



Kecerdasan Buatan Agentik dalam Onkologi: Dari Tumor Board Virtual Menuju Pengobatan Kanker yang Dipersonalisasi

Pratiwi Nurul^{1*}, Hasanah²

^{1*2} Universitas Brawijaya, Indonesia

Alamat: Jalan Veteran No.10-11, Ketawanggede, Kecamatan Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur

Email : pratiwinurul@brawijaya.ac.id¹, Hasanah@brawijaya.ac.id²

Korespondensi penulis: pratiwinurul@brawijaya.ac.id

Abstract Artificial intelligence is moving beyond the boundaries of the digital world into the physical realm. Physical AI and embodied intelligence represent the new frontier of AI research, where intelligent systems not only process data but also interact directly with the real environment through physical bodies (embodiment). This review examines the crucial role of advanced sensors and battery-free systems in realizing the vision of Physical AI. Through an analysis of recent developments in advanced sensing, energy-efficient computing architectures, and battery-free systems, this study identifies that sensors serve as the "data gateway" connecting the physical world with intelligence models. The findings indicate that textile-based flexible e-skin and proprioceptive sensorimotor systems have achieved gesture recognition accuracy exceeding 98% and untrained object detection with a deviation of 0.49 cm at 5.5 cm range, demonstrating generalization capabilities that surpass simple pattern recognition. Layered inference architecture—from reflex layers to global policy levels promises dramatic energy consumption reduction by mapping each event to the lowest inference layer that can act safely and correctly, enabling sustainable battery-free operation through energy harvesting. This review concludes that the future of Physical AI depends on the synergy between advanced sensors capable of capturing multimodal physical data (pressure, temperature, texture, proprioception) and battery-free systems that enable autonomous, sustainable, and large-scale distributed operations.

Keywords: Physical AI, embodied intelligence, advanced sensors, battery-free systems, e-skin, energy-efficient computing, Internet of Things

Abstrak Kecerdasan buatan bergerak melampaui batas-batas dunia digital menuju ranah fisik. Physical AI dan embodied intelligence menjadi frontier baru penelitian AI, di mana sistem cerdas tidak hanya memproses data tetapi juga berinteraksi secara langsung dengan lingkungan nyata melalui badan fisik (embodiment). Tinjauan ini mengkaji peran krusial sensor canggih dan sistem tanpa baterai dalam mewujudkan visi Physical AI. Melalui analisis terhadap perkembangan terkini dalam sensorik canggih, arsitektur komputasi hemat energi, dan sistem tanpa baterai, penelitian ini mengidentifikasi bahwa sensor merupakan "gerbang data" yang menghubungkan dunia fisik dengan model kecerdasan. Temuan menunjukkan bahwa e-skin fleksibel berbasis tekstil dan sensorimotorik proprioseptif telah mencapai akurasi pengenalan gestur >98% dan deteksi objek tak terlatih dengan deviasi 0,49 cm pada rentang 5,5 cm, menandakan kemampuan generalisasi yang melampaui pengenalan pola sederhana. Arsitektur komputasi bertingkat (layered inference architecture) dengan lapisan refleks hingga tingkat kebijakan global menjanjikan pengurangan konsumsi energi dramatis dengan memetakan setiap kejadian ke lapisan inferensi paling rendah yang dapat bertindak aman dan benar, memungkinkan operasi tanpa baterai yang berkelanjutan melalui pemanenan energi. Telaah ini menyimpulkan bahwa masa depan Physical AI bergantung pada sinergi antara sensor canggih yang mampu menangkap data fisik multimodal (tekanan, suhu, tekstur, proprioepsi) dan sistem tanpa baterai yang memungkinkan operasi mandiri, berkelanjutan, dan terdistribusi dalam skala besar.

Kata Kunci: Physical AI, embodied intelligence, sensor canggih, sistem tanpa baterai, e-skin, komputasi hemat energi, Internet of Things.

1. LATAR BELAKANG

1.1. Dari AI di Layar menuju AI yang "Berbadan"

Kecerdasan buatan selama ini identik dengan dunia digital: memproses teks, mengenali gambar, menghasilkan video, dan menganalisis data. Namun, frontier penelitian AI kini bergeser secara fundamental menuju apa yang disebut sebagai Physical AI sistem cerdas yang tidak hanya "berpikir" tetapi juga "bertindak" di dunia fisik melalui badan (*embodiment*).

Seperti yang disampaikan oleh Jensen Huang dari NVIDIA pada CES 2026, *"The ChatGPT moment for Physical AI is nearly here"*. Pernyataan ini menangkap titik balik yang lebih luas dalam bagaimana AI bergerak keluar dari layar dan masuk ke dunia fisik. Perusahaan seperti Hyundai Motor Group bahkan mendeklarasikan transformasi menjadi "Physical AI Solutions Company," menunjukkan bahwa transisi ini bukan sekadar tren penelitian tetapi juga arah strategis industri.

1.2. Definisi dan Karakteristik Physical AI

Physical AI merujuk pada agen cerdas yang mampu merasakan lingkungan fisik dan melakukan tindakan seperti manusia di luar antarmuka digital. Berbeda dengan generative AI yang unggul dalam pembuatan konten dan analisis data, Physical AI mengkhususkan diri dalam interaksi lingkungan dan tugas kontrol gerakan.

Tiga ciri utama *Physical AI* menurut Ma Xiaojian dari *Beijing Institute for General Artificial Intelligence* adalah: (1) kemampuannya dibangun di atas data interaksi fisik dunia nyata; (2) ia menggabungkan pemahaman tentang dunia fisik; dan (3) ia dapat digunakan pada entitas fisik dunia nyata.

1.3. Tujuan Tinjauan

Tinjauan ini bertujuan untuk: (1) mengkaji peran sensor canggih sebagai "gerbang data" yang menghubungkan dunia fisik dengan model AI; (2) menganalisis arsitektur komputasi hemat energi dan sistem tanpa baterai sebagai fondasi keberlanjutan Physical AI; dan (3) mengidentifikasi tantangan dan peluang menuju implementasi Physical AI yang luas dan berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1. Sensor Canggih: Gerbang Data untuk Physical AI

2.1.1 E-Skin dan Sensorik Multimodal

Salah satu terobosan paling signifikan dalam Physical AI adalah pengembangan *electronic skin (e-skin)* yang memungkinkan robot merasakan sentuhan sensorik yang selama ini hilang dalam pelatihan AI. E-skin fleksibel yang dikembangkan oleh Institute of Flexible Electronics Technology di Zhejiang dapat mendeteksi tekanan, suhu, dan tekstur secara real-time, memberikan umpan balik gaya pada frekuensi 1 kilohertz dengan resolusi 2 persen.

Lebih lanjut, pengembangan Textile Sensor Matrix (TSM) berbasis tekstil yang dilaporkan di ScienceDirect menunjukkan bahwa integrasi sensorik ke dalam kain dapat mencapai densitas 48 sensing pixel per cm^2 dan akurasi pengenalan objek hingga 97,02%. Keunggulan utama pendekatan ini adalah integrasi pemanenan energi (*energy harvesting*) sebesar $\sim 14 \mu\text{W cm}^{-2}$, yang memungkinkan pengoperasian tanpa baterai dan mengatasi *trade-off* antara kenyamanan dan keandalan yang telah lama menjadi tantangan dalam sistem wearable.

2.1.2 Sensor Proprioseptif dan Generalisasi

Pendekatan berbeda untuk Physical AI menggunakan sensor proprioseptif sensor yang meniru mekanisme persepsi tubuh manusia melalui pengukuran fleksi sendi. Penelitian yang dipublikasikan di ScienceDirect menunjukkan bahwa hanya dengan sepuluh sensor sederhana berbasis karbon-elastomer dan jaringan saraf 1D-CNN, sistem dapat mengenali 26 gestur bahasa isyarat dengan akurasi >98%.

Yang lebih penting, sistem ini menunjukkan kemampuan generalisasi yang melampaui pengenalan pola sederhana: ia dapat memprediksi ukuran bola yang tidak terlatih (5,5 cm) dengan akurasi $5,54 \pm 0,49 \text{ cm}$. Kemampuan untuk menginferensi "makna" dari data melalui generalisasi ini merupakan langkah penting menuju AI yang benar-benar memahami dunia fisik, bukan sekadar mengklasifikasikan pola yang telah dilihat sebelumnya.

2.2. Arsitektur Komputasi Hemat Energi dan Sistem Tanpa Baterai

2.2.1 Lapisan Inferensi Bertingkat

Physical AI menghadapi tantangan mendasar: bagaimana menjalankan kecerdasan pada perangkat dengan sumber daya energi terbatas, terutama ketika diterapkan pada jaringan sensor terdistribusi skala besar. Arsitektur komputasi

bertingkat (*layered inference architecture*) muncul sebagai solusi, dengan prinsip bahwa "*intelligence grows from constraint*" kecerdasan justru tumbuh dari keterbatasan.

Kerangka yang diusulkan dalam preprints.org mengidentifikasi enam lapisan inferensi, mulai dari kopling fisik langsung (lapisan 0, tanpa daya) hingga kebijakan global berbasis cloud (lapisan 5) . Prinsip kunci dari arsitektur ini adalah "mendistribusikan setiap kejadian ke lapisan paling murah yang dapat bertindak aman dan benar".

Tabel 2.1 Lapisan Inferensi dalam Arsitektur Komputasi Bertingkat

Lapisan	Jenis Inferensi	Implementasi	Energi/Latensi
0	Kopling fisik langsung	Material/struktur mekanis	Pasif/nol daya
1	Ambang biner	Komparator/baris silang biner	pJ-nJ, ns-us
2	Koordinasi analog	Op-amp, logika analog	nJ, us
3	Refleks digital deterministik	MCU, CPLD, FPGA	uJ, us-ms
4	Kebijakan lokal	Edge NPU, DSP	mJ, ms-s
5	Kebijakan global	Cloud, GPU cluster	J+, detik-menit

Lapisan refleks (lapisan 1-3) berfungsi sebagai "filter" yang mengubah perturbasi fisik frekuensi tinggi menjadi peristiwa jarang dan tindakan lokal segera, sementara lapisan kebijakan (lapisan 4-5) melakukan lebih sedikit kerja real-time tetapi tetap aman karena peta aturannya dibatasi dan dipelihara oleh kebijakan . Arsitektur mutual protection loop ini memungkinkan penghematan energi dramatis dengan menonaktifkan komponen komputasi yang lebih berat ketika tidak diperlukan.

2.2.2 Pengukuran EROIE: Energi yang Dikembalikan vs Energi yang Diinvestasikan

Untuk mengukur efektivitas arsitektur komputasi, dikembangkan metrik Energy Returned on Invested Energy for Embodied Intelligence (EROIE) . Metrik ini menghitung rasio energi berguna yang dilestarikan atau disampaikan oleh arsitektur

kontrol embodied dibagi dengan total energi yang diinvestasikan untuk merasakan, memutuskan, berkomunikasi, beralih, dan memelihara tindakan kontrol tersebut .

EROIE memungkinkan perbandingan kuantitatif antara arsitektur berbeda dan memberikan dasar untuk optimasi desain yang berfokus pada keberlanjutan energi faktor kritis untuk sistem tanpa baterai yang mengandalkan pemanenan energi,

3. METODE PENELITIAN

3.1. Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur (*literature review*) atau tinjauan pustaka. Metode ini dipilih karena bertujuan untuk mengumpulkan, menganalisis, dan merangkum berbagai informasi dari sumber-sumber tertulis yang sudah ada tentang Physical AI, sensor canggih, dan sistem tanpa baterai. Studi literatur sangat cocok untuk topik yang sedang berkembang pesat seperti Physical AI, karena memungkinkan peneliti mendapatkan gambaran luas tanpa harus melakukan eksperimen langsung.

3.2. Sumber Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis sumber data:

3.2.1 Sumber Primer

- a. Artikel jurnal ilmiah dari penerbit terkemuka (ScienceDirect, IEEE Xplore, MDPI, Springer, Nature)
- b. Prosiding konferensi internasional (ICRA, IROS, NeurIPS, CVPR)
- c. Paper yang dipublikasikan di arXiv (pra-publikasi)
- d. Laporan teknis dari lembaga riset dan industri

3.2.2 Sumber Sekunder

- a. Buku teks tentang AI dan robotika.
- b. Artikel berita dan opini dari sumber terpercaya.
- c. Dokumentasi produk dan siaran pers dari perusahaan teknologi

3.3. Kata Kunci Pencarian

Untuk menemukan literatur yang relevan, peneliti menggunakan kombinasi kata kunci berikut:

Kelompok 1 (Konsep Utama):

- a. *"Physical AI" OR "Embodied AI" OR "Embodied Intelligence" OR "Physical Artificial Intelligence"*

Kelompok 2 (Sensor dan Persepsi):

- a. *"Advanced sensors" OR "e-skin" OR "electronic skin" OR "tactile sensing" OR "proprioceptive sensor"*
- b. *"Multimodal sensing" OR "wearable sensors" OR "textile sensors"*

Kelompok 3 (Energi dan Komputasi):

- a. *"Battery-free" OR "energy harvesting" OR "low-power computing" OR "edge AI"*
- b. *"Layered inference" OR "reflex-policy architecture" OR "energy-efficient AI"*

Kelompok 4 (Aplikasi):

- a. *"Human-robot interaction" OR "robotics" OR "wearable technology" OR "smart sensing"*

Strategi Pencarian:

- a. Menggabungkan kata kunci dari kelompok berbeda menggunakan operator boolean AND dan OR
- b. Contoh: *("Physical AI" OR "Embodied AI") AND ("e-skin" OR "tactile sensing") AND ("battery-free" OR "energy harvesting")*

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Peran Sensor Canggih sebagai Gerbang Data Physical AI

Salah satu wawasan paling mendasar dari tinjauan ini adalah bahwa sensor bukan sekadar aksesoris periferi untuk Physical AI, tetapi "titik akses data" yang menghubungkan dunia nyata dengan model kecerdasan. Seperti yang diungkapkan oleh RoboSense, *"high-precision 3D perception is the core data source for the continuous iteration of Physical AI"*.

Data yang dibutuhkan Physical AI secara fundamental berbeda dari data teks dan gambar di era internet. *"Traditional video data is actually relatively rough for embodied large models. They require a more complete spatial data structure and more accurate depth information"*. Perbedaan ini menjelaskan mengapa sensor canggih mulai dari LiDAR solid-state hingga e-skin multimodal menjadi komponen kritis dalam ekosistem Physical AI.

Implementasi e-skin di pusat pelatihan embodied AI menunjukkan bagaimana sensor canggih dapat menjadi "pipa data" berkelanjutan: fasilitas tersebut dapat memproduksi dan memasang hingga 1.000 intelligent sensing grippers per bulan, mendukung pelatihan robot skala besar untuk tugas dunia nyata.

4.2. Arsitektur Komputasi dan Sistem Tanpa Baterai

Perkembangan dalam arsitektur komputasi menunjukkan bahwa efisiensi energi dan otonomi adalah dua sisi mata uang yang sama dalam Physical AI. Komponen komputasi kini mulai menyamakan efisiensi dengan otonomi: robot yang mengonsumsi daya lebih sedikit dapat beroperasi lebih lama, membawa baterai lebih kecil, dan mencapai siklus hidup penerapan yang lebih berkelanjutan.

Pendekatan lapisan inferensi bertingkat menawarkan jalan menuju sistem tanpa baterai yang sesungguhnya. Dengan memetakan setiap kejadian ke lapisan inferensi paling rendah yang dapat bertindak aman dan benar, energi yang diinvestasikan untuk komputasi dapat dikurangi secara dramatis. Lapisan refleksi (lapisan 0-3) berfungsi sebagai "filter" yang mengubah perturbasi fisik frekuensi tinggi menjadi peristiwa jarang dan tindakan lokal segera, memungkinkan lapisan kebijakan yang lebih berat untuk tetap tidak aktif atau dalam mode daya rendah.

4.3. Dari Sensor ke Kecerdasan: Generalisasi dan Pemahaman Semantik

Sensor canggih tidak hanya menyediakan data untuk model AI; mereka juga memungkinkan bentuk kecerdasan yang lebih dalam generalisasi dan pemahaman semantik. Kemampuan sistem proprioseptif untuk memprediksi ukuran objek yang tidak terlatih menunjukkan bahwa Physical AI dapat melampaui pengenalan pola sederhana menuju inferensi kausal.

Temuan ini sejalan dengan visi yang lebih luas tentang bagaimana Physical AI akan berkembang. Seperti yang diidentifikasi dalam tinjauan KCI, pendekatan "*pre-training and post-training*" pada video internet dan data manipulasi lintas robot, pendekatan "*real-simulation-real*" yang merekonstruksi dunia fisik ke lingkungan simulasi, dan pendekatan pemrograman model bahasa besar akan secara bertahap menyatu dalam data, simulasi, dan penalaran model.

4.4. Tantangan Menuju Implementasi Luas

Meskipun kemajuan yang menggembirakan, Physical AI masih menghadapi tantangan signifikan menuju implementasi luas:

- a. Daya Tahan Perangkat Keras: Tangan robot dengan tingkat kebebasan tinggi saat ini hanya bertahan 300.000-500.000 siklus, sementara robot gudang perlu melakukan 8.000-10.000 pegangan per hari berarti dapat rusak setelah sekitar satu bulan penggunaan.
- b. Bridging Sim-to-Real: Perbedaan antara aturan fisik yang dibangun dalam lingkungan simulasi dan kondisi kerja nyata secara langsung menurunkan

tingkat keberhasilan tugas seperti pegangan kompleks dan inspeksi urutan panjang setelah robot meninggalkan ruang pameran.

- c. Standarisasi Data: Data video tradisional terlalu kasar untuk model embodied large. Diperlukan struktur data spasial yang lebih lengkap dan informasi kedalaman yang lebih akurat, yang menempatkan tuntutan tinggi pada sensor.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

- a. *Physical AI* menandai pergeseran paradigma dari AI berbasis data menuju AI yang berinteraksi langsung dengan dunia fisik. Sensor canggih bukan lagi aksesori tetapi "titik akses data" yang menghubungkan dunia nyata dengan model kecerdasan.
- b. Sensor canggih seperti e-skin dan sistem proprioseptif mencapai akurasi tinggi dan kemampuan generalisasi pengenalan gestur >98% dan prediksi objek tak terlatih dengan deviasi 0,49 cm.
- c. Arsitektur komputasi bertingkat dengan lapisan refleks hingga kebijakan global menawarkan jalan menuju sistem tanpa baterai yang berkelanjutan, dengan prinsip memetakan setiap kejadian ke lapisan inferensi paling rendah yang dapat bertindak aman dan benar.
- d. Tantangan signifikan tetap ada dalam daya tahan perangkat keras, bridging sim-to-real, dan standarisasi data, yang memerlukan penelitian dan pengembangan berkelanjutan.

5.2. Saran

Bagi Peneliti:

- a. Fokus pada integrasi sensor canggih dengan arsitektur komputasi hemat energi untuk menciptakan sistem Physical AI yang mandiri dan berkelanjutan.
- b. Kembangkan metode untuk meningkatkan daya tahan perangkat keras, terutama aktuator dan sensor, untuk aplikasi industri skala besar.
- c. Eksplorasi pendekatan yang menggabungkan "*pre-training*" pada data dunia nyata dengan "*post-training*" melalui reinforcement learning di dunia nyata.

Bagi Pengembang Teknologi:

- a. Investasikan dalam pengembangan sensor solid-state yang andal dan berbiaya rendah untuk memperluas adopsi Physical AI.
- b. Bangun ekosistem data yang memungkinkan pengumpulan data interaksi fisik dunia nyata secara berkelanjutan.
- c. Kembangkan standar interoperabilitas untuk sensor dan sistem komputasi dalam ekosistem Physical AI.

DAFTAR REFERENSI

- Wevolver. (2026). Chapter 5: Physical AI & Embodied AI. The 2026 Edge AI Technology Report.
- Lin, X., et al. (2026). Human-AI Co-Embodied Intelligence for Scientific Experimentation and Manufacturing. arXiv:2511.02071v2.
- KCI. (2026). Physical AI: The Convergence of Foundation Models, Sim-to-Real Transfer, and Embodied Intelligence. Korean Citation Index.
- IKCEST. (2026). Electronic skin: Bridging the sensory gap in embodied AI. International Knowledge Centre for Engineering Sciences and Technology.
- Preprints.org. (2026). Physical AI as Seen from Nature: A Reflex-Policy Layered Architecture for Energy-Proportional Embodied Intelligence.
- NVIDIA. (2025). World Simulation with Video Foundation Models for Physical AI. Cosmos-Predict2.5.
- IKCEST. (2026). Physical AI gains traction in tech industry. International Knowledge Centre for Engineering Sciences and Technology.
- RoboSense. (2026). RoboSense Unveils 2nd-Gen All-Solid-State Perception Platform. 36Kr.
- TARS. (2026). TARS Debuts DexHand at ICRA 2026. PRNewswire.
- ScienceDirect. (2025). Energy-efficient, high-accuracy sensing in loose-fitting textile sensor matrix for LLM-enabled human-robot collaboration. Materials Today Physics.
- FutureX. (2026). Physical AI Daily Issue 69. DEV Community.
- ACM Digital Library. (2026). Artificial Tripartite Intelligence: A Bio-Inspired, Sensor-First Architecture for Physical AI. ACM.
- TARS. (2026). TARS Debuts at WAIC 2026 as AWE Embodied Foundation Model Wins SAIL Award. EQS News.

- ScienceDirect. (2025). Realizing physical AI through a proprioceptive wearable interface. *Sensors and Actuators A: Physical*.
- Lu, Q., Lei, T., Xu, J., & Qin, J. (2025). Principles, applications, and challenges of E-skin: A mini-review. *Chemical Engineering Journal*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894725077757>
- Sitti, M. (2021). Physical intelligence as a new paradigm. *Nature*, 598(7881), 408-412.
- Miriyev, A., & Kova, M. (2020). Physical artificial intelligence: A new era for robotic research and education. *Nature Machine Intelligence*, 2(1), 20-28.