

Desain Perangkat Pengukuran Hemoglobin Secara Non-Invasif Berbasis *Machine Learning*

1st Keyza Nuralifa Kalyana Puteri
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Purwokerto, Indonesia

keyzanuralifa@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Sevia Indah Purnama
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Purwokerto, Indonesia

seviaindah@telkomuniversity.ac.id

3rd Mas Aly Afandi
Fakultas Teknik Elektro
Telkom University
Purwokerto, Indonesia

alyafandi@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Hemoglobin (Hb) merupakan indikator penting untuk menilai kondisi kesehatan karena berperan dalam transportasi oksigen dan karbon dioksida dalam tubuh. Metode pengukuran Hb yang umum digunakan saat ini bersifat invasif, membutuhkan pengambilan sampel darah yang dapat menimbulkan ketidaknyamanan, risiko infeksi, serta memerlukan waktu dan biaya tambahan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan perangkat pengukur kadar hemoglobin secara non-invasif menggunakan sensor MAX30102 dan algoritma *machine learning* regresi linier. Sensor mendeteksi intensitas cahaya merah (*Red*) dan inframerah (IR) pada ujung jari, yang selanjutnya digunakan sebagai input dalam model prediksi kadar Hb. Model regresi linier yang digunakan memiliki persamaan: $Hb = 0,19118 + 0,02011 \times IR - 0,0030 \times Red$. Hasil evaluasi menunjukkan kombinasi sinyal rata-rata IR dan *Red* memberikan performa terbaik dengan MAE sebesar 0,939, MSE 1,325, RMSE 1,151, serta koefisien korelasi sebesar 0,643. Rata-rata galat antara hasil prediksi perangkat non-invasif terhadap metode invasif adalah 2,66%. Hasil ini menunjukkan bahwa perangkat non-invasif berbasis regresi linier dapat menjadi alternatif yang akurat, nyaman, dan efisien untuk pemantauan kadar hemoglobin.

Kata kunci— hemoglobin, *machine learning*, non-invasif, regresi linier.

I. PENDAHULUAN

Hemoglobin (Hb) merupakan komponen penting dalam darah yang berfungsi membawa oksigen dari paru-paru ke seluruh tubuh dan mengangkut karbon dioksida kembali ke paru-paru [1]. Karena perannya yang vital, kadar hemoglobin sering digunakan sebagai indikator untuk menilai kondisi kesehatan seseorang. Menurut *World Health Organization* (WHO), seseorang dikategorikan anemia jika kadar hemoglobinnya berada di bawah 12 gr/dl untuk wanita dan 13 gr/dl untuk pria [2]. Anemia dapat menyebabkan penurunan kemampuan darah dalam membawa oksigen ke jaringan tubuh, yang bisa menimbulkan gejala seperti lemas, mudah lelah, dan pusing [3].

Berdasarkan data Riskesdas 2018, prevalensi anemia pada remaja Indonesia mencapai 32%, yang artinya sekitar 3

hingga 4 dari 10 remaja mengalami kondisi ini. Saat ini, metode pengukuran hemoglobin umumnya masih dilakukan secara invasif dengan mengambil sampel darah [4]. Meskipun akurat, metode ini memiliki kelemahan seperti rasa tidak nyaman bagi pasien, risiko infeksi, serta membutuhkan waktu dan biaya lebih. Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif metode pengukuran hemoglobin yang lebih nyaman, cepat, dan aman. Salah satu solusinya adalah pengukuran hemoglobin secara non-invasif menggunakan teknologi optik berdasarkan prinsip hukum *Beer-Lambert*. Penelitian ini memanfaatkan hukum *Beer-Lambert* yaitu melewati sinar pada darah dan mengukur intensitas cahaya yang melewati darah [5]. Dengan mengukur seberapa besar cahaya yang diserap, konsentrasi hemoglobin dalam darah dapat diperkirakan tanpa perlu pengambilan sampel darah secara langsung. Agar estimasi kadar hemoglobin dari data sensor optik dapat dilakukan secara akurat, diperlukan model prediksi yang mampu memetakan hubungan antara intensitas cahaya dengan kadar hemoglobin. Permasalahan ini dikategorikan sebagai regresi, yaitu proses pemodelan hubungan antara variabel bebas (X) dan variabel terikat (Y) [6]. Dalam penelitian ini, nilai intensitas cahaya IR dan *Red* dari sensor berfungsi sebagai input (X), sedangkan kadar hemoglobin sebagai *output* (Y). Penelitian ini bertujuan mengembangkan alat pengukur hemoglobin non-invasif berbasis sensor cahaya dan algoritma regresi linier sebagai solusi yang lebih nyaman, praktis, dan dapat digunakan untuk pemantauan mandiri tanpa perlu pengambilan sampel darah.

II. KAJIAN TEORI

A. Hemoglobin

Hemoglobin adalah protein utama dalam eritrosit yang bertugas mengangkut oksigen ke seluruh tubuh dan membawa karbon dioksida kembali ke paru-paru [7].

B. Pengukuran Hemoglobin Invasif

Pengukuran kadar hemoglobi pada umumnya secara invasif dengan mengambil darah kapiler menggunakan lancet kemudian diteteskan pada strip tes dan dimasukkan kedalam hemoglobinometer portabel [8]. Alternatif pengukuran hemoglobin secara non-invasif menggunakan sensor optik

yang memanfaatkan perbedaan absorpsi cahaya merah dan inframerah oleh darah.

C. Hukum Beer Lambert

Hukum *Beer-Lambert* (*Beer's law*) menyatakan bahwa “jumlah cahaya yang diserap sebanding dengan konsentrasi zat tersebut dan panjang lintasan cahaya yang melewati larutan” [9]. Secara matematis, hukum *Beer-Lambert* ditulis dengan:

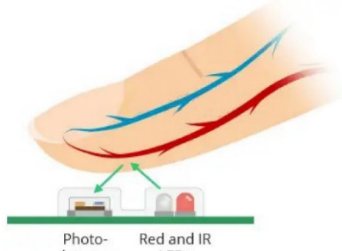
$$A = \epsilon \cdot b \cdot C \quad (1)$$

Keterangan:

- A : absorbansi
 ϵ : koefisien ekstingsi molar ($M^{-1} cm^{-1}$)
 b : Panjang jalur cahaya (cm)
 C : konsentrasi Zat (M)

D. Sensor MAX30102

Sensor MAX30102 merupakan sensor optik yangf menggunakan LED *Red*, LED Inframerah (IR), dan fotodioda untuk mengukur sinyal dari aliran darah di ujung jari [10].



GAMBAR 1 (SISTEM KERJA SENSOR MAX30102) [10]

Gambar 1 menunjukkan menunjukkan proses kerja sensor MAX30102, dimana jari diletakkan di atas yang terdiri dari fotodetektor, LED merah, dan LED inframerah (IR). Cahaya dari LED dipancarkan melalui jaringan kulit, dan sebagian dari cahaya tersebut dipantulkan kembali oleh pembuluh darah ke fotodetektor. Prinsip kerja sensor MAX30102 didasarkan pada metode fotoplethismografi (PPG), yang menggunakan cahaya untuk mendeteksi perubahan volume darah [11].

E. Regresi linier

Regresi linier digunakan untuk memodelkan hubungan antara satu atau lebih variabel independen (nilai yang dihasilkan sensor MAX30102) dan variabel dependen (nilai hb invasif) [12].

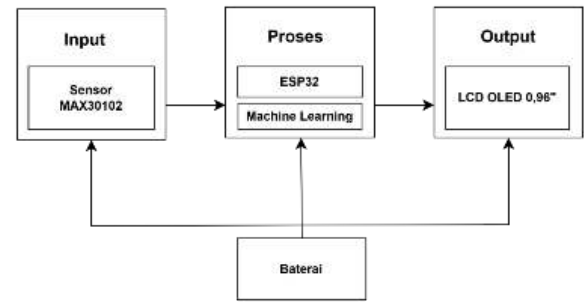
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (2)$$

Dengan keterangan:

- Y : Variabel dependen
- X_1, X_2, X_n : Variabel Independen
- β_0 : *Intercept* (konstanta)
- $\beta_1, \beta_2, \beta_n$: koefisien regresi yang mengukur seberapa besar perubahan dalam Y yang diharapkan [13].

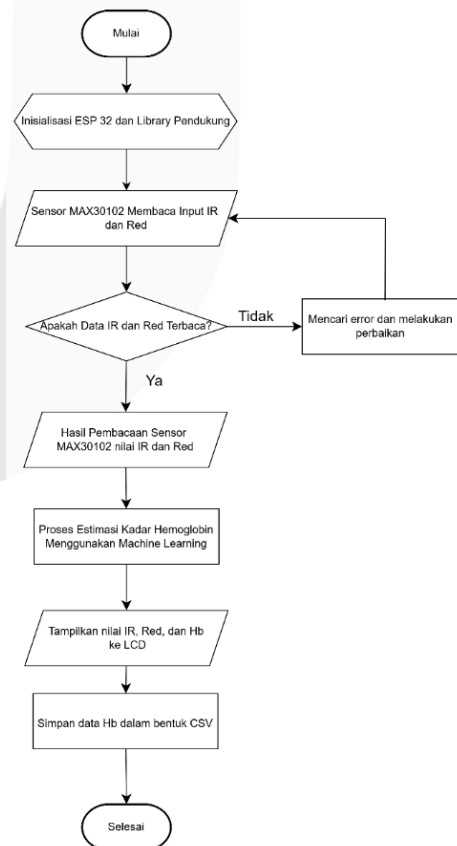
III. METODE

Penelitian ini dilakukan melalui dua tahapan utama, yaitu perancangan perangkat keras dan perancangan perangkat lunak.



GAMBAR 2 (BLOK DIAGRAM SISTEM)

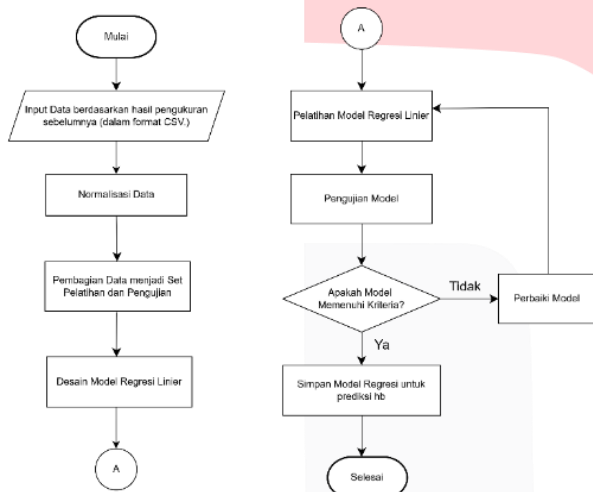
Diagram blok sistem perangkat pengukur hemoglobin non-invasif berbasis MAX30102 terdiri dari tiga komponen utama: input, proses, dan *output*. Pada tahap input, sensor MAX30102 menangkap sinyal cahaya inframerah (IR) dan merah (*Red*) dari ujung jari pengguna. Data ini kemudian diproses oleh mikrokontroler ESP32 yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem. Proses melibatkan pemrosesan sinyal dan pengiriman data ke model *machine learning* untuk memprediksi kadar hemoglobin berdasarkan nilai IR dan *Red*. Hasil prediksi dikembalikan ke ESP32 untuk validasi, kemudian ditampilkan secara *real-time* melalui layar OLED 0,96 inci. Sistem ini bersifat portabel dengan dukungan sumber daya dari baterai. Berikut merupakan *flowchart* algoritma yang menggambarkan alur kerja perangkat keras sistem pengukur hemoglobin non-invasif berbasis sensor MAX30102 dan mikrokontroler ESP32:



GAMBAR 3 (FLOWCHART PERANGKAT KERAS)

Flowchart perangkat keras menggambarkan alur kerja sistem pengukuran hemoglobin non-invasif berbasis sensor MAX30102 dan mikrokontroler ESP32. Proses dimulai dari inialisasi perangkat serta pustaka pendukung yang diperlukan untuk komunikasi antara sensor dan tampilan. Setelah inialisasi berhasil, sistem membaca sinyal cahaya merah (*Red*) dan inframerah (IR) dari jari pengguna. Apabila data terbaca dengan baik, nilai IR dan *Red* dikirim untuk diproses menggunakan algoritma *machine learning* guna memprediksi kadar hemoglobin. Hasil prediksi kemudian ditampilkan secara *real-time* melalui layar OLED dan disimpan dalam format CSV untuk keperluan dokumentasi. Setelah seluruh proses selesai, sistem kembali ke awal untuk melakukan pengukuran selanjutnya. Selain perangkat keras, sistem juga dilengkapi dengan perangkat lunak yang bertugas mengatur pemodelan dan prediksi kadar hemoglobin.

Flowchart berikut menggambarkan alur kerja perangkat lunak dalam memproses data sensor, menjalankan model *machine learning*, serta menghasilkan *output* kadar hemoglobin yang dapat ditampilkan kepada pengguna.



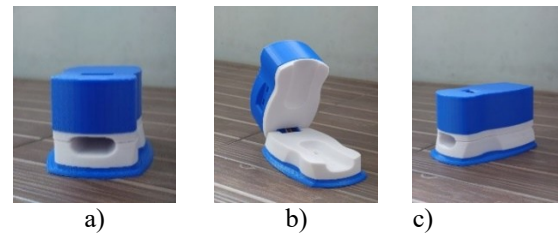
GAMBAR 4
(FLOWCHART PERANGKAT LUNAK)

Flowchart algoritma di atas menggambarkan alur kerja sistem *machine learning* untuk prediksi kadar hemoglobin secara non-invasif. Proses dimulai dengan input data IR dan *Red* dalam format CSV, yang kemudian dinormalisasi dan dibagi menjadi data pelatihan dan pengujian. Model regresi linier dilatih menggunakan data pelatihan, lalu divalidasi dengan data pengujian. Jika performa belum optimal, dilakukan tuning hingga akurasi tercapai. Model akhir disimpan dan digunakan untuk prediksi kadar hemoglobin secara *real-time*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perancangan Perangkat Sistem

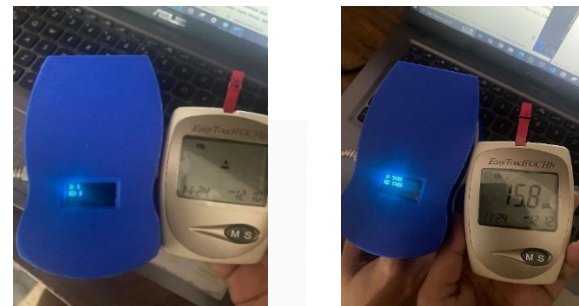
Perangkat pengukuran hemoglobin non-invasif berhasil direalisasikan sesuai rancangan menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor MAX30102. Casing dicetak dengan teknologi 3D printing berukuran $13,5 \times 9 \times 8$ cm, dirancang ringkas dan portabel. Gambar 5. Menunjukkan bentuk fisik akhir dari perangkat yang telah selesai dirakit.



GAMBAR 5
(HASIL PERANCANGAN PERANGKAT HEMOGLOBIN)

B. Pengujian Sistem *Hardware*

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa sensor MAX30102 berfungsi secara optimal dalam mendeteksi intensitas cahaya inframerah (IR) dan merah (*Red*) sebagai dasar estimasi kadar hemoglobin secara non-invasif. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu membedakan kondisi aktif dan tidak aktif dengan baik. Pada saat jari belum dimasukkan, tidak terdapat sinyal yang terdeteksi, sehingga nilai IR dan *Red* tercatat nol. Sebaliknya, ketika jari dimasukkan, sensor mencatat nilai IR dan *Red* secara konsisten. Hal ini membuktikan bahwa sensor berfungsi optimal dalam mendeteksi pantulan cahaya dari jaringan tubuh.



GAMBAR 6
(PENGUJIAN UNTUK PENGAMBILAN DATA IR, *RED*, DAN HB INVASIF)

Pada gambar 6 ditampilkan proses pengujian yang dilakukan sebanyak terdapat 30 responden ahaya IR dan *Red* dari sensor MAX30102, serta kadar hemoglobin dari alat invasif sebagai acuan validasi. Data yang diperoleh digunakan untuk proses pelatihan dan pengujian model regresi linier dalam memprediksi kadar hemoglobin secara non-invasif.

C. Pengujian Pemodelan *Machine Learning*

Pengujian ini dilakukan untuk membangun model prediksi kadar hemoglobin secara non-invasif menggunakan algoritma regresi linier berbasis *machine learning*. Model dikembangkan dengan memanfaatkan data intensitas cahaya merah (*Red*), inframerah (IR), dan rasio IR/*Red* yang diperoleh dari sensor MAX30102 pada 30 Responden, dengan nilai hemoglobin dari alat invasif sebagai target *output*. Setiap skenario pengujian menggunakan kombinasi fitur yang berbeda untuk memperoleh model dengan performa prediksi terbaik. Evaluasi kinerja model dilakukan menggunakan metrik *Mean Absolute Error (MAE)*, *Mean Squared Error (MSE)*, *Root Mean Squared Error (RMSE)*, dan koefisien korelasi (*r*).

Tabel berikut menyajikan hasil evaluasi model berdasarkan kombinasi fitur input yang digunakan:

TABEL 1 (PERBANDINGAN MODEL ALGORITMA REGRESI LINEAR)

INPUT	PENGUJIAN				
	MAE	MSE	RMSE	Tolerance	r
IR <i>Mean</i>	1.046	1.336	1.156	0.75	0.404
Red <i>Mean</i>	0.956	1.507	1.228	0.75	-0.191
IR/Red Ratio	0.952	1.481	1.217	0.75	0.336
IR <i>Mean</i> & Red <i>Mean</i>	0.939	1.325	1.151	0.75	0.643
IR <i>Mean</i> & IR/Red Ratio	1.015	1.24	1.114	0.75	0.436
RED <i>Mean</i> & IR/Red Ratio	1.014	1.241	1.114	0.75	0.438
IR <i>Mean</i> , Red <i>Mean</i> dan IR/Red Ratio	1.016	1.24	1.114	0.75	0.436

Berdasarkan hasil evaluasi, model regresi linier dengan kombinasi input IR *Mean* dan Red *Mean* menunjukkan performa prediksi terbaik dibandingkan model lainnya. Model ini menghasilkan nilai galat terendah (MAE 0,939; MSE 1,325; RMSE 1,151) dan koefisien korelasi (r) sebesar 0.643, yang mengindikasikan hubungan yang cukup kuat antara input dan *output*. Akurasi prediksi dalam toleransi kesalahan $\pm 5\%$ mencapai 75%, sesuai dengan batas akurasi minimum yang dapat diterima secara klinis untuk alat kesehatan di Indonesia.

Model-model dengan input tunggal seperti IR *Mean* atau Red *Mean*, maupun kombinasi tiga fitur, tidak menunjukkan peningkatan signifikan baik dari sisi galat maupun korelasi. Oleh karena itu, model dengan input IR *Mean* dan Red *Mean* dipilih sebagai model prediksi terbaik dengan persamaan regresi:

$$Hb = 0.19118 + 0.02011 \times IR - 0.0030 \times Red \quad (3)$$

Dari persamaan tersebut, diketahui bahwa sinyal IR berkontribusi positif terhadap estimasi kadar hemoglobin, sedangkan sinyal Red berkontribusi negatif, sesuai dengan prinsip penyerapan cahaya hemoglobin pada panjang gelombang.

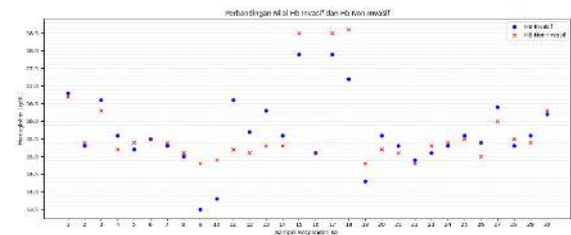
D. Pengujian Akurasi Perangkat Hemoglobin Non-Invasif dengan Invasif

Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi perangkat non-invasif dalam mengukur kadar hemoglobin, dengan membandingkannya terhadap alat ukur hemoglobin invasif standar



Gambar 7 Pengujian Perbandingan perangkat Hemoglobin Non-Invasif dengan Invasif

Pengujian dilakukan pada 30 responden yang terdiri dari tiga kategori: wanita remaja, wanita dewasa, dan pria dewasa. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kinerja perangkat non-invasif yang telah dirancang dalam memprediksi kadar hemoglobin, dengan membandingkannya terhadap hasil dari alat invasif sebagai standar acuan.



GAMBAR 8
(GRAFIK PERBANDINGAN NILAI HB INVASIF DAN NON-INVASIF)

Pada gambar 8 menyajikan perbandingan nilai kadar hemoglobin yang diperoleh dari metode invasif dan non-invasif pada 30 sampel responden. Berdasarkan hasil pengujian, sebanyak 25 dari 30 sampel (83,3%) menunjukkan hasil prediksi kadar hemoglobin yang akurat atau berada dalam rentang kesalahan yang wajar. Sementara itu, terdapat 5 sampel (16,7%) yang mengalami penyimpangan nilai $\geq 1,0$ g/dL, dan dikategorikan sebagai outlier secara klinis. Hal ini menunjukkan bahwa perangkat non-invasif telah bekerja dengan tingkat akurasi yang cukup tinggi, meskipun masih terdapat beberapa kondisi yang memerlukan evaluasi lebih lanjut untuk meningkatkan ketepatan prediksi.

Berdasarkan hasil perhitungan menunjukkan bahwa rata-rata tingkat kesalahan (*error*) dari hasil prediksi non-invasif adalah sebesar 2,66% terhadap nilai referensi invasif. Nilai tersebut masih berada dalam batas toleransi klinis sebesar $\pm 5\%$, yang menunjukkan bahwa perangkat mampu memberikan estimasi kadar hemoglobin yang cukup akurat. Selain itu, Keunggulan utama dari perangkat ini adalah sifatnya yang non-invasif, sehingga tidak memerlukan pengambilan sampel darah dan dapat digunakan secara lebih praktis, aman, dan nyaman untuk pemantauan rutin.

Dengan demikian, perangkat non-invasif yang dikembangkan dalam penelitian menunjukkan potensi untuk terus dikembangkan sebagai alat alternatif pemantauan kadar hemoglobin yang efektif, baik di lingkungan klinis maupun dalam pemantauan mandiri oleh pasien.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan perangkat pengukuran kadar hemoglobin secara non-invasif menggunakan sensor MAX30102 dan algoritma regresi linier yang berfungsi secara optimal. Pendekatan *machine learning* berbasis regresi linier mampu memetakan hubungan antara intensitas cahaya inframerah (IR) dan merah (Red) dengan kadar hemoglobin dalam darah secara efektif.

Perangkat yang dirancang dengan sensor MAX30102 dan mikrokontroler ESP32 telah diimplementasikan secara fungsional dan menunjukkan performa yang baik dalam estimasi kadar hemoglobin. Dari berbagai kombinasi fitur yang dievaluasi, model dengan input *IR Mean* dan *Red Mean* memberikan hasil terbaik dengan nilai galat MAE sebesar 0,939, MSE sebesar 1,325, RMSE sebesar 1,151, dan koefisien korelasi (r) sebesar 0,643. Akurasi prediksi dalam rentang toleransi kesalahan klinis $\pm 5\%$ mencapai 75%. Secara keseluruhan, perangkat non-invasif memiliki tingkat galat rata-rata sebesar 2,66% jika dibandingkan dengan metode invasif sebagai acuan, sehingga dapat disimpulkan bahwa perangkat ini mampu memberikan estimasi kadar hemoglobin secara praktis dan cukup akurat. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar dilakukan perbaikan dan optimasi pada model prediksi, salah satunya dengan mengeksplorasi algoritma *machine learning* lain yang berpotensi meningkatkan akurasi. Selain itu, penting untuk memperluas jumlah data pengukuran dengan menambah jumlah partisipan serta memperluas variasi rentang kadar hemoglobin yang diamati agar model yang dikembangkan memiliki kemampuan generalisasi yang lebih baik serta dapat mengurangi risiko *overfitting*, sehingga dapat meningkatkan performa perangkat dalam memprediksi kadar hemoglobin secara non-invasif.

REFERENSI

- [1] V. I. . Gunadi, Y. M. Mewo, and M. Tiho, "Gambaran kadar hemoglobin pada pekerja bangunan," *J. e-Biomedik*, vol. 4, no. 2, pp. 2–7, 2016, doi: 10.35790/ebm.4.2.2016.14604.
- [2] M. Mardiyansyah, E. Erfan, and Y. Yurman, "Skrining Anemia Pada Lansia Melalui Pemeriksaan Hemoglobin Di Wilayah Kerja Puskesmas Desa Sukasari," *J. Indones. Med. Lab. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 184–191, 2022, doi: 10.53699/joimedlabs.v3i2.120.
- [3] Sri Wulandari Rahman, U. Usman, F. Umar, and H. K. Kengky, "Faktor-faktor yang Berhubungan dengan Kejadian Anemia Pada Remaja," *J. Gizi Kerja dan Produkt.*, vol. 4, no. 2, pp. 109–118, 2023, doi: 10.52742/jgkp.v4i2.177.
- [4] 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.
- [5] S. P. H. G, P. S. Ramkumar, G. K. Prabhu, and A. N. Babu, "Methods and Devices to Determine Hemoglobin Non Invasively : A Review," *Int. J. Sci. Eng. Rechn.*, vol. 937, no. 3, pp. 934–937, 2014.
- [6] P. Purwadi, P. S. Ramadhan, and N. Safitri, "Penerapan Data Mining Untuk Mengestimasi Laju Pertumbuhan Penduduk Menggunakan Metode Regresi Linier Berganda Pada BPS Deli Serdang," *J. SAINTIKOM (Jurnal Sains Manaj. Inform. dan Komputer)*, vol. 18, no. 1, p. 55, 2019, doi: 10.53513/jis.v18i1.104.
- [7] Firdayanti *et al.*, *Dasar-Dasar Hematologi*. 2024.
- [8] 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.
- [9] I. Oshina and J. Spigulis, "Beer–Lambert law for optical tissue diagnostics: current state of the art and the main limitations," *J. Biomed. Opt.*, vol. 26, no. 10, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1117/1.jbo.26.10.100901.
- [10] M. A. Adrian, M. R. Widiarto, and R. S. Kusumadiarti, "Health Monitoring System dengan Indikator Suhu Tubuh, Detak Jantung dan Saturasi Oksigen Berbasis Internet of Things (IoT)," *J. Petik*, vol. 7, no. 2, pp. 108–118, 2021, doi: 10.31980/jpetik.v7i2.1230.
- [11] I. A. E. Zaeni, *Dasar-Dasar Elektronika*. 2021.
- [12] S. Ningsih and H. H. Dukalang, "Penerapan Metode Suksesif Interval pada Analisis Regresi Linier Berganda," *Jambura J. Math.*, vol. 1, no. 1, pp. 43–53, 2019, doi: 10.34312/jjom.v1i1.1742.
- [13] C. Dr (Cand). Aditya Wardhana, S.E., M.Si., M.M., CHRM.P., CIRP., CHRA., CPP. and M. M. Dr. Zainuddin Iba, S.E., *Analisis Regresi dan Analisis Jalur untuk Riset Bisnis Menggunakan SPSS 29.0 & SMART-PLS 4.0*, no. July. 2024. [Online]. Available: <http://www.mendeley.com/research/regresi-linier-berganda-1/>