

Edukasi Interaksi Manusia dan Mesin Melalui Permainan Robotika Berbasis Sinyal Tubuh untuk Anak Usia Dini

Tito Waluyo Purboyo^{1*}, M. Darfyma Putra¹, Dziban Naufal¹, Riza Aria Komara¹, Rifdah Nur Nasywa¹, Sultan Muhammad Naufal¹

¹Program Studi Teknik Biomedis, Universitas Telkom, Bandung, Indonesia

*Corresponding Author: titowaluyo@telkomuniversity.ac.id

Abstrak: Program pengabdian kepada masyarakat ini bertujuan memperkenalkan konsep interaksi manusia-mesin (HMI) kepada anak usia dini berusia 4–8 tahun melalui permainan robotik berbasis sinyal biopotensial di TPA/TPQ Al Istiqomah Sukabirus, Kabupaten Bandung, Jawa Barat. Permasalahan utama yang diidentifikasi adalah minimnya integrasi sistematis konsep HMI dalam kurikulum pendidikan anak usia dini (PAUD) di Indonesia, padahal usia 4–8 tahun merupakan jendela perkembangan kognitif yang optimal. Program ini menggunakan pendekatan pembelajaran berbasis permainan dengan scaffolding bertahap, memanfaatkan sinyal elektromiografi (EMG) dari kontraksi otot lengan dan sinyal elektrookulografi (EOG) dari gerakan mata sebagai antarmuka kendali robot beroda. Peserta terdiri atas 20 anak usia dini dan 14 responden pemangku kepentingan (pendidik dan orang tua/wali). Program dilaksanakan dalam satu sesi empat jam yang terbagi atas empat tahapan. Hasil menunjukkan bahwa 100% peserta anak berhasil mengendalikan robot secara mandiri, melampaui tolok ukur kompetensi 75%. Evaluasi kuantitatif dari 70 titik data kuesioner Likert menghasilkan Indeks Tingkat Kepuasan (ITK) 100%, dengan distribusi 60,0% "Setuju" dan 40,0% "Sangat Setuju", tanpa satu pun respons negatif. Temuan ini memvalidasi kelayakan antarmuka biopotensial sebagai media pembelajaran HMI yang sesuai perkembangan untuk anak usia dini, sekaligus menyediakan kerangka pedagogis yang tervalidasi dan dapat direplikasi untuk program penjangkauan teknologi biomedis di komunitas PAUD.

Kata Kunci: Sinyal Biopotensial; Pendidikan Anak Usia Dini; Robotika Edukatif; Antarmuka EMG/EOG; Interaksi Manusia-Mesin

Abstract: This community service program aimed to introduce the concept of human-machine interaction (HMI) to early childhood learners aged 4–8 years through biopotential signal-based robotic play at TPA/TPQ Al Istiqomah Sukabirus, Bandung Regency, West Java. The main problem identified was the minimal systematic integration of HMI concepts in early childhood education (ECE) curricula in Indonesia, despite ages 4–8 representing an optimal cognitive developmental window. This program applied a play-based learning approach with scaffolding, utilizing electromyography (EMG) signals from forearm muscle contraction and electrooculography (EOG) signals from eye movements as wheeled robot control interfaces. Participants comprised 20 early childhood learners and 14 stakeholder respondents (educators and parents/guardians). The program was conducted in a four-hour session divided into four stages. Results showed that 100% of child participants independently controlled the robot, surpassing the 75% competency benchmark. Quantitative evaluation of 70 Likert questionnaire data points yielded a combined Satisfaction Index of 100%, distributed as 60.0% "Agree" and 40.0% "Strongly Agree," with zero negative responses. These findings validate the feasibility of biopotential interfaces as developmentally appropriate HMI learning media for early childhood and provide a validated, replicable pedagogical framework for biomedical technology outreach programs in ECE communities.

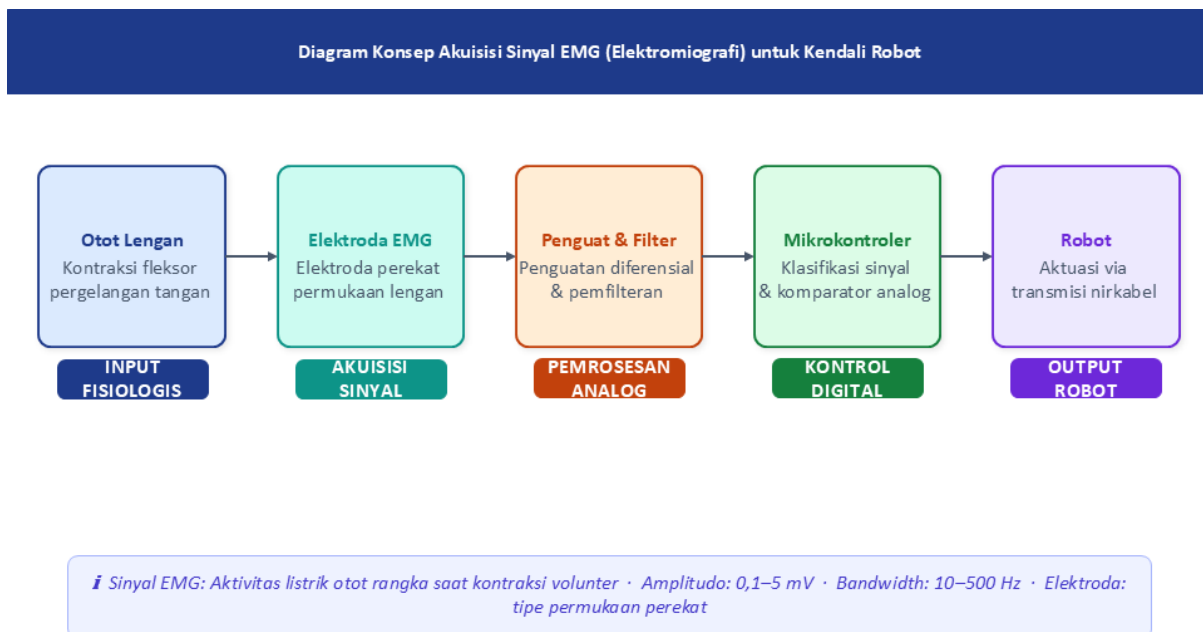
Keywords: Biopotential Signals; Early Childhood Education; Educational Robotics; EMG/EOG Interface; Human-Machine Interaction

1. Pendahuluan

Transisi global menuju paradigma Society 5.0 mendefinisikan ulang kompetensi yang diperlukan generasi mendatang, menjadikan interaksi manusia-mesin (human-machine interaction/HMI) sebagai literasi inti masyarakat, bukan sekadar keterampilan teknis khusus. Meskipun demikian, integrasi sistematis konsep HMI dalam kurikulum pendidikan anak usia dini (PAUD) masih sangat terbatas, terutama di negara berkembang seperti Indonesia [1]. Kajian sistematis Su dan Yang menunjukkan bahwa pendidikan berpikir komputasional pada anak usia dini di negara berkembang menghadapi kesenjangan besar antara rekomendasi kebijakan dan implementasi kurikulum aktual [1]. Indonesia, dengan sekitar 30 juta anak yang terdaftar di lembaga PAUD, merupakan populasi kritis yang memerlukan intervensi literasi teknologi terstruktur sejak dini [2].

Meta-analisis sistematis Alonso-García dan kawan-kawan membuktikan bahwa robotika pendidikan memberikan dampak signifikan terhadap perkembangan berpikir komputasional anak usia dini, dengan bukti kuat bahwa desain instruksional yang sesuai usia mampu mengakomodasi variasi perkembangan kognitif di kelas prasekolah [3]. Penelitian tersebut menegaskan bahwa usia 4–8 tahun merupakan jendela plastisitas sinaptik yang optimal—kerangka konstruktivis Piaget dan zona perkembangan proksimal Vygotsky sama-sama menekankan bahwa pembelajaran pada periode ini paling efektif ketika tertanam dalam kegiatan yang konkret dan kaya pengalaman sensoris [4], [5]. Ouyang dan Xu memperkuat temuan ini melalui meta-analisis multitingkat yang menunjukkan pengaruh positif robotika pada motivasi belajar, keterampilan, dan pengetahuan siswa di berbagai jenjang pendidikan [6].

Batas eksplorasi yang kritis namun belum banyak dijelajahi dalam robotika pendidikan adalah penerapan antarmuka berbasis sinyal biopotensial—khususnya elektromiografi (EMG) dan elektrookulografi (EOG)—sebagai alat pedagogis untuk anak usia dini. Sinyal EMG dihasilkan oleh aktivitas listrik otot rangka selama kontraksi volunter, sedangkan sinyal EOG muncul dari potensi korneotinal yang dimodulasi gerakan mata. Kedua sinyal tersebut merupakan fenomena bioelektrik alami yang dapat berfungsi sebagai masukan kendali intuitif untuk sistem robotik. Tinjauan komprehensif Xiong dan kawan-kawan mengenai deep learning untuk antarmuka EMG-HMI mengonfirmasi potensi besar sinyal EMG sebagai kendali robotik yang dapat diakses oleh pengguna tanpa keahlian teknis [7]. Konsep akuisisi sinyal EMG untuk kendali robot diilustrasikan pada Gambar 1. Wang dan kawan-kawan selanjutnya membuktikan kelayakan antarmuka berbasis EOG untuk kendali robot humanoid, menunjukkan akurasi dan respons waktu yang memadai bahkan dengan fitur sederhana seperti gerakan mata saccadic [8]. Diagram konsep akuisisi sinyal EOG ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Diagram Konsep Akuisisi Sinyal EMG (Elektromiografi) untuk Kendali Robot

Diagram Konsep Akuisisi Sinyal EOG (Elektrookulografi) untuk Kendali Robot



Sinyal EOG: Potensi korneortinal yang dimodulasi gerakan mata · Amplitudo: 0,01–3,5 mV · Bandwidth: DC–50 Hz · Elektroda: tipe periokular perekat

Gambar 2. Diagram Konsep Akuisisi Sinyal EOG (Elektrookulografi) untuk Kendali Robot

Gerosa dan kawan-kawan mendokumentasikan bahwa intervensi robotika pendidikan bagi anak prasekolah yang dirancang dengan keterlibatan tugas yang tinggi menghasilkan peningkatan berpikir komputasional yang signifikan, disertai keterlibatan afektif yang kuat [9]. Namun demikian, intervensi terstruktur yang menargetkan anak usia dini secara khusus dengan antarmuka berbasis biopotensial masih sangat minim dalam literatur, berbeda dengan program-program sebelumnya yang dilakukan tim peneliti ini di tingkat SMA [10] dan SMP [11] yang telah mendokumentasikan hasil positif serupa. Kesenjangan ini signifikan mengingat primasi perkembangan intervensi anak usia dini serta kewajiban institusional program pengabdian kepada masyarakat dalam kerangka Tridharma Perguruan Tinggi.

Program ini bertujuan untuk: (1) memperkenalkan konsep HMI dasar kepada anak usia dini melalui kendali robot yang terwujud dan dimediasi permainan menggunakan antarmuka EMG dan EOG; (2) menilai persepsi pemangku kepentingan komunitas tentang kualitas dan dampak program melalui instrumen evaluasi tervalidasi; serta (3) membangun kerangka pedagogis yang dapat direplikasi untuk pendidikan HMI berbasis biopotensial dalam konteks PAUD. Manfaat yang diharapkan meliputi peningkatan literasi teknologi anak usia dini sejak dini, penyediaan model pengabdian yang dapat diadopsi lembaga PAUD lain, serta kontribusi pada literatur pendidikan biomedis dan robotika edukatif di Indonesia.

2. Metode Pelaksanaan

2.1 Lokasi dan Sasaran Kegiatan

Program pengabdian kepada masyarakat ini dilaksanakan di TPA/TPQ Al Istiqomah Sukabirus yang berlokasi di Kabupaten Bandung, Provinsi Jawa Barat. Institusi dipilih berdasarkan tiga kriteria: (1) belum pernah terpapar program pendidikan robotika atau HMI sebelumnya; (2) kesediaan pimpinan institusi untuk berpartisipasi dalam kolaborasi universitas-komunitas; serta (3) keterwakilan demografis dari populasi PAUD perkotaan Jawa Barat. Populasi peserta utama terdiri atas 20 anak usia dini berusia 4–8 tahun ($N = 20$) yang mencakup tahapan praoperasional hingga operasional konkret awal menurut kerangka Piaget [4]. Responden evaluasi terdiri atas 14 pemangku kepentingan komunitas ($N = 14$) yang meliputi pendidik TPA/TPQ serta orang tua/wali peserta. Program dilaksanakan dalam satu sesi penuh sepanjang empat jam (08.00–12.00 WIB) pada hari kegiatan.

2.2 Tahapan Pelaksanaan

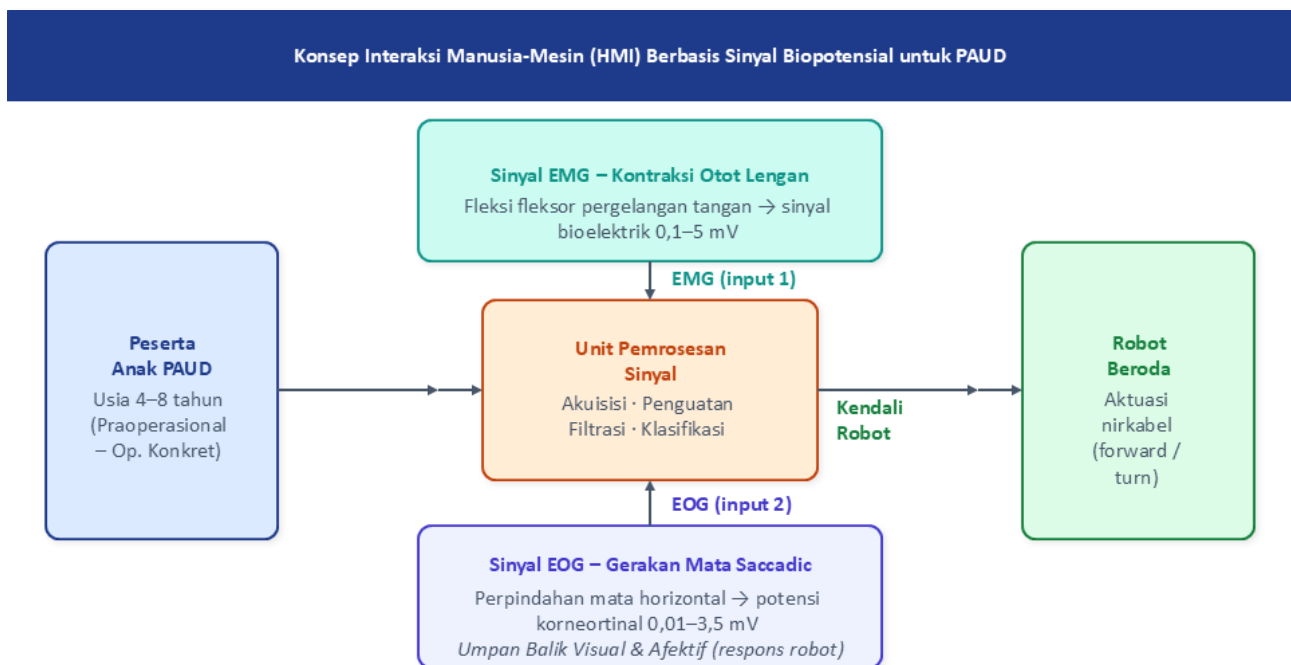
Pelaksanaan program mengikuti kerangka tiga fase: (1) persiapan, (2) penyampaian, dan (3) evaluasi. Fase persiapan meliputi koordinasi institusional, pengembangan modul pembelajaran berbasis permainan yang mengacu pada prinsip Universal Design for Learning (UDL) [12], persiapan dan verifikasi keamanan peralatan, serta kalibrasi fasilitator. Semua komponen sensor EMG dan EOG dioperasikan pada tegangan di bawah 5V menggunakan elektroda perekat permukaan yang aman secara dermatologis.

Fase penyampaian terdiri atas empat sesi berurutan. Sesi 1 (45 menit) menyampaikan pengantar naratif interaktif tentang robotika menggunakan metode bercerita yang sesuai usia. Sesi 2 (30 menit) menyajikan visualisasi sinyal EMG secara langsung, sehingga anak-anak dapat mengamati aktivitas bioelektrik otot mereka sendiri di layar monitor. Sesi 3 (90 menit) merupakan sesi langsung inti, di mana setiap anak bergantian mengendalikan robot menggunakan antarmuka EMG (kontraksi fleksor pergelangan tangan dipetakan ke perintah arah) maupun antarmuka EOG (gerakan saccadic horizontal dipetakan ke navigasi robot). Sesi 4 (30 menit) menutup kegiatan dengan refleksi terstruktur dan perayaan pencapaian bersama.

Platform teknologi yang digunakan mengintegrasikan tiga komponen: (a) modul akuisisi EMG portabel dengan elektroda perekat pada lengan bawah; (b) elektroda EOG periokular yang mendeteksi perpindahan mata horizontal; serta (c) unit pemrosesan sinyal berbasis mikrokontroler yang menggerakkan platform robot beroda melalui transmisi nirkabel. Penentuan ambang batas dan klasifikasi sinyal diimplementasikan menggunakan sirkuit komparator analog dengan sensitivitas yang dapat disesuaikan, sehingga mampu mengakomodasi variabilitas kendali motorik peserta anak usia dini.

2.3 Kerangka Pedagogis

Arsitektur pedagogis program mensintesis teori pembelajaran berbasis permainan dengan metodologi scaffolding instruksional [5]. Scaffolding dioperasionalkan melalui protokol bantuan bertahap: fasilitator memberikan panduan maksimum pada upaya kendali robot awal, kemudian secara sistematis menarik dukungan seiring anak menunjukkan kompetensi. Konsep interaksi manusia-mesin berbasis biopotensial dalam program ini diilustrasikan pada Gambar 3, yang menampilkan alur dari sinyal fisiologis anak hingga aktuasi robot. Budiyanto dan kawan-kawan membuktikan bahwa kerangka pembelajaran STEM terintegrasi dalam robotika pendidikan secara signifikan meningkatkan perkembangan berpikir komputasional [13]. Berdasarkan kerangka tersebut, program ini mengintegrasikan empat domain STEM: Sains (pembangkitan sinyal bioelektrik), Teknologi (sistem akuisisi sensor), Rekayasa (mekanika robot), dan Matematika (logika ambang batas sinyal). Gambar 4 menyajikan kerangka STEM terintegrasi beserta tiga fase pelaksanaan program secara menyeluruh.



Gambar 3. Konsep Interaksi Manusia-Mesin (HMI) Berbasis Sinyal Biopotensial untuk PAUD



Gambar 4. Kerangka STEM Terintegrasi dan Tiga Fase Pelaksanaan Program

2.4 Instrumen Evaluasi dan Analisis Data

Evaluasi program menggunakan desain metode campuran konvergen [14]. Evaluasi kuantitatif menggunakan kuesioner Likert lima butir yang dikembangkan peneliti (skala 5 poin: 1 = Sangat Tidak Setuju hingga 5 = Sangat Setuju) yang diberikan kepada 14 responden pemangku kepentingan pada akhir program. Lima butir kuesioner mengukur: (1) relevansi materi terhadap kebutuhan masyarakat; (2) kecukupan waktu pelaksanaan; (3) kejelasan materi; (4) kualitas pelayanan panitia; dan (5) minat keberlanjutan program. Hal ini menghasilkan 70 titik data respons ($5 \text{ butir} \times 14 \text{ responden}$). Data kuantitatif dianalisis menggunakan statistik deskriptif: frekuensi respons, distribusi persentase, dan Indeks Tingkat Kepuasan (ITK) = $(\text{jumlah respons } S + SS) / \text{total respons} \times 100\%$. Data kualitatif diperoleh melalui observasi lapangan terstruktur, wawancara semi-terstruktur dengan pendidik, dan dokumentasi perilaku anak.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pelaksanaan Kegiatan

Dokumentasi foto kegiatan pengabdian kepada masyarakat ditampilkan pada Gambar 5, yang memperlihatkan tiga sesi utama: pengenalan robotika interaktif, visualisasi sinyal EMG, dan sesi bermain robot dengan kendali EMG serta EOG. Seluruh 20 peserta anak berhasil menyelesaikan empat sesi program secara penuh. Secara kritis, 100% peserta mencapai kendali robot mandiri—didefinisikan sebagai pelaksanaan setidaknya satu gerakan robot terarah yang disengaja menggunakan antarmuka EMG atau EOG dengan bantuan fasilitator minimal—dalam sesi langsung 90 menit, melampaui tolok ukur kompetensi yang telah ditetapkan sebesar 75%.



Gambar 5. Dokumentasi Foto Kegiatan Pengabdian kepada Masyarakat

Dokumentasi observasional mengungkapkan pola preferensi antarmuka yang terdiferensiasi secara perkembangan: anak usia 6–8 tahun menunjukkan kompetensi superior untuk kendali berbasis EMG, konsisten dengan kendali motorik kasar yang lebih matang pada tahap operasional konkret [4]. Sebaliknya, anak usia 4–5 tahun menunjukkan keterlibatan afektif lebih kuat dengan kendali berbasis EOG, menghubungkan kausalitas "ajaib" antropomorfik pada respons robot yang diarahkan mata—pola yang dapat diinterpretasikan dalam kerangka berpikir animistik pra-operasional Piaget [4] dan sejalan dengan temuan Gerosa dan kawan-kawan tentang "faktor keterlibatan" yang tinggi pada anak prasekolah ketika menggunakan robot berfitur unik [9].

Metrik keterlibatan berkelanjutan mendukung efektivitas program: sesi langsung 90 menit tidak menghasilkan satu pun dokumentasi pelepasan diri secara sukarela. Beberapa responden pendidik menyatakan hal ini belum pernah terjadi sebelumnya dalam pengalaman profesional PAUD mereka. Observasi pasca-sesi mendokumentasikan perilaku pencarian teknologi spontan, termasuk minat pada bahan bacaan bertemakan sains dan pertanyaan terkait robot. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menunjukkan bahwa desain pembelajaran berbasis keterlibatan aktif mendorong rasa ingin tahu teknologi yang berkelanjutan pada anak [15].

3.2 Hasil Evaluasi Kuantitatif

Tabel 1 menyajikan hasil evaluasi kuantitatif lengkap dari kuesioner Likert yang diberikan kepada 14 responden pemangku kepentingan. Platform robot beroda dan perangkat sensor EMG/EOG yang digunakan dalam program ditampilkan pada Gambar 6.



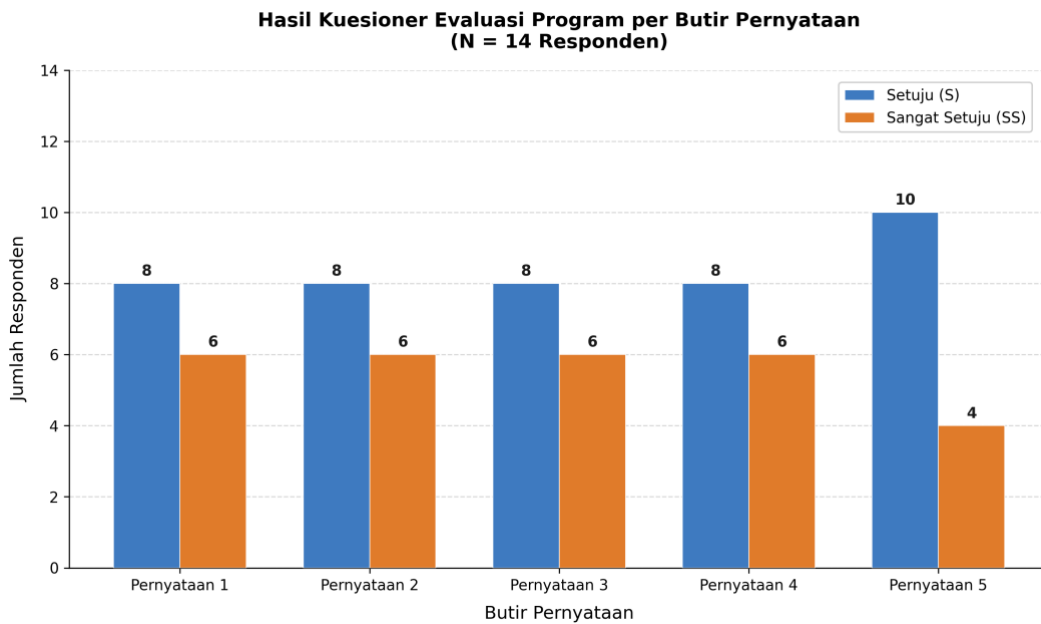
Gambar 6. Platform Robot, Modul ExG dan Perangkat Sensor EMG/EOG yang Digunakan

Analisis terhadap 70 titik data respons, sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 7 yang menyajikan distribusi respons per butir pernyataan, mengungkapkan pola evaluasi yang seragam positif. Indeks Tingkat Kepuasan (ITK) agregat mencapai 100%, dengan respons terdistribusi antara kategori "Setuju" (S = 60,0%; n = 42) dan "Sangat Setuju" (SS = 40,0%; n = 28). Tidak satu pun respons tercatat pada kategori Netral, Tidak Setuju, dan Sangat Tidak Setuju di semua lima butir evaluasi, menunjukkan konsensus mutlak di antara pemangku kepentingan komunitas.

Tabel 1. Hasil Evaluasi Pemangku Kepentingan: Program Permainan Robotik Biopotensial

No.	Butir Pernyataan	STS	TS	N	S	SS	Total
1	Materi kegiatan sesuai dengan kebutuhan masyarakat	0	0	0	8	6	14
2	Waktu pelaksanaan kegiatan relatif sesuai dan cukup	0	0	0	8	6	14
3	Materi yang disajikan jelas dan mudah dipahami	0	0	0	8	6	14
4	Panitia memberikan pelayanan yang baik selama kegiatan	0	0	0	8	6	14
5	Masyarakat berharap kegiatan seperti ini dilanjutkan	0	0	0	10	4	14
Total		0	0	0	42	28	70
Persentase (%)		0,0%	0,0%	0,0%	60,0%	40,0%	100%

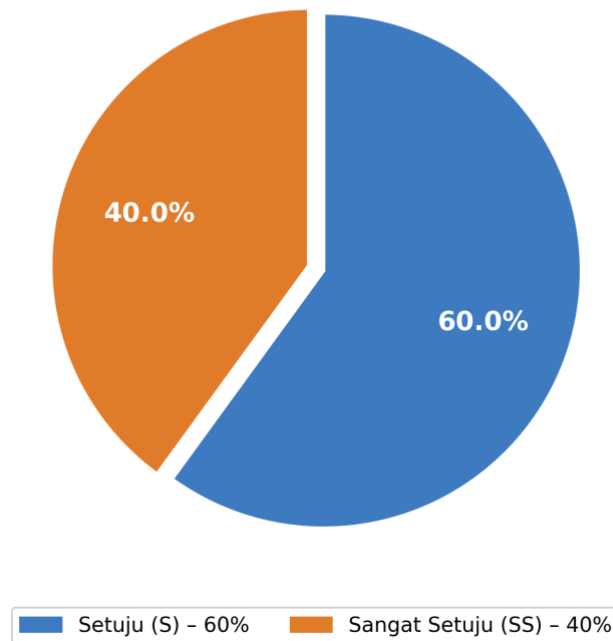
Catatan: STS = Sangat Tidak Setuju; TS = Tidak Setuju; N = Netral; S = Setuju; SS = Sangat Setuju. Data mewakili respons agregat dari N = 14 responden per butir (total 70 titik data respons).



Gambar 7. Diagram Batang Distribusi Respons Kuesioner per Butir Pernyataan (N = 14 Responden)

Gambar 8 menampilkan distribusi total respons kuesioner dalam format diagram lingkaran, yang secara visual menegaskan bahwa seluruh 70 titik data terdistribusi hanya pada dua kategori positif. Butir 1–4 masing-masing mencatat 8 respons Setuju (57,1%) dan 6 Sangat Setuju (42,9%). Butir 5 (minat keberlanjutan) mencatat 10 respons Setuju (71,4%) dan 4 Sangat Setuju (28,6%), pola yang konsisten dengan tantangan komunikasi konsep rekayasa biomedis kepada pemangku kepentingan awam.

**Distribusi Total Respons Kuesioner
(N = 70 Titik Data)**



Gambar 8. Diagram Lingkaran Distribusi Total Respons Kuesioner (N = 70 Titik Data)

3.3 Dampak Kegiatan terhadap Mitra

Capaian kegiatan ini memberi dampak nyata pada tiga dimensi. Pertama, dimensi pengetahuan: seluruh peserta anak memahami hubungan antara gerakan tubuh dan respons robot, sebuah konsep HMI yang sebelumnya sama sekali tidak mereka kenal. Kedua, dimensi keterampilan: 100% peserta mencapai kendali robot mandiri, melampaui tolok ukur yang ditetapkan. Ketiga, dimensi sikap dan perilaku: observasi mendokumentasikan perubahan nyata menuju rasa ingin tahu teknologi yang berkelanjutan, tercermin dari pertanyaan spontan anak-anak mengenai cara kerja robot. Pemangku kepentingan dewasa—pendidik dan orang tua—juga melaporkan peningkatan wawasan tentang potensi teknologi biomedis sebagai media pendidikan PAUD.

3.4 Pembahasan

Temuan ini berkontribusi pada tiga domain teoritis yang saling bersinggungan. Pertama, dalam robotika pendidikan, program ini memberikan bukti terdokumentasi kelayakan antarmuka robotik berbasis biopotensial pada populasi PAUD, memperluas paradigma interaksi di luar tombol dan layar sentuh konvensional sebagaimana diidentifikasi Ching dan Hsu dalam tinjauan sistematis mereka [15]. Sifat terwujud dari kendali robot berbasis EMG dan EOG selaras dengan prinsip pembelajaran aktif yang berpijak pada pengalaman tubuh—sebuah modalitas yang terbukti lebih efektif bagi anak usia dini dibandingkan instruksi abstrak.

Kedua, dalam pendidikan rekayasa biomedis, program ini menunjukkan bahwa konsep dasar pemrosesan sinyal fisiologis—pembangkitan, deteksi, ambang batas, dan translasi—dapat diperkenalkan secara bermakna kepada anak semuda empat tahun melalui desain pengalaman langsung. Tinjauan Xiong dan kawan-kawan mengenai antarmuka HMI berbasis EMG menegaskan bahwa kemudahan akses teknologi ini membuatnya cocok untuk berbagai konteks pengguna, termasuk anak-anak [16]. Ketiga, dalam kebijakan pendidikan STEM, Budiyanto dan kawan-kawan membuktikan bahwa robotika edukatif yang terintegrasi dengan kerangka STEM secara konsisten menghasilkan peningkatan berpikir komputasional [13], sejalan dengan bukti empiris yang diperoleh program ini.

Perbandingan dengan program pengabdian sebelumnya dari tim yang sama—di SMA [10] dan SMP [11]—mengungkapkan diferensial keterlibatan afektif yang menarik: anak usia dini menunjukkan intensitas keterlibatan yang lebih tinggi, durasi atensi yang lebih panjang, dan perilaku pencarian pengetahuan spontan yang lebih kuat dibanding peserta usia sekolah menengah. Pola ini mengisyaratkan adanya jendela afektif

yang secara khusus reseptif terhadap pengenalan teknologi pada usia 4–8 tahun—temuan yang memiliki implikasi signifikan bagi perencanaan jalur tenaga kerja STEM Indonesia.

3.5 Tindak Lanjut Program

Berdasarkan hasil yang terdokumentasi, empat rekomendasi tindak lanjut dikemukakan. Pertama, pengembangan kit robotika biopotensial portabel dan hemat biaya yang dirancang untuk dioperasikan pendidik tanpa keahlian teknis khusus, guna memungkinkan adopsi berkelanjutan di luar intervensi satu sesi. Kedua, implementasi mendatang sebaiknya menawarkan pilihan antarmuka EMG dan EOG dengan alokasi yang distratifikasi berdasarkan usia peserta untuk mengoptimalkan keterlibatan individual. Ketiga, diperlukan penilaian tindak lanjut longitudinal untuk mengukur dampak jangka panjang terhadap minat STEM dan kinerja akademik peserta. Keempat, replikasi program di berbagai konteks PAUD sosioekonomi berbeda di Indonesia akan memungkinkan penilaian hambatan skalabilitas terkait ketersediaan infrastruktur dan kesiapan pendidik.

4. Kesimpulan

Program pengabdian kepada masyarakat ini telah merancang, melaksanakan, dan mengevaluasi intervensi baru berupa permainan robotik berbasis sinyal biopotensial (EMG dan EOG) sebagai media pembelajaran HMI untuk anak usia dini di TPA/TPQ Al Istiqomah Sukabirus, Bandung, Jawa Barat. Capaian utama program adalah 100% peserta anak (N = 20) berhasil mengendalikan robot secara mandiri dalam sesi 90 menit, melampaui tolok ukur kompetensi 75% yang ditetapkan, dan evaluasi 14 pemangku kepentingan komunitas menghasilkan ITK 100% tanpa satu pun respons negatif. Dampak yang dapat diukur mencakup peningkatan pemahaman konsep HMI, pengembangan keterampilan kendali motorik dalam konteks teknologi, serta perubahan sikap menuju rasa ingin tahu teknologi yang berkelanjutan.

Kontribusi teoritis utama program adalah pembuktian empiris bahwa antarmuka robotik berbasis biopotensial yang sebelumnya terbatas pada konteks klinis dan penelitian lanjutan dapat berfungsi sebagai alat pembelajaran yang efektif secara pedagogis dan sesuai perkembangan untuk anak usia empat tahun ke atas, ketika tertanam dalam kerangka instruksional berbasis permainan yang dirancang dengan baik. Program ini menyediakan model tervalidasi untuk penjangkauan teknologi universitas-komunitas yang dapat direplikasi. Penelitian mendatang perlu mengatasi penilaian dampak longitudinal, replikasi lintas konteks sosioekonomi, dan optimasi biaya platform biopotensial untuk mewujudkan potensi penuh dari inovasi pedagogis ini dalam skala yang lebih luas.

Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Telkom atas dukungan institusional dan pendanaan program melalui mandat pengabdian kepada masyarakat dalam kerangka Tridharma Perguruan Tinggi. Apresiasi disampaikan kepada pimpinan, pendidik, orang tua, wali, dan para peserta muda TPA/TPQ Al Istiqomah Sukabirus yang antusiasmenya merupakan bukti paling nyata dari keberhasilan program. Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1] J. Su dan W. Yang, "A systematic review of integrating computational thinking in early childhood education," *Computers and Education Open*, vol. 4, Art. 100122, 2023. doi: 10.1016/j.caeo.2023.100122
- [2] Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia, "Statistik Pendidikan Anak Usia Dini 2022/2023," Jakarta, Indonesia: Pusat Data dan Teknologi Informasi, 2023. [Online]. Tersedia: <https://pusdatin.kemdikbud.go.id>
- [3] S. Alonso-García, I. Aznar-Díaz, M. P. Cáceres-Reche, J. M. Trujillo-Torres, dan J. M. Romero-Rodríguez, "Enhancing computational thinking in early childhood education with robotics: A systematic review and meta-analysis," *Heliyon*, vol. 10, no. 13, Art. e33249, 2024. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33249
- [4] J. Piaget, *The Psychology of Intelligence*. New York, NY, USA: Routledge, 2001.
- [5] L. S. Vygotsky, *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes*. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1978.

-
- [6] F. Ouyang dan W. Xu, "The effects of educational robotics in STEM education: A multilevel meta-analysis," *International Journal of STEM Education*, vol. 11, no. 1, Art. 7, 2024. doi: 10.1186/s40594-024-00469-4
- [7] D. Xiong, D. Zhang, X. Zhao, dan Y. Zhao, "Deep learning for EMG-based human-machine interaction: A review," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 8, no. 3, hal. 512–533, 2021. doi: 10.1109/JAS.2021.1003865
- [8] F. Wang, X. Li, dan J. Pan, "A human-machine interface based on an EOG and a gyroscope for humanoid robot control and its application to home services," *Computational Intelligence and Neuroscience*, vol. 2022, Art. 1650387, 2022. doi: 10.1155/2022/1650387
- [9] A. Gerosa, V. Koleszar, G. Tejera, L. Gómez-Sena, dan A. Carboni, "Educational robotics intervention to foster computational thinking in preschoolers: Effects of children's task engagement," *Frontiers in Psychology*, vol. 13, Art. 904761, 2022. doi: 10.3389/fpsyg.2022.904761
- [10] T. W. Purboyo dkk., "Pengenalan robotika sebagai media pengembangan keterampilan berpikir komputasional pada siswa Sekolah Menengah Atas Alam Bandung," *Almufi Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 4, no. 2, hal. 248–255, 2024.
- [11] T. W. Purboyo, D. Naufal, M. D. Putra, R. A. Komara, R. N. Nasywa, dan S. M. Naufal, "Workshop koding robotik dan implementasi kendali robot menggunakan sinyal tubuh bagi siswa dan guru SMPN 17 Bandung," *Almufi Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, vol. 5, no. 2, hal. 154–162, 2025.
- [12] M. F. Zakariyah, W. Yulianingsih, L. N. Hidayah, dan A. Karima, "Implementation of universal design for learning (UDL) in digital learning media: A systematic review," *Jurnal Pendidikan dan Pemberdayaan Masyarakat*, vol. 11, no. 2, hal. 176–188, 2024. doi: 10.21831/jppm.v11i2.83253
- [13] C. W. Budiyanto, K. Fenyvesi, A. Lathifah, dan R. A. Yuana, "Computational thinking development: Benefiting from educational robotics in STEM teaching," *European Journal of Educational Research*, vol. 11, no. 4, hal. 1997–2012, 2022. doi: 10.12973/eu-jer.11.4.1997
- [14] J. W. Creswell dan V. L. Plano Clark, *Designing and Conducting Mixed Methods Research*, 3rd ed. Thousand Oaks, CA, USA: SAGE Publications, 2018.
- [15] Y.-H. Ching dan Y.-C. Hsu, "Educational robotics for developing computational thinking in young learners: A systematic review," *TechTrends*, vol. 67, hal. 444–458, 2023. doi: 10.1007/s11528-022-00789-4
- [16] D. Xiong dkk., "Intuitive human-robot-environment interaction with EMG signals: A review," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 11, 2024. doi: 10.1109/JAS.2024.124329