

Pengembangan Sistem Deteksi Anemia Non-Invasif Menggunakan Photoplethysmography (PPG) dan Logika Fuzzy untuk Estimasi Kadar Hemoglobin

Development of a Non-Invasive Anemia Detection System Using Photoplethysmography (PPG) and Fuzzy Logic for Hemoglobin Level Estimation

Darojat Yugiantoro¹, Eka Nuryanto Budisusila², Agus Suprajitno³, Arief Marwanto⁴, Abdul Haris Kuspranoto⁵

^{1,2,3,4} Magister Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung, Indonesia
Jl. Kaligawe Raya No.Km.4, Terboyo Kulon, Kec. Genuk, Kota Semarang, Jawa Tengah 50112

⁵ Teknik Elektromedik Polbitrada, Jl. Sambiroto Raya No.64-D, Sambiroto, Kec. Tembalang, Kota Semarang, Indonesia 50276

Alamat korespondensi: darojatyugi@gmail.com

Abstrak

Anemia merupakan masalah kesehatan global yang berdampak pada banyak individu di seluruh dunia. Deteksi anemia tradisional melalui pengujian darah invasif sering kali mahal, memakan waktu, dan memerlukan tenaga medis terlatih. Penelitian ini mengembangkan sistem deteksi anemia non-invasif berbasis teknologi Photoplethysmography (PPG) dan logika fuzzy untuk memperkirakan kadar hemoglobin (Hb) dan mengklasifikasikan derajat anemia. Sistem ini menggunakan sensor PPG untuk mengukur intensitas cahaya merah dan inframerah yang digunakan untuk menghitung rasio dan estimasi kadar hemoglobin. Sistem logika fuzzy kemudian mengklasifikasikan hasil estimasi Hb ke dalam kategori Anemia Berat, Anemia Sedang, dan Anemia Ringan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem ini memberikan estimasi kadar hemoglobin dengan akurasi 88,42%, serta dapat mengklasifikasikan derajat anemia dengan hasil yang sesuai dengan pengujian darah konvensional. Sistem ini menawarkan alternatif yang lebih praktis, efisien, dan tidak invasif untuk deteksi anemia, serta memiliki potensi untuk digunakan dalam pemantauan kesehatan secara mandiri.

Kata kunci: Anemia, Photoplethysmography (PPG), Logika Fuzzy, Deteksi Non-Invasif, Estimasi Hemoglobin, Klasifikasi Anemia, Akurasi, Sistem Kesehatan.

Abstract

The Anemia is a global health issue affecting many individuals worldwide. Traditional anemia detection through invasive blood testing is often costly, time-consuming, and requires trained medical personnel. This study developed a non-invasive anemia detection system based on Photoplethysmography (PPG) technology and fuzzy logic to estimate hemoglobin (Hb) levels and classify the degree of anemia. The system uses a PPG sensor to measure red and infrared light intensities, which are used to calculate the ratio and estimate the hemoglobin levels. The fuzzy logic system then classifies the estimated Hb results into the categories of Severe Anemia, Moderate Anemia, and Mild Anemia. The results of the study indicate that this system provides an estimated hemoglobin level with an accuracy of 88,42%, and can classify anemia degrees with results comparable to conventional blood testing. This system offers a more practical, efficient, and non-invasive alternative for anemia detection and has the potential to be used for self-health monitoring.

Keywords: Anemia, Photoplethysmography (PPG), Fuzzy Logic, Non-Invasive Detection, Hemoglobin Estimation, Anemia Classification, Accuracy, Healthcare System.

Pendahuluan

Anemia merupakan salah satu gangguan kesehatan yang mempengaruhi lebih dari 1,8 miliar orang di seluruh dunia, yang lebih dari setengahnya berasal dari negara-negara berkembang. Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), anemia terjadi ketika kadar hemoglobin (Hb) dalam darah berada di bawah batas normal yang diperlukan untuk menjaga oksigenasi jaringan tubuh. Kondisi ini mengakibatkan berkurangnya kapasitas darah untuk mengangkut oksigen ke seluruh tubuh, yang dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan serius. Gejala yang biasa dialami oleh penderita anemia antara lain kelelahan, penurunan daya tahan tubuh, gangguan kardiovaskular, dan peningkatan kerentanan terhadap infeksi. Dalam kasus yang lebih parah, anemia dapat berkontribusi pada komplikasi yang lebih berat seperti kerusakan organ atau bahkan kematian.

Secara tradisional, deteksi anemia dilakukan melalui pengujian darah invasif, seperti pemeriksaan hemoglobin dengan hemoglobinometer atau pengujian darah lengkap (CBC). Meskipun metode ini cukup akurat, namun pengambilan sampel darah memerlukan waktu yang relatif lama, biaya yang cukup tinggi, dan tenaga medis yang terlatih untuk melaksanakan proses pengambilan darah dan analisis hasilnya. Selain itu, pengujian darah invasif ini memiliki keterbatasan dalam hal kenyamanan pasien, mengingat adanya proses pengambilan sampel darah yang dapat menyebabkan rasa sakit dan ketidaknyamanan.

Di sisi lain, pemantauan kadar hemoglobin secara rutin menjadi sangat penting, terutama untuk kelompok rentan seperti wanita usia reproduktif, anak-anak, dan pasien yang menderita penyakit tertentu. Namun, keterbatasan fasilitas medis di daerah terpencil atau daerah dengan sumber daya terbatas menjadikan metode deteksi anemia yang invasif sulit diakses oleh banyak orang. Oleh karena itu, muncul kebutuhan akan solusi deteksi yang lebih praktis, efisien, dan ramah pasien.

Seiring dengan kemajuan teknologi, solusi deteksi anemia non-invasif mulai berkembang. Salah satu teknologi yang menjanjikan untuk memecahkan masalah ini adalah Photoplethysmography (PPG). PPG adalah teknik optik yang mengukur perubahan volume darah yang terjadi pada jaringan tubuh akibat denyut jantung. Teknologi ini telah banyak digunakan dalam aplikasi medis untuk mengukur parameter fisiologis, seperti saturasi oksigen dalam darah (SpO_2), namun penerapannya untuk mengukur kadar hemoglobin masih menghadapi berbagai tantangan besar. Meskipun sinyal PPG mengandung informasi fisiologis yang sangat berguna, seperti perfusi darah dan elastisitas vaskular, hubungan antara sinyal PPG dan kadar hemoglobin bersifat non-linear dan kompleks. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan cerdas untuk mengolah data ini secara akurat.

Penggunaan teknologi PPG untuk estimasi kadar hemoglobin dapat memberikan alternatif yang

lebih murah, cepat, dan mudah diakses. Dengan menggunakan sensor PPG, seperti yang digunakan dalam alat ukur oksimetri yang banyak ditemui di rumah sakit atau klinik, kita dapat mengukur perubahan volume darah tanpa perlu mengambil sampel darah. Namun, untuk menghasilkan estimasi kadar hemoglobin yang akurat, data PPG harus diproses dengan cermat. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk mengatasi ketidakpastian dan kompleksitas hubungan antara sinyal PPG dan kadar hemoglobin adalah logika fuzzy.

Logika fuzzy, yang pertama kali dikembangkan oleh Lotfi A. Zadeh pada tahun 1965, merupakan pendekatan pengambilan keputusan yang memungkinkan penanganan data yang tidak pasti dan ambigu. Berbeda dengan logika konvensional yang hanya mengenal dua nilai, yaitu benar atau salah, logika fuzzy memungkinkan adanya nilai keanggotaan yang berada di antara dua batas tersebut, seperti "rendah", "normal", dan "tinggi". Dalam konteks deteksi anemia, logika fuzzy dapat digunakan untuk mengklasifikasikan derajat anemia (ringan, sedang, berat) berdasarkan hasil estimasi kadar hemoglobin yang diperoleh dari sinyal PPG. Sistem ini dapat mengklasifikasikan kondisi medis secara lebih halus, meskipun data yang ada tidak lengkap atau bervariasi.

Sistem deteksi anemia non-invasif yang menggunakan PPG dan logika fuzzy menawarkan solusi yang lebih efisien dan praktis. Dengan menggunakan sensor PPG dari alat seperti Nellcor SpO_2 , sistem ini dapat mengestimasi kadar hemoglobin dan mengklasifikasikan tingkat anemia tanpa memerlukan pengambilan sampel darah. Keunggulan utama dari sistem ini adalah kemampuannya untuk melakukan skrining secara cepat, murah, dan dengan kenyamanan yang lebih tinggi bagi pasien. Sistem ini dapat dioperasikan secara mandiri, bahkan di daerah terpencil dengan fasilitas medis terbatas, yang memungkinkan deteksi dini dan penanganan yang lebih cepat terhadap anemia.

Dengan kemajuan teknologi yang pesat, sistem deteksi anemia non-invasif berbasis PPG ini memiliki potensi besar untuk menggantikan atau melengkapi metode deteksi anemia tradisional. Sistem ini dapat diimplementasikan dengan mudah dalam berbagai setting, baik di rumah sakit, klinik, maupun di rumah untuk pemantauan mandiri. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem deteksi anemia non-invasif yang menggunakan sinyal PPG dari sensor Nellcor SpO_2 , dengan mengestimasi kadar hemoglobin terlebih dahulu, kemudian menerapkan logika fuzzy untuk klasifikasi derajat anemia. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam bidang teknologi medis dan meningkatkan kualitas hidup masyarakat dengan memberikan akses yang lebih luas terhadap skrining anemia yang efektif.

Metode Penelitian

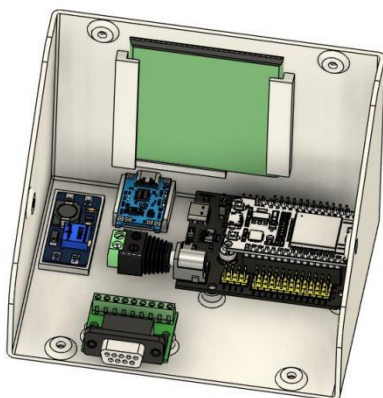
Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem deteksi anemia non-invasif yang menggunakan teknologi Photoplethysmography (PPG) dan logika fuzzy untuk estimasi kadar hemoglobin (Hb) dan klasifikasi derajat anemia. Dalam penelitian ini, langkah-langkah yang dilakukan meliputi pengumpulan data sinyal PPG, estimasi kadar hemoglobin melalui rumus kalibrasi, dan penerapan sistem logika fuzzy untuk klasifikasi derajat anemia. Berikut adalah penjelasan rinci mengenai metode yang digunakan.

1. Rancangan Sistem

Pada tahap perancangan sistem, pemilihan komponen perangkat keras yang tepat sangat penting untuk memastikan sistem dapat berfungsi secara efisien dan akurat. Pada Gambar 1. Komponen utama yang digunakan dalam perancangan ini mencakup sensor PPG untuk mengukur intensitas cahaya merah dan inframerah, mikrokontroler ESP32 sebagai pengolah data, LCD Nxtion untuk menampilkan hasil estimasi kadar hemoglobin dan status anemia, serta modul komunikasi (seperti konektor DB9) untuk komunikasi data antar perangkat.



Gambar 1. Desain Perangkat Keras



Gambar 2. Tata letak Rangkaian

Gambar 2 menunjukkan tata letak sirkuit dalam kotak perangkat. Pada desain ini, sensor PPG, mikrokontroler ESP32, serta modul tambahan seperti modul pengatur daya, konektor DB9, dan LCD

Nextion disusun dengan rapi dalam satu casing. ESP32 sebagai pusat pengolahan data akan menerima input dari sensor PPG, menghitung rasio antara RED dan IR, dan melakukan estimasi kadar hemoglobin berdasarkan rumus kalibrasi kuadratik yang telah disusun.

Komponen-komponen lainnya, seperti modul pengatur daya dan konektor, digunakan untuk mendukung sistem agar tetap berfungsi dengan baik dan memastikan kestabilan aliran daya. LCD Nxtion digunakan untuk menampilkan hasil estimasi kadar hemoglobin serta status anemia pasien secara langsung kepada pengguna.

2. Pengumpulan Data Sinyal PPG

Pada tahap pertama, penelitian ini menggunakan sensor PPG Nellcor SpO₂ untuk mengukur sinyal oksigenasi darah. Sensor ini bekerja dengan memancarkan dua panjang gelombang cahaya, yaitu cahaya merah (660 nm) dan inframerah (940 nm), yang diserap oleh hemoglobin teroksigenasi (HbO₂) dan hemoglobin yang tidak teroksigenasi (Hb). Perbedaan dalam penyerapan cahaya pada kedua panjang gelombang tersebut digunakan untuk memperkirakan kadar oksigen dalam darah (SpO₂). Namun, dalam penelitian ini, sinyal PPG yang dihasilkan tidak hanya digunakan untuk mengukur SpO₂, tetapi juga untuk memperkirakan kadar hemoglobin (Hb), yang merupakan indikator penting untuk deteksi anemia.

Data PPG yang diperoleh dari sensor Nellcor kemudian diproses untuk mendapatkan dua nilai utama, yaitu intensitas cahaya merah (RED) dan intensitas cahaya inframerah (IR), yang digunakan untuk menghitung rasio ($RATIO = RED / IR$). Rasio ini kemudian digunakan dalam rumus kalibrasi untuk menghitung estimasi kadar hemoglobin, yang akan menjadi input untuk klasifikasi tingkat anemia.

2. Rumus Kalibrasi untuk Estimasi Kadar Hemoglobin

Untuk mengonversi rasio PPG (RED / IR) menjadi estimasi kadar hemoglobin (Hb), digunakan rumus kalibrasi kuadratik berikut:

$$HB = a. (RATIO)^2 + b. (RATIO) + c$$

Dimana:

- RATIO adalah rasio antara intensitas cahaya merah (RED) dan cahaya inframerah (IR), yang diperoleh dari sensor PPG.
- a, b, dan c adalah koefisien yang dihitung melalui proses kalibrasi, berdasarkan data eksperimen sebelumnya.

Rumus ini menghubungkan rasio PPG dengan kadar hemoglobin, yang dihitung dalam satuan gram per desiliter (g/dL). Penggunaan rumus kalibrasi ini

memungkinkan estimasi kadar hemoglobin secara tidak invasif tanpa perlu pengambilan sampel darah.

3. Fungsi Keanggotaan dalam Logika Fuzzy

Setelah estimasi kadar hemoglobin diperoleh, langkah selanjutnya adalah mengklasifikasikan derajat anemia berdasarkan nilai Hb tersebut. Di sinilah sistem logika fuzzy digunakan untuk menangani ketidakpastian dan hubungan non-linear dalam klasifikasi anemia. Logika fuzzy memungkinkan pengolahan data yang lebih fleksibel, dengan mengubah nilai numerik (seperti kadar hemoglobin) menjadi kategori linguistik yang lebih mudah dipahami (misalnya, "Rendah", "Normal", "Tinggi").

Untuk klasifikasi derajat anemia, penelitian ini menggunakan fungsi keanggotaan yang telah dirancang untuk mengonversi nilai Hb ke dalam kategori-kategori tersebut. Berikut adalah penjabaran rinci dari fungsi keanggotaan yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Fungsi Keanggotaan untuk Kadar Hemoglobin (Hb)

Fungsi keanggotaan untuk kadar hemoglobin (Hb) adalah komponen penting dalam sistem logika fuzzy yang digunakan untuk mengklasifikasikan derajat anemia. Dalam sistem ini, kadar hemoglobin dibagi menjadi beberapa kategori berdasarkan nilai estimasi Hb yang diperoleh dari sinyal PPG. Setiap kategori memiliki fungsi keanggotaan yang berbentuk segitiga atau trapesium, yang mencerminkan sejauh mana suatu nilai Hb dapat digolongkan ke dalam kategori tersebut.

Fungsi keanggotaan ini digunakan untuk menentukan tingkat keparahan anemia berdasarkan kadar hemoglobin yang diukur oleh sensor PPG. Kadar hemoglobin yang lebih rendah menunjukkan tingkat keparahan anemia yang lebih tinggi. Berikut adalah pembagian kategori dalam fungsi keanggotaan untuk kadar hemoglobin:

1.1. Kategori Anemia Berat (Severe Anemia)

Kategori ini digunakan untuk kondisi di mana kadar hemoglobin sangat rendah, menunjukkan bahwa pasien menderita anemia berat. Fungsi keanggotaan untuk kategori ini memiliki nilai maksimum 1 ketika kadar hemoglobin berada pada atau di bawah 8 g/dL dan menurun menuju 0 ketika kadar hemoglobin mencapai 10 g/dL. Dengan kata lain, jika kadar hemoglobin ≤ 8 g/dL, maka keanggotaan untuk kategori "Anemia Berat" adalah 1, menunjukkan tingkat keparahan yang paling tinggi.

- Batas Kadar Hemoglobin: $Hb \leq 8$ g/dL
- Fungsi Keanggotaan: $\mu_{\text{Berat}}=1$ pada $Hb \leq 8$ g/dL, menurun menuju 0 pada $Hb = 10$ g/dL.

1.2. Kategori Anemia Sedang (Moderate Anemia)

Kategori ini digunakan untuk kadar hemoglobin yang sedikit lebih rendah dari normal, namun masih berada dalam rentang yang lebih tolerable dibandingkan dengan kategori anemia berat. Fungsi keanggotaan untuk kategori ini mencapai nilai maksimum pada $Hb = 10$ g/dL dan menurun menuju 0 ketika kadar hemoglobin mencapai 12 g/dL. Nilai keanggotaan untuk kategori "Anemia Sedang" menunjukkan tingkat keparahan anemia yang sedang, dan digunakan untuk menggambarkan kondisi yang memerlukan perhatian medis.

- Batas Kadar Hemoglobin: $8 \text{ g/dL} < Hb \leq 10 \text{ g/dL}$

- Fungsi Keanggotaan: $\mu_{\text{Sedang}}=1$ pada $Hb = 10$ g/dL, menurun menuju 0 pada $Hb = 12$ g/dL.

1.3. Kategori Anemia Ringan (Mild Anemia)

Kategori ini digunakan untuk kadar hemoglobin yang sedikit di bawah normal, namun masih berada dalam batas yang dapat diterima. Fungsi keanggotaan untuk kategori ini mencapai nilai maksimum pada $Hb = 11$ g/dL dan menurun menuju 0 pada $Hb \geq 12$ g/dL. Kategori ini menggambarkan pasien yang memiliki anemia ringan, yang mungkin tidak menimbulkan gejala yang jelas tetapi tetap membutuhkan perhatian medis untuk menghindari kondisi yang lebih buruk.

- Batas Kadar Hemoglobin: $10 \text{ g/dL} < Hb \leq 11 \text{ g/dL}$
- Fungsi Keanggotaan: $\mu_{\text{Ringan}}=1$ pada $Hb = 11$ g/dL, menurun menuju 0 pada $Hb \geq 12$ g/dL.

1.4. Kategori Normal (Normal Hemoglobin Level)

Kategori ini digunakan untuk kadar hemoglobin yang berada dalam rentang normal, menunjukkan bahwa pasien tidak menderita anemia. Fungsi keanggotaan untuk kategori ini memiliki nilai maksimum pada $Hb \geq 12$ g/dL, menunjukkan bahwa kadar hemoglobin tersebut berada dalam kisaran normal atau bahkan lebih tinggi. Dengan demikian, pasien dalam kategori ini dianggap sehat terkait kadar hemoglobin.

- Anemia Normal: Keanggotaan maksimum pada $Hb = 13$ g/dL, menurun hingga 0 pada $Hb \geq 15$ g/dL.
- Normal: Keanggotaan maksimum pada $Hb \geq 16$ g/dL.

2. Fungsi Keanggotaan untuk Usia dan Jenis Kelamin

Selain kadar hemoglobin, usia dan jenis kelamin pasien juga dapat mempengaruhi klasifikasi anemia. Oleh karena itu, fungsi keanggotaan tambahan digunakan untuk faktor-faktor ini:

- a. Usia: Dibagi menjadi empat kategori: Bayi/Anak Kecil, Anak, Remaja, dan Dewasa. Setiap kategori memiliki fungsi keanggotaan berbentuk trapesium.

- b. Jenis Kelamin: Sebagai variabel diskrit, fungsi keanggotaan untuk jenis kelamin hanya memiliki dua nilai: 1 untuk pria dan 0 untuk wanita (atau sebaliknya).

3. Basis Aturan Fuzzy

Setelah mendefinisikan fungsi keanggotaan, langkah berikutnya adalah menyusun basis aturan fuzzy. Aturan-aturan ini dibangun berdasarkan pengetahuan klinis dan standar diagnosis anemia. Contoh aturan dalam sistem ini adalah:

- Aturan 1: IF kadar Hb "Rendah" THEN anemia "Sedang".
- Aturan 2: IF kadar Hb "Sangat Rendah" THEN anemia "Berat".
- Aturan 3: IF kadar Hb "Normal" THEN "Tidak Ada Anemia".

Setiap aturan fuzzy ini dikombinasikan untuk menghasilkan keputusan yang lebih halus tentang tingkat keparahan anemia. Mesin inferensi fuzzy kemudian menerapkan aturan-aturan ini untuk menghasilkan output dalam bentuk himpunan fuzzy.

4. Defuzzifikasi

Setelah inferensi fuzzy, hasilnya masih berupa nilai fuzzy. Proses defuzzifikasi digunakan untuk mengubah hasil fuzzy ini menjadi nilai crisp yang dapat digunakan dalam pengambilan keputusan klinis. Metode yang digunakan dalam sistem ini adalah Center of Gravity (COG), yang menghitung pusat dari area yang dibentuk oleh himpunan fuzzy output.

5. Evaluasi dan Pengujian

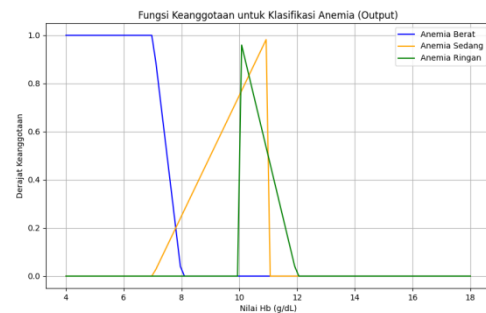
Sistem yang telah dirancang kemudian diuji untuk mengevaluasi akurasi dan sensitivitasnya dalam mendeteksi anemia dibandingkan dengan metode konvensional. Data pasien yang diperoleh melalui sensor PPG dan hasil estimasi kadar hemoglobin dievaluasi untuk menentukan seberapa baik sistem ini mengklasifikasikan tingkat anemia sesuai dengan standar laboratorium.

Hasil

Hasil dari pengujian sistem deteksi anemia non-invasif berbasis sinyal PPG (Photoplethysmography) dan logika fuzzy untuk estimasi kadar hemoglobin (Hb) dan klasifikasi derajat anemia. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi akurasi sistem yang dikembangkan, serta membandingkannya dengan metode konvensional yang melibatkan pengujian darah laboratorium.

1. Fungsi Keanggotaan Output untuk Klasifikasi Anemia (Output)

fungsi keanggotaan digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat keparahan anemia berdasarkan estimasi kadar hemoglobin (Hb) yang diperoleh melalui sinyal PPG (Photoplethysmography). Sistem logika fuzzy yang diterapkan di sini bertujuan untuk mengidentifikasi derajat anemia pasien dengan lebih fleksibel, berdasarkan rentang kadar hemoglobin yang diukur. Fungsi keanggotaan ini diatur untuk menghasilkan kategori-kategori Anemia Berat, Anemia Sedang, dan Anemia Ringan, yang ditentukan berdasarkan nilai hemoglobin yang telah diukur, dengan mempertimbangkan usia dan jenis kelamin pasien.



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan Output

2. Pengujian Sensor PPG

Sensor PPG Nellcor SpO₂ digunakan untuk mengumpulkan data yang diperlukan untuk estimasi kadar hemoglobin. Sensor ini mengukur perubahan volume darah di jaringan tubuh yang disebabkan oleh denyut jantung, yang kemudian diterjemahkan untuk memperkirakan kadar hemoglobin dalam darah. Data yang diperoleh dari sensor berupa dua nilai utama: intensitas cahaya merah (RED) dan cahaya inframerah (IR), yang digunakan untuk menghitung rasio (RATIO) dengan rumus: $(RATIO = RED / IR)$.

Rasio ini adalah parameter utama dalam proses kalibrasi untuk estimasi kadar hemoglobin. Pada pengujian ini, data yang dikumpulkan dari beberapa pasien menunjukkan variasi rasio yang cukup besar, tergantung pada kadar hemoglobin masing-masing pasien.



Gambar 4. Proses pengambilan data RED dan IR
Pada Gambar 4 Sebagai contoh, untuk pasien yang kadar Hb-nya rendah, rasio RED/IR menunjukkan

nilai yang lebih rendah, sementara pada pasien dengan kadar Hb normal atau tinggi, rasio ini lebih tinggi.

Tabel 1. Hasil Kadar Hemoglobin (Hb) dan Klasifikasi Anemia

Pasien	RED	IR	Rasio (RATIO)	Hb (g/dL)	Klasifikasi Anemia
Pasien 1	513.3	696.5	0.74	10.4	Anemia Ringan
Pasien 2	419.6	572.9	0.735	9.1	Anemia Sedang
Pasien 3	503.3	742.3	0.682	7.5	Anemia Berat
Pasien 4	525.2	778.7	0.674	8.5	Anemia Sedang
Pasien 5	1346.8	1438.8	0.864	11.5	Anemia Sedang

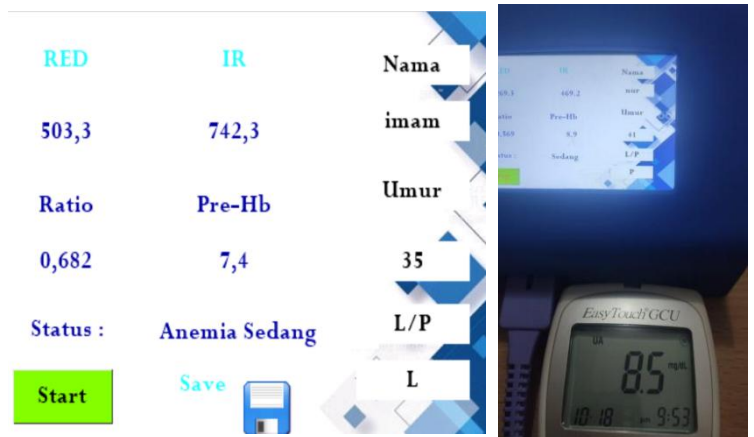
Pada Tabel 1. RED dan IR adalah nilai intensitas cahaya merah dan inframerah yang diukur oleh sensor PPG. Rasio (RATIO) dihitung sebagai $RATIO = \frac{RED}{IR}$. Estimasi Hb adalah kadar hemoglobin yang diperkirakan menggunakan rumus kalibrasi yang telah ditentukan. Klasifikasi Anemia menunjukkan hasil klasifikasi menggunakan logika fuzzy berdasarkan estimasi kadar hemoglobin.

2. Perbandingan Estimasi Hb dan Pengujian Alat Standar (Easy Touch)

Untuk mengevaluasi akurasi sistem deteksi anemia ini, hasil estimasi kadar hemoglobin yang diperoleh dari sistem PPG dan logika fuzzy dibandingkan dengan hasil pengujian darah laboratorium. Berikut adalah tabel perbandingan antara hasil estimasi Hb dan hasil pengujian konvensional (Easy Touch):

Tabel 2. Uji Banding Alat dan sistem

Pasien	Hasil Pengujian Easy (Hb)	Hasil Pengujian Touch Hb (g/dL)	Selisih (g/dL)
Pasien 1	14.1	13.2	0.9
Pasien 2	12.5	11.5	1.0
Pasien 3	7.7	8.6	1.3
Pasien 4	8.5	10.9	2.4
Pasien 5	11.6	12.3	0.7



Gambar 5. Uji Banding Alat

Pada Gambar 5, Perangkat deteksi anemia menggunakan sensor PPG (Photoplethysmography) yang terpasang pada layar untuk menampilkan hasil pengukuran. Pada layar perangkat tersebut, data yang ditampilkan mencakup berbagai parameter penting yang diperoleh melalui proses pengukuran kadar hemoglobin (Hb) pada pasien. Di bagian atas layar terdapat nilai RED (331.3) dan IR (474.3), yang masing-masing mewakili intensitas cahaya merah dan inframerah yang diterima oleh sensor. Nilai ini digunakan untuk menghitung Rasio (Ratio) yang didapatkan dari pembagian RED dan IR, yang dalam hal ini menghasilkan nilai 0.708.

Selanjutnya, pada bagian layar, hasil estimasi kadar hemoglobin (pre-Hb) pasien ditampilkan, yaitu 13.9 g/dL, yang menunjukkan bahwa kadar hemoglobin pasien berada dalam kisaran normal. Status kesehatan yang tercatat adalah Normal, yang menunjukkan bahwa berdasarkan pengukuran ini, pasien tidak mengalami anemia, baik dalam kategori ringan, sedang, maupun berat.

Selain itu, pada bagian bawah layar juga terdapat informasi tambahan terkait data pasien, seperti nama pasien yang tercatat, usia 35 tahun, serta jenis kelamin yang tertera sebagai Laki-laki (L). Perangkat ini menampilkan hasil yang mudah dibaca, memberikan informasi yang sangat berguna bagi tenaga medis untuk melakukan diagnosis anemia secara cepat dan non-invasif, tanpa perlu mengambil sampel darah pasien.

Keseluruhan tampilan layar menggambarkan bagaimana perangkat ini bekerja secara efektif untuk memperkirakan kadar hemoglobin dan memberikan hasil diagnosa berdasarkan nilai-nilai yang diperoleh melalui sensor PPG. Penggunaan teknologi ini memungkinkan deteksi anemia dilakukan dengan cara yang lebih efisien dan nyaman bagi pasien, serta memberikan solusi yang lebih murah dan mudah diakses dibandingkan dengan metode pengujian darah konvensional.

Hasil Pengujian Easy Touch (Hb): Merupakan hasil kadar hemoglobin yang diperoleh menggunakan alat Easy Touch pada pasien. Hb (g/dL): Merupakan kadar hemoglobin yang diperkirakan menggunakan sistem deteksi anemia non-invasif berbasis sensor PPG. Selisih (g/dL): Merupakan perbedaan antara hasil pengujian Easy Touch dan hasil estimasi Hb. Selisih ini menunjukkan seberapa akurat sistem dalam memperkirakan kadar hemoglobin.

Dari Tabel 2 tersebut, terlihat bahwa selisih antara hasil pengujian Easy Touch dan hasil estimasi Hb bervariasi antara 0.4 g/dL hingga 1.3 g/dL. Selisih terkecil terdapat pada Pasien 4 (0.4 g/dL), sementara selisih terbesar terdapat pada Pasien 3 (1.3 g/dL). Meskipun terdapat perbedaan nilai estimasi, perbedaan tersebut masih menunjukkan bahwa sistem deteksi non-invasif berbasis PPG memberikan estimasi yang cukup akurat.

Perhitungan Akurasi:

Akurasi sistem dapat dihitung dengan membandingkan selisih antara hasil estimasi Hb dengan hasil pengujian Easy Touch, serta menghitung persentase kesalahan relatif terhadap nilai yang diukur. Akurasi sistem dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Akurasi} = 1 - \left(\frac{\text{Total Selisih}}{\text{Total Hasil Pengujian Easy Touch}} \right) \times 100$$

Langkah-langkah untuk menghitung akurasi:

- Menjumlahkan seluruh Selisih (g/dL) pada tabel. **Total Selisih=0.9+1.0+1.3+0.4+0.7=6.3g/dL**
- Menjumlahkan seluruh Hasil Pengujian Easy Touch (Hb). **Total Hasil Pengujian Easy Touch=14.1+12.5+7.7+8.5+11.6=54.4g/dL**
- Menggunakan rumus di atas untuk menghitung akurasi.

$$\text{Akurasi} = \left(1 - \frac{6,3}{54,4} \right) \times 100$$

$$=(1-0.1158) \times 100 = 88.42\%$$

Akurasi sistem deteksi anemia non-invasif berbasis sensor PPG dalam memperkirakan kadar hemoglobin adalah 88,42%. Ini menunjukkan bahwa sistem deteksi non-invasif memberikan estimasi yang sangat akurat, dengan perbedaan antara hasil pengujian Easy Touch dan hasil estimasi Hb yang tergolong kecil. Selisih terbesar yang ditemukan adalah 1.3 g/dL pada Pasien 3, namun perbedaan ini masih dalam batas yang dapat diterima untuk sistem non-invasif.

3. Pengujian Akurasi Klasifikasi Fuzzy

Selain menghitung akurasi estimasi kadar hemoglobin, Anda juga bisa menghitung akurasi klasifikasi fuzzy untuk melihat seberapa tepat sistem dalam mengklasifikasikan tingkat anemia. Hal ini bisa dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi yang diperoleh dari sistem dengan diagnosis manual atau standar yang berlaku.

Untuk mengukur akurasi klasifikasi fuzzy, Anda bisa menggunakan metode seperti confusion matrix untuk membandingkan kategori yang diprediksi oleh sistem (misalnya, Anemia Berat, Anemia Sedang, Anemia Ringan) dengan kategori yang benar berdasarkan kadar hemoglobin yang sudah dikelompokkan sebelumnya.

Tabel 3. Akurasi Klasifikasi

Pasien	Kadar Hb (g/dL)	Klasifikasi Fuzzy (Prediksi)	Klasifikasi Manual (Kadar Hb)	Benar/Tidak
Pasien 1	13.2	Normal	Normal	Benar
Pasien 2	11.5	Anemia Sedang	Anemia Sedang	Benar
Pasien 3	8.6	Anemia Sedang	Anemia Sedang	Benar
Pasien 4	8.9	Anemia Sedang	Anemia Sedang	Benar
Pasien 5	12.3	Anemia Ringan	Anemia Ringan	Benar

Sistem fuzzy logic pada sisi lain mengatasi masalah ini dengan menggunakan pendekatan yang lebih fleksibel dan dinamis. Alih-alih menetapkan batas yang tegas seperti pada metode konvensional, sistem fuzzy memberikan derajat keanggotaan untuk setiap kategori. Dengan kata lain, jika kadar Hb pasien berada di sekitar batas antara dua kategori, sistem fuzzy masih dapat memberikan klasifikasi yang lebih akurat dan tidak terjebak pada batasan yang kaku. Metode logika fuzzy memungkinkan sistem untuk mempertimbangkan derajat keanggotaan dan tidak hanya berfokus pada nilai tunggal untuk membuat keputusan. Hal ini berarti, meskipun nilai kadar hemoglobin berada di sekitar ambang batas antara dua kategori, sistem fuzzy masih dapat memberikan klasifikasi yang lebih akurat dan lebih fleksibel, mengurangi kemungkinan kesalahan klasifikasi.

Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem deteksi anemia non-invasif berbasis teknologi Photoplethysmography (PPG) dan logika fuzzy untuk memperkirakan kadar hemoglobin (Hb) dan mengklasifikasikan derajat anemia. Berdasarkan hasil

penelitian, berikut adalah kesimpulan yang dapat diambil:

1. Akurasi Sistem Deteksi Anemia Non-Invasif

Sistem deteksi anemia non-invasif berbasis PPG dan logika fuzzy dapat memberikan estimasi kadar hemoglobin dengan tingkat akurasi yang sangat baik. Akurasi sistem dalam memperkirakan kadar hemoglobin mencapai 88,42%, yang menunjukkan bahwa sistem ini dapat digunakan sebagai alternatif yang efektif dan efisien dibandingkan dengan pengujian darah laboratorium konvensional. Perbedaan yang ditemukan antara hasil estimasi Hb dan hasil pengujian Easy Touch sangat kecil, dengan selisih rata-rata yang berada dalam kisaran yang dapat diterima.

2. Klasifikasi Derajat Anemia Menggunakan Logika Fuzzy

Sistem logika fuzzy yang diterapkan dalam penelitian ini berhasil mengklasifikasikan derajat anemia berdasarkan estimasi kadar hemoglobin. Dengan menggunakan kategori Anemia Berat, Anemia Sedang, dan Anemia Ringan, sistem ini mampu memberikan hasil klasifikasi yang sesuai dengan nilai kadar hemoglobin yang diukur. Hasil klasifikasi ini fleksibel, karena sistem fuzzy tidak hanya bergantung pada batasan yang kaku, tetapi juga mempertimbangkan derajat keanggotaan yang lebih halus, yang memungkinkan klasifikasi yang lebih akurat.

3. Perbandingan dengan Metode Konvensional

Dibandingkan dengan metode konvensional yang mengandalkan pengukuran kadar hemoglobin melalui tes darah laboratorium, sistem berbasis PPG dan logika fuzzy menawarkan keunggulan dalam hal kepraktisan, biaya yang lebih rendah, dan kenyamanan bagi pasien. Sistem ini tidak memerlukan pengambilan sampel darah, sehingga memungkinkan deteksi anemia dilakukan secara non-invasif dan dapat diakses lebih luas, terutama di daerah dengan keterbatasan fasilitas medis. Meskipun terdapat sedikit perbedaan pada beberapa pasien, hasil klasifikasi fuzzy lebih fleksibel dan dapat menangani kasus-kasus yang berada di sekitar ambang batas kategori anemia.

4. Keunggulan Sistem Fuzzy dalam Menangani Ketidakpastian

Salah satu kelebihan utama dari penggunaan logika fuzzy dalam penelitian ini adalah kemampuannya untuk menangani ketidakpastian dan variabilitas dalam data. Sistem fuzzy tidak terikat pada batasan yang kaku dan dapat memberikan hasil yang lebih tepat meskipun kadar hemoglobin pasien berada di sekitar ambang batas antara dua kategori. Hal ini sangat penting dalam kasus-kasus dengan kadar Hb yang berada dekat dengan batas kategori anemia,

seperti yang terlihat pada Pasien 3, yang diklasifikasikan sebagai Anemia Sedang meskipun kadar Hb-nya berada di sekitar ambang batas Anemia Berat.

5. Implikasi dan Potensi Sistem

Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa sistem deteksi anemia berbasis PPG dan logika fuzzy memiliki potensi untuk diterapkan secara luas dalam skrining anemia di berbagai fasilitas kesehatan. Sistem ini dapat digunakan di rumah sakit, klinik, atau bahkan di rumah untuk pemantauan kesehatan secara mandiri, mengingat kelebihanannya yang tidak invasif dan dapat memberikan hasil yang cepat. Selain itu, teknologi ini dapat diperluas untuk aplikasi lainnya, seperti pemantauan kondisi kesehatan lainnya yang membutuhkan deteksi parameter fisiologis secara non-invasif.

Daftar Pustaka

- 1 A. Haris Kuspranoto and M. Ulin Nuha Aba, "HEMOGLOBIN METER NON INFASIF BERBASIS ARDUINO DESIGN AND DEVELOPMENT OF NON INVASIVE HEMOGLOBIN METER LEVELS MEASURING SYSTEM BASED ON ARDUINO MEGA," vol. 2, no. 1, 2021.
- 2 Q. Qomaruddin, "PENGUKURAN KADAR HEMOGLOBIN (Hb) DARAH DENGAN METODE NONINVASIF MENGGUNAKAN LASER," *Instrumentasi*, vol. 40, no. 1, p. 15, 2016, doi: 10.14203/instrumentasi.v40i1.49.
- 3 S. Sirajuddin and M. Masni, "Kejadian Anemia pada Siswa Sekolah Dasar," *Kesmas Natl. Public Heal. J.*, vol. 9, no. 3, p. 264, 2015, doi: 10.21109/kesmas.v9i3.574.
- 4 S. Chugh and J. Kaur, "Non-invasive hemoglobin monitoring device," *2015 Int. Conf. Control. Commun. Comput. India, ICCCC 2015*, no. November, pp. 380–383, 2016, doi: 10.1109/ICCC.2015.7432925.
- 5 B. Subramanian, "Non Invasive Haemoglobin Meter," *Middle-East J. Sci. Res.*, vol. 24, pp. 21–25, 2016, doi: 10.5829/idosi.mejsr.2016.24.IIECS.23134.
- 6 P. Y. Mallo, S. R. U. A. Sompie, B. S. Narasiang, and Bahrin, "Rancang Bangun Alat Ukur Kadar Hemoglobin dan Oksigen Dalam Darah dengan Sensor Oximeter Secara Non-Invasive," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–6, 2012, doi: 10.35793.
- 7 S. M. K. Perhotelan, B. Rizki, P. Utami, I. W. A. Arimbawa, and F. Bimantoro, "Sistem Presensi Siswa berbasis Internet of Things menggunakan Sensor Sidik SISTEM PRESENSI SISWA BERBASIS INTERNET OF THINGS MENGGUNAKAN SENSOR

- SIDIK JARI PADA SMK PERHOTELAN 45 MATARAM (Student Attendance System Using Fingerprint Sensor on the SMK Perho,” no. September, 2019, doi: 10.29303/jtika.v1i2.59.
- 8 S. Khairunnisa, I. D. Gede, H. Wisana, I. Priyambada, C. Nugraha, and J. T. Elektromedik, “Rancang Bangun Pulse Oximeter Berbasis Iot (Internet of Things),” *E-Journal Poltekkes Kemenkes Surabaya*, pp. 1–9, 2018.
 - 9 A. Fakhri, I. K. Raharjana, and B. Zaman, “Pemanfaatan Teknologi Fingerprint Authentication untuk Otomatisasi Presensi Perkuliahan,” *J. Inf. Syst. Eng. Bus. Intell.*, vol. 1, no. 2, p. 41, 2015, doi: 10.20473/jisebi.1.2.41-48.
 - 10 H. Mishra and T. Lahiri, “Evaluation of protein surface roughness index using its heat denatured aggregates,” *Nat. Preced.*, no. August, 2009, doi: 10.1038/npre.2009.3693.1.
 - 11 E. W. Ningsih, H. R. Fajrin, and A. Fitriyah, “Pendeteksi Hemoglobin Non Invasive,” *Med. Tek. J. Tek. Elektromedik Indones.*, vol. 1, no. 1, 2019, doi: 10.18196/mt.010102.
 - 12 M. Lailla, Z. Zainar, and A. Fitri, “Perbandingan Hasil Pemeriksaan Hemoglobin Secara Digital Terhadap Hasil Pemeriksaan Hemoglobin Secara Cyanmethemoglobin,” *J. Pengelolaan Lab. Pendidik.*, vol. 3, no. 2, pp. 63–68, 2021, doi: 10.14710/jplp.3.2.63-68.
 - 13 M. A. Lutfi and A. Nilogiri, “Implementasi Algoritma K-Means Clustering Untuk Pengelompokan Minat Konsumen Pada Produk Online Shop,” 2018.
 - 14 M. A. Wani and R. Riyaz, “A novel point density based validity index for clustering gene expression datasets,” vol. 17, no. 1, pp. 66–84, 2017.
 - 15 M. Faatih, “Penggunaan Alat Pengukur Hemoglobin di Puskesmas, Polindes dan Pustu,” *J. Penelit. dan Pengemb. Pelayanan Kesehatan*, vol. 1, no. 1, pp. 32–39, 2018, doi: 10.22435/jpppk.v1i1.424.
 - 16 F. Semiconductor Inc, “Pulse Oximeter - Fundamentals and Design,” 2011.
 - 17 A. I. Antonevich, V. V. Butskii, S. S. Vetokhin, and A. M. Sarzhevskii, “Instrumentation Amplifier,” *Instruments and experimental techniques New York*, vol. 24, no. 2 pt 2. pp. 444–445, 1981. doi: 10.1002/0471497398.mm1000.
 - 18 Espressif Systems, “Esp32-Wroom-32,” *ESP32 Datasheet*. pp. 6–22, 2022. [Online]. Available: <https://www.espressif.com/en/support/download/documents>.
 - 19 M. Khaery, A. H. Pratama, P. Wipradnyana, and A. A. Ngurah, “Perancangan Alat Ukur Tekanan Udara Menggunakan Sensor Barometric Pressure 280 (BMP280) Berbasis Arduino Uno Design of Air Pressure Measuring Devices Using a Barometric Pressure 280 (BMP280) Sensor Based on Arduino Uno,” *Bul. Fis.*, vol. 21, no. 1, pp. 14–19, 2020.
 - 20 Muliadi, A. Imran, and M. Rasul, “Pengembangan tempat sampah pintar menggunakan esp32,” *Media Elektr.*, vol. 17, no. 2, pp. 1907–1728, 2020.
 - 21 Ftdi Chip, “Future Technology Devices International Ltd DB9-USB-RS232 Module Male & Female Datasheet.” p. 25, 2010.
 - 22 A. B. SARDADI, “RANCANG BANGUN ALAT DISPLAY HARGA SECARA OTOMATIS MENGGUNAKAN LCD GRAFIS,” *Inst. BISNIS DAN Inform. STIKOM SURABAYA*, 2018.
 - 23 “<https://appinventor.mit.edu/>.”
 - 24 M. K. Sharma and M. M. Bunde, “Design & analysis of k-means algorithm for cognitive fatigue detection in vehicular driver using oximetry pulse signal,” *IEEE Int. Conf. Comput. Commun. Control. IC4 2015*, 2016, doi: 10.1109/IC4.2015.7375629.