



Perangkat Keras Cerdas dan Sistem Embedded Generasi Baru: *Transistor Fleksibel Ultra-Tipis untuk Sistem Neuromorfik Wearable* serta Sel Saraf Tiruan Berbasis *Memristor* dan Komputasi *In-Memory*

Sasikirana Ayu^{1*}, Putri Lestari²

^{1*2} Universitas Tanjungpura, Indonesia

Alamat: Jalan Profesor Dokter H. Hadari Nawawi, Bansir Laut, Kec. Pontianak Tenggara, Kota Pontianak, Kalimantan Barat

Email : sasikiranaayu@Untan.ac.id¹, putrilestari@Untan.ac.id²

Korespondensi penulis: sasikiranaayu@Untan.ac.id

Abstract The rapid development of artificial intelligence (AI) and edge computing demands hardware that is not only intelligent but also flexible, energy-efficient, and integrable into wearable devices. This study examines recent innovations in ultra-thin flexible transistors and memristor-based neuromorphic systems that enable in-memory computing for wearable applications. Through a systematic literature review of recent developments, this research identifies that flexible transistors based on 2D materials and oxide semiconductors achieve high electron mobility on flexible substrates, paving the way for wearable neuromorphic systems. Memristors, as key components, can mimic biological synaptic functions through synaptic plasticity, enabling parallel and energy-efficient processing that mimics the human brain. Furthermore, on-chip learning systems with memristor-based artificial neurons equipped with short-term plasticity, long-term plasticity, and spike-timing dependent plasticity (STDP) mechanisms demonstrate significant potential for pattern classification and learning applications. The integration of backend-of-line (BEOL) fabricated flexible transistors with memristor-based artificial neurons opens pathways for next-generation embedded systems that can be used in wearable devices for healthcare, pattern recognition, and human-machine interaction. This research concludes that the synergy between ultra-thin flexible transistors, memristors, and in-memory computing offers a robust foundation for realizing intelligent and energy-efficient wearable neuromorphic systems, although challenges in scalability and integration remain.

Keywords: flexible transistors, neuromorphic, memristors, in-memory computing, wearable electronics, artificial neurons, synaptic plasticity

Abstrak Perkembangan pesat kecerdasan buatan (AI) dan komputasi edge membutuhkan perangkat keras yang tidak hanya cerdas tetapi juga fleksibel, hemat energi, dan dapat diintegrasikan ke dalam perangkat wearable. Penelitian ini mengkaji inovasi terkini dalam transistor fleksibel ultra-tipis dan sistem neuromorfik berbasis memristor yang memungkinkan komputasi in-memory untuk aplikasi wearable. Melalui tinjauan literatur sistematis terhadap perkembangan terkini, penelitian ini mengidentifikasi bahwa transistor fleksibel berbahan 2D dan oxide semiconductor mampu mencapai mobilitas elektron yang tinggi pada substrat fleksibel, membuka jalan bagi sistem neuromorfik yang dapat dikenakan. Memristor, sebagai komponen kunci, dapat meniru fungsi sinaps biologis melalui plastisitas sinaptik, memungkinkan pemrosesan paralel dan efisien energi yang meniru cara kerja otak manusia. Di sisi lain, sistem on-chip learning dengan sel saraf tiruan berbasis memristor yang dilengkapi mekanisme short-term plasticity dan long-term plasticity, serta spike-timing dependent plasticity (STDP), menunjukkan potensi besar untuk aplikasi klasifikasi pola dan pembelajaran. Integrasi fabrikasi backend-of-line (BEOL) transistor fleksibel dengan sel saraf tiruan memristor membuka jalan bagi sistem embedded generasi baru yang dapat digunakan dalam perangkat wearable untuk aplikasi kesehatan, pengenalan pola, dan interaksi manusia-mesin. Penelitian ini menyimpulkan bahwa sinergi antara transistor fleksibel ultra-tipis, memristor, dan komputasi in-memory menawarkan fondasi yang kuat untuk mewujudkan sistem neuromorfik wearable yang cerdas dan efisien energi, meskipun masih menghadapi tantangan skalabilitas dan integrasi.

Kata Kunci: transistor fleksibel, neuromorfik, memristor, komputasi in-memory, wearable electronics, sel saraf tiruan, plastisitas sinaptik

1. LATAR BELAKANG

Ledakan aplikasi kecerdasan buatan (AI) dan komputasi edge telah menciptakan permintaan yang belum pernah terjadi sebelumnya untuk perangkat keras yang tidak hanya cerdas tetapi juga hemat energi, kompak, dan dapat diintegrasikan ke dalam berbagai faktor bentuk. Perangkat keras konvensional berbasis silikon, meskipun sangat canggih, memiliki keterbatasan dalam hal fleksibilitas fisik dan efisiensi energi untuk aplikasi tertentu terutama dalam domain perangkat yang dapat dikenakan (*wearable devices*), perangkat *Internet of Things* (IoT), dan sistem tertanam yang harus beroperasi di lingkungan dengan sumber daya terbatas. Kebutuhan akan perangkat keras yang mampu menjalankan algoritma AI di edge (edge AI) dengan konsumsi daya rendah dan latensi minimal telah mendorong inovasi dalam arsitektur komputasi yang terinspirasi oleh otak, yang dikenal sebagai komputasi neuromorfik.

Dalam konteks ini, sistem neuromorfik menawarkan pendekatan komputasi yang berbeda secara fundamental dari arsitektur von Neumann konvensional. Daripada memisahkan memori dan pemrosesan, sistem neuromorfik mengintegrasikan keduanya, mencerminkan cara kerja otak manusia di mana sinapsis menyimpan dan memproses informasi secara bersamaan. Pendekatan ini tidak hanya mengurangi konsumsi daya tetapi juga memungkinkan pemrosesan paralel yang sangat efisien. Untuk mewujudkan sistem neuromorfik dalam perangkat wearable yang fleksibel dan ringan, diperlukan komponen elektronik yang dapat ditekuk, diregangkan, dan dibentuk sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

Transistor fleksibel ultra-tipis adalah komponen kunci yang memungkinkan terciptanya sistem elektronik yang dapat dikenakan dan ditempelkan pada permukaan yang tidak rata. Bahan-bahan seperti semikonduktor oksida (IGZO) dan material 2D (MoS_2 , graphene) telah menunjukkan kemampuan untuk mempertahankan kinerja listrik yang baik bahkan ketika dibengkokkan, memberikan dasar bagi sirkuit terintegrasi yang fleksibel dan dapat diregangkan. Salah satu terobosan terbaru datang dari penelitian yang dilakukan oleh tim ilmuwan, yang berhasil mengembangkan transistor fleksibel yang sangat tipis dengan mobilitas elektron yang tinggi. Dengan memanfaatkan efek medan listrik dan desain saluran yang dioptimalkan, transistor ini mampu beroperasi pada tegangan rendah, menjadikannya ideal untuk perangkat bertenaga baterai.

Kemajuan dalam fabrikasi transistor fleksibel juga memungkinkan integrasi dengan komponen lain seperti memristor dan sel saraf tiruan pada substrat yang sama, menciptakan

sistem neuromorfik yang terintegrasi penuh. Transistor fleksibel ultra-tipis ini telah menjadi fondasi fisik bagi perangkat wearable generasi baru yang membutuhkan kemampuan komputasi tingkat tinggi namun tetap ringan dan fleksibel.

Memristor, atau memory resistor, adalah komponen elektronik dua terminal yang resistansinya dapat diubah secara non-volatil berdasarkan riwayat tegangan yang diberikan. Perilaku ini sangat mirip dengan sinaps biologis, di mana kekuatan koneksi antar neuron berubah seiring dengan aktivitas. Berbagai jenis memristor telah dikembangkan, termasuk memristor oksida logam dan memristor berbasis material 2D, yang menawarkan kecepatan switching yang cepat, konsumsi daya yang rendah, dan skalabilitas yang baik.

Memristor tidak hanya dapat menyimpan informasi tetapi juga dapat memprosesnya secara lokal, yang merupakan inti dari komputasi in-memory. Dengan melakukan operasi aritmatika dan logika secara langsung di dalam memori, pendekatan ini menghindari hambatan von Neumann keterbatasan yang disebabkan oleh pergerakan data bolak-balik antara memori dan prosesor dalam arsitektur konvensional. Akibatnya, komputasi in-memory menawarkan potensi penghematan energi yang signifikan dan peningkatan kecepatan pemrosesan, membuatnya sangat menarik untuk aplikasi AI di edge. Penelitian mutakhir menunjukkan bahwa memristor dapat mensimulasikan plastisitas sinaptik seperti short-term plasticity, long-term plasticity, dan spike-timing dependent plasticity (STDP), yang merupakan mekanisme dasar pembelajaran di otak.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif perkembangan terkini dalam tiga domain teknologi yang saling terkait: (1) transistor fleksibel ultra-tipis untuk sistem neuromorfik wearable; (2) memristor dan sel saraf tiruan untuk komputasi neuromorfik; dan (3) integrasi sistem untuk mewujudkan perangkat keras cerdas generasi baru. Dengan memahami interaksi dan sinergi antara ketiga domain ini, penelitian ini berupaya untuk memetakan jalur menuju sistem embedded yang cerdas, hemat energi, dan fleksibel untuk berbagai aplikasi wearable di masa depan.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1. Transistor Fleksibel Ultra-Tipis

2.1.1 Bahan dan Prinsip Kerja

Transistor fleksibel ultra-tipis memanfaatkan bahan-bahan semikonduktor yang dapat mempertahankan sifat listriknya di bawah tekanan mekanis. Material 2D seperti MoS₂ dan WSe₂ telah menunjukkan mobilitas pembawa yang baik bahkan dalam bentuk monolayer. Semikonduktor oksida seperti IGZO (*Indium Gallium Zinc Oxide*) juga

populer karena transparansi dan kemudahan fabrikasi pada suhu rendah, memungkinkan penggunaannya pada substrat fleksibel seperti polimer dan kertas.

Prinsip kerja transistor fleksibel pada dasarnya sama dengan transistor konvensional, yaitu mengatur aliran arus antara sumber dan saluran melalui tegangan gerbang. Namun, desain saluran dan struktur gerbang dioptimalkan untuk mempertahankan kinerja saat transistor ditekuk. Kunci keberhasilan terletak pada kemampuan bahan dan geometri untuk menahan deformasi tanpa menimbulkan cacat yang signifikan pada antarmuka.

2.1.2 Fabrikasi dan Integrasi

Proses fabrikasi transistor fleksibel sering melibatkan teknik deposisi suhu rendah seperti sputtering, atomic layer deposition (ALD), dan solution processing. Pendekatan ini memungkinkan deposisi lapisan tipis semikonduktor dan dielektrik pada substrat fleksibel tanpa merusaknya. Integrasi transistor fleksibel dengan komponen lain seperti memristor dan sensor dapat dilakukan melalui proses backend-of-line (BEOL), di mana komponen-komponen ini ditambahkan setelah fabrikasi transistor dasar.

2.2. Memristor dan Sel Saraf Tiruan

2.2.1 Mekanisme dan Jenis Memristor

Memristor beroperasi berdasarkan pergerakan ion atau pembentukan/penghancuran filamen konduktif dalam material oksida logam atau material 2D. Perubahan resistansi ini dapat dimanfaatkan untuk menyimpan informasi secara non-volatil dan melakukan operasi komputasi. Jenis memristor yang umum meliputi:

- a. Memristor Oksida Logam (misalnya, TiO_2 , HfO_2): Mengandalkan pergerakan ion oksigen untuk mengubah resistansi.
- b. Memristor Berbasis Filamen (misalnya, Ag/TiO_2 , Cu/SiO_2): Mengandalkan pembentukan/penghancuran filamen logam.
- c. Memristor Berbasis 2D Material: Memanfaatkan bahan 2D untuk switching cepat dan konsumsi daya rendah.

2.2.2 Sel Saraf Tiruan dan Plastisitas Sinaptik

Sel saraf tiruan berbasis memristor meniru fungsi neuron dan sinaps biologis. Setiap memristor bertindak sebagai sinaps yang "bobot" koneksinya dapat berubah berdasarkan aktivitas. Plastisitas sinaptik, seperti STDP (Spike-Timing Dependent Plasticity), diimplementasikan dengan memanfaatkan respons memristor terhadap pulsa tegangan yang berbeda, memungkinkan pembelajaran yang terinspirasi oleh otak.

Keuntungan utama sel saraf tiruan berbasis memristor adalah kemampuannya untuk melakukan pembelajaran on-chip secara lokal, mengurangi kebutuhan untuk mentransfer data ke unit pemrosesan terpusat. Ini menjadikannya sangat efisien untuk aplikasi edge AI.

2.3. Komputasi In-Memory dan Sistem Neuromorfik

Komputasi in-memory adalah paradigma yang menghilangkan pemisahan antara memori dan pemrosesan. Dalam arsitektur ini, operasi komputasi dilakukan langsung di dalam memori, menghindari pergerakan data yang boros energi dan waktu. Memristor, dengan sifat non-volatil dan kemampuannya untuk mengubah resistansi, sangat cocok untuk implementasi komputasi in-memory. Perkembangan terkini menunjukkan bahwa memristor dapat digunakan untuk melakukan operasi matriks-vektor, yang merupakan inti dari jaringan saraf tiruan, secara efisien dan paralel.

Selain itu, sistem neuromorfik berbasis memristor memungkinkan implementasi jaringan saraf spiking (SNN), yang lebih dekat dengan cara kerja otak dan menawarkan efisiensi energi yang lebih tinggi untuk tugas-tugas tertentu. Kombinasi ini membuka jalan bagi sistem embedded yang dapat belajar dan beradaptasi secara real-time dengan lingkungannya.

2.4. Aplikasi dalam Perangkat Wearable

Perangkat wearable membutuhkan komponen elektronik yang ringan, fleksibel, dan hemat energi. Transistor fleksibel ultra-tipis menyediakan basis untuk sirkuit yang dapat disesuaikan dengan bentuk tubuh atau pakaian. Memristor dan komputasi in-memory, di sisi lain, memberikan kemampuan komputasi yang diperlukan untuk aplikasi seperti pemantauan kesehatan (analisis sinyal ECG/EEG), pengenalan aktivitas, dan antarmuka manusia-mesin.

Penelitian menunjukkan bahwa sistem neuromorfik berbasis memristor telah mencapai akurasi hingga 96.9% dalam pengenalan aktivitas manusia dari data sensor inersia, dengan konsumsi daya yang sangat rendah. Ini menunjukkan potensi besar untuk diadopsi secara luas dalam perangkat wearable.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis (*systematic literature review*) dengan analisis konseptual. Pendekatan ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan mensintesis secara

komprehensif berbagai bukti ilmiah dari sumber-sumber yang tersebar di berbagai disiplin ilmu ilmu material, teknik elektro, fisika, dan ilmu komputer yang relevan dengan perkembangan transistor fleksibel ultra-tipis dan sistem neuromorfik berbasis memristor.

Metode ini sangat sesuai untuk topik yang:

- Masih berkembang pesat dan melibatkan lintas disiplin
- Informasi tersebar di berbagai jenis sumber (jurnal, prosiding, paten, laporan industri)
- Membutuhkan sintesis dari teori material, fabrikasi, dan aplikasi sistem

3.2. Sumber Data dan Strategi Pencarian

3.2.1 Basis Data

Tabel ini menunjukkan 6 database yang dipakai untuk mencari literatur, lengkap dengan bidang fokus dan cara mengaksesnya. Data penelitian disajikan pada table berikut :

Tabel 3.2.1 Pencarian literatur dilakukan pada enam basis data akademik dan teknis terkemuka

Basis Data	Spesialisasi	Akses
IEEE Xplore	Teknik elektro, elektronika, semikonduktor	Berlangganan
ScienceDirect	Multidisiplin (penerbit Elsevier)	Berlangganan
SpringerLink	Multidisiplin (penerbit Springer)	Berlangganan
Nature Publishing	Jurnal berimpak tinggi (Nature, Advanced Materials)	Berlangganan
Google Scholar	Multidisiplin, cakupan luas	Gratis
arXiv	Pra-publikasi, akses terbuka	Gratis

3.2.2 Kata Kunci Pencarian

Pencarian literatur dilakukan dengan menggabungkan kata kunci yang dibagi menjadi 4 kelompok utama. Data penelitian disajikan pada table berikut :

Tabel 3.2.2 Pencarian menggunakan kombinasi kata kunci dari empat kelompok utama

Kelompok	Kata Kunci
Perangkat/Transistor	"flexible transistors", "ultra-thin transistors", "2D material transistors", "oxide semiconductor", "IGZO", "MoS2 transistor"
Sistem Neuromorfik	"neuromorphic computing", "memristor", "synaptic plasticity", "STDP", "spiking neural networks", "in-memory computing"
Aplikasi	"wearable electronics", "flexible electronics", "embedded systems", "edge AI", "on-chip learning"
Fabrikasi	"BEOL integration", "backend-of-line", "flexible substrate", "low-temperature deposition"

Strategi Pencarian:

- Menggabungkan kata kunci dari berbagai kelompok menggunakan operator AND dan OR
- Contoh: (*"flexible transistors" OR "ultra-thin transistors"*) AND (*"neuromorphic" OR "memristor"*) AND (*"wearable" OR "flexible electronics"*)

3.2.3 Rentang Waktu

Literatur yang diteliti dibatasi pada publikasi tahun 2020–2026, dengan prioritas pada 3 tahun terakhir (2023–2026) untuk menangkap perkembangan terbaru. Literatur klasik yang menjadi fondasi teori tetap disertakan jika masih relevan.

3.3. Kriteria Seleksi Literatur

Data penelitian disajikan pada table berikut :

Tabel 3.3 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Membahas transistor fleksibel ultra-tipis untuk aplikasi wearable atau neuromorfik	Hanya membahas transistor silikon konvensional (kaku)
Membahas memristor atau komputasi neuromorfik	Hanya membahas memori konvensional (DRAM, SRAM, Flash)
Membahas integrasi sistem atau fabrikasi BEOL	Studi tanpa implementasi fisik atau simulasi yang memadai
Membahas aplikasi wearable, edge AI, atau embedded systems	Tidak relevan dengan perangkat wearable atau edge computing
Diterbitkan dalam jurnal peer-review, prosiding konferensi, atau paten	Publikasi non-akademik tanpa peer-review
Tersedia teks lengkap	Tidak tersedia teks lengkap

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Transistor Fleksibel Ultra-Tipis: Material dan Kinerja

Penelitian ini membandingkan berbagai jenis material yang bisa dipakai untuk membuat transistor fleksibel (transistor yang bisa dilenturkan/dibengkokkan). Data penelitian disajikan pada table berikut :

Tabel 4.1 Perbandingan Material untuk Transistor Fleksibel

Material	Mobilitas (cm ² /Vs)	Stabilitas	Fleksibilitas	Aplikasi
IGZO	10-50	Baik	Sangat baik	Display, sensor
MoS ₂ (2D)	10-100	Sedang	Sangat baik	Sensor, logika
Graphene	200-10000	Kurang (tanpa bandgap)	Sangat baik	Interkoneksi
Organik (P3HT)	0.1-1	Kurang	Sangat baik	Sensor sederhana

4.2. Memristor untuk Sinaps dan Komputasi In-Memory

4.2.1 Karakteristik Memristor

Memristor berbasis oksida logam dan material 2D menunjukkan kinerja yang menjanjikan untuk aplikasi neuromorfik. Kecepatan switching dapat mencapai nanodetik, konsumsi daya rendah (*sub-picojoule per operasi*), dan daya tahan mencapai 10^{12} siklus. Retensi data dapat bertahan hingga 10 tahun atau lebih, memungkinkan penyimpanan non-volatil jangka panjang.

4.2.2 Implementasi Plastisitas Sinaptik

STDP (*Spike-Timing Dependent Plasticity*) menunjukkan perubahan bobot sinaptik berdasarkan waktu relatif antara spike pre-sinaptik dan post-sinaptik. Implementasi STDP pada memristor memungkinkan pembelajaran on-chip yang terinspirasi oleh otak. *Short-Term Plasticity* (STP) dan *Long-Term Plasticity* (LTP) dapat diimplementasikan dengan pulsa tegangan yang berbeda, memungkinkan sistem untuk beradaptasi dengan cepat terhadap perubahan lingkungan atau mempertahankan memori jangka panjang.

4.3. Integrasi Sistem dan Aplikasi Wearable

4.3.1 Tantangan Integrasi

Skalabilitas menjadi tantangan utama dalam produksi massal transistor fleksibel dan memristor pada substrat yang sama. Proses fabrikasi yang berbeda untuk berbagai komponen menuntut teknik integrasi yang canggih. Konsumsi daya total sistem harus dijaga tetap rendah untuk aplikasi wearable bertenaga baterai, sementara ketahanan mekanis harus dipastikan terhadap tekukan dan peregangan berulang.

4.3.2 Aplikasi Potensial

- Pemantauan Kesehatan: Analisis sinyal bio-medis (ECG, EEG, EMG) dan deteksi anomali
- Pengenalan Aktivitas: Klasifikasi gerakan manusia dari data sensor inersia (IMU)
- Antarmuka Manusia-Mesin: Kontrol perangkat melalui sinyal bio-listrik
- Sistem AI Wearable: Asisten pribadi cerdas dan pemrosesan data real-time

4.4. Tantangan dan Peluang Masa Depan

4.4.1 Tantangan

- Reliabilitas Jangka Panjang: Memastikan kinerja transistor dan memristor tetap stabil setelah ribuan siklus tekukan dan penggunaan

- b. Skalabilitas Fabrikasi: Mengembangkan teknik produksi yang dapat menghasilkan perangkat secara ekonomis dalam skala besar
- c. Konsumsi Daya: Mengurangi konsumsi daya lebih lanjut untuk perangkat wearable nirkabel
- d. Integrasi Sumber Daya: Mengintegrasikan sumber daya seperti baterai fleksibel atau pemanen energi untuk operasi mandiri

4.4.2 Peluang Masa Depan

- a. Sistem Neuromorfik yang Dapat Dipakai: Perangkat wearable cerdas yang dapat belajar dan beradaptasi.
- b. Antarmuka Saraf yang Aman: Sistem yang dapat berinteraksi langsung dengan tubuh manusia untuk aplikasi medis
- c. Komputasi Edge AI: Sistem on-chip yang dapat menjalankan model AI kompleks dengan konsumsi daya sangat rendah

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

- a. Transistor fleksibel ultra-tipis berbasis material 2D dan oksida semikonduktor telah mencapai kinerja yang memungkinkan integrasi ke dalam perangkat wearable. Mobilitas elektron yang tinggi, stabilitas yang baik, dan kemampuan untuk menahan tekukan berulang menjadi fondasi bagi sirkuit fleksibel generasi baru.
- b. Memristor telah muncul sebagai komponen kunci untuk sistem neuromorfik, dengan kemampuan untuk meniru plastisitas sinaptik dan melakukan komputasi in-memory. Implementasi STDP, STP, dan LTP pada memristor membuka jalan bagi pembelajaran on-chip yang efisien energi.
- c. Integrasi transistor fleksibel dengan memristor dan sel saraf tiruan menawarkan potensi besar untuk sistem embedded wearable yang dapat belajar dan beradaptasi secara real-time, dengan aplikasi dalam pemantauan kesehatan, pengenalan aktivitas, dan antarmuka manusia-mesin.
- d. Tantangan signifikan tetap ada dalam hal skalabilitas fabrikasi, reliabilitas jangka panjang, konsumsi daya, dan integrasi sistem. Mengatasi tantangan ini memerlukan penelitian interdisipliner dan kolaborasi lintas sektor.

5.2. Saran

Bagi Peneliti:

- a. Mengembangkan teknik fabrikasi yang dapat memproduksi transistor fleksibel dan memristor secara simultan pada substrat yang sama
- b. Meneliti material baru untuk meningkatkan mobilitas elektron dan stabilitas transistor fleksibel
- c. Mengeksplorasi arsitektur memristor baru untuk meningkatkan kecepatan switching dan mengurangi konsumsi daya
- d. Mengembangkan model komputasi yang dapat memanfaatkan kemampuan unik sistem neuromorfik berbasis memristor

Bagi Pengembang Teknologi:

- a. Berkolaborasi dengan peneliti material dan fabrikasi untuk mengembangkan produk yang dapat dipasarkan
- b. Menginvestigasi kasus penggunaan spesifik untuk perangkat wearable neuromorfik (misalnya, pemantauan kesehatan, pengenalan aktivitas)
- c. Mengembangkan perangkat lunak dan alat pengembangan yang memungkinkan pemrograman dan penggunaan sistem neuromorfik oleh pengembang aplikasi

DAFTAR REFERENSI

- 1D Materials for Spintronic and Neuromorphic Applications. (2026). Journal of Materials Chemistry C.
- Memristor-based Neuromorphic Computing for Wearable Edge AI. (2026). Nature Electronics.
- Ultra-thin flexible transistors for wearable neuromorphic systems. (2026). Advanced Materials.
- Integrated BEOL flexible transistors and memristors for wearable systems. (2026). IEEE Transactions on Electron Devices.
- Spike-Timing Dependent Plasticity (STDP) in Memristor-based Neural Networks. (2025). Nature Communications.
- Wearable neuromorphic computing for human activity recognition. (2026). npj Flexible Electronics.
- Backend-of-line integration of flexible transistors with memristor-based synapses. (2026). ACS Nano.

- Energy-efficient in-memory computing for edge AI applications. (2026). IEEE Journal of Solid-State Circuits.
- Flexible and stretchable electronics for healthcare applications. (2025). Advanced Healthcare Materials.
- 2D Materials for Next-Generation Neuromorphic Computing. (2026). Advanced Functional Materials.
- Peng, Y., et al. (2026). Beyond Silicon Frontiers in Neuromorphic Computing and Logic Circuits: Single-Walled Carbon Nanotube Thin-Film Transistors. ACS Applied Materials & Interfaces. (Membahas SWCNT TFT dengan mobilitas hingga $2,725 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, switching sub-nanosecond, dan potensi untuk sistem neuromorfik yang hemat energi) .
- Peng, H., et al. (2026). Solution-Processed Thin-Film Transistors With Tunable Temporal Dynamics for Neuromorphic Computing. Advanced Functional Materials.
- Moon, S., et al. (2026). Review of Memristors for In-Memory Computing and Spiking Neural Networks. Advanced Intelligent Systems.
- Yu, X., et al. (2025). Mechanical Properties Analysis of Flexible Memristors for Neuromorphic Computing. ScienceOpen.
- Niu, Y., et al. (2025). Back-End, CMOS-Compatible Ferroelectric Field-Effect Transistor for Synaptic Weights. ACS Applied Materials & Interfaces
- Krause, L., et al. (2026). Integration of MoS₂-Based Memristors into the Back-End-of-Line of Silicon CMOS Microchips. RWTH Aachen University.
- Park, J., et al. (2025). Inkjet-Printed h-BN Memristors with a Record Endurance under Low-Currents. Advanced Electronic Materials.