diagram alir (a) program utama dan (b) sub program klasifikasi kualitas air

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan dijelaskan perihal pengujian sistem dan analisis dari hasil pengujian. Pengujian tersebut bertujuan untuk mengetahui hasil dari cara kerja sistem serta untuk melihat tingkat keberhasilan sistem sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan.

A. Pengujian Sensor

Pengujian sensor dilakukan dengan cara menguji ketiga sensor dengan menggunakan enam jenis sampel air yaitu air PDAM, air sungai, air garam, air gula, air jeruk, dan air sabun. Pengujian sensor pH dilakukan dengan menggunakan sensor pH analog DFRobot V.1. Sensor ini memiliki akurasi sebesar $\pm 0,1$ pH pada saat suhu 25°C dan memiliki waktu respon ≤ 1 menit. Untuk pengujian sensor TDS dilakukan menggunakan sensor TDS analog DFRobot. Sensor ini memiliki akurasi sebesar $\pm 10\%$ F.S. pada saat suhu 25°C dan memiliki rentang nilai pengukuran sebesar $0 - 1000$ ppm. Sementara pengujian sensor kekeruhan dilakukan menggunakan sensor *Turbidity* analog DFRobot. Sensor ini memiliki waktu respon < 500 ms dan dapat bekerja dengan optimal pada rentang suhu sebesar $5^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$. Percobaan pengujian ketiga sensor tersebut dilakukan dengan cara mengukur nilai pH, TDS, dan *turbidity* enam sampel jenis air, seperti yang ditunjukkan pada Tabel V.

B. Pengujian *Fuzzy Classifier*

Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil keluaran *fuzzy classifier* pada Arduino dengan hasil menghitung manual menggunakan data yang dihasilkan oleh sensor, seperti ditunjukkan pada Tabel VI. Nilai pembacaan sensor, derajat keanggotaan tiap himpunan fuzzy, dan hasil klasifikasi kualitas air bisa diamati pada Serial Monitor Arduino Mega 2560, seperti ditunjukkan pada Gambar 12.

TABEL V. PENGUJIAN PH, TDS, DAN KEKERUHAN

No	Jenis Air	Nilai pH	Nilai TDS (PPM)	Nilai Kekeruhan (NTU)
1	Air PDAM	7,48	209	0
2	Air sungai	7,45	361	6,89
3	Air dengan campuran garam	7,47	1207	0
4	Air dengan campuran gula	7,54	198	3,56
5	Air dengan campuran jeruk	3,18	1058	10
6	Air dengan campuran sabun	6,88	1113	3,56

```
pH:7.48
TDS:209
NTU : 0.00
td_rendah :
1.00
td_tinggi :
0.00
tu_rendah :
1.00
tu_tinggi :
0.00
ph_buruk :
0.00
ph_baik :
1.00
Kualitas air baik
```

Gambar 12. Hasil serial monitor untuk air PDAM

TABEL VI. PENGUJIAN FUZZY CLASSIFIER

No	Kriteria Variabel Uji	Variabel Linguistik	Derajat Keanggotaan					
			Air PDAM	Air Sungai	Air Garam	Air Gula	Air Jeruk	Air Sabun
1	pH	Buruk	0	0	0	0	1	0
		Baik	1	1	1	1	0	1
2	TDS	Rendah	1	0,93	0	1	0,16	0,1
		Tinggi	0	0,07	1	0	0,84	0,9
3	<i>Turbidity</i>	Rendah	1	0,77	1	0,88	0,67	0,88
		Tinggi	0	0,23	0	0,12	0,33	0,12
4	Nilai <i>crisp z</i> Arduino	Baik	1	0,73	0	0,88	0,21	0,16
		Biasa	0	0,27	1	0,12	0,79	0,84
		Buruk	0	0	0	0	0	0
5	Nilai <i>crisp z</i> hitung manual	Baik	1	0,73	0	0,88	0,21	0,16
		Biasa	0	0,27	1	0,12	0,79	0,84
		Buruk	0	0	0	0	0	0

C. Pengujian Hasil Keluaran Sistem

Pengujian ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil keluaran *fuzzy classifier* pada Arduino dengan hasil menghitung manual menggunakan data yang dihasilkan oleh sensor, seperti ditunjukkan pada Tabel VI. Sistem pakar sukses memberikan hasil inferensi dengan persentase keberhasilan sebesar 100%, baik pada pengujian klasifikasi kualitas air maupun menampilkan data di *website* ThingSpeak. Tabulasi pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Tabel VII.

Pengujian ini dilakukan dengan cara menguji tampilan grafik, tampilan hasil klasifikasi kualitas air, dan hasil unduhan data pada *website* ThingSpeak. Data yang ditampilkan ini berasal dari hasil keluaran sensor yang diolah oleh Arduino, yang kemudian dikirim menuju API ThingSpeak dengan menggunakan modul WiFi ESP8266-01. Kriteria keberhasilan dari pengujian ini adalah *website* ThingSpeak mampu menampilkan data dari sensor dalam bentuk grafik, ThingSpeak dapat menampilkan hasil klasifikasi kualitas air, dan ThingSpeak dapat mengunduh data sensor yang bekerja secara *real time* dalam format file *.csv*.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 13, ThingSpeak dapat menampilkan data sensor ke dalam bentuk grafik, serta dapat memberikan hasil klasifikasi kualitas air yang ditunjukkan oleh angka 1.

Berikut adalah keterangan dari *field* 4:

- Angka 1 menunjukkan bahwa air tersebut memiliki kualitas baik.
- Angka 2 menunjukkan bahwa air tersebut memiliki kualitas biasa.
- Angka 3 menunjukkan bahwa air tersebut memiliki kualitas buruk.

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 14, data dari ThingSpeak dapat diunduh di mana berisi nilai dari ketiga parameter sensor yaitu sensor pH, TDS, dan *turbidity* serta hasil klasifikasi kualitas air.

Sementara itu untuk menguji waktu transmisi yang diperlukan dari menerima masukan sensor hingga menampilkan hasil di ThingSpeak, dilakukan dengan cara merekam waktu setiap terdapat *entry* baru di *website* ThingSpeak, seperti yang ditunjukkan kolom pertama pada Gambar 14. Sementara itu pada program Arduino, telah ditetapkan bahwa program utama berulang setiap 20 detik. Sehingga hasil pengujian waktu transmisi dapat dilihat pada Tabel VIII.

Dari Tabel VIII, didapatkan rata-rata waktu transmisi yang diperlukan adalah 3,5 detik. Waktu transmisi dipengaruhi oleh adanya tundaan propagasi melalui jaringan internet hingga diterima oleh *end-user*. Untuk menunjukkan penggambaran uji sistem secara keseluruhan, seluruh aspek uji dapat dirangkum seperti yang ditunjukkan pada Tabel IX.

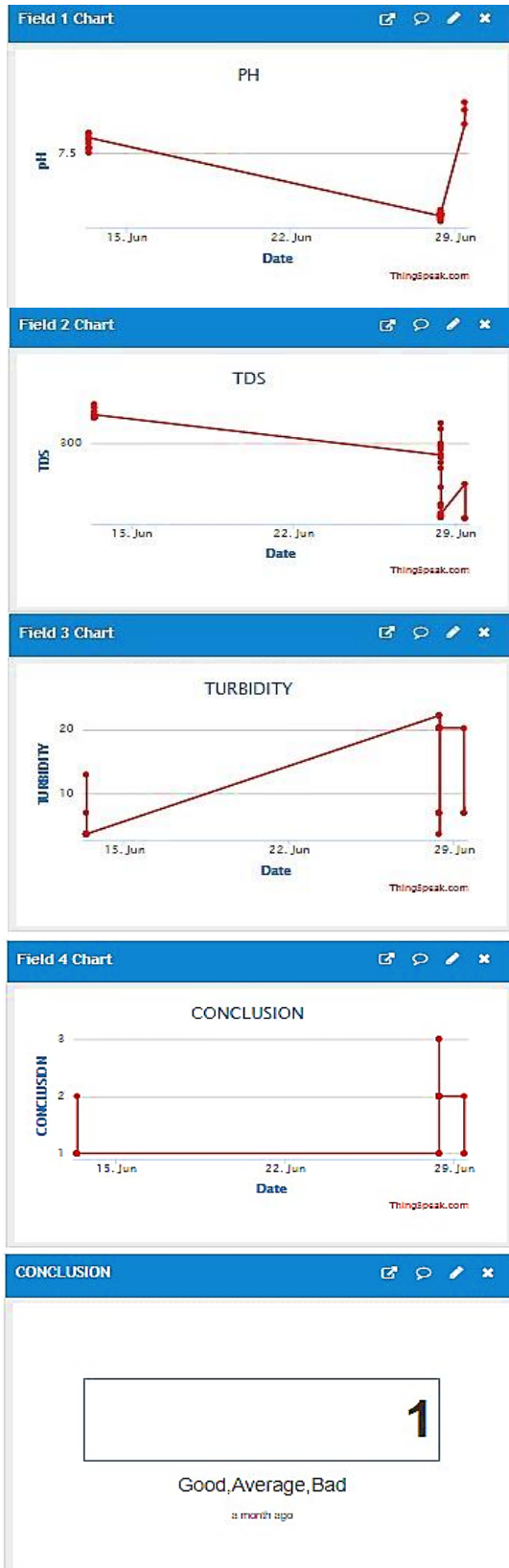
TABEL VII. PERSENTASE KEBERHASILAN SISTEM

No	Variabel Uji	Uji Spesifikasi	Pengujian ke-								%	
			1	2	3	4	5	6	7	8		
1	Air PDAM	Mengklasifikasikan kualitas air	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
		Menampilkan ke ThingSpeak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100
2	Air sungai	Mengklasifikasikan kualitas air	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
		Menampilkan ke ThingSpeak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100
3	Air garam	Mengklasifikasikan kualitas air	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
		Menampilkan ke ThingSpeak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100
4	Air gula	Mengklasifikasikan kualitas air	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
		Menampilkan ke ThingSpeak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100
5	Air jeruk	Mengklasifikasikan kualitas air	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
		Menampilkan ke ThingSpeak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100
6	Air sabun	Mengklasifikasikan kualitas air	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	100
		Menampilkan ke ThingSpeak	+	+	+	+	+	+	+	+	+	100

Keterangan:

✓ : Sistem pakar berhasil melakukan klasifikasi

+ : Nilai pengukuran dan klasifikasi berhasil ditampilkan pada ThingSpeak



Gambar 13. Hasil tampilan ThingSpeak

created_at	entry_id	field1	field2	field3	field4
2020-06-13 09:15:08 WIB	1	7.56795	344	6.88999	1
2020-06-13 09:15:36 WIB	2	7.53377	331	3.55704	1
2020-06-13 09:15:59 WIB	3	7.51668	348	3.55704	1
2020-06-13 09:16:22 WIB	4	7.56226	332	3.55704	1
2020-06-13 09:16:45 WIB	5	7.54517	332	3.55704	1
2020-06-13 09:17:08 WIB	6	7.51953	332	12.88362	2
2020-06-13 09:17:31 WIB	7	7.51668	339	3.55704	1
2020-06-13 09:17:53 WIB	8	7.50244	333	3.55704	1
2020-06-13 09:18:16 WIB	9	7.55086	335	-16.4689	1

Gambar 14. Hasil unduhan data ThingSpeak

TABEL VIII. PENGUJIAN WAKTU TRANSMISI

No	Tundaan Program (detik)	Interval Pencatatan Entry ThingSpeak (detik)	Waktu Transmisi (detik)
1	20	28	8
2	20	23	3
3	20	23	3
4	20	23	3
5	20	23	3
6	20	23	3
7	20	22	2
8	20	23	3

TABEL IX. RANGKUMAN HASIL UJI

No	Aspek Uji	Indikator	Hasil
1	Sensor	Keberhasilan mengukur tiap parameter dan menyimpannya di Arduino	Seluruh percobaan berhasil
2	Perhitungan sistem pakar	Kesesuaian hasil <i>fuzzy classifier</i> antara yang dihitung Arduino dan perhitungan manual	Sesuai
3	Klasifikasi	Tingkat keberhasilan sistem pakar melakukan klasifikasi	100%
4	ThingSpeak	Tingkat keberhasilan menampilkan nilai parameter dan klasifikasi di <i>website</i> ThingSpeak	100%
5	Waktu transmisi	Waktu yang dibutuhkan untuk olah data hingga menampilkannya	3,5 detik

Sebagai perbandingan terhadap hasil penelitian terdahulu, beberapa aspek dijelaskan untuk menunjukkan posisi penelitian ini. Dilihat dari sisi sistem pakar yang ditanamkan, penelitian [3] - [15], [17] - [19] hanya terbatas pada melakukan pengukuran beberapa parameter kualitas air. Artinya, proses pengambilan kesimpulan kualitas air menjadi proses terpisah yang melibatkan manusia. Algoritma *Fast Forest* digunakan untuk mengklasifikasikan air yang bisa diminum atau tidak [16]. Namun, karena variabel yang diukur hanya parameter fisis menyebabkan hasil klasifikasi kurang valid karena air yang aman diminum tidak hanya berdasarkan

parameter fisis saja. Sementara pada penelitian ini ditanamkan sistem pakar menggunakan *fuzzy classifier* untuk mengklasifikasi kualitas air bagi keperluan higiene sanitasi.

Dari sisi konektivitas, penelitian [3], [4], [16] tidak terkoneksi internet ataupun hanya mempunyai *localhost*. Jaringan komunikasi nirkabel berbasis Zigbee juga dimanfaatkan untuk interkoneksi sensor dan pengendali [5], [6]. Namun daya jangkauannya juga terbatas pada kemampuan transmisi teknologi Zigbee. Sementara pada [9], [11] - [13], [18], modul SIM digunakan untuk mengirimkan teks. Selain tergantung kekuatan sinyal GSM, sistem tersebut juga bergantung pada masa aktif dan pulsa kartu SIM. Untuk pengujian waktu transmisi ke *end-user* juga tidak ada informasi yang mendukung. Sementara pada penelitian ini, tampilan grafis pemantauan kualitas air dapat diakses kapan saja dan di mana saja pada *website* ThingSpeak. Kemudian ditinjau dari kecepatan transmisinya, hasil penelitian ini mempunyai rerata waktu transmisi 3,5 detik.

IV. PENUTUP

Sebuah sistem pemantauan kualitas air telah berhasil direalisasikan berbasis IoT. Seluruh sensor dapat bekerja dengan baik sesuai rentang pengukurannya. *Fuzzy classifier* mampu mengklasifikasikan kualitas air berdasarkan nilai pH, TDS, dan *turbidity* air menurut aturan fuzzy yang dirancang. Seluruh sistem diimplementasikan menggunakan Arduino Mega 2560 dan modul WiFi ESP8266. Untuk mempermudah pemantauan, tampilan *website* ThingSpeak telah menunjukkan secara grafis semua nilai sensor dan juga hasil klasifikasi kualitas air. Sistem pakar berhasil mengklasifikasikan kualitas air dengan tingkat keberhasilan 100% dan juga menampilkannya di *website* ThingSpeak dengan tingkat keberhasilan 100%. Sedangkan rerata waktu transmisi yang diperlukan adalah 3,5 detik. Dengan adanya alat ini, maka proses pemantauan kualitas air dapat dilakukan kapanpun dan di manapun. Penelitian ke depan perlu memasukkan parameter kimia wi BoD dan CoD agar hasil klasifikasi kualitas air dapat memberikan informasi tentang air yang aman untuk diminum.

REFERENSI

- [1] Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 32 tahun 2017 tentang Standar Baku Mutu Kesehatan Lingkungan dan Persyaratan Kesehatan Air untuk Keperluan Higiene Sanitasi, Kolam Renang, Solus Per Aqua, dan Pemanian Umum., 2017.
- [2] L. Parra, J. Rocher, J. Escrivá, and J. Lloret, "Design and development of low cost smart *turbidity* sensor for water quality monitoring in fish farms," *Aquac. Eng.*, vol. 81, pp. 10–18, 2018, doi: 10.1016/j.aquaeng.2018.01.004.
- [3] F. Amani and K. Prawirodjo, "Alat ukur kualitas air minum dengan parameter pH, suhu, tingkat kekeruhan, dan jumlah padatan terlarut," *J. JETRI*, vol. 14, no. 1, pp. 49–62, 2016, doi: 10.25105/jetri.v14i1.821.
- [4] R. Pramana, "Perancangan Sistem Kontrol dan Monitoring Kualitas Air dan Suhu Air Pada Kolam Budidaya Ikan," *J. Sustain. J. Has. Penelit. dan Ind. Terap.*, vol. 7, no. 1, pp. 13–23, 2018, doi: 10.31629/sustainable.v7i1.435.
- [5] H. P. Luo, G. L. Li, W. F. Peng, J. Song, and Q. W. Bai, "Real-time remote monitoring system for aquaculture water quality," *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 136–143, 2015, doi: 10.3965/jijabe.20150806.1486.
- [6] N. A. Cloete, R. Malekian, and L. Nair, "Design of Smart Sensors for Real-Time Water Quality Monitoring," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 3975–3990, 2016, doi: 10.1109/ACCESS.2016.2592958.
- [7] Y. Xuecun, Z. Chuanqi, K. Linghong, and H. Zhixin, "Design of Fishpond Water Quality Monitoring and Control System Based on ZigBee," *J. Appl. Sci. Eng. Innov.*, vol. 2, no. 10, pp. 385–388, 2015.
- [8] K. S. Adu-Manu, C. Tapparello, W. Heinzelman, F. A. Katsriku, and J. D. Abdulai, "Water quality monitoring using wireless sensor networks: Current trends and future research directions," *ACM Trans. Sens. Networks*, vol. 13, no. 1, 2017, doi: 10.1145/3005719.
- [9] D. S. Simbeye and S. F. Yang, "Water quality monitoring and control for aquaculture based on wireless sensor networks," *J. Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 840–849, 2014, doi: 10.4304/jnw.9.4.840-849.
- [10] M. Pule, A. Yahya, and J. Chuma, "Wireless sensor networks: A survey on monitoring water quality," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 15, no. 6, pp. 562–570, 2017, doi: 10.1016/j.jart.2017.07.004.
- [11] S. Bhattacharya, S. Chatterjee, and A. De, "GSM Based Water Quality Monitoring and Notification System," *Int. J. Emerg. Trends Electron. Commun. Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 1–7, 2020.
- [12] E. Ragavan, C. Hariharan, N. Aravindraj, and S. S. Manivannan, "Real time water quality monitoring system," *Int. J. Pharm. Technol.*, vol. 8, no. 4, pp. 26199–26205, 2016, doi: 10.15680/ijrcc.2015.0306016.
- [13] B. Das and P. C. Jain, "Real-time water quality monitoring system using Internet of Things," *2017 Int. Conf. Comput. Commun. Electron. COMPTELIX 2017*, pp. 78–82, 2017, doi: 10.1109/COMPTELIX.2017.8003942.
- [14] F. Wang, L. Hu, J. Zhou, and K. Zhao, "A survey from the perspective of evolutionary process in the internet of things," *Int. J. Distrib. Sens. Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1155/2015/462752.
- [15] M. S. Bennet Praba, N. Rengaswamy, Vishal, and O. Deepak, "IoT Based Smart Water System," *Proc. 3rd Int. Conf. Commun. Electron. Syst. ICCES 2018*, pp. 1041–1045, 2018, doi: 10.1109/CESYS.2018.8723969.
- [16] M. Mukta, S. Islam, S. Das Barman, A. W. Reza, and M. S. H. Khan, "IoT based Smart Water Quality Monitoring System," *2019 IEEE 4th Int. Conf. Comput. Commun. Syst.*, pp. 669–673, 2019, doi: 10.1109/CCOMS.2019.8821742.
- [17] R. Martínez, N. Vela, A. el Aatik, E. Murray, P. Roche, and J. M. Navarro, "On the use of an IoT integrated system for water quality monitoring and management in wastewater treatment plants," *Water (Switzerland)*, vol. 12, no. 4, pp. 1–21, 2020, doi: 10.3390/W12041096.
- [18] M. Parameswari and M. B. Moses, "Efficient analysis of water quality measurement reporting system using IOT based system in WSN," *Cluster Comput.*, vol. 22, pp. 12193–12201, 2019, doi: 10.1007/s10586-017-1581-1.
- [19] L. García, L. Parra, J. M. Jimenez, J. Lloret, and P. Lorenz, "IoT-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and IoT systems for irrigation in precision agriculture," *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 4, pp. 1–48, 2020, doi: 10.3390/s20041042.
- [20] G. Gao, K. Xiao, and M. Chen, "An intelligent IoT-based control and traceability system to forecast and maintain water quality in freshwater fish farms," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 166, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1016/j.compag.2019.105013.
- [21] P. Damor and K. J. Sharma, "IoT based Water Monitoring System: A Review," *Int. J. Adv. Eng. Res. Dev.*, vol. 4, no. 6, 2017.
- [22] J. Wang, H. Yue, and Z. Zhou, "An improved traceability system for food quality assurance and evaluation based on fuzzy classification and neural network," *Food Control*, vol. 79, pp. 363–370, 2017, doi: 10.1016/j.foodcont.2017.04.013.
- [23] O. El Aissaoui, Y. El Alami El Madani, L. Oughdir, and Y. El Alloui, "A fuzzy classification approach for learning style prediction based on web mining technique in e-learning environments," *Educ. Inf. Technol.*, vol. 24, no. 3, pp. 1943–1959, 2019, doi: 10.1007/s10639-018-9820-5.
- [24] K. Liu, J. Wang, X. Tao, X. Zeng, P. Bruniaux, and E. Kamalha, "Fuzzy classification of young women's lower body based on anthropometric measurement," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 55, pp. 60–68, 2016, doi: 10.1016/j.ergon.2016.07.008.
- [25] S. A. Mokeddem, "A fuzzy classification model for myocardial infarction risk assessment," *Appl. Intell.*, vol. 4, pp. 1233–1250, 2018, doi: 10.1007/s10489-017-1102-1.
- [26] M. J. Villaseñor-Aguilar *et al.*, "Fuzzy Classification of the Maturity of the Tomato Using a Vision System," *J. Sensors*, vol. 2019, pp. 1–12, 2019, doi: 10.1155/2019/3175848.