Jurnal Kesehatan, Vol. 15 No. 1 (2026), 35-47
DOI : https://doi.org/10.37048/kesehatan.v15i1.758
Website : https://jurnal.uym.ac.id/index.php/kesehatan
ISSN 2086-9266 e-ISSN 2654-587x

PERAN BIOMARKER DIGITAL DAN SINYAL FISIOLOGIS DALAM PEMANTAUAN KESEHATAN MENTAL GENERASI MUDA: *LITERATURE REVIEW*

Yumna Nabila[1*], Mira Wahyu Kusumawati[2], Zainal Arifin[3], Muhammad Lazuardi Pradivta Komara[4], Afin Muhammad Nurtsani[5]
[1,3,4]Program Studi Teknologi Rekayasa Elekro-Medis, Politeknik Negeri Indramayu
[2]Program Studi Keperawatan, Politeknik Negeri Indramayu
[5]Program Studi Teknik Biomedis, Universitas Telkom
*Korespondensi : yumnanabila@polindra.ac.id

ABSTRAK
Latar Belakang: Masalah kesehatan mental di kalangan remaja meningkat di seluruh dunia, sementara metode penilaian tradisional terbatas dalam menangkap perubahan psikologis secara real-time dan objektif. Biomarker digital dan sinyal fisiologis dari perangkat wearable dan smartphone menghadirkan alternatif yang menjanjikan untuk pemantauan kesehatan mental secara berkelanjutan. **Tujuan:** Mengidentifikasi peran biomarker digital dan sinyal fisiologis dalam memantau kesehatan mental di kalangan remaja. **Metode:** Tinjauan literatur sistematis dilakukan dengan mensitesis artikel-artikel yang diperoleh dari *Scopus, PubMed, ScienceDirect,* dan *Google Scholar,* dengan fokus pada studi yang diterbitkan antara tahun 2020 dan 2026. Kriteria inklusi, berdasarkan kerangka kerja PICOS, populasi remaja, variabilitas detak jantung (HRV) dan aktivitas elektrodermal (EDA), dan kesehatan mental: depresi, kecemasan, dan stres. Dua puluh studi memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis menggunakan pendekatan sintesis naratif. **Hasil:** Temuan menunjukkan bahwa variabilitas detak jantung (HRV) adalah biomarker fisiologis yang paling banyak digunakan dan sangat terkait dengan hasil kesehatan mental yaitu depresi, kecemasan, dan stres. Pendekatan multimodal yang mengintegrasikan sinyal fisiologis, data perilaku, dan fenotipe digital mencapai akurasi prediksi yang lebih tinggi daripada model modalitas tunggal. AI dan metode machine learing lebih lanjut meningkatkan deteksi dan klasifikasi kondisi kesehatan mental. **Kesimpulan:** Biomarker digital dan sinyal fisiologis mewakili pendekatan yang menjanjikan dan inovatif untuk pemantauan kesehatan mental pada remaja. Integrasi teknologi yang dapat dikenakan dan analitik berbasis kecerdasan buatan memungkinkan penilaian yang berkelanjutan dan objektif, mendukung deteksi dan intervensi dini. Penelitian selanjutnya dapat berfokus pada pengintegrasian faktor biopsikososial, meningkatkan ketelitian metodologis, dan sistem pelayanan kesehatan mental.
Kata kunci: Biomarker digital, generasi muda, heart rate, kesehatan mental, sinyal fisiologis

ABSTRACT
Background: Mental health issues among adolescents are increasing worldwide, while traditional assessment methods are limited in capturing psychological changes in real-time and objectively. Digital biomarkers and physiological signals from wearable devices and smartphones present a promising alternative for continuous mental health monitoring. Objective: To identify the role of digital biomarkers and physiological signals in monitoring mental health among adolescents. Methods: A systematic literature review was conducted according to the PRISMA guidelines. Articles were retrieved from Scopus, PubMed, ScienceDirect, and Google Scholar, focusing on studies published between 2020 and 2026. Inclusion criteria, based on the PICOS framework, included adolescent population, heart rate variability (HRV) and electrodermal activity (EDA), and mental health: depression, anxiety, and stress. Twenty studies met the inclusion criteria and were analyzed using a narrative synthesis approach. Results: Findings indicate that heart rate variability (HRV) is the most widely used physiological biomarker and is strongly associated with mental health outcomes, namely depression, anxiety, and stress. A multimodal approach

• **Corresponding Author | Received : 17th April 2026; Revised : 23th April 2026; Accept : 5th June 2026**

integrating physiological signals, behavioral data, and digital phenotypes achieved higher predictive accuracy than single-modality models. AI and machine learning methods further improve the detection and classification of mental health conditions. Conclusion: Digital biomarkers and physiological signals offer a promising, innovative approach to mental health monitoring in adolescents. The integration of wearable technology and AI-based analytics enables continuous and objective assessment, supporting early detection and intervention. Future research can focus on integrating biopsychosocial factors, improving methodological rigor, and improving mental health service delivery systems.
Key word: Digital biomarkers, heart rate, mental health, physiological signals, youth

PENDAHULUAN

Kesehatan mental di kalangan anak muda telah muncul sebagai masalah kesehatan masyarakat global yang signifikan, terutama di tengah perubahan teknologi dan sosial yang pesat (Nasution et al., 2025; Stewart et al., 2021). Satu dari tujuh remaja mengalami gangguan kesehatan mental, dengan depresi dan kecemasan (Dombou et al., 2023). Masa remaja dan dewasa muda merupakan periode perkembangan kritis karena gangguan kesehatan mental pertama kali muncul. Gangguan mental 75% dimulai sebelum usia 25 tahun sehingga penting untuk dilakukan deteksi dini (Solmi et al., 2022). Beban masalah kesehatan mental berdasarkan data nasional menunjukkan proporsi yang cukup besar terutama gangguan mental emosional (Kementrian Kesehatan RI, 2024). Masalah-masalah ini semakin diperberat dengan tekanan akademis, paparan digital, dan stresor psikososial yang lazim di kalangan Generasi Z. Akibatnya, ada kebutuhan mendesak akan pendekatan inovatif dan terukur untuk deteksi dan pemantauan dini.

Metode penilaian kesehatan mental tradisional, termasuk kuesioner laporan diri dan wawancara klinis, tetap lazim tetapi memiliki beberapa keterbatasan. Remaja sering kali tidak melaporkan masalah kesehatan mental karena stigma dan literasi kesehatan mental terbatas (Yani et al., 2025). Penilaian kesehatan mental dengan kuesioner biasa dilakukan dalam sekali waktu sehingga membatasi kemampuan untuk menangkap fluktuasi temporal dalam kesehatan mental. Kesehatan mental memiliki sifat yaang fluktiatif sehingga membutuhkan pemantauan berkelanjutan untuk meningkatkan deteksi dini. Kemajuan terbaru dalam teknologi kesehatan digital memberikan alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan ini. Pengintegrasian data fisiologis ke dalam pemantauan kesehatan mental telah menarik minat yang semakin besar. Biomarker digital dan sinyal fisiologis dapat digunakan sebagai indikator objektif yang dapat melengkapi penilaian kesehatan mental tradisional. Biomarker digital adalah data fisiologis dan perilaku yang dapat diukur yang dikumpulkan melalui perangkat seperti ponsel pintar dan sensor yang dapat dikenakan (Alonso et al., 2024). Sinyal fisiologis umum meliputi variabilitas detak jantung (HRV), aktivitas elektrodermal (EDA), pola tidur, dan aktivitas fisik. Pengukuran ini terkait erat dengan respons stres, regulasi emosi, dan fungsi sistem saraf otonom (Castaldo et al., 2020). Data fisiologis dari perangkat wearable dapat memprediksi gejala depresi dan kecemasan dengan akurasi yang dapat diterima (Ahmed et al., 2023; Bergwerff et al., 2026). Pemantauan secara berkelanjutan memungkinkan deteksi perubahan psikologis secara real-time di lingkungan sehari-hari. Pendekatan ini sangat relevan bagi Generasi Z yang mengikuti perkembangan teknologi digital dalam kehidupan sehari-hari.

Kemajuan dalam kecerdasan buatan dan fenotipe digital telah memperluas potensi untuk mengintegrasikan sinyal fisiologis ke dalam pemantauan kesehatan mental. Fenotipe digital memfasilitasi pengumpulan dan analisis data perilaku dan fisiologis secara berkelanjutan melalui smartphone dan perangkat wearable (Krones et al., 2025; Prakash et al., 2021). Teknik machine learning dapat mengidentifikasi pola kompleks dalam data

multimodal (Wu et al., 2020), mendukung prediksi hasil kesehatan mental yang lebih akurat (Garriga et al., 2022). Hasil studi saat ini menekankan sinyal fisiologis dan tidak cukup memasukkan faktor psikososial. Interaksi antara determinan biologis, psikologis, dan sosial membentuk kesehatan mental tanpa mengintegrasikan interpretasi data fisiologis tetap terbatas. Pendekatan komprehensif dan integratif diperlukan untuk mencapai pemahaman holistik tentang kesehatan mental remaja. Penggunaan biomarker digital masih terdapat kekurangan sehingga perlu untuk sintesis komprehensif tentang peran mereka dalam pemantauan kesehatan mental remaja. Hasil penelitian yang sebelumnya memisahkan antara hasil pemeriksaan biomarker dan psikososial. Tinjauan literatur diperlukan untuk mensintesis bukti terkini, mengidentifikasi kesenjangan penelitian, dan menginformasikan arah penelitian di masa mendatang (Georgiou et al., 2026). Sintesis ini penting untuk mendukung pengembangan sistem pemantauan kesehatan mental berbasis teknologi yang terintegrasi. Sinyal fisiologis yang dihubungkan dengan hasil kesehatan mental dapat menjadi pendekatan kesehatan mental sebagai upaya peningkatan deteksi dini dan intervensi pada generasi muda.

METODE

Pendekatan yang digunakan yaitu literature review dengan menggunakan metodologi sistematis untuk mensintesis bukti terkini tentang peran biomarker digital dan sinyal fisiologis dalam memantau kesehatan mental di kalangan populasi remaja hingga dewasa muda. Tujuan utama adalah untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis studi empiris yang meneliti penggunaan data fisiologis dan teknologi digital dalam menilai hasil kesehatan mental di kalangan remaja dan dewasa muda. Pencarian literatur komprehensif dilakukan di berbagai basis data elektronik, termasuk Scopus, PubMed, ScienceDirect, dan Google Scholar. Penulis menggunakan kata kunci sebagai berikut: *digital biomarker, physiological signal, heart rate variability* (HRV), electrodermal activity (EDA) *wearable sensor, mental health, depression, anxiety, stress, youth, adolescent OR young adult.* Pencarian dibatasi pada artikel yang diterbitkan antara tahun 2020 dan 2026 untuk memastikan inklusi studi terbaru dan relevan yang mencerminkan kemajuan teknologi terkini. Artikel merupakan hasil dari original research dan metode kuantitatif, penulis mengeksklusikan hasil penelitian review dan kualitatif. Artikel berbahasa Inggris dan Indonesia dan tersedia akses lengkapnya. Berikut adalah inklusi berdasarkan kerangka kerja PICO.

1. P (Populasi): Peserta adalah remaja atau dewasa muda berusia sekitar 10–29 tahun.
2. I (Paparan/Intervensi): Studi yang melibatkan biomarker digital atau sinyal fisiologis, termasuk detak jantung, variabilitas detak jantung (HRV), aktivitas elektrodermal (EDA), pola tidur, aktivitas fisik, atau data sensor yang dapat dikenakan.
3. C (Camparasi/Pembanding): -
4. O (Outcome/Hasil): Studi yang menilai hasil kesehatan mental seperti depresi, kecemasan, stres, tekanan psikologis, atau kesejahteraan.

Kriteria Eksklusi

1. Studi yang hanya berfokus pada hasil kesehatan fisik tanpa menilai variabel kesehatan mental.
2. Studi berupa artikel ulasan, editorial, abstrak konferensi, atau sumber yang tidak ditinjau sejawat.

Artikel diseleksi sesuai dengan kriteria inklusi dan eksklusi diatas kemudian memperoleh 20 artikel yang memenuhi kriteria kelayakan dan dianalisis. Pendekatan sintesis naratif juga digunakan untuk menganalisis dan mengintegrasikan temuan di seluruh studi. Hasil dikelompokkan ke dalam kategori tematik yaitu:

1. Jenis sinyal fisiologis yang digunakan dalam pemantauan kesehatan mental (misalnya, HRV, EDA, pola tidur)
2. Peran teknologi wearable dan digital dalam akuisisi data
3. Penerapan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin dalam prediksi kesehatan mental
4. Hubungan antara indikator fisiologis dan hasil kesehatan mental
5. Metodologi penelitian dan integrasi data fisiologis dengan faktor psikososial.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis artikel dari berbagai data based peneliti mendapatkan 14 artikel sesuai kriteria inklusi yang kemudian di sintesis dalam studi ini.

Tabel 1. Sintesis Hasil Artikel

Penulis (Tahun)	Title	Populasi (P)	Intervensi / Paparan (I)	Pembanding (C)	Luaran (O)
(Kadirvelu et al., 2025)	Digital Phenotyping for Adolescent Mental Health: Feasibility Study Using Machine Learning to Predict Mental Health Risk From Active and Passive Smartphone Data	Remaja (berbasis sekolah)	Digital phenotyping berbasis smartphone	-	Risiko kesehatan mental (SDQ, insomnia, ide bunuh diri) dapat dideteksi menggunakan teknologi digital berbasis smart phone ini.
(Liu et al., 2025)	Digital phenotyping from wearables using AI Characterizes psychiatric disorders and identifies genetic associations	Remaja	Biomarker digital wearable berbasis AI	Metode tradisional (GWAS konvensional)	Klasifikasi gangguan psikiatri dapat dideteksi dengan teknologi yang menggabungkan antara perilaku dan genetika
(Chen et al., 2025)	Heart rate variability and heart rate asymmetry in adolescents with major depressive disorder during nocturnal sleep period	Remaja dengan depresi (MDD)	HRV berbasis ECG saat tidur	Kontrol sehat	Remaja dengan Depresi mengalami penurunan tonus vagal yang signifikan dibandingkan dengan kelompok kontrol yang sehat.
(Taylor et al., 2025)	Heart Rate Variability as a Digital Biomarker in Adolescents and Young Adults	Remaja & dewasa muda	Monitoring HRV	Nilai baseline	Nilai HRV berhubungan dengan tingkat kecemasan dan depresi pada remaja. HRV yang

	Receiving Hematopoietic Cell Transplantation				rendah terjadi pada pasien dengan kecemasan dan depresi tinggi
(Wang et al., 2024)	The effects of Baduanjin exercise on the psychological condition and heart rate variability of sports disadvantaged college students: A randomised trial	Mahasiswa	HRV + intervensi latihan	Kelompok kontrol	Latihan Baduanjin selama 16 minggu secara signifikan meningkatkan HRV sehingga berpotensi membantu menyeimbangkan aktivitas saraf simpatik-vagal dan berkontribusi pada pengaturan kesehatan mental.
(Zhao et al., 2024)	Relationship between state anxiety, heart rate variability, and shooting performance in adolescent shooters	Remaja	HRV + pengukuran kecemasan	Level performa berbeda	kecemasan situasional berkorelasi positif dengan aktivitas simpatik dalam HRV, kecemasan berkorelasi negatif dengan aktivitas parasimpatik, dan performa.
(Vacher et al., 2023)	Asynchronous Heart Rate Variability Biofeedback Protocol Effects on Adolescent Athletes' Cognitive Appraisals and Recovery-Stress States	Remaja atlet	HRV biofeedback	Kelompok kontrol	Protokol HRV-BFBasync secara signifikan memprediksi tingkat stres biopsikososial dan stres kognitif
(Huber et al., 2025)	Brain activation and heart rate variability as markers of autonomic function under stress	Dewasa	HRV + aktivitas otak (fMRI)	Kondisi stres vs relaksasi	Respons stres. interaksi otak-jantung yang dinamis selama regulasi otonom terkait stres dan menekankan potensi poros otak-jantung sebagai target intervensi terapeutik

(Shir & Hanna, 2024)	The Predictive Potential of Heart Rate Variability for Depression	Remaja	HRV	-	HRV dapat digunakan sebagai mediator fisiologis deteksi depresi dan mekanisme penyakit.
(Cici Widowati & Kasih Purwantini, 2025)	Inovasi Sensor Wearable untuk Monitoring Kesehatan Mental melalui Variabilitas Denyut Jantung	Mahasiswa	Sensor wearable HRV	-	sensor wearable mampu memprediksi kondisi stres dengan tingkat akurasi mencapai 80%. Sensor wearable berbasis HRV dapat digunakan sebagai alat bantu non-invasif yang praktis untuk memantau kondisi mental secara real-time
(Erlangga Syahri Ramadhan, 2025)	Sistem Pemantauan Stres Dan Kecemasan Untuk Deteksi Dini Kesehatan Mental Memakai Sensor Biomedik Bebasis Iot Dan Deep Neural Networks	Mahasiswa	Sensor IoT (HR, GSR, suhu) + DNN	Metode konvensional	integrasi teknologi sensor dan deep learning secara signifikan meningkatkan efektivitas deteksi stres dan kecemasan dibandingkan dengan metode tradisiona
(Aziz et al., 2025)	Pengembangan dan Validasi Model Hybrid Machine Learning untuk Diagnosis Awal Depresi	Pasien Depresi	Model ML berbasis kuesioner	-	Model hybrid dapat memberikan akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan model individual, serta memiliki potensi untuk digunakan dalam aplikasi berbasis teknologi untuk memberikan peringatan dini pada depresi.
(Semen et al., 2023)	Heart Rate Variability and Somatization in Adolescents With Irritable Bowel Syndrome	Remaja	HRV berbasis ECG	Kontrol sehat	Remaja dengan IBS menunjukkan tanda-tanda disfungsi otonom hanya selama tes ortostatik, yang dikaitkan dengan peningkatan skor somatisasi.

(Rosadi & Kom, 2025)	Alat Deteksi Tingkat Stress Pada Mahasiswa Berdasarkan Detak jantung dan Konduksivitas kulit dengan sensor MAX30100 dan sensor GSR Menggunakan Metode Fuzzy Logic Berbasis Arduino Nano	Mahasiswa	sensor MAX30100 dan Galvanic Skin Response (GSR) + detak jantung dan kondutivitas kulit	-	Alat ini dapat digunakan untuk mendeteksi tingkat stress dengan akurasi *Stabilitas sensor GSR mencapai 74% pada kategori sangat stabil, sedangkan sensor MAX30100 menunjukkan 60,87%.*

Hasil dari tinjauan ini menunjukkan bahwa biomarker digital dan sinyal fisiologis mewakili paradigma yang menjanjikan untuk memantau kesehatan mental pada populasi remaja. Variabilitas detak jantung (HRV), aktivitas elektrodermal (EDA), pola tidur, dan aktivitas fisik secara konsisten diidentifikasi sebagai indikator fisiologis utama pada seluruh artikel. Data fisiologis yang diperoleh dari perangkat wearable memberikan pengukuran kondisi psikologis dan mengukur secara objektif (Bergwerff et al., 2026; Liu et al., 2025) Pendekatan deteksi berbasis diigital yang mengintegrasikan aliran data pasif dan aktif telah menunjukkan kemampuan untuk memprediksi risiko kesehatan mental dengan akurasi sedang hingga tinggi (Castillo Zorro et al., 2026). Transisi dari pelaporan diri subjektif ke pemantauan objektif merupakan peningkatan penilaian kesehatan mental. Teknologi wearable memungkinkan pemantauan waktu nyata di lingkungan alami, sehingga meningkatkan validitas ekologis (Shen et al., 2025). Perkembangan ini menunjukan paradigma penilaian kesehatan mental dapat dilakukan dengan berbasis data.

Temuan utama dari tinjauan ini adalah peran penting HRV sebagai biomarker fisiologis dalam penelitian kesehatan mental. Penurunan HRV berkaitan dengan indikator masalah kesehatan seperti depresi, kecemasan, dan stres (Chen et al., 2025; Taylor et al., 2025). HRV menjadi indikator regulasi sistem saraf otonom yang menunjukan pada keseimbangan antara aktivitas simpatik dan parasimpatik. Penurunan HRV berkaitan dengan gangguan regulasi emosional dan peningkatan kerentanan terhadap gangguan suasana hati (Castaldo et al., 2020; Shir & Hanna, 2024). HRV juga disebutkan sebagai biomarker prediktif yang dapat mendahului timbulnya depresi, hal ini berarti bahwa nilainya menjadi dasar diagnostik dan alat deteksi dini. Standardisasi terhadap pengukuran HRV sangat diperlukan agar tidak muncul inkonsistensi terhadap hasil diagnostik masalah kesehatan mental. Pengukuran secara fisiologis multimodal menjadi penting untuk pemantauan kesehatan mental. Kombinasi data hasil pengukuran HRV, EDA, pola tidur, dan aktivitas digunakan untuk prediksi masalah kesehatan mental (Castillo Zorro et al., 2026; Erlangga Syahri Ramadhan, 2025). Pendekatan multimodal menguntungkan karena banyak faktor yang berinteraksi membentuk kesehatan mental. Pengintegrasian berbagai sinyal fisiologis meningkatkan kinerja klasifikasi dibandingkan dengan model sensor tunggal (Behradfar et al., 2025). Sistem

multimodal juga dapat berbasis perangkat wearable memfasilitasi pemantauan kesehatan mental yang lebih personal.

Tantangan seperti noise sinyal, masalah sinkronisasi, dan kompleksitas komputasi menjadi faktor yang harus diperhatikan dalam deteksi maupun monitoring masalah kesehatan mental. Keterbatasan ini menggarisbawahi kebutuhan akan peningkatan teknik pemrosesan dan integrasi sinyal. Hal ini mendasari bahwa deteksi dini dan sistem monitoring multimodal merupakan salah satu fenomena yang dapat diteliti selanjutnya sebagai inovasi. Tema penting yang diidentifikasi dalam tinjauan ini adalah meningkatnya peran kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) dalam menganalisis data fisiologis. Beberapa penelitian telah menerapkan algoritma ML seperti random forests, support vector machines, dan deep neural networks untuk mengklasifikasikan kondisi kesehatan mental (Aziz et al., 2025; Liu et al., 2025). AI memungkinkan deteksi hubungan kompleks dan non-linear dalam data fisiologis dan perilaku. Model berbasis ML dapat mencapai akurasi tinggi dalam memantau depresi, kecemasan, dan stres (Ahmed et al., 2022; Taskynbayeva & Gutoreva, 2025). Model AI berbasis perangkat wearable telah menunjukkan peningkatan kinerja saat menggunakan data multimodal. Kurangnya interpretasi dalam model AI tetap menjadi perhatian kritis. Algoritma black-box dapat membatasi adopsi klinis karena transparansi yang rendah. Pendekatan AI perlu dijelaskan untuk meningkatkan kepercayaan dan penerapan dalam proses perawatan kesehatan.

Interaksi kompleks antara determinan biologis, psikologis, dan sosial membentuk kesehatan mental. Penelitian menunjukkan bahwa penggabungan data psikososial meningkatkan akurasi prediksi dan pemahaman kontekstual (Remes et al., 2021). Pendekatan yang mengintegrasikan skrening fisiologis dengan biomarker dengan tanda dan gejala psikososial dapat meningkatkan kekuatan data sebagai dasar terdeteksinya masalah kesehatan mental remaja. Penilaian dapat dilakukan dengan mengintegrasikan data laporan diri, perilaku, dan fisiologis sehingga menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif tentang kesehatan mental, khususnya di kalangan remaja.

Tinjauan ini menegaskan implikasi signifikan untuk pengembangan sistem kesehatan mental digital. Integrasi sensor yang dapat dikenakan, biomarker fisiologis, dan AI memungkinkan pemantauan berkelanjutan dan deteksi dini masalah kesehatan mental, khususnya bagi remaja yang sangat terlibat dengan teknologi digital. Pertimbangan etis seperti privasi data, keamanan, dan persetujuan pengguna memerlukan perhatian yang cermat. Kemajuan teknologi dan perlindungan privasi mengarahkan kepada pentingnya kerangka kerja etis dalam implementasi kesehatan digital (Grosman-Rimon & Wegier, 2024; Krones et al., 2025)Aksesibilitas tetap menjadi tantangan yang terus-menerus di negara-negara berpenghasilan rendah dan menengah. Penelitian selanjutnya dapat memprioritaskan solusi yang terukur, etis, dan berpusat pada pengguna. Biomarker digital secara keseluruhan merupakan inovasi dalam deteksi dan pemantauan status kesehatan mental yang presisi bagi remaja.

SIMPULAN

Biomarker digital dan sinyal fisiologis semakin diakui sebagai komponen penting dalam memajukan pemantauan kesehatan mental untuk populasi remaja. Variabilitas detak jantung (HRV) diidentifikasi sebagai biomarker yang paling konsisten dan kuat, karena mencerminkan regulasi sistem saraf otonom dan keadaan emosional. Integrasi teknologi wearable dan fenotipe digital memungkinkan penilaian kesehatan mental yang berkelanjutan, real-time, dan objektif, sehingga mengatasi keterbatasan metode pelaporan diri tradisional. Penggunaan kecerdasan buatan dan ML meningkatkan deteksi dan prediksi kondisi kesehatan mental, terutama ketika data multimodal digunakan. Data fisiologis diperlukan untuk di integrasikan bersama faktor psikososial untuk pemahaman komprehensif tentang kesehatan mental. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan pendekatan biopsikososial yang menggabungkan data fisiologis, perilaku, dan psikososial untuk meningkatkan akurasi prediksi dan interpretasi kontekstual. Pertimbangan etis, termasuk privasi data, persetujuan pengguna, dan aksesibilitas, harus diperhatikan untuk memastikan implementasi teknologi kesehatan digital yang bertanggung jawab. Mengintegrasikan biomarker digital dan sinyal fisiologis merupakan hal inovatif untuk kesehatan mental yang presisi. Mengembangkan sistem kesehatan mental digital yang terukur, mudah dijelaskan, dan berpusat pada pengguna sangat penting untuk mendukung strategi deteksi dini, pencegahan, dan intervensi, khususnya bagi kaum muda yang sangat terlibat dengan teknologi digital.

KONTRIBUSI PENULIS

YN berkontribusi dalam konseptualisasi penelitian, perumusan tujuan, penelusuran literatur, analisis dan sintesis data, serta penyusunan naskah awal. Mira Wahyu Kusumawati berkontribusi dalam penelaahan literatur, interpretasi hasil, dan penyempurnaan pembahasan dari perspektif keperawatan. ZA berkontribusi dalam pengembangan metodologi, penelaahan hasil sintesis, dan evaluasi substansi ilmiah. MLPK berkontribusi dalam analisis literatur terkait biomarker digital, sinyal fisiologis, serta penerapan kecerdasan buatan dan *machine learning*. Afin Muhammad Nurtsani berkontribusi dalam penelaahan aspek teknologi biomedis, evaluasi substansi ilmiah, dan revisi naskah. Seluruh penulis berkontribusi dalam peninjauan dan penyempurnaan naskah serta menyetujui versi akhir untuk dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, A., Aziz, S., Alzubaidi, M., Schneider, J., Irshaidat, S., Abu Serhan, H., Abd-alrazaq, A. A., Solaiman, B., & Househ, M. (2023). Wearable devices for anxiety & depression: A scoping review. In *Computer Methods and Programs in Biomedicine Update* (Vol. 3). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.cmpbup.2023.100095

Ahmed, A., Aziz, S., Toro, C. T., Alzubaidi, M., Irshaidat, S., Serhan, H. A., Abd-alrazaq, A. A., & Househ, M. (2022). Machine learning models to detect anxiety and depression through social media: A scoping review. *Computer*

Methods and Programs in Biomedicine Update, *2*, 100066. https://doi.org/10.1016/J.CMPBUP.2022.100066

Alonso, A. K. M., Hirt, J., Woelfle, T., Janiaud, P., & Hemkens, L. G. (2024). Definitions of digital biomarkers: a systematic mapping of the biomedical literature. *2023BMJ Health Care Inform*. https://doi.org/10.1136/ bmjhci-2023-100914

Aziz, F., Abasa, S., Komputer, I., Pancasakti, U., & Karya Persada Muna, U. (2025). Pengembangan dan Validasi Model Hybrid Machine Learning untuk Diagnosis Awal Depresi. *Journal Pharmacy and Aplication of Computer Sciences*, *3*(1), 8–15.

Behradfar, M., Roy, S., & Nuamah, J. (2025). Optimizing Mental Stress Detection via Heart Rate Variability Feature Selection. *Sensors*, *25*(13). https://doi.org/10.3390/s25134154

Bergwerff, C. E., Buisman, R. S. M., Nibbering, N., & Noordermeer, S. D. S. (2026). Using Wearables in Mental Health Care for Children and Adolescents: A Scoping Review. *Research on Child and Adolescent Psychopathology*, *54*(1), 16. https://doi.org/10.1007/s10802-025-01408-9

Castaldo, G., Rastrelli, L., Galdo, G., Molettieri, P., Rotondi Aufiero, F., & Cereda, E. (2020). Aggressive weight-loss program with a ketogenic induction phase for the treatment of chronic plaque psoriasis: A proof-of-concept, single-arm, open-label clinical trial. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.), 74*. https://doi.org/10.1016/J.NUT.2020.110757

Castillo Zorro, C. A., Fonzo, G. A., & Moscoso-Barrera, W. D. (2026). Use of physiological signals, behavioral data, and processing algorithms in electronic devices and mobile applications for diagnosing depression, anxiety, and stress. *DIGITAL HEALTH*, *12*. https://doi.org/10.1177/20552076251404514

Chen, W., Chen, H., Jiang, W., Chen, C., Xu, M., Ruan, H., Chen, H., Yu, Z., & Chen, S. (2025). Heart rate variability and heart rate asymmetry in adolescents with major depressive disorder during nocturnal sleep period. *BMC Psychiatry*, *25*(1). https://doi.org/10.1186/s12888-025-06911-3

Cici Widowati, & Kasih Purwantini. (2025). Inovasi Sensor Wearable untuk Monitoring Kesehatan Mental melalui Variabilitas Denyut Jantung. *Journal of New Trends in Sciences*, *2*(2), 63–73. https://doi.org/10.59031/jnts.v2i2.787

Dombou, C., Omonaiye, O., Fraser, S., Cénat, J. M., Fournier, K., & Yaya, S. (2023). Barriers and facilitators associated with the use of mental health services among immigrant students in high-income countries: A systematic scoping review. *PloS One*, *18*(6). https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0287162

Erlangga Syahri Ramadhan, M. (2025). *ELKOM (Jurnal Elektronika dan Komputer) Sistem Pemantauan Stres Dan Kecemasan Untuk Deteksi Dini Kesehatan Mental Memakai Sensor Biomedik Bebasis Iot Dan Deep Neural Networks*. *18*(1). https://journal.stekom.ac.id/index.php/elkom

Garriga, R., Mas, J., Abraha, S., Nolan, J., Harrison, O., Tadros, G., & Matic, A. (2022). Machine learning model to predict mental health crises from electronic health records. *Nature Medicine*, *28*(6), 1240–1248. https://doi.org/10.1038/s41591-022-01811-5

Georgiou, A., Chrysostomou, S., & Kantilafti, M. (2026). Ultra-Processed Foods and Mental Health in Children and Adolescents: Evidence from a Systematic Review. In *Nutrients* (Vol. 18, Number 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/nu18060899

Grosman-Rimon, L., & Wegier, P. (2024). With advancement in health technology comes great responsibility - Ethical and safety considerations for using digital health technology: A narrative review. In *Medicine (United States)* (Vol. 103, Number 33, p. e39136). Lippincott Williams and Wilkins. https://doi.org/10.1097/MD.0000000000039136

Huber, A., Koenig, J., Bruns, B., Bendszus, M., Friederich, H. C., & Simon, J. J. (2025). Brain activation and heart rate variability as markers of autonomic function under stress. *Scientific Reports*, *15*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-12430-8

Kadirvelu, B., Bel, T. B., Freccero, A., Simplico, M. Di, Nicholls, D., & Faisal, A. A. (2025). Digital Phenotyping for Adolescent Mental Health: A Feasibility Study Employing Machine Learning to Predict Mental Health Risk From Active and Passive Smartphone Data (Preprint). *Journal of Medical Internet Research*. https://doi.org/10.2196/72501

Kementrian Kesehatan RI. (2024). *Profil Kesehatan Indonesia 2023*. https://kemkes.go.id/id/profil-kesehatan-indonesia-2023

Krones, F., Marikkar, U., Parsons, G., Szmul, A., & Mahdi, A. (2025). Review of multimodal machine learning approaches in healthcare. *An International Journal on Information Fusion*, *114*, 102690. https://doi.org/10.1016/j.inffus.2024.102690

Liu, J. J., Borsari, B., Li, Y., Liu, S. X., Gao, Y., Xin, X., Lou, S., Jensen, M., Garrido-Martín, D., Verplaetse, T. L., Ash, G., Zhang, J., Girgenti, M. J., Roberts, W., & Gerstein, M. (2025). Digital phenotyping from wearables using AI characterizes psychiatric disorders and identifies genetic associations. *Cell*, *188*(2), 515-529.e15. https://doi.org/10.1016/j.cell.2024.11.012

Nasution, I. S., Susilo, M. C., Tengku, N. A. H., & Ariska, N. (2025). Kesehatan Mental Remaja Dan Tantangan Sosial-Digital: Analisis Literatur Untuk Rekomendasi Kebijakan Kesehatan. *Jurnal Kesehatan Tambusai*, *6*(2), 8555–8564.

Prakash, J., Chaudhury, S., & Chatterjee, K. (2021). Digital phenotyping in psychiatry: When mental health goes binary. *Industrial Psychiatry Journal*, *30*(2), 191–192. https://doi.org/10.4103/ipj.ipj_223_21

Remes, O., Francisco, J., & Templeton, P. (2021). Biological, Psychological, and Social Determinants of Depression: A Review of Recent Literature. *Brain Sciences*, *11*(12). https://doi.org/10.3390/brainsci11121633

Rosadi, A., & Kom, S. (2025). Alat Deteksi Tingkat Stress Pada Mahasiswa Berdasarkan Detak jantung dan Konduksivitas kulit dengan sensor MAX30100 dan sensor GSR Menggunakan Metode Fuzzy Logic Berbasis Arduino Nano. *Jurnal Ilmiah Computing Insight*, *7*(2), 3.

Semen, M., Lychkovska, O., Kaminskyy, D., Yavorskyi, O., Semen, K. O., & Yelisyeyeva, O. (2023). Heart Rate Variability and Somatization in Adolescents with Irritable Bowel Syndrome. *Journal of Neurogastroenterology and Motility*, *29*(2), 208–217. https://doi.org/10.5056/jnm22019

Shen, S. Y., Qi, W., Zeng, J., Li, S., Liu, X., Zhu, X., Dong, C., Wang, B., Shi, Y., Yao, J., Wang, B., Lou, X., Gu, S., Li, P., Wang, J., Jiang, G., & Cao, S. (2025). Passive Sensing for Mental Health Monitoring Using Machine Learning With Wearables and Smartphones: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, *27*, e77066. https://doi.org/10.2196/77066

Shir, G., & Hanna, K. (2024). The Predictive Potential of Heart Rate Variability for Depression. In *Neuroscience* (Vol. 546, pp. 88–103). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2024.03.013

Solmi, M., Radua, J., Olivola, M., Croce, E., Soardo, L., Salazar de Pablo, G., Il Shin, J., Kirkbride, J. B., Jones, P., Kim, J. H., Kim, J. Y., Carvalho, A. F., Seeman, M. V., Correll, C. U., & Fusar-Poli, P. (2022). Age at onset of mental disorders worldwide: large-scale meta-analysis of 192 epidemiological studies. In *Molecular Psychiatry* (Vol. 27, Number 1, pp. 281–295). Springer Nature. https://doi.org/10.1038/s41380-021-01161-7

Stewart, G. J., Nelson, B. S., Drysdale, W. S., Acton, W. J. F., Vaughan, A. R., Hopkins, J. R., Dunmore, R. E., Hewitt, C. N., Nemitz, E., Mullinger, N., Langford, B., Shivani, Reyes-Villegas, E., Gadi, R., Rickard, A. R., Lee, J. D., & Hamilton, J. F. (2021). Sources of non-methane hydrocarbons in surface air

in Delhi, India. *Faraday Discussions*, *226*(0), 409–431. https://doi.org/10.1039/D0FD00087F

Taskynbayeva, M., & Gutoreva, A. (2025). Machine learning approaches to anxiety detection: trends, model evaluation, and future directions. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *8*, 1630047. https://doi.org/10.3389/FRAI.2025.1630047/TEXT

Taylor, M. R., Bradford, M. C., Zhou, C., Fladeboe, K. M., Wittig, J. F., Baker, K. S., Yi-Frazier, J. P., & Rosenberg, A. R. (2025). Heart Rate Variability as a Digital Biomarker in Adolescents and Young Adults Receiving Hematopoietic Cell Transplantation. *Cancer Medicine*, *14*(4). https://doi.org/10.1002/cam4.70609

Vacher, P., Merlin, Q., Levillain, G., Mourot, L., Martinent, G., & Nicolas, M. (2023). Asynchronous Heart Rate Variability Biofeedback Protocol Effects on Adolescent Athletes' Cognitive Appraisals and Recovery-Stress States. *Journal of Functional Morphology and Kinesiology*, *8*(3). https://doi.org/10.3390/jfmk8030094

Wang, Z., Zhang, Z., & Wu, Y. (2024). The effects of Baduanjin exercise on the psychological condition and heart rate variability of sports-disadvantaged college students: A randomised trial. *Journal of Health, Population and Nutrition*, *43*(1). https://doi.org/10.1186/s41043-024-00691-4

Wu, W., Zhang, Y., Jiang, J., Lucas, M. V, Fonzo, G. A., Rolle, C. E., Cooper, C., Chin-Fatt, C., Krepel, N., Cornelssen, C. A., Wright, R., Toll, R. T., Trivedi, H. M., Monuszko, K., Caudle, T. L., Sarhadi, K., Jha, M. K., Trombello, J. M., Deckersbach, T., … Etkin, A. (2020). An electroencephalographic signature predicts antidepressant response in major depression. *Nature Biotechnology*, *38*(4), 439–447. https://doi.org/10.1038/s41587-019-0397-3

Yani, D. I., Chua, J. Y. X., Wong, J. C. M., Pikkarainen, M., Goh, Y. S. S., & Shorey, S. (2025). Perceptions of Mental Health Challenges and Needs of Indonesian Adolescents: A Descriptive Qualitative Study. *International Journal of Mental Health Nursing*, *34*(1). https://doi.org/10.1111/inm.13505

Zhao, C., Wang, K., Li, D., Li, Y., Wang, Z., Liu, Y., & Zhang, T. (2024). Relationship between state anxiety, heart rate variability, and shooting performance in adolescent shooters. *BMC Psychology*, *12*(1). https://doi.org/10.1186/s40359-024-02062-4