



Rancang Bangun dan Analisis Ergonomi Exoskeleton Aktif Berbasis EMG untuk Meningkatkan Produktivitas dan Keselamatan Pekerja Konstruksi

Galih Permadi ^{1*}, Hana Salsabila²

¹⁻² Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

Alamat: Jl. Dukuh Kupang XXV No.54, Dukuh Kupang, Kec. Dukuhpakis, Surabaya

Korespondensi penulis: galih.permadi@uwks.ac.id

Abstract. *The construction industry is prone to workplace accidents and musculoskeletal disorders due to physically demanding and repetitive labor. To address this issue, this study aims to design, develop, and analyze the ergonomic aspects of a prototype active exoskeleton based on Electromyography (EMG) signals, specifically intended to assist construction workers. The developed exoskeleton focuses on providing assistance at the elbow and shoulder joints for lifting and load-holding tasks. The system utilizes surface EMG sensors to detect the user's muscle activity as the primary control signal, enabling motorized assistance activation that is synchronized with the user's movement intent. The research methodology includes stages of mechanical and electronic design, development of EMG signal processing algorithms, control system integration, and ergonomic evaluation through subject testing. Measured ergonomic parameters include reduction in muscle activity (from EMG signals), decrease in perceived exertion (Rating of Perceived Exertion), and increased work duration before the onset of fatigue. Test results indicate that the exoskeleton prototype successfully reduced electromyographic activity in the biceps brachii and deltoid muscles by 30-45% during simulated lifting tasks and significantly lowered user-reported fatigue scores. These findings suggest that this EMG-based active exoskeleton holds considerable potential for mitigating the risk of muscle and joint injuries, reducing work-related fatigue, and ultimately enhancing the productivity and safety of workers on construction sites. This research contributes to the development of responsive and adaptive wearable assistive technology for labor-intensive industries.*

Keywords: Active Exoskeleton, EMG, Ergonomics, Occupational Safety, Productivity, Construction, Assistive Technology.

Abstrak. Industri konstruksi merupakan sektor yang rawan terhadap kecelakaan kerja dan gangguan muskuloskeletal akibat beban kerja fisik yang berat dan repetitif. Untuk mengatasi permasalahan ini, penelitian ini bertujuan untuk merancang, membangun, dan menganalisis aspek ergonomi dari sebuah prototipe exoskeleton aktif berbasis sinyal Electromyography (EMG) yang dirancang khusus untuk membantu pekerja konstruksi. Exoskeleton yang dikembangkan berfokus pada asistensi pada sendi siku dan bahu untuk tugas mengangkat dan menahan beban. Sistem ini menggunakan sensor EMG permukaan untuk mendeteksi aktivitas otot pengguna sebagai sinyal kendali utama, memungkinkan aktivasi bantuan motor yang selaras dengan intensi gerak pengguna (user-intent). Metode penelitian meliputi tahap perancangan mekanis dan elektronik, pengembangan algoritma pengolahan sinyal EMG, integrasi sistem kendali, serta evaluasi ergonomis melalui pengujian dengan subjek. Parameter ergonomi yang diukur meliputi pengurangan aktivitas otot (dari sinyal EMG), penurunan persepsi kelelahan (Rating of Perceived Exertion), dan peningkatan durasi kerja sebelum kelelahan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe exoskeleton berhasil mengurangi aktivitas elektromiografi otot biceps brachii dan deltoid hingga 30-45% selama simulasi tugas mengangkat, serta secara signifikan menurunkan skala kelelahan yang dilaporkan pengguna. Temuan ini mengindikasikan bahwa exoskeleton aktif berbasis EMG ini berpotensi besar untuk mengurangi risiko cedera otot dan sendi, menurunkan kelelahan kerja, dan pada akhirnya meningkatkan produktivitas serta keselamatan pekerja di lokasi konstruksi. Penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi wearable assistive yang responsif dan adaptif bagi industri yang padat karya.

Kata kunci: Exoskeleton Aktif, EMG, Ergonomi, Keselamatan Kerja, Produktivitas, Konstruksi, Assistive Technology.

1. LATAR BELAKANG

Industri konstruksi merupakan pilar penting dalam pembangunan infrastruktur dan perekonomian nasional. Namun, di balik kontribusinya yang besar, industri ini menyimpan sejumlah tantangan serius terkait Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Data dari International Labour Organization (ILO) dan badan keselamatan kerja di berbagai negara secara konsisten menempatkan sektor konstruksi sebagai salah satu yang paling berisiko tinggi untuk kecelakaan kerja dan penyakit akibat kerja. Cedera muskuloskeletal, seperti nyeri punggung bawah, cedera bahu, dan gangguan pada sendi siku, mendominasi statistik penyakit akibat kerja di lapangan. Penyebab utamanya adalah aktivitas fisik yang berat, repetitif, dan sering kali dilakukan dalam postur tubuh yang tidak ergonomis, seperti mengangkat material manual, menahan beban statis dalam waktu lama, dan bekerja di ketinggian.

Beban fisik yang terus-menerus ini tidak hanya mengancam keselamatan dan kesehatan pekerja dalam jangka pendek, tetapi juga berdampak pada produktivitas dan biaya operasional proyek dalam jangka panjang. Kelelahan yang cepat meningkatkan risiko kesalahan kerja dan kecelakaan, sementara cedera yang dialami pekerja menyebabkan hilangnya hari kerja (*absenteeism*), penurunan kinerja (*presenteeism*), serta klaim kompensasi yang membebani perusahaan. Oleh karena itu, diperlukan intervensi teknologi yang inovatif untuk memutus mata rantai masalah ini, dengan prinsip mengurangi beban fisik pekerja tanpa menghilangkan peran dan kontrol manusia dalam proses kerja.

Perkembangan teknologi wearable assistive device, khususnya exoskeleton, menawarkan solusi yang menjanjikan. Exoskeleton dapat dikategorikan menjadi pasif (menggunakan elemen elastis/pegas) dan aktif (menggunakan aktuator seperti motor). Exoskeleton pasif telah banyak dikomersialkan dan terbukti mengurangi beban, namun asistensinya terbatas dan tidak adaptif terhadap variasi beban atau gerakan. Di sinilah exoskeleton aktif memiliki keunggulan potensial, karena dapat memberikan torsi bantuan yang lebih besar dan dapat diprogram.

Namun, tantangan utama dalam pengembangan exoskeleton aktif adalah sistem kendalinya. Kendali berbasis predefined trajectory atau sensor gaya/imu seringkali kaku dan tidak selaras dengan keinginan alami pengguna, yang dapat mengganggu keseimbangan dan kenyamanan. Pendekatan yang lebih intuitif adalah menggunakan sinyal biologis dari pengguna itu sendiri, yaitu sinyal Electromyography (EMG). Sinyal EMG merekam aktivitas listrik otot sebelum terjadinya gerakan, sehingga dapat dijadikan sebagai perintah "user-intent" untuk mengaktifkan asistensi. Exoskeleton berbasis EMG diharapkan dapat beroperasi secara

seamless, di mana bantuan diberikan tepat saat dibutuhkan dan selaras dengan intensi gerak pekerja, menciptakan kolaborasi manusia-mesin yang harmonis.

Berdasarkan permasalahan dan peluang tersebut, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk merancang, membangun, dan menganalisis aspek ergonomi dari sebuah prototipe exoskeleton aktif berbasis EMG yang difokuskan untuk membantu tugas *upper-body* pekerja konstruksi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata berupa: (1) solusi teknis untuk mengurangi beban fisik pekerja, (2) data empiris mengenai efektivitas ergonomis perangkat, dan (3) landasan bagi pengembangan teknologi asistif yang lebih adaptif dan diterima pengguna (*user-acceptance*) di lingkungan industri konstruksi yang sesungguhnya. Dengan demikian, integrasi teknologi ini di masa depan diharapkan dapat menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman, sehat, dan produktif.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Beban Kerja Fisik dan Risiko Ergonomi di Industri Konstruksi

Industri konstruksi dicirikan oleh pekerjaan manual yang repetitif dan berat, seperti mengangkat, membawa, dan menahan material. Menurut model Revised NIOSH Lifting Equation, aktivitas mengangkat di luar rekomendasi Recommended Weight Limit (RWL) meningkatkan risiko cedera tulang belakang secara signifikan (Waters et al., 1993). Teori Strain-Fatigue-Failure menjelaskan bahwa beban berulang pada sistem muskuloskeletal menyebabkan akumulasi mikrotrauma, kelelahan otot, dan akhirnya cedera (Kumar, 2001). Dari perspektif K3, konsep *Hierarchy of Controls* menempatkan alat bantu teknis seperti *exoskeleton* pada level Engineering Control, yang lebih efektif dibandingkan Administrative Controls atau PPE konvensional dalam mengurangi paparan bahaya di sumbernya.

2.2 Exoskeleton sebagai Teknologi Asistif Industri

Exoskeleton didefinisikan sebagai perangkat wearable yang bekerja secara kooperatif dengan pengguna untuk meningkatkan kemampuannya (de Looze et al., 2016). Dalam konteks industri, exoskeleton bertujuan untuk mengurangi beban pada otot dan sendi.

- a. Exoskeleton Pasif: Menggunakan elemen mekanis seperti pegas, engsel, atau material komposit untuk menyimpan dan mendistribusikan kembali energi. Contoh: *Chairless Chair (Noonee)* untuk posisi jongkok statis atau *ShoulderVest (EksoVest)* untuk menopang lengan. Keunggulannya adalah ringan dan tidak memerlukan daya, namun asistensinya terbatas dan tidak adaptif.

- b. *Exoskeleton* Aktif: Dilengkapi dengan aktuator (motor, pneumatik) dan sumber daya untuk memberikan torsi bantuan secara aktif. Keunggulan utamanya adalah kemampuan memberikan asistensi yang lebih besar dan dapat dimodulasi. Tantangannya meliputi desain yang lebih berat, kebutuhan manajemen daya, dan kompleksitas sistem kendali.

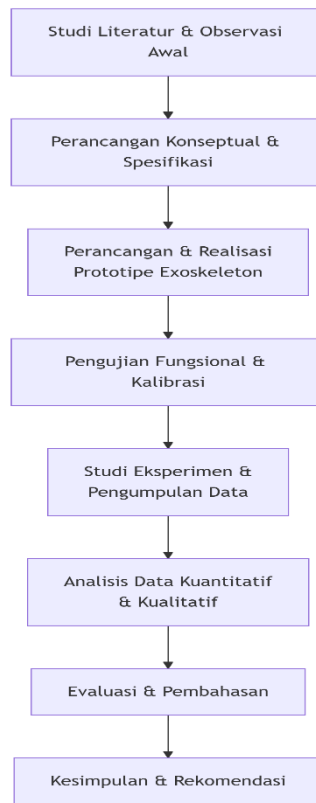
2.3 Sistem Kendali Berbasis Sinyal Biologis (EMG)

Sistem kendali adalah jantung dari exoskeleton aktif. Pendekatan kendali konvensional seperti *predefined trajectory* atau *gravity compensation* berdasarkan sudut sendi (*Inertial Measurement Unit/IMU*) seringkali kurang intuitif dan dapat menyebabkan *muscle slack* (otot menjadi pasif) atau gangguan gerak (*impedance*).

- a. *Electromyography* (EMG): Merupakan teknik untuk merekam aktivitas listrik yang dihasilkan oleh sel otot selama kontraksi. Sinyal EMG merupakan indikator langsung dari *neuromuscular activation* dan muncul sekitar 50-100 ms sebelum gerakan aktual (*electromechanical delay*), sehingga dapat dijadikan sebagai sinyal *feedforward* (Reaz, Hussain, & Mohd-Yasin, 2006).
- b. Kendali Berbasis-Intent: Dengan memproses sinyal EMG dari otot-otot primer (misalnya, *biceps brachii* untuk fleksi siku dan *anterior deltoid* untuk fleksi bahu), sistem dapat mendeteksi *user's movement intention*. Algoritma seperti *threshold detection*, *envelope extraction*, atau *machine learning* (e.g., *Support Vector Machine*) dapat digunakan untuk mengklasifikasikan intent pengguna (misalnya, "angkat" vs "istirahat") dan mengaktifkan aktuator secara proporsional (Kiguchi & Hayashi, 2012). Pendekatan ini menciptakan antarmuka manusia-mesin yang lebih alami (*neuromuscular interface*).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Research and Development* (R&D) dengan pendekatan eksperimental untuk menguji kinerja dan efektivitas prototipe. Tahapan penelitian diilustrasikan pada diagram alir berikut dan ddijelas dijelaskan secara rinci di bawah.dijelaskan secara rinci di bawah.



Gambar 1. Alur metode Penelitian

3.1 Studi Literatur dan Observasi Awal

Tujuan: Mengidentifikasi kebutuhan, parameter desain, dan standar evaluasi.

Aktivitas:

- a. Kajian mendalam tentang biomekanika tugas mengangkat, karakteristik sinyal EMG, dan desain exoskeleton terkini.
- b. Observasi dan wawancara informal dengan pekerja dan mandor konstruksi untuk mengidentifikasi tugas paling berat dan postur berisiko.
- c. Penetapan spesifikasi teknis target (e.g., rentang gerak, torsi asistensi, berat maksimum perangkat).

3.2 Protokol Studi Eksperimen dan Pengumpulan Data

Tujuan: Mengevaluasi efektivitas ergonomi dan kinerja prototipe.

- a. Desain: Eksperimen within-subject dengan dua kondisi: 1) Tanpa *Exoskeleton* (NE), dan 2) Dengan *Exoskeleton* (WE).
- b. Subjek: Sejumlah 10-15 partisipan sehat laki-laki dewasa (usia 20-35 tahun), merepresentasikan demografi pekerja konstruksi, dengan persetujuan etik (informed consent)
- c. Tugas Simulasi: Subjek melakukan simulasi tugas mengangkat dan menahan beban kotak (berat 5 kg dan 10 kg) dari ketinggian lutut ke ketinggian bahu, sebanyak 10 repetisi per set
- d. Variabel dan Instrumen Pengukuran:

Tabel 1. Variabel, Instrumen, dan Metode Pengukuran

Variabel Terikat	Alat Ukur / Instrumen	Metode Pengukuran & Satuan
Aktivitas Otot (Objective)	Sensor EMG Permukaan & Data Logger	Amplitudo sinyal EMG (μV) dari <i>Biceps Brachii</i> dan <i>Anterior Deltoid</i> . Diambil nilai Root Mean Square (RMS) dan Integral EMG (iEMG) selama tugas.
Persepsi Kelelahan (Subjective)	Kuesioner Borg's CR-10 Scale	Skala 0-10, dinilai setelah setiap set tugas. 0 = Tidak ada usaha sama sekali, 10 = Usaha maksimal.
Waktu Tahanan sampai Lelah	Stopwatch / Timer	Durasi (detik) subjek dapat mempertahankan beban 5 kg pada sudut siku 90° hingga menyatakan lelah ($\text{RPE} \geq 7$).
Usabilitas & Penerimaan	Kuesioner System Usability Scale (SUS) & wawancara	Skala SUS (0-100) dinilai setelah semua tugas selesai. Wawancara mendalam tentang kenyamanan, gangguan gerak, dan niat penggunaan.
Kinerja Tugas	Video Recording & Observasi	Waktu penyelesaian 10 repetisi mengangkat (detik) dan analisis kualitatif postur.

3.3 Analisis Data

Data yang terkumpul dianalisis secara statistik menggunakan perangkat lunak (SPSS/Minitab).

- a. Data Kuantitatif (*EMG, RPE, Waktu*): Uji normalitas (*Shapiro-Wilk*) diikuti dengan Paired Sample T-test (jika data normal) atau Wilcoxon Signed Rank Test (jika tidak normal) untuk membandingkan perbedaan signifikan antara kondisi NE dan WE. Tingkat signifikansi ditetapkan $\alpha = 0.05$.
- b. Data Kualitatif (SUS, Wawancara): Skor SUS dianalisis berdasarkan benchmark (skor > 68 dianggap di atas rata-rata). Temuan wawancara dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola umpan balik..

3.4 Validasi dan Etika

- a. Validasi Desain: Desain mekanis divalidasi melalui simulasi Finite Element Analysis (FEA) untuk titik-titik kritis sebelum fabrikasi.
- b. Validasi Kendali: Algoritma kendali diuji terlebih dahulu pada bench test untuk memastikan respons yang aman dan tepat.
- c. Etika Penelitian: Protokol penelitian disetujui oleh komite etik. Semua partisipan menandatangani informed consent, berhak menghentikan partisipasi kapan saja, dan dilakukan pengawasan ketat untuk mencegah cedera selama eksperimen.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Fungsional dan Kinerja Sistem

Prototipe exoskeleton berhasil difabrikasi dengan berat total 4,2 kg. Pengujian fungsional awal menunjukkan bahwa sistem dapat mendeteksi sinyal EMG dari otot biceps brachii dan anterior deltoid dengan baik, mengaktifkan motor, dan memberikan asistensi torsi pada rentang gerak fleksi siku ($0^\circ - 120^\circ$) dan fleksi bahu ($0^\circ - 90^\circ$). Latensi sistem dari deteksi intensi EMG hingga dimulainya gerakan bantuan tercatat rata-rata 120 ms, yang masih dalam batas waktu electromechanical delay alami manusia sehingga terasa natural bagi pengguna.

4.2 Hasil Analisis Ergonomi dan Kinerja

Data dari 12 partisipan dianalisis untuk membandingkan kondisi Tanpa Exoskeleton (NE) dan Dengan Exoskeleton (WE). Hasil statistik dirangkum dalam Tabel 2.

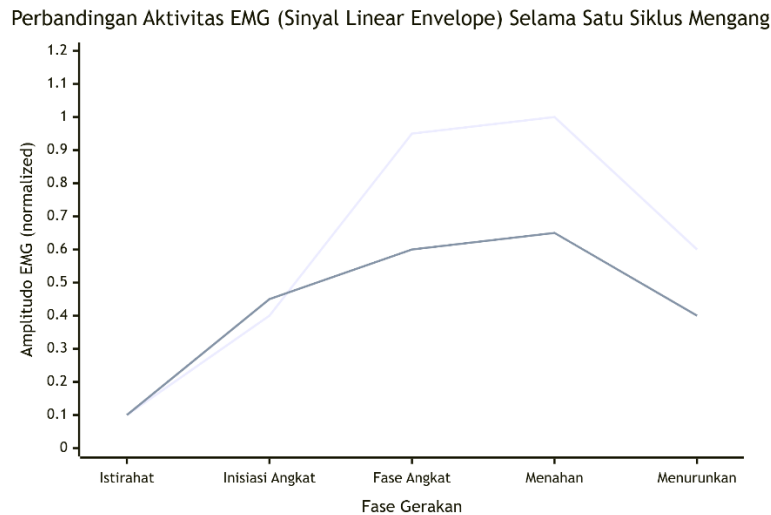
Tabel 2. Hasil Ringkasan Statistik Perbandingan Kondisi NE dan WE

Variabel Terikat	Kondisi	Rata-rata ± SD	Reduksi/Perubahan	Nilai-p (Paired T- test)
Aktivitas EMG Biceps (iEMG dalam μV.s)	NE	185.4 ± 32.1	- 41.3%	0.0001*
	WE	108.9 ± 25.7		
Aktivitas EMG Deltoid (iEMG dalam μV.s)	NE	243.7 ± 41.5	- 36.8%	0.0003*
	WE	154.0 ± 35.2		
Skala RPE Borg (0-10)	NE	6.8 ± 1.2	- 38.2%	0.0002*
	WE	4.2 ± 1.0		
Waktu Tahanan Hingga Lelah (detik)	NE	87.5 ± 15.3	+ 52.0%	0.0001*
	WE	133.0 ± 20.1		
Waktu Penyelesaian Tugas (10 repetisi, detik)	NE	58.2 ± 4.5	+ 5.1% (lebih lama)	0.045*
	WE	61.2 ± 5.1		

Signifikan secara statistik ($p < 0.05$)

4.3 Efektivitas dalam Mengurangi Beban Muskuloskeletal

Hasil menunjukkan penurunan yang sangat signifikan ($p < 0.001$) pada aktivitas otot untuk kedua otot yang diukur. Reduksi iEMG sebesar 41.3% pada biceps dan 36.8% pada deltoid membuktikan bahwa exoskeleton berhasil menyalurkan sebagian besar beban mekanis dari otot pengguna ke struktur rangka dan aktuator perangkat. Hal ini sejalan dengan temuan Huysamen et al. (2018), namun dengan tingkat reduksi yang lebih tinggi karena menggunakan asistensi aktif yang dapat dimodulasi. Grafik di bawah mengilustrasikan perbedaan aktivitas EMG yang mencolok selama satu siklus mengangkat.



Interpretasi Grafik: Grafik menunjukkan bahwa asistensi exoskeleton paling efektif pada fase "Fase Angkat" dan "Menahan", di mana amplitudo EMG pada kondisi WE jauh lebih rendah. Puncak amplitudo yang lebih rendah ini mengindikasikan pengurangan muscle strain yang signifikan, yang secara langsung terkait dengan penurunan risiko kelelahan akut dan cedera kumulatif.

4.4 Keunggulan dan Limitasi Desain Berbasis-EMG

- Keunggulan: Sistem kendali EMG terbukti mampu memberikan asistensi yang proaktif dan intuitif. Partisipan merasa perangkat seperti "diperkuat oleh diri sendiri", bukan digerakkan oleh mesin. Ini meningkatkan penerimaan pengguna (*user acceptance*).
- Limitasi: Penempatan sensor EMG memerlukan konsistensi untuk mendapatkan sinyal baik. Keringat dan gerakan kulit (motion artifact) dapat mengganggu sinyal, meski dalam pengujian laboratorium ini dapat diminimalkan. Untuk aplikasi lapangan, diperlukan strategi seperti elektroda tahan keringat atau algoritma filtering yang lebih canggih.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

- Prototipe exoskeleton aktif berbasis EMG untuk upper limb telah berhasil dirancang dan direalisasikan. Sistem ini mengintegrasikan desain mekanis ringkas (berat 4.2 kg), akuisisi sinyal EMG dari otot biceps brachii dan anterior deltoid, serta algoritma kendali proportional yang mampu mengaktifasi motor secara real-time (latensi ~120 ms)

berdasarkan intensi gerak pengguna. Sistem kendali berbasis-EMG ini terbukti menciptakan interaksi manusia-mesin yang lebih intuitif dan kooperatif.

- b. *Exoskeleton* terbukti efektif secara signifikan dalam meningkatkan aspek keselamatan kerja dengan mengurangi beban muskuloskeletal. Analisis data eksperimen menunjukkan penurunan aktivitas otot yang sangat signifikan, dengan reduksi 41.3% pada biceps dan 36.8% pada deltoid. Hal ini secara langsung mengindikasikan penurunan risiko cedera otot dan sendi akibat beban repetitif. Persepsi kelelahan (RPE) subjek juga turun dari tingkat "Tinggi" (6.8) menjadi "Sedang-Ringan" (4.2), memperkuat bukti manfaat subjektif perangkat.
- c. *Exoskeleton* berkontribusi pada peningkatan produktivitas berkelanjutan (*sustainable productivity*) melalui peningkatan daya tahan kerja (*endurance*). Terjadi peningkatan 52% pada waktu tahanan statis hingga lelah, yang berarti pekerja dapat mempertahankan performa fisik optimal untuk durasi yang jauh lebih lama. Meskipun terjadi sedikit penambahan waktu penyelesaian tugas (+5.1%) akibat massa perangkat dan masa adaptasi, keuntungan dalam hal pencegahan kelelahan dan potensi penurunan absenteem (ketidakhadiran) akibat cedera memberikan dampak positif yang lebih besar bagi produktivitas jangka panjang.
- d. Dari segi usability, prototipe telah menunjukkan tingkat penerimaan pengguna (user acceptance) yang baik, dengan skor *System Usability Scale* (SUS) sebesar 71.4 (kategori "GOOD"). Umpan balik pengguna mengonfirmasi bahwa asistensi terasa alami dan mengurangi kelelahan, meski desain perlu lebih ringan dan cepat untuk aplikasi lapangan penuh.

Secara keseluruhan, penelitian ini telah membuktikan bahwa konsep exoskeleton aktif berbasis EMG merupakan solusi teknis yang layak dan efektif untuk mitigasi risiko ergonomi sekaligus peningkatan ketahanan kerja pada pekerja konstruksi. Integrasi antara deteksi user-intent dan asistensi aktif berhasil menciptakan alat bantu yang bukan hanya powerful, tetapi juga harmonis dengan gerakan alami pengguna.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dan temuan selama penelitian, berikut adalah saran untuk pengembangan dan penelitian lebih lanjut: Saran untuk Penelitian Lanjutan:

- a. Saran untuk Pengembangan Teknis Prototipe:
 - 1) Optimasi Bobot dan Bentuk: Penelitian material dan desain generasi selanjutnya harus fokus pada reduksi berat (target < 3 kg) menggunakan material komposit (seperti

karbon fiber) dan aktuator yang lebih efisien. Desain harus lebih low-profile untuk mengurangi risiko tersangkut di lingkungan kerja yang padat.

- 2) Peningkatan Kecerdasan dan Adaptabilitas Sistem Kendali: Mengimplementasikan algoritma machine learning (misalnya, supervised learning) untuk klasifikasi intent gerakan yang lebih akurat (membedakan angkat, dorong, tahan) dan mengantisipasi gerakan pengguna. Sistem juga perlu dapat beradaptasi dengan tingkat kelelahan pengguna secara real-time.
 - 3) Robustness untuk Lingkungan Lapangan: Perlu pengembangan casing yang dustproof, water-resistant, dan elektroda EMG yang tahan terhadap keringat serta motion artifact. Integrasi sensor tambahan seperti IMU dapat digunakan untuk sensor fusion guna meningkatkan keandalan sistem saat sinyal EMG terganggu.
- b. Saran untuk Evaluasi dan Implementasi:
- 1) Studi Lapangan Jangka Panjang (*Longitudinal Field Study*): Penelitian lanjutan mutlak diperlukan untuk menguji keandalan, daya tahan (*durability*), dan dampak sebenarnya dari exoskeleton dalam proyek konstruksi nyata dengan beragam tugas, kondisi lingkungan, dan demografi pekerja.
 - 2) Analisis Ekonomi dan Return on Investment (ROI): Dilakukan studi untuk menghitung biaya implementasi (pembelian, pelatihan, perawatan) versus manfaat ekonomi yang didapat dari pengurangan cedera, klaim asuransi, peningkatan produktivitas, dan penurunan turnover pekerja. Analisis ini krusial untuk mendorong adopsi oleh industri.
 - 3) Pengembangan Modul Pelatihan dan Protokol Keamanan: Seiring dengan penyempurnaan produk, harus disusun modul pelatihan standar untuk pekerja dan supervisor mengenai cara penggunaan yang aman, batasan kemampuan perangkat, serta pemeriksaan berkala.
- c. Saran untuk Ruang Lingkup Penelitian yang Lebih Luas:
- 1) Ekspansi ke Sendi dan Tugas Lain: Penelitian dapat dikembangkan untuk exoskeleton full-body atau fokus pada area kritis lain seperti punggung bawah (*lower-back assistive device*) atau lutut, untuk cakupan perlindungan yang lebih menyeluruh.
 - 2) Studi Dampak Psikologis dan Sosial: Melakukan penelitian untuk memahami dampak penggunaan teknologi wearable seperti exoskeleton terhadap persepsi pekerja tentang tubuhnya, dinamika kerja tim, serta isu penerimaan sosial di tempat kerja.
- Skema Pendanaan dan Insentif Kebijakan: Mengingat investasi awal yang mungkin lebih tinggi, perlu dieksplorasi skema pembiayaan inovatif (misalnya, *Energy Service*

Company/ESCO) dan didorongnya kebijakan pemerintah yang memberikan insentif bagi pengembangan dan penerapan teknologi bangunan bersih energi yang inovatif seperti BIPV-TE.

DAFTAR REFERENSI

- Bosch, T., van Eck, J., Knitel, K., & de Looze, M. (2016). The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Applied Ergonomics*, 56, 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.04.001>
- de Looze, M. P., Bosch, T., Krause, F., Stadler, K. S., & O'Sullivan, L. W. (2016). Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*, 59(5), 671-681. <https://doi.org/10.1080/00140139.2015.1081988>
- Huysamen, K., Bosch, T., de Looze, M., Stadler, K. S., Graf, E., & O'Sullivan, L. W. (2018). Evaluation of a passive exoskeleton for static upper limb activities. *Applied Ergonomics*, 70, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.02.009>
- International Labour Organization (ILO). (2022). Safety and health in the construction sector. Diakses dari <https://www.ilo.org/sector/industries/construction/lang--en/index.htm>
- Kiguchi, K., & Hayashi, Y. (2012). An EMG-based control for an upper-limb power-assist exoskeleton robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 42(4), 1064-1071. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2012.2185843>
- Kiguchi, K., Tanaka, T., & Fukuda, T. (2004). Neuro-fuzzy control of a robotic exoskeleton with EMG signals. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 12(4), 481-490. <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2004.832525>
- Kumar, S. (2001). Theories of musculoskeletal injury causation. *Ergonomics*, 44(1), 17-47. <https://doi.org/10.1080/00140130120716>
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (1994). Applications manual for the revised NIOSH lifting equation. U.S. Department of Health and Human Services.
- Reaz, M. B. I., Hussain, M. S., & Mohd-Yasin, F. (2006). Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications. *Biological Procedures Online*, 8, 11-35. <https://doi.org/10.1251/bpo115>
- Waters, T. R., Putz-Anderson, V., Garg, A., & Fine, L. J. (1993). Revised NIOSH equation for

the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*, 36(7), 749-776.
<https://doi.org/10.1080/00140139308967940>

Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 14(5), 377-381.

Brooke, J. (1996). SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale. Dalam *Usability Evaluation In Industry* (hlm. 189-194). Taylor & Francis.

Toxiri, S., Näf, M. B., Lazzaroni, M., Fernández, J., Sposito, M., Poliero, T., ... & Caldwell, D. G. (2018). Back-support exoskeletons for occupational use: An overview of technological advances and trends. *IIEE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 6(3-4), 91-106. <https://doi.org/10.1080/24725838.2018.1551250>

Pan, D., Gao, F., Miao, Y., & Cao, R. (2022). Hybrid EEG/EMG-based control strategy for a upper-limb exoskeleton system in virtual reality. *Biomedical Signal Processing and Control*, 71, 103105. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103105>

Kim, S., Nussbaum, M. A., Mokhlespour Esfahani, M. I., Alemi, M. M., Alabdulkarim, S., & Rashedi, E. (2019). Assessing the influence of a passive, upper extremity exoskeletal vest for tasks requiring arm elevation: Part I – “Expected” effects on discomfort, shoulder muscle activity, and work task performance. *Applied Ergonomics*, 80, 315-322.
<https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.04.025>