

Rancang Bangun Alat Ukur Kadar Gula Darah Non-Invasif Berbasis Inframerah Menggunakan Metode *Fuzzy*

Design a Non-Invasive Infrared Based Blood Sugar Measuring Device Using the Fuzzy Method

Kemalasari¹, Moch. Rochmad², Mochamad Handi Hardiansyah³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektronika, Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
^{1,2,3} Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

email: ¹kemala@pens.ac.id, ²rochmad@pens.ac.id, ³handihrdnsyh@ee.student.pens.ac.id

Informasi Artikel

Diajukan, 2 Agustus 2025
Diterima, 20 Februari 2026
Diterbitkan, 5 Juni 2026

Kata Kunci :

ANFIS, Glukosa Darah Noninvasif, Sensor TCRT5000, Multimodal Fusion, Spektroskopi NIR

ABSTRAK

Diabetes melitus merupakan kelainan metabolisme kronis yang menuntut penderitanya untuk melakukan pemantauan glukosa darah secara berkelanjutan. Metode pemantauan konvensional bersifat invasif yang menimbulkan ketidaknyamanan dan berpotensi menyebabkan infeksi. Penelitian ini bertujuan merancang sistem pemantauan glukosa darah noninvasif multimodal yang mengintegrasikan pengukuran fotoplethysmografi (PPG) inframerah pada ujung jari dan analisis optik spesimen urine menggunakan sensor TCRT5000. Sistem berbasis mikrokontroler ESP32 ini menerapkan algoritma *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) untuk memodelkan hubungan nonlinier antara parameter optik dan kadar glukosa. Penelitian melibatkan 48 subjek dengan protokol pengukuran puasa dalam kondisi lingkungan terkontrol ($\pm 25^{\circ}\text{C}$). Fitur sinyal diekstraksi meliputi intensitas rata-rata, varians, dan rasio fusi jari-urine. Hasil pengujian menunjukkan bahwa model ANFIS dengan 5 membership function tipe Gaussian mampu memprediksi kadar glukosa dengan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) sebesar 6,97% pada data latih dan 10,84% pada data uji validasi. Hasil pengukuran ditampilkan pada layar LCD TFT, lalu dapat disimpan dan dilihat secara *online* pada *website*. Integrasi fitur multimodal dan kalibrasi lingkungan terbukti meningkatkan akurasi prediksi dibandingkan model Fuzzy Mamdani standar. Prototipe ini menawarkan potensi sebagai alternatif alat skrining awal yang nyaman dan ekonomis.

ABSTRACT

Diabetes mellitus is a chronic metabolic disorder that requires sufferers to monitor blood glucose on an ongoing basis. Conventional monitoring methods are invasive and cause discomfort and potentially lead to infection. This study aims to design a multimodal noninvasive blood glucose monitoring system that integrates infrared photoplethysmography (PPG) measurements on fingertips and optical analysis of urine specimens using TCRT5000 sensors. The ESP32 microcontroller-based system applies the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) algorithm to model the nonlinear relationship between optical parameters and glucose levels. The study involved 48 subjects with fasting measurement protocols under controlled environmental conditions ($\pm 25^{\circ}\text{C}$). Features of the extracted signals include mean intensity, variance, and finger-urine fusion ratio. The test results showed that the ANFIS model with 5 Gaussian type membership functions was able to predict glucose levels with a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 6.97% in the training data and 10.84% in the validation test data. The measurement results are displayed on the TFT LCD screen, and can then be saved and viewed online on the website. The integration of multimodal features and environmental calibration has been shown to improve prediction accuracy compared to the standard Fuzzy Mamdani model. This prototype offers the potential as a convenient and economical alternative to an initial screening tool.

Keyword :

ANFIS, Non-Invasive Blood Glucose, TCRT5000 Sensor, Multimodal Fusion, NIR Spectroscopy

1. PENDAHULUAN

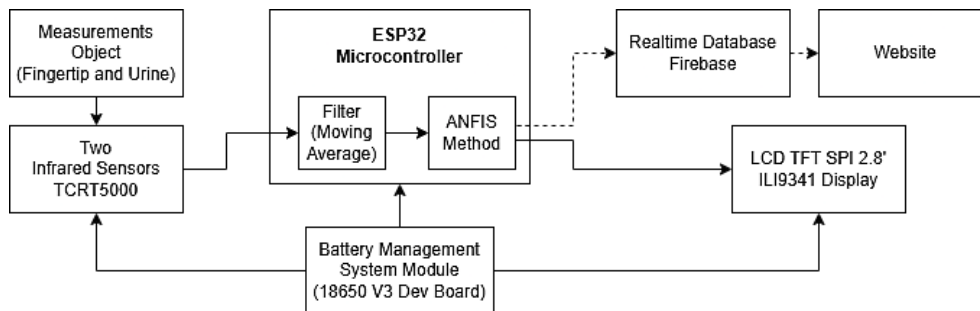
Diabetes melitus adalah gangguan metabolisme kronis yang ditandai dengan hiperglikemia, atau kadar glukosa darah yang tinggi. Manajemen diabetes yang efektif sangat bergantung pada pemantauan glukosa darah secara rutin dan berkelanjutan. Namun, metode pemantauan konvensional, seperti penggunaan glukometer yang memerlukan tusukan jari untuk mendapatkan sampel darah, bersifat invasif. Prosedur ini tidak hanya menimbulkan rasa sakit dan ketidaknyamanan tetapi juga membawa risiko infeksi dan kerusakan jaringan dalam jangka panjang, yang pada akhirnya dapat menurunkan kepatuhan pasien dalam melakukan pemantauan mandiri[1], [2]. Rendahnya kepatuhan ini dapat berakibat pada manajemen penyakit yang tidak optimal dan peningkatan risiko komplikasi serius pada organ vital seperti jantung, ginjal, dan mata[1]. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pemantauan glukosa yang non-invasif, nyaman, dan akurat menjadi sebuah kebutuhan mendesak di bidang teknologi kesehatan[3], [4]. Salah satu teknologi non-invasif yang paling menjanjikan adalah spektroskopi inframerah dekat (*Near-Infrared* atau NIR). Prinsip kerja teknologi ini didasarkan pada interaksi cahaya NIR dengan komponen biologis dalam jaringan tubuh. Molekul glukosa memiliki pita serapan spesifik dalam spektrum NIR, sehingga perubahan konsentrasinya akan memodulasi jumlah cahaya yang dipantulkan atau ditransmisikan melalui jaringan, yang kemudian dapat dideteksi oleh sensor optik[1], [5], [6], [7]. Sejumlah penelitian telah mengeksplorasi penggunaan NIR pada berbagai bagian tubuh, terutama ujung jari, karena kaya akan kapiler darah[8]. Selain melalui darah, kondisi hiperglikemia juga dapat diindikasikan melalui analisis cairan tubuh lain seperti urine[9]. Adanya glukosa dalam urine (glukosuria) terjadi ketika kadar glukosa darah melampaui ambang batas reabsorpsi ginjal, menjadikannya penanda penting untuk kondisi diabetes yang signifikan[10], [11], [12], [13]. Meskipun teknologi komponen seperti sensor NIR dan metode pemrosesan sinyal cerdas telah banyak diteliti secara terpisah, penelitian yang secara spesifik mengintegrasikan sinyal dari dua sumber biologis yang berbeda, yaitu sirkulasi darah kapiler (melalui ujung jari) dan hasil metabolisme ginjal (melalui urine) untuk meningkatkan keandalan pengukuran masih terbatas. Gabungan data dari dua titik pengukuran ini berpotensi memberikan gambaran kondisi glikemik yang lebih komprehensif. Lebih lanjut, hubungan antara sinyal optik yang diterima sensor dengan konsentrasi glukosa bersifat sangat kompleks dan nonlinier, dipengaruhi oleh banyak variabel pengganggu seperti ketebalan kulit, pigmentasi, dan hidrasi jaringan. Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan sebuah model komputasi cerdas yang mampu belajar dan beradaptasi. *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) menawarkan solusi yang kuat karena menggabungkan kemampuan penalaran logika *fuzzy* dalam menangani ketidakpastian dengan kekuatan pembelajaran adaptif dari jaringan saraf tiruan[14]. Berdasarkan kesenjangan tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang, membangun, dan mengevaluasi kinerja sebuah prototipe alat ukur kadar glukosa darah noninvasif. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan gabungan data dari dua sensor inframerah yang mengukur pada ujung jari dan sampel urine secara bersamaan, dan penggunaan model ANFIS untuk mengolah sinyal sensor dan memprediksi kadar glukosa darah, yang diharapkan dapat mengatasi kompleksitas dan nonlinieritas data biomedis secara efektif.

2. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini mencakup perancangan perangkat keras, prosedur akuisisi dan *preprocessing* data, serta pengembangan model prediksi kadar glukosa darah menggunakan ANFIS.

2.1. Perancangan Sistem

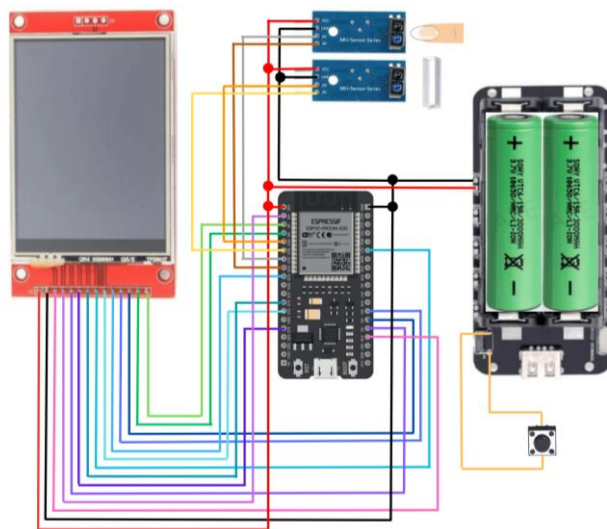
Sistem yang dirancang merupakan perangkat portabel yang terintegrasi. Komponen utama sistem terdiri dari mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemroses utama, dua unit modul sensor inframerah reflektif TCRT5000 (panjang gelombang puncak 950 nm) sebagai transduser, layar LCD TFT 2.8 inci sebagai antarmuka pengguna, dan modul *Battery Shield* V3 dengan dua baterai 18650 sebagai catu daya portabel. Modul sensor ditempatkan dalam *casing* tertutup berwarna hitam (*Black Box*) yang dirancang khusus untuk memblokir cahaya ambien (cahaya matahari dan lampu ruangan). Desain mekanik dirancang untuk memblokir interferensi cahaya eksternal hingga <10 lux. Hal ini memastikan bahwa fototransistor hanya menerima cahaya inframerah yang dipantulkan oleh jaringan tubuh, bukan *noise* optik dari lingkungan. Sensor pertama diletakkan tepat di bawah tempat sandaran jari yang ada di dalam *box*, sedangkan sensor kedua dipasang sejajar pada lubang kuvet tertutup untuk pengukuran sampel urine. Sedangkan mikrokontroler ESP32 dipilih karena memiliki kapabilitas pemrosesan yang memadai, pin ADC untuk akuisisi data analog dari sensor, serta modul Wi-Fi terintegrasi untuk pengiriman data ke *database*. Arsitektur sistem secara keseluruhan digambarkan dalam diagram blok pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Pengukuran Glukosa Noninvasif

2.2. Perakitan Perangkat Keras

Proses perakitan *hardware* sistem menyesuaikan kebutuhan dari solusi permasalahan yang ada untuk menjadi sistem satu kesatuan dari kebutuhan *hardware*, proses ini melibatkan pengkabelan pada modul-modul yang dibutuhkan.



Gambar 2. Perakitan Sistem Alat Ukur Kadar Gula Darah Noninvasif

Pada Gambar 2 merupakan desain keseluruhan dari konsep sistem alat ukur kadar gula darah noninvasif menggunakan dua sensor inframerah, ESP32, dan komponen-komponen lain yang ditenagai oleh modul *battery shield dev v3 18650 2 sel*. Selanjutnya berikut adalah spesifikasi perangkat yang digunakan pada penelitian ini, dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat Alat Ukur Kadar Gula Darah Noninvasif

Keterangan	Spesifikasi
Nama Alat	Alat Ukur Kadar Gula Darah Noninvasif
Sensor	Modul Sensor Inframerah Reflektif TCRT5000
Processing Unit	Mikrokontroler ESP32
Interface	Layar LCD TFT SPI 2.8 inci (Resolusi 240x320)
Power Input	2 Baterai 18650 3,7V dengan Modul <i>Battery Shield V3</i>
Konektivitas	<i>Wi-Fi</i> untuk pengiriman data ke <i>database</i>
Metode Prediksi	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)</i>
Dimensi	15 cm x 9.5 cm x 5 cm

2.3. Subjek dan Protokol Eksperimen

Penelitian ini telah melalui proses perizinan oleh Dinas Kesehatan Kota Surabaya, Kepala Puskesmas dan petugas laboratorium Puskesmas Keputih, yang mana melibatkan 48 subjek (usia 20-60 tahun) yang terdiri dari kelompok sehat dan diabetes. Pengambilan data dilakukan di Laboratorium Puskesmas Keputih dengan protokol:

- **Standardisasi**
Subjek beristirahat ±10 menit di ruang tunggu laboratorium Puskesmas yang terkontrol (suhu 22-26°C dan kelembaban 35-60%) sebelum pengambilan data untuk memastikan suhu permukaan kulit telah beradaptasi dengan suhu ruangan (aklimatisasi). Stabilitas suhu sangat krusial karena perubahan suhu ekstrem dapat menyebabkan vasokonstriksi atau vasodilatasi pada pembuluh darah kapiler jari, yang akan mengubah sinyal PPG secara drastis terlepas dari kadar glukosa.
- **Sampling**
Pengukuran dilakukan dalam kondisi subjek puasa selama ±8 jam. Data sensor direkam selama 15 detik (frekuensi sampling 10 Hz), bersamaan dengan pengukuran glukosa darah kapiler menggunakan glukometer Yuwell 582 sebagai acuan (ground truth).
- **Kalibrasi**
Proses kalibrasi dilakukan dengan dua tahap, yaitu kalibrasi perangkat keras dan kalibrasi model. Kalibrasi perangkat keras dilakukan dengan menormalkan pembacaan sensor agar seragam antar alat atau waktu. Sebelum setiap sesi pengujian, sensor dikalibrasi terhadap referensi warna putih standar (kertas HVS 80gsm) pada jarak tetap 2 mm untuk normalisasi nilai ADC dan mengatasi drift komponen elektronik. Sedangkan kalibrasi model dilakukan dengan memetakan nilai sensor ke nilai glukosa.

2.4. Akuisisi Data dan Preprocessing Data

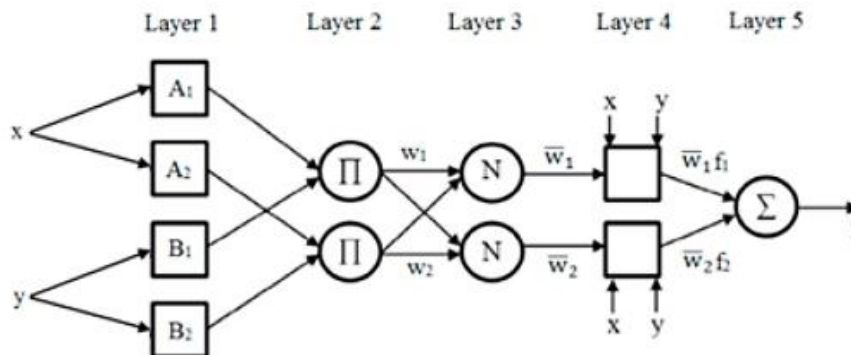
Proses akuisisi data dilakukan pada dua titik, yaitu pada permukaan kulit ujung jari dan sampel urine yang ditempatkan dalam sebuah kuvet kaca. Untuk setiap pengukuran, sistem mengakuisisi data dari kedua sensor secara simultan selama 15 detik dengan interval pembacaan 100ms, menghasilkan sekitar 150 titik data mentah per sensor. Sinyal mentah dari sensor optik rentan terhadap derau (*noise*) dan fluktuasi sesaat. Untuk menstabilkan sinyal dan meningkatkan rasio sinyal terhadap derau (*Signal-to-Noise Ratio*), diterapkan filter digital *Moving Average* (MA) sebagai tahap *preprocessing*[15]. Filter MA bekerja dengan menghitung nilai rata-rata dari sejumlah sampel data terakhir dalam sebuah "jendela" yang bergerak. Nilai yang telah difilter ($y[n]$) dihitung menggunakan persamaan (1).

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n - k] \quad (1)$$

Di mana $x[n]$ adalah nilai masukan data mentah, dan M adalah ukuran jendela (*window size*), yang dalam penelitian ini ditetapkan sebesar 10. Nilai rata-rata dari seluruh data yang telah difilter selama 15 detik kemudian digunakan sebagai satu nilai masukan (ADC Jari dan ADC Urine) untuk model prediksi.

2.5. Pengembangan Model ANFIS

Pendekatan awal menggunakan sistem inferensi *fuzzy* tipe Mamdani menunjukkan keterbatasan, terutama pada proses pendefinisian aturan dan fungsi keanggotaan yang manual, sehingga menghasilkan error prediksi yang tinggi[16]. Oleh karena itu, penelitian ini beralih ke metode *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS). ANFIS merupakan arsitektur *hybrid* yang mengintegrasikan Jaringan Saraf Tiruan ke dalam kerangka Sistem Inferensi *Fuzzy*, memungkinkannya untuk belajar dari data dan secara otomatis mengoptimalkan parameter model[14]. Arsitektur ANFIS tipe Sugeno orde pertama yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari lima lapisan fungsional seperti diilustrasikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Arsitektur Model ANFIS yang Digunakan

Model ANFIS dikembangkan menggunakan metode *hybrid learning* (kombinasi *least squares* dan *backpropagation gradient descent*). Struktur model menggunakan *Grid Partitioning* yang menghasilkan 25 aturan fuzzy (*Rules*) dari kombinasi 5 *Membership Function* (MF) tipe Gaussian pada setiap *input*. Model ANFIS dibangun dan dievaluasi menggunakan *dataset* yang terdiri dari 48 sampel. Setiap sampel berisi tiga nilai: nilai ADC dari sensor jari, nilai ADC dari sensor urine, dan nilai kadar glukosa darah referensi (dalam mg/dL) yang diukur menggunakan glukometer standar (Yuwell 582). Dari total 48 sampel, 40 sampel digunakan untuk pelatihan model (*training data*) dan 8 sampel sisanya digunakan untuk pengujian model (*testing data*), serta mengevaluasi kemampuan generalisasi model dengan menggunakan metrik MAPE dan RMSE. Konfigurasi dan parameter yang digunakan untuk membangun dan melatih model ANFIS menggunakan *software* MATLAB diringkas dalam Tabel 2.

Parameter	Nilai
Jumlah <i>Input</i>	2 (ADC Jari dan ADC Urine)
Jumlah <i>Output</i>	1 (Kadar Glukosa Darah)
Tipe Sistem Inferensi <i>Fuzzy</i>	Sugeno
Tipe Fungsi Keanggotaan (MF) <i>Input</i>	Gaussian ('gaussmf')
Jumlah MF per <i>Input</i>	5
Tipe MF <i>Output</i>	Konstan ('constant')
Jumlah Aturan (<i>Rules</i>)	25
Metode Optimasi	Hibrida (<i>hybrid</i>)
Jumlah <i>Epoch</i>	2000
Toleransi Error (<i>Error Tolerance</i>)	0,01

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil kuantitatif dari evaluasi model ANFIS dan membahas implikasi dari temuan tersebut.

3.1. Prototipe Sistem

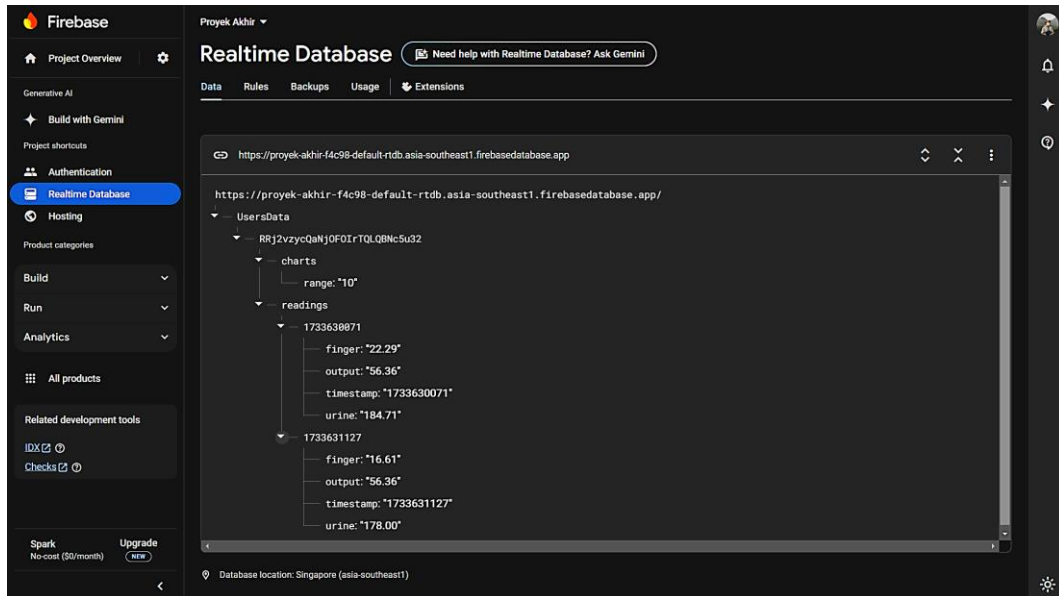
Pada perancangan prototipe sistem dilakukan pembuatan desain mekanik untuk alat yang dibuat serta membuat perancangan elektrik. Perancangan perangkat keras terdiri dari perancangan desain mekanik, dengan menggunakan *box* khusus *project* yang sudah jadi di pasaran, kemudian *box* tersebut disesuaikan dengan alat yang akan di buat ini. Sedangkan perancangan elektrik terdiri dari pembuatan rangkaian elektrik atau *schematic* yang menghubungkan antara mikrokontroler, sensor serta komponen-komponen lain yang digunakan, kemudian mendesain sebuah PCB dari rangkaian elektrik tersebut, lalu mencetak PCB serta melakukan penyolderan komponen-komponen ke dalam PCB yang telah dicetak. Setelah semua proses dalam perancangan elektrik selesai, kemudian sistem elektrik dan mekanik digabungkan. Prototipe sistem alat ukur kadar gula darah noninvasif dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Prototipe Sistem Alat Ukur Kadar Gula Darah Noninvasif

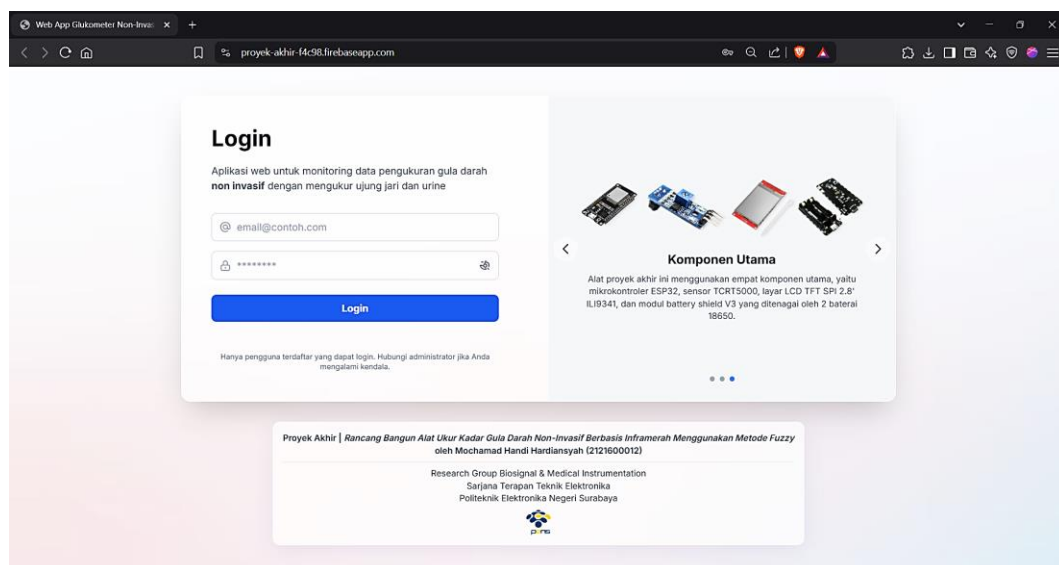
3.2. Website dan Database

Pada bagian *database*, *platform firebase* digunakan sebagai penyedia layanan *realtime database*, *hosting* dan *deploy* yang dikembangkan oleh Google, menyediakan berbagai layanan *backend* untuk membangun aplikasi berbasis web maupun mobile secara cepat dan efisien. Tampilan dari *realtime database firebase* dapat dilihat pada Gambar 5.

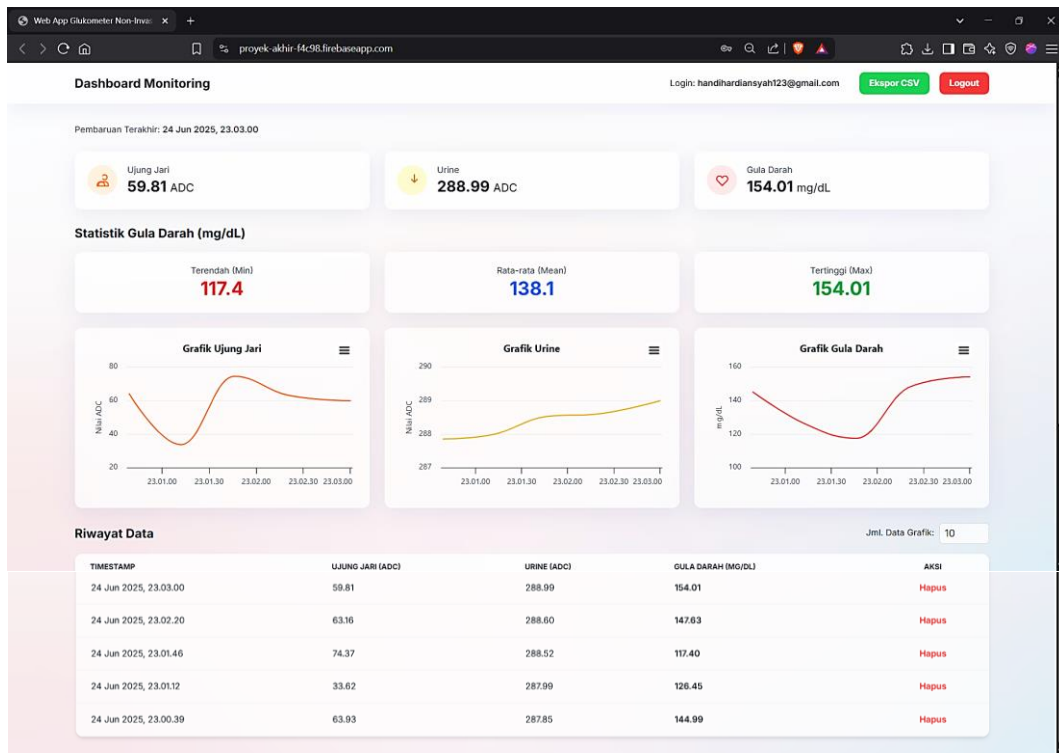


Gambar 5. Halaman *Realtime Database Firebase*

Pada bagian *website*, menampilkan data dari mikrokontroler yang terdiri dari beberapa komponen utama. Pada sisi *frontend*, komponen seperti HTML, CSS, dan JavaScript digunakan untuk merancang tampilan dan interaktivitas *website*. Data yang diterima dari firebase akan diambil menggunakan API firebase dengan bantuan JavaScript, kemudian ditampilkan secara dinamis pada halaman web. Untuk menampilkan data secara *real-time*, digunakan teknik pemrograman berbasis *event listener* yang memungkinkan *website* untuk memperbarui tampilan setiap kali ada perubahan data yang diterima dari *database*. *Backend* firebase menangani autentikasi dan pengelolaan data pengguna, serta memastikan bahwa informasi yang ditampilkan tetap konsisten dan aman. Hasil tampilan halaman *login* dan halaman utama dari *website* dapat dilihat pada Gambar 6 dan **Error! Reference source not found..**



Gambar 6. Halaman *Login Website Untuk Monitoring Kadar Gula Darah Noninvasif*



Gambar 7. Halaman Utama Website Untuk Monitoring Kadar Gula Darah Noninvasif

3.3. Hasil Pelatihan dan Pengujian Model

Pendekatan awal menggunakan sistem inferensi *fuzzy* tipe *mamdani* menunjukkan keterbatasan, terutama pada proses pendefinisian aturan dan fungsi keanggotaan yang manual, sehingga menghasilkan error prediksi yang tinggi. Kinerja model pertama, yaitu model *fuzzy* *mamdani* yang telah dilatih, dievaluasi menggunakan beberapa metrik eror standar, yaitu MAPE, RMSE, dan MAE. Hasil evaluasi untuk tahap pelatihan dan pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Metrik Kinerja Model *Fuzzy* Mamdani

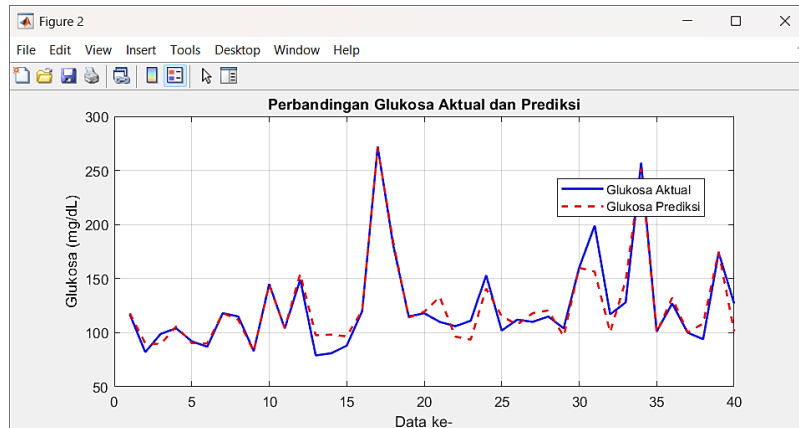
Tahap Evaluasi	MAPE (%)	RMSE	MAE
Pelatihan (n = 6)	6,95	7,16	6,58
Pengujian (n = 3)	20,48	22,88	18,87

Untuk mengevaluasi kinerja model sebelumnya, kinerja model selanjutnya, yaitu model ANFIS yang telah dilatih, dievaluasi menggunakan beberapa metrik eror standar yang sama seperti pada model *fuzzy* *mamdani*. Lalu hasil evaluasi untuk tahap pelatihan dan pengujian disajikan pada Tabel 4.

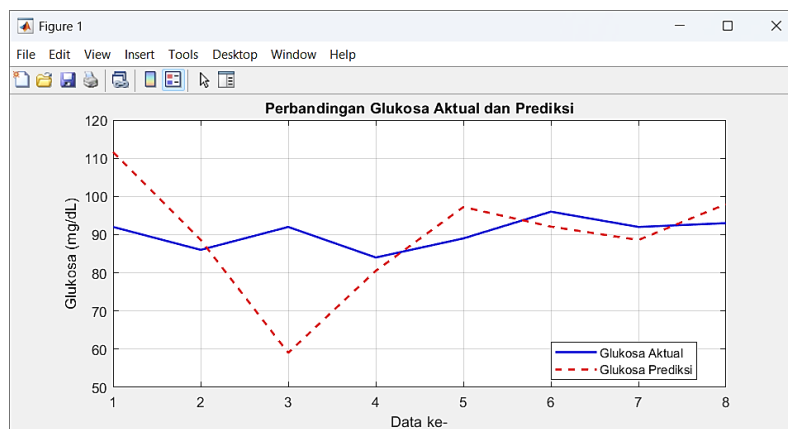
Tabel 4. Metrik Kinerja Model ANFIS

Tahap Evaluasi	MAPE (%)	RMSE	MAE
Pelatihan (n = 40)	6,97	12,04	7,97
Pengujian (n = 8)	10,84	14,18	9,90

Untuk memvisualisasikan performa prediksi, Gambar 8 dan Gambar 9 membandingkan nilai kadar glukosa yang diprediksi oleh model ANFIS dengan nilai aktual yang diukur oleh glukometer standar untuk data pelatihan dan pengujian.



Gambar 8. Grafik Perbandingan Hasil Prediksi Model dengan Data Aktual pada Tahap Pelatihan (n = 40)



Gambar 9. Grafik Perbandingan Hasil Prediksi Model dengan Data Aktual pada Tahap Pengujian (n = 8)

3.4. Pembahasan

Hasil yang disajikan pada Tabel 3 menunjukkan bahwa pendekatan awal menggunakan model *fuzzy* mamdani memiliki eror prediksi yang tinggi. Pada tahap pelatihan, model mencapai MAPE sebesar 6,95%, yang menunjukkan model masih bisa mempelajari pola *dataset* awal. Namun, pada tahap pengujian, model mencapai MAPE sebesar 20,48%, yang menunjukkan model kurang mampu untuk memprediksi data baru yang disajikan. Oleh karena itu, perlu dilakukan evaluasi kinerja model yang digunakan untuk mendapatkan akurasi hasil prediksi yang lebih baik. Di sini, saya mengganti model *fuzzy* mamdani dengan ANFIS. Kinerja model ANFIS yang dikembangkan mampu memprediksi kadar glukosa darah dengan tingkat akurasi yang menjanjikan. Hasil kinerja model disajikan pada Tabel 4. Pada tahap pelatihan, model mencapai MAPE sebesar 6,97%, yang mengindikasikan kemampuan model untuk mempelajari pola dari *dataset* yang diberikan. Yang lebih penting, pada tahap pengujian dengan data baru, model menunjukkan MAPE sebesar 10,84%. Selisih yang relatif kecil antara eror pelatihan dan pengujian ini mengisyaratkan bahwa model memiliki kemampuan generalisasi yang cukup baik dan tidak mengalami *overfitting* yang signifikan, di mana model hanya menghafal data pelatihan tanpa bisa memprediksi data baru secara akurat.

Tingkat akurasi prediksi pada data uji sebesar 89,16% (100% - 10,84% MAPE) merupakan hasil yang kompetitif dalam bidang penelitian glukometer noninvasif berbasis NIR. Sebagai perbandingan, beberapa penelitian awal di bidang ini melaporkan tingkat akurasi dalam rentang 4% hingga 16% dibandingkan dengan metode invasif standar. Hasil ini memperkuat validitas pendekatan yang diusulkan, yaitu bahwa gabungan data dari dua sumber biologis (jari dan urine) yang diolah menggunakan ANFIS dapat secara efektif memodelkan hubungan yang kompleks dan nonlinier antara sinyal inframerah dan konsentrasi glukosa. Meskipun demikian, perlu diakui adanya beberapa keterbatasan. Analisis lebih dalam pada hasil pengujian menunjukkan adanya beberapa prediksi dengan eror yang cukup tinggi, dengan eror maksimum mencapai 35,83% untuk salah satu data uji. Variabilitas ini kemungkinan besar disebabkan oleh ukuran *dataset* yang relatif kecil (total 48 sampel). Model prediktif, terutama yang berbasis pembelajaran mesin seperti ANFIS, sangat bergantung pada kuantitas dan keragaman data pelatihan untuk dapat membangun model yang kuat dan andal di berbagai kondisi. *Dataset*

yang terbatas mungkin belum sepenuhnya mencakup seluruh variasi fisiologis antar individu, yang dapat menyebabkan performa yang kurang optimal pada subjek dengan karakteristik yang belum terwakili dengan baik dalam data pelatihan. Oleh karena itu, pengujian lebih lanjut dengan *dataset* yang jauh lebih besar dan lebih beragam secara demografis sangat diperlukan untuk memvalidasi dan meningkatkan kekuatan model.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, prototipe alat ukur kadar glukosa darah noninvasif ini mengintegrasikan data dari dua sensor inframerah (ujung jari dan urine) dengan model prediksi cerdas. Implementasi *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS) untuk memodelkan hubungan nonlinier antara sinyal sensor dan kadar glukosa, menghasilkan tingkat akurasi prediksi sebesar 93,03% pada data pelatihan dan 89,16% pada data pengujian. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan dua sensor yang diusulkan memiliki potensi signifikan sebagai alternatif metode pemantauan glukosa yang lebih nyaman, aman, dan bebas rasa sakit. Meskipun demikian, untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan untuk memperluas *dataset* pelatihan dan pengujian secara signifikan guna meningkatkan kekuatan dan keandalan model prediktif sebelum dapat dipertimbangkan untuk validasi klinis yang lebih luas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS) atas dukungan segala fasilitas selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Dinas Kesehatan Kota Surabaya yang telah memberikan izin penelitian ke tempat pelayanan kesehatan, serta pihak Puskesmas Keputih yang telah membantu dalam proses pengumpulan data yang sangat berharga bagi penelitian ini, sehingga penelitian ini dapat berjalan lancar hingga selesai.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Hina and W. Saadeh, "Noninvasive Blood Glucose Monitoring Systems Using Near-Infrared Technology—A Review," Jul. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/s22134855.
- [2] S. Y. Putri and N. Firmawati, "Rancang Bangun Pengukur Kadar Gula Darah Non-Invasive Berbasis NodeMCU ESP8266," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 11, no. 2, pp. 271–277, Apr. 2022, doi: 10.25077/jfu.11.2.271-277.2022.
- [3] *IECBES 2014: conference proceeding, 2014 IEEE International Conference on Biomedical Engineering and Sciences: 8th-10th December 2014, Miri, Malaysia*. IEEE, 2014.
- [4] J. Pendidikan and D. Konseling, "Literatur Review Mengenai Rancangan Glukometer Non Invasive Berbasis Arduino."
- [5] H. M. Nazha *et al.*, "Portable Infrared-Based Glucometer Reinforced with Fuzzy Logic," *Biosensors (Basel)*, vol. 13, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.3390/bios13110991.
- [6] Q. Chen, W. Zhang, and W. Wu, "VIS/NIR/FIR spectroscopy for blood glucose monitoring: A review," Mar. 01, 2025, *American Institute of Physics*. doi: 10.1063/5.0239187.
- [7] G. Gunawan, B. Harianto, M. Elsera, and F. Fachrizal, "Analysis of Infrared Sensors As a Non Invasive Glucose Measuring by Applying Fuzzy Algorithm," in *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1361/1/012041.
- [8] M. Sulehu and A. H. Senrimang, "PROGRAM APLIKASI ALAT PENGUKUR KADAR GLUKOSA DALAM DARAH NON INVASIVE BEBAS DESKTOP," 2018.
- [9] E. Satria, "RANCANG BANGUN ALAT UKUR KADAR GULA DARAH NON-INVASIVE BERBASIS MIKROKONTROLER AT89S51 DENGAN MENGUKUR TINGKAT KEKERUHAN SPESIMEN URINE MENGGUNAKAN SENSOR FOTODIODA," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 2, no. 1, 2013.
- [10] M. A. Darwich, A. Shahen, A. Daoud, A. Lahia, J. Diab, and E. Ismaiel, "Non-Invasive IR-Based Measurement of Human Blood Glucose †," *Engineering Proceedings*, vol. 35, no. 1, 2023, doi: 10.3390/IECB2023-14593.
- [11] F. Gómez-Peralta, L. G. Luque Romero, A. Puppo-Moreno, and J. Riesgo, "Performance of a Non-Invasive System for Monitoring Blood Glucose Levels Based on Near-Infrared Spectroscopy Technology (Glucube®)," *Sensors*, vol. 24, no. 23, Dec. 2024, doi: 10.3390/s24237811.
- [12] E. Satria, "RANCANG BANGUN ALAT UKUR KADAR GULA DARAH NON-INVASIVE BERBASIS MIKROKONTROLER AT89S51 DENGAN MENGUKUR TINGKAT KEKERUHAN SPESIMEN URINE MENGGUNAKAN SENSOR FOTODIODA," *Jurnal Fisika Unand*, vol. 2, no. 1, 2013.
- [13] L. Ahada *et al.*, "Alat Ukur Kadar Gula Darah Non-Invasive Dalam Urin Menggunakan TCS3200 Metode Artificial Neural Network," *Seminar Nasional Fortei Regional*, vol. 7.
- [14] M. Şahin and R. Erol, "A Comparative Study of Neural Networks and ANFIS for Forecasting Attendance Rate of Soccer Games," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 22, no. 4, p. 43, Nov. 2017, doi: 10.3390/mca22040043.

- [15] M. Şahin and R. Erol, "Prediction of Attendance Demand in European Football Games: Comparison of ANFIS, Fuzzy Logic, and ANN," *Comput Intell Neurosci*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/5714872.
- [16] E. W. Saputra, "Optimasi Fungsi Keanggotaan Fuzzy Mamdani Menggunakan Algoritma Genetika Untuk Penentuan Penerima Beasiswa," *Jurnal Sarjana Teknik Informatika*, vol. 8 no. 2, Juni 2020.