"BEAUTYGUARD: RANCANG BANGUN SISTEM MONITORING PAPARAN ULTRAVIOLET DAN SUHU KULIT UNTUK REKOMENDASI PERAWATAN BERBASIS INTERNET OF THINGS"

Yemima Harianja[1], Astrid Sitompul[2], Valentina Simbolon[3], Igrelatercia Neguita Pinem[4], Ivolyne Simanjuntak[5], Dhea Vistara Sihite[6]
yemimaharianja06@gmail.com[1], astridsitompul@unimed.ac.id[2], valenchiasimbolon@gmail.com[3], pinemigrelatercianeguita@gmail.com[4], ivolynesimanjuntak0317@gmail.com[5], dheavistarasihite@gmail.com[6]
Universitas Negeri Medan

ABSTRAK

Peningkatan kesadaran masyarakat terhadap kesehatan dan perlindungan kulit mendorong kebutuhan akan sistem monitoring paparan Ultraviolet (UV) dan suhu kulit yang berbasis data. Paparan UV berlebih berisiko menyebabkan penuaan dini, hiperpigmentasi, hingga gangguan kulit lainnya, sementara suhu permukaan kulit dapat menjadi indikator respons fisiologis terhadap lingkungan. Praktik perlindungan kulit saat ini masih banyak bergantung pada estimasi subjektif tanpa dukungan pengukuran kuantitatif yang terintegrasi. Penelitian ini bertujuan merancang dan merealisasikan BeautyGuard, yaitu sistem monitoring paparan UV dan suhu kulit berbasis Internet of Things (IoT) yang mampu memberikan rekomendasi perlindungan kulit secara real-time melalui mekanisme berbasis aturan (rule-based system). Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali yang menerima data dari sensor ultraviolet GY-ML8511 dan sensor suhu non-kontak MLX90614, dengan hasil pengukuran dan rekomendasi ditampilkan melalui layar OLED 0,96 inci I2C. Metode penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan data ambang batas indeks UV dan suhu kulit, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pengujian akurasi sensor dan waktu respons sistem, serta analisis kesesuaian rekomendasi yang dihasilkan. Hasil pengujian awal menunjukkan sensor UV mampu mendeteksi variasi paparan pada rentang nilai 1,5–5,1 pada pengukuran pukul 09.00–17.00 WIB, dengan waktu deteksi sistem 1,1–1,4 detik dan waktu tampil rekomendasi 1,8–2,5 detik, seluruhnya berada di bawah target waktu respons maksimal 3 detik. Sistem rekomendasi berbasis aturan berhasil menghasilkan lima tingkat saran perlindungan kulit sesuai kombinasi nilai UV dan suhu terukur. Prototipe BeautyGuard yang bersifat portabel, mandiri (standalone embedded system), dan aplikatif ini berpotensi menjadi alat bantu praktis di bidang tata rias dan perawatan kecantikan dalam menentukan tindakan perlindungan kulit berdasarkan kondisi paparan lingkungan secara objektif.

Kata Kunci: Internet Of Things, Paparan Ultraviolet, Suhu Kulit, Sistem Rekomendasi, Monitoring Real-Time..

ABSTRACT

Growing public awareness of skin health and protection has increased the need for a data-driven monitoring system for Ultraviolet (UV) exposure and skin temperature. Excessive UV exposure risks premature aging, hyperpigmentation, and other skin disorders, while skin surface temperature can indicate physiological responses to the environment. Current skin-protection practices still largely rely on subjective estimation without integrated quantitative measurement. This study aims to design and realize BeautyGuard, an IoT-based monitoring system for UV exposure and skin temperature capable of providing real-time skin-protection recommendations through a rule-based mechanism. The system uses an ESP32 microcontroller as the control center, receiving data from a GY-ML8511 ultraviolet sensor and an MLX90614 non-contact temperature sensor, with measurement results and recommendations displayed on a 0.96-inch I2C OLED screen. The research method includes a literature review, collection of UV index and skin temperature threshold data, hardware and

software design, sensor accuracy and system response-time testing, and analysis of the resulting recommendation's suitability. Preliminary test results show the UV sensor detected exposure variation in the range of 1.5–5.1 during measurements from 09:00 to 17:00 WIB, with a system detection time of 1.1–1.4 seconds and a recommendation display time of 1.8–2.5 seconds, both within the maximum 3-second response-time target. The rule-based recommendation system successfully produced five levels of skin-protection advice based on combinations of measured UV and temperature values. The resulting BeautyGuard prototype — portable, self-contained (a standalone embedded system), and applicable — has potential as a practical tool in the cosmetology and beauty-care field for determining skin-protection actions based on objectively measured environmental exposure conditions.
***Keywords**: Internet Of Things, Ultraviolet Exposure, Skin Temperature, Recommendation System, Real-Time Monitoring.*

PENDAHULUAN

Perkembangan industri kecantikan dan perawatan kulit menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Kesadaran masyarakat terhadap kesehatan dan perlindungan kulit, khususnya dari paparan sinar Ultraviolet (UV), mendorong kebutuhan akan sistem monitoring kondisi kulit yang lebih presisi dan berbasis data. Paparan sinar UV yang berlebihan dapat menyebabkan iritasi, penuaan dini, hiperpigmentasi, hingga peningkatan risiko kanker kulit. Suhu permukaan kulit juga menjadi indikator penting dalam mendeteksi inflamasi serta respons fisiologis terhadap paparan lingkungan, sebagaimana dilaporkan dalam penelitian mengenai sensor wearable non-invasif untuk monitoring kesehatan kulit (Mao et al., 2023).

Praktik perlindungan kulit sehari-hari masih banyak bergantung pada estimasi subjektif, seperti perkiraan intensitas cahaya matahari atau sensasi panas pada kulit. Pendekatan tersebut sering kali tidak akurat karena tidak didukung oleh data kuantitatif mengenai tingkat paparan UV maupun perubahan suhu kulit secara langsung. Studi mengenai perangkat monitoring UV wearable menunjukkan bahwa pengukuran berbasis sensor mampu memberikan informasi paparan yang lebih objektif dibandingkan persepsi pengguna (Deng et al., 2023). Kondisi ini menunjukkan pentingnya sistem monitoring berbasis teknologi untuk meningkatkan efektivitas perlindungan kulit.

Perkembangan Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) membuka peluang penerapan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Teknologi IoT memungkinkan integrasi sensor, mikrokontroler, dan sistem komunikasi berbasis Internet Protocol untuk melakukan pemantauan parameter secara real-time. Integrasi IoT dengan sistem wearable monitoring kesehatan telah terbukti meningkatkan akurasi pengukuran serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data, terutama ketika dikombinasikan dengan pendekatan kecerdasan buatan (Subhan et al., 2023).

Pengembangan sensor Ultraviolet dan sensor suhu non-kontak telah banyak digunakan dalam penelitian untuk mendeteksi paparan lingkungan dan perubahan fisiologis pada kulit secara kontinu. Studi mengenai teknologi e-skin dan sensor fleksibel epidermal menunjukkan bahwa sensor suhu dapat diintegrasikan secara ergonomis untuk pemantauan kulit jangka panjang (Sun et al., 2024), sementara kemajuan pada teknologi sensor wearable turut memperluas potensi implementasi sistem monitoring personal yang lebih adaptif dan responsif (Liu et al., 2024). Integrasi sensor dengan sistem rekomendasi berbasis aturan memungkinkan perangkat tidak hanya melakukan monitoring, tetapi juga memberikan saran tindakan secara otomatis sesuai kondisi yang terdeteksi (Belabbaci et al., 2025), dan pendekatan sejenis pada sistem IoT terintegrasi untuk monitoring paparan UV dan parameter lingkungan terbukti efektif mendukung perlindungan preventif berbasis

data (Khan et al., 2024).

Perangkat analisis kulit yang tersedia di pasaran umumnya masih berfokus pada parameter tertentu dan memiliki harga relatif tinggi, sehingga belum sepenuhnya terjangkau untuk penggunaan personal sehari-hari. Sistem monitoring paparan UV yang ada juga belum sepenuhnya mengintegrasikan parameter suhu kulit dan fitur rekomendasi berbasis IoT dalam satu platform yang sederhana dan aplikatif (Ramani et al., 2022). Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan BeautyGuard sebagai sistem monitoring paparan Ultraviolet dan suhu kulit berbasis IoT dengan fitur rekomendasi perawatan secara real-time. Sistem dirancang dengan mengintegrasikan sensor UV, sensor suhu non-kontak, modul komunikasi IoT, serta antarmuka tampilan dalam satu kesatuan sistem yang terstruktur.

Rumusan masalah penelitian ini meliputi: (1) bagaimana menghasilkan sistem monitoring paparan UV dan suhu kulit yang mampu memberikan data objektif dan terukur sebagai dasar pengambilan keputusan perlindungan kulit; (2) bagaimana membangun sistem terintegrasi berbasis IoT yang mampu melakukan akuisisi, pemrosesan, dan interpretasi data sensor secara real-time dalam satu perangkat portabel; serta (3) bagaimana merancang model rekomendasi berbasis parameter paparan UV dan suhu kulit yang adaptif terhadap kondisi pengguna.

Kebaruan (novelty) penelitian BeautyGuard terletak pada tiga aspek, yaitu: (1) integrasi simultan pengukuran paparan UV dan suhu permukaan kulit dalam satu sistem monitoring berbasis IoT, sehingga mampu merepresentasikan kondisi paparan lingkungan dan respons fisiologis kulit secara bersamaan; (2) penerapan sistem rekomendasi berbasis aturan (rule-based system) yang memanfaatkan ambang batas parameter UV dan suhu untuk menghasilkan keputusan perlindungan kulit secara otomatis dan real-time; serta (3) pengembangan perangkat monitoring yang bersifat mandiri (standalone embedded system), di mana proses akuisisi data, pemrosesan, dan pemberian rekomendasi dilakukan langsung pada perangkat tanpa ketergantungan pada infrastruktur eksternal.

Tabel 1. Ringkasan Penelitian Terdahulu yang Relevan

No	Judul / Peneliti	Metode	Hasil
1	A Review of Skin-Wearable Sensors for Non-Invasive Health Monitoring — Mao et al. (2023)	Review perkembangan sensor wearable untuk monitoring parameter kulit	Sensor wearable efektif untuk monitoring suhu dan parameter fisiologis kulit secara non-invasif
2	Smart Wearable Systems for Health Monitoring — Deng et al. (2023)	Review sistem wearable pintar untuk monitoring kesehatan	Sistem wearable pintar mendukung pemantauan kondisi kesehatan secara berkelanjutan dan real-time
3	AI-Enabled Wearable Medical Internet of Things in Healthcare System: A Survey — Subhan et al. (2023)	Survei integrasi AI dan IoT medis pada sistem layanan kesehatan	Integrasi AI pada IoT medis wearable meningkatkan akurasi dan efisiensi layanan kesehatan
4	E-Skin and Its Advanced Applications in Ubiquitous Health Monitoring — Sun et al. (2024)	Pengembangan sensor fleksibel (e-skin) untuk aplikasi kesehatan	Sensor suhu epidermal fleksibel memungkinkan monitoring jangka panjang yang nyaman
5	Recent Advances in Flexible Temperature Sensors: Materials, Mechanism, Fabrication, and Applications — Liu et al. (2024)	Tinjauan material, mekanisme, dan fabrikasi sensor suhu fleksibel	Kemajuan material dan fabrikasi meningkatkan sensitivitas sensor suhu fleksibel pada kulit

Sumber: hasil kajian pustaka peneliti (2026).

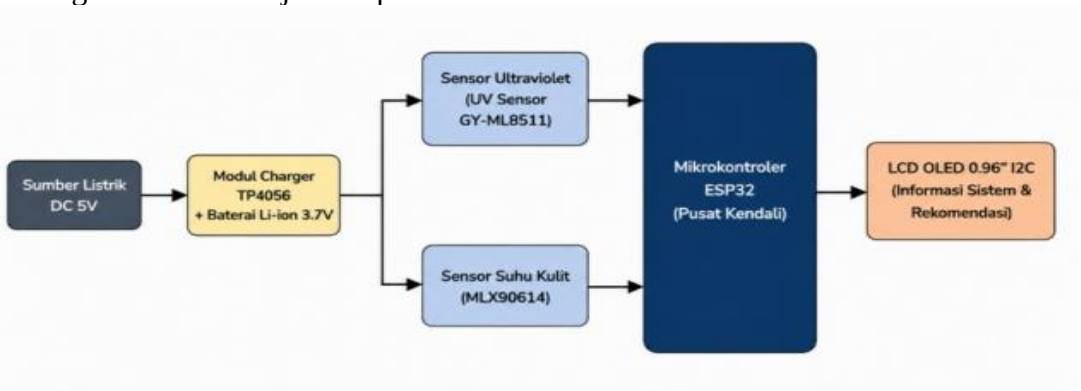
METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Universitas Negeri Medan, Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kecamatan Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. Bahan yang digunakan meliputi rangka/casing BeautyGuard, baterai Li-ion 3,7V, kabel jumper, dan PCB/protoboard. Alat yang digunakan terdiri atas mikrokontroler ESP32, sensor UV GY-ML8511, sensor suhu non-kontak MLX90614, modul tampilan OLED/LCD I2C, modul charger TP4056, boost converter (bila diperlukan), laptop, dan multimeter. Perancangan mekanik dan elektronik dilakukan menggunakan perangkat lunak SolidWorks dan Arduino IDE.

HASIL DAN PEMBAHASAN

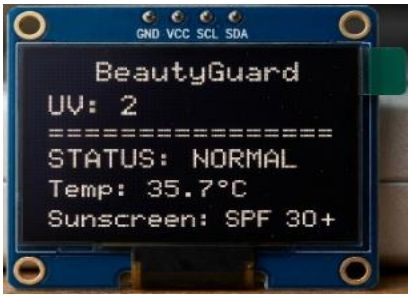
Realisasi Perangkat Keras BeautyGuard

Perancangan sistem BeautyGuard mengacu pada konsep perangkat monitoring paparan Ultraviolet (UV) dan suhu kulit secara real-time. Sistem menggunakan ESP32 sebagai pusat kendali yang menerima data dari sensor UV dan sensor suhu non-kontak MLX90614; data hasil pembacaan kemudian diproses menggunakan mekanisme berbasis aturan (rule-based system) untuk menentukan kondisi paparan. Diagram blok hasil perancangan sistem ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 1. Diagram Blok Hasil Perancangan Sistem BeautyGuard

Prototipe BeautyGuard telah berhasil direalisasikan dalam bentuk perangkat monitoring paparan UV dan suhu menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali, sensor ultraviolet GY-ML8511 untuk mendeteksi tingkat paparan UV, serta sensor suhu non-kontak MLX90614 untuk mengukur suhu permukaan kulit. Hasil pembacaan kedua sensor diproses oleh ESP32 dan ditampilkan secara langsung melalui OLED 0,96 inci I2C, sehingga pengguna dapat mengetahui nilai UV, status paparan, dan suhu kulit pada perangkat. Sistem juga dilengkapi modul catu daya dan baterai sebagai sumber energi, dengan seluruh komponen ditempatkan pada sebuah box pelindung untuk menjaga kerapian dan kestabilan rangkaian selama pengujian. Tampilan hasil pengukuran pada layar OLED perangkat ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 2. Tampilan OLED BeautyGuard Menunjukkan Status Paparan

Data Hasil Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja perangkat dalam membaca parameter UV dan suhu serta kemampuan sistem dalam memberikan rekomendasi, mengikuti dua skema pengujian yang telah dirancang pada proposal.

1) Pengujian Akurasi Sensor UV. Pengujian dilakukan dengan mengamati pembacaan sensor UV pada BeautyGuard pada pukul 09.00, 11.00, 13.00, 15.00, dan 17.00 WIB. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Pengujian Sensor UV pada BeautyGuard

No	Waktu Pengujian	Nilai UV	Kategori UV	Kondisi Cuaca
1	09.00 WIB	2	Rendah	Cerah
2	11.00 WIB	3,2	Sedang	Cerah
3	13.00 WIB	5,1	Sedang	Cerah
4	15.00 WIB	3,7	Sedang	Cerah Berawan
5	17.00 WIB	1,5	Rendah	Berawan

Sumber: data pengujian lapangan (2026)

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, nilai pembacaan sensor UV menunjukkan adanya perubahan tingkat paparan pada waktu yang berbeda, dengan nilai terendah 1,5 pada pukul 17.00 WIB dan nilai tertinggi 5,1 pada pukul 13.00 WIB. Nilai UV cenderung meningkat menuju siang hari dan kembali menurun pada sore hari, menunjukkan bahwa sensor UV pada BeautyGuard mampu mendeteksi perubahan tingkat paparan Ultraviolet secara konsisten dengan pola alami intensitas matahari harian

2) Pengujian Respons Sistem. Pengujian respons dilakukan dengan memberikan empat kondisi paparan UV (rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi) dan mengamati waktu yang dibutuhkan sistem untuk mendeteksi kondisi serta menampilkan hasil pengukuran. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Pengujian Respons Sistem BeautyGuard

No	Kondisi UV & Suhu	Waktu Deteksi (detik)	Waktu Tampil Rekomendasi (detik)	Status
1	UV Rendah	1,1	1,8	Berhasil
2	UV Sedang	1,2	2,0	Berhasil
3	UV Tinggi	1,3	2,2	Berhasil
4	UV Sangat Tinggi	1,4	2,5	Berhasil

Sumber: data pengujian lapangan (2026)

Berdasarkan Tabel 3, waktu deteksi sistem berada pada rentang 1,1–1,4 detik, sedangkan waktu hingga rekomendasi ditampilkan berada pada rentang 1,8–2,5 detik, dengan seluruh kondisi pengujian (4 dari 4) berstatus berhasil. Nilai waktu tampil tersebut berada di bawah target waktu respons maksimal 3 detik pada Tabel 2, sehingga target respons sistem tercapai, dan tingkat keberhasilan pengujian sebesar 100% turut memenuhi target ketepatan rekomendasi ≥ 95%.

3) Hasil Rekomendasi Berbasis Rule-Based System. Sistem rekomendasi bekerja dengan mengolah nilai indeks UV dan suhu permukaan kulit yang diperoleh dari sensor, kemudian membandingkannya dengan aturan yang telah ditentukan sehingga sistem dapat memberikan rekomendasi perlindungan kulit secara otomatis. Aturan rekomendasi yang diterapkan pada BeautyGuard ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 4. Rule-Based System Rekomendasi Perlindungan Kulit

No	Nilai UV	Kategori	Suhu	Rekomendasi Sistem
1	0–2	Rendah	< 30°C	Perlindungan dasar, sunscreen SPF 30 dianjurkan
2	3–5	Sedang	30–34°C	Gunakan sunscreen SPF 30–50 dan lakukan re-aplikasi
3	6–7	Tinggi	30–35°C	Gunakan sunscreen SPF 50 dan kurangi paparan langsung
4	8–10	Sangat Tinggi	30–36°C	Gunakan sunscreen SPF 50+, gunakan pelindung tambahan dan hindari paparan langsung
5	> 10	Ekstrem	> 36°C	Gunakan sunscreen SPF 50+, segera kurangi paparan dan cari tempat teduh

Sumber: rancangan rule-based system peneliti (2026)

Adapun untuk indikator keandalan sistem monitoring pada penggunaan berkelanjutan dan stabilitas operasional jangka panjang, hasil kuantitatif belum dapat dilaporkan pada tahap ini karena pengujian ketahanan perangkat pada durasi pemakaian yang lebih panjang dan variasi kondisi lingkungan masih dalam proses pelaksanaan.

Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem BeautyGuard mampu menjalankan fungsi utama sebagai perangkat monitoring paparan UV dan suhu. Sensor digunakan sebagai sumber data masukan yang kemudian diproses oleh ESP32 untuk menghasilkan informasi kondisi paparan, dan hasil pengolahan ditampilkan melalui OLED sehingga pengguna dapat mengetahui kondisi lingkungan secara langsung. Pola nilai UV yang lebih tinggi pada sekitar tengah hari (Tabel 3) menunjukkan bahwa sensor dapat mendeteksi perubahan paparan UV sesuai kondisi pengukuran aktual, informasi yang relevan sebagai pertimbangan kebutuhan perlindungan kulit sebelum beraktivitas di luar ruangan.

Waktu deteksi dan waktu tampil rekomendasi yang singkat (Tabel 4) menunjukkan bahwa ESP32 mampu menerima pembacaan sensor, memproses data, dan menampilkan informasi pada OLED secara cepat — sebuah aspek penting bagi kepraktisan BeautyGuard sebagai alat bantu perawatan kulit, karena pengguna dapat memperoleh informasi kondisi UV sebelum maupun selama beraktivitas di luar ruangan. Adapun sistem rekomendasi berbasis aturan (Tabel 5) menunjukkan bahwa perubahan nilai UV dan suhu lingkungan menghasilkan lima tingkat rekomendasi perlindungan yang berjenjang, dari penggunaan sunscreen SPF 30 pada kondisi UV rendah hingga anjuran segera berteduh pada kondisi ekstrem. Dengan pendekatan tersebut, BeautyGuard tidak hanya menampilkan data pengukuran, tetapi juga mengubahnya menjadi informasi yang mudah dipahami dan dapat mendukung pengambilan keputusan perawatan kulit.

Temuan ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa sensor wearable dan sistem IoT mampu memberikan pengukuran paparan UV dan parameter fisiologis kulit yang lebih objektif dibandingkan estimasi subjektif (Deng et al., 2023; Khan et al., 2024), serta bahwa integrasi kecerdasan buatan dengan sistem IoT dapat meningkatkan akurasi interpretasi data sensor (Subhan et al., 2023). Pemilihan pendekatan rule-based system pada BeautyGuard konsisten dengan kebutuhan akan solusi monitoring yang ringan secara komputasi, portabel, dan mandiri (standalone embedded system), sebagaimana diidentifikasi sebagai celah penelitian oleh Ramani et al. (2022) terkait keterbatasan platform monitoring UV yang tersedia di pasaran. Dalam konteks penerapannya, sistem ini berpotensi menjadi alat bantu bagi pengguna maupun praktisi tata rias dan kecantikan untuk mempertimbangkan kondisi paparan UV sebelum menentukan

tindakan perlindungan kulit, terutama penggunaan sunscreen dan pengaturan durasi paparan langsung.

Penelitian ini masih memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu menjadi perhatian pada tahap lanjutan, yaitu: (1) jumlah titik pengujian akurasi sensor UV masih terbatas pada lima waktu pengukuran dalam satu hari, sehingga data belum sepenuhnya merepresentasikan variasi cuaca dan musim; (2) pengujian akurasi sensor UV dan suhu belum dibandingkan secara kuantitatif terhadap alat ukur referensi standar (misalnya UV meter kalibrasi laboratorium), sehingga nilai persentase error terhadap target akurasi ≤ 5% belum dapat dilaporkan secara pasti; serta (3) pengujian keandalan sistem pada penggunaan berkelanjutan dan stabilitas operasional jangka panjang masih perlu dilakukan pada tahap penelitian selanjutnya.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah merancang dan merealisasikan BeautyGuard, sebuah sistem monitoring paparan Ultraviolet dan suhu kulit berbasis IoT yang mengintegrasikan sensor UV GY-ML8511, sensor suhu non-kontak MLX90614, mikrokontroler ESP32, serta sistem rekomendasi berbasis aturan (rule-based system) yang ditampilkan melalui layar OLED. Hasil pengujian awal menunjukkan sensor UV mampu mendeteksi variasi paparan pada rentang 1,5–5,1 selama pengukuran pukul 09.00–17.00 WIB, dengan waktu deteksi sistem 1,1–1,4 detik dan waktu tampil rekomendasi 1,8–2,5 detik — seluruhnya memenuhi target waktu respons ≤ 3 detik — serta tingkat keberhasilan pengujian 100% pada seluruh kondisi (memenuhi target ketepatan rekomendasi ≥ 95%). Sistem rekomendasi berbasis aturan berhasil menghasilkan lima tingkat saran perlindungan kulit sesuai kombinasi nilai UV dan suhu terukur. Adapun akurasi sensor terhadap alat referensi standar serta keandalan dan stabilitas sistem pada penggunaan jangka panjang masih memerlukan pengujian lebih lanjut. Dengan karakteristik yang portabel, mandiri, dan aplikatif, prototipe BeautyGuard berpotensi menjadi alat bantu praktis di bidang tata rias dan perawatan kecantikan dalam mendukung keputusan perlindungan kulit berbasis data. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan kalibrasi sensor terhadap alat ukur referensi standar, memperbanyak titik pengujian pada berbagai kondisi cuaca dan musim, serta menguji keandalan dan stabilitas sistem pada periode operasional yang lebih panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Negeri Medan melalui skema Penelitian Student Grant Tahun Anggaran 2026 atas dukungan pendanaan penelitian ini, serta kepada Ibu Astrid Sitompul, M.Pd. selaku dosen pembimbing atas arahan dan bimbingan selama pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

N. A. Belabbaci, R. Anaadumba, and M. A. U. Alam, “Recent advancements in wearable hydration-monitoring technologies: Scoping review of sensors, trends, and future directions,” JMIR mHealth and uHealth, vol. 13, Art. no. e60569, 2025, doi: 10.2196/60569.

Z. Deng, L. Guo, X. Chen, and W. Wu, “Smart wearable systems for health monitoring,” Sensors, vol. 23, no. 5, Art. no. 2479, 2023, doi: 10.3390/s23052479.

Y. Khan, A. Todorov, R. Torah, S. Beeby, and M. R. Ardern-Jones, “Skin sensing and wearable technology as tools to measure atopic dermatitis severity,” Skin Health and Disease, vol. 4, no. 5, Art. no. e449, 2024, doi: 10.1002/ski2.449.

L. Liu, Y. Dou, J. Wang, Y. Zhao, W. Kong, C. Ma, D. He, H. Wang, H. Zhang, A. Chang, and P. Zhao, “Recent advances in flexible temperature sensors: Materials, mechanism, fabrication, and applications,” Advanced Science, vol. 11, Art. no. 2405003, 2024, doi:

10.1002/advs.202405003.
P. Mao, H. Li, and Z. Yu, “A review of skin-wearable sensors for non-invasive health monitoring applications,” Sensors, vol. 23, no. 7, Art. no. 3673, 2023, doi: 10.3390/s23073673.
P. Ramani, S. Kumar, and J. Lee, “IoT-integrated wearable skin sensors for UV and environmental monitoring,” IEEE Access, vol. 10, pp. 88214–88226, 2022.
F. Subhan, A. Mirza, M. Bin Mohd Su’ud, M. M. Alam, S. Nisar, U. Habib, and M. Z. Iqbal, “AI-enabled wearable medical Internet of Things in healthcare system: A survey,” Applied Sciences, vol. 13, no. 3, Art. no. 1394, 2023, doi: 10.3390/app13031394.
X. Sun, X. Guo, J. Gao, J. Wu, F. Huang, J.-H. Zhang, F. Huang, X. Lu, Y. Shi, and L. Pan, “E-skin and its advanced applications in ubiquitous health monitoring,” Biomedicines, vol. 12, no. 10, Art. no. 2307, 2024, doi: 10.3390/biomedicines12102307.
X. Tang, T. Yang, D. Yu, H. Xiong, and S. Zhang, “Current insights and future perspectives of ultraviolet radiation (UV) exposure: Friends and foes to the skin and beyond the skin,” Environment International, vol. 185, Art. no. 108535, 2024, doi: 10.1016/j.envint.2024.108535.
K. A. McDonald, Y. Lytvyn, A. Mufti, A.-W. Chan, and C. F. Rosen, “Review on photoprotection: A clinician's guide to the ingredients, characteristics, adverse effects, and disease-specific benefits of chemical and physical sunscreen compounds,” Archives of Dermatological Research, vol. 315, no. 4, pp. 735–749, 2023, doi: 10.1007/s00403-022-02483-4.
J. Aguilera, T. Gracia-Cazaña, and Y. Gilaberte, “New developments in sunscreens,” Photochemical & Photobiological Sciences, vol. 22, pp. 2473–2482, 2023, doi: 10.1007/s43630-023-00453-x.
X. Huang and A. N. Chalmers, “Review of wearable and portable sensors for monitoring personal solar UV exposure,” Annals of Biomedical Engineering, vol. 49, no. 3, pp. 964–978, 2021, doi: 10.1007/s10439-020-02710-x.
E. S. Nagelhout, R. Lensink, A. Zhu, B. G. Parsons, J. D. Jensen, and Y. P. Wu, “The feasibility and acceptability of using a wearable UV radiation exposure monitoring device in adults and children: Cross-sectional questionnaire study,” JMIR Dermatology, vol. 3, no. 1, Art. no. e15711, 2020, doi: 10.2196/15711.
R. Zou, R. Ramanathan, and V. Bansal, “Recent advances and a roadmap to wearable UV sensor technologies,” Advanced Materials Technologies, 2020, doi: 10.1002/admt.201901036.
K. J. Gromkowska-Kępka, A. Puścion-Jakubik, R. Markiewicz-Żukowska, and K. Socha, “The impact of ultraviolet radiation on skin photoaging—Review of in vitro studies,” Journal of Cosmetic Dermatology, vol. 20, no. 11, pp. 3427–3431, 2021, doi: 10.1111/jocd.14033.
T. Passeron, H. W. Lim, C.-L. Goh, H. Y. Kang, F. Ly, A. Morita, J. Ocampo Candiani, S. Puig, S. Schalka, L. Wei, B. Dréno, and J. Krutmann, “Photoprotection according to skin phototype and dermatoses: Practical recommendations from an expert panel,” Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology, vol. 35, no. 7, pp. 1460–1469, 2021, doi: 10.1111/jdv.17242.