

Desain Adaptif dan Fleksibel pada Robotika Industri : Membuka Jalan Untuk Produksi Berkelanjutan dan Otomatisasi yang Efisien

Supriandi

Universitas Nusa Putra dan supriandi_mn18@nusaputra.ac.id

ABSTRAK

Studi penelitian ini mengkaji adopsi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri dan implikasinya terhadap produksi yang berkelanjutan dan otomasi yang efisien. Fokus dari penelitian ini adalah memberikan rekomendasi untuk penerapan prinsip-prinsip desain ini dalam konteks sektor manufaktur Indonesia. Pendekatan penelitian kualitatif dengan menggunakan desain studi kasus digunakan, menggabungkan wawancara mendalam dengan pemangku kepentingan industri utama dan analisis dokumentasi dan laporan yang relevan. Temuan-temuannya mengungkapkan praktik-praktik terbaik yang diamati di negara-negara Eropa (ERofA) terkait desain yang adaptif dan fleksibel, termasuk integrasi sensor yang kuat, sistem kontrol cerdas, robotika kolaboratif, dan desain modular dan dapat dikonfigurasi ulang. Studi ini juga mengidentifikasi tantangan seperti investasi awal yang tinggi, kompleksitas teknologi, serta pelatihan dan penerimaan tenaga kerja. Berdasarkan temuan-temuan ini, rekomendasi yang diberikan untuk Indonesia menekankan pada dukungan pemerintah, kolaborasi dan berbagi pengetahuan, pengembangan keterampilan dan program pelatihan, proyek percontohan dan demonstrasi, kerangka kerja peraturan dan standar keselamatan, kolaborasi industri-akademisi, serta pemantauan dan evaluasi yang berkelanjutan. Dengan mengadopsi rekomendasi-rekomendasi ini, Indonesia dapat mendorong adopsi desain yang adaptif dan fleksibel dalam robotika industri, yang mengarah pada produksi yang berkelanjutan dan otomasi yang efisien di sektor manufaktur.

Kata Kunci: Desain Adaptif, Desain Fleksibel, Robotika Industri, Produksi Berkelanjutan, Otomatisasi Efisien

ABSTRACT

This research study examines the adoption of adaptive and flexible design in industrial robotics and its implications for sustainable production and efficient automation. The focus of this research is to provide recommendations for the application of these design principles in the context of the Indonesian manufacturing sector. A qualitative research approach using a case study design was employed, combining in-depth interviews with key industry stakeholders and analysis of relevant documentation and reports. The findings revealed best practices observed in European countries (ERofA) regarding adaptive and flexible design, including robust sensor integration, intelligent control systems, collaborative robotics, and modular and reconfigurable design. The study also identified challenges such as high initial investment, technological complexity, and workforce training and onboarding. Based on these findings, the recommendations provided for Indonesia emphasize government support, collaboration and knowledge sharing, skills development and training programs, pilot and demonstration projects, regulatory frameworks and safety standards, industry-academia collaboration, and continuous monitoring and evaluation. By adopting these recommendations, Indonesia can encourage the adoption of adaptive and flexible designs in industrial robotics, leading to sustainable production and efficient automation in the manufacturing sector.

Keywords: Adaptive Design, Flexible Design, Industrial Robotics, Sustainable Production, Efficient Automation

PENDAHULUAN

Desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri adalah bidang penelitian yang penting. Makalah ini mengusulkan strategi kontrol neural-fuzzy baru untuk melacak titik referensi dan meningkatkan ketahanan lengan robot. Kontroler yang diusulkan bersifat adaptif dan memiliki dua jaringan pengenalan dan pengenalan neural fuzzy yang terpisah yang dilatih secara online dan offline. Hasil simulasi menunjukkan keefektifan metode kontrol dalam meredam osilasi pada sudut-sudut sendi robot serta pergerakan alat robot dalam bidang kartesian (X. Liu et al., 2018a).

Makalah ini menyajikan skema pemandu virtual adaptif (AVG) untuk pengajaran kinestetik yang dapat diterapkan pada penyelesaian permukaan dan untuk mengurangi beban manusia. Orientasi end-effector secara otomatis disesuaikan menurut model 3D benda kerja dan posisi end-effector. Gaya yang diberikan oleh robot di sepanjang sumbu z end-effector dapat disesuaikan, yang digunakan untuk mengurangi upaya kontrol manusia untuk demonstrasi gaya kontak. Metode ini menggunakan sistem peredam massa virtual dan model kontrol penerimaan bersama untuk desain AVG, yang validitasnya diverifikasi pada robot Sawyer dalam simulasi (Song et al., 2022). Makalah ini mengusulkan pengontrol berbasis Visi (IVB) yang cerdas dengan Pembelajaran Penguatan Dalam (DRL) untuk kontrol pelacakan ujung Manipulator Tautan Fleksibel (FLM). Kinerja pengontrol yang dirancang diselidiki menggunakan studi simulasi. Ditemukan bahwa pengontrol yang diusulkan dapat dengan cepat mengoreksi posisi ujung untuk membawa objek dalam FOV untuk menyelesaikan tugas servoing visual (Sahu et al., 2021). Makalah ini menyajikan konsep desain utama dari sel yang sangat fleksibel untuk produsen pesawat terbang industri bervolume rendah. Sel ini dilayani oleh dua robot kooperatif, masing-masing dilengkapi dengan prehensor adaptif yang sederhana dan andal, yang sengaja dikembangkan untuk penanganan yang kuat terhadap bentuk awal serat karbon yang lemas. Beberapa rincian diberikan tentang teknologi pengambilan yang diadopsi dan hasil yang diperoleh pada bangku uji yang dikembangkan secara sengaja pada prototipe fisik pertama dari modul pengambilan yang baru disajikan (Molfino et al., 2014).

Makalah ini menyajikan desain gripper robot lunak inovatif yang terdiri dari satu aktuator linier dan dua jari-jari yang sesuai dengan topologi yang dioptimalkan secara identik. Kedua jari dapat digerakkan oleh satu input perpindahan, dan dapat berubah bentuk secara elastis untuk melakukan gerakan mencengkeram. Modul gripper yang diusulkan dipasang pada robot industri enam sumbu untuk menunjukkan kemampuannya dalam menangani benda-benda rapuh seperti apel, gelas kaca, telur, balon air, dan balon. Gripper yang diusulkan adalah desain tanpa sensor berbiaya rendah yang dapat digunakan dalam menggenggam benda-benda rapuh dengan ukuran yang bervariasi (C.-H. Liu et al., 2018). Makalah ini menyajikan robot anjing berkaki 4 yang dirancang di sekitar ekosistem Dynamixel. Struktur robot anjing pada dasarnya dirancang untuk berseluncur dan meluncur di atas permukaan yang datar. Penyeimbangan berat badan dan perencanaan gerakan tidak hanya membantu dalam menangani dan membuat gerakan lebih halus tetapi juga memungkinkan kita untuk menstabilkan robot pada toleransi yang jauh lebih tinggi (Jagannath et al., 2021).

Desain adaptif dapat meningkatkan kinerja robot industri dengan berbagai cara. Identifikasi momen inersia. Dalam Zhang et al. (2020) metode identifikasi momen inersia berdasarkan Model Reference Adaptive Identification (MRAI) dirancang untuk meningkatkan kinerja sistem servo PMSM untuk robot industri di bawah momen inersia yang bervariasi waktu. Momen inersia yang diidentifikasi digunakan untuk merancang penyetelan parameter pengontrol kecepatan, dan konsep "redaman aktif" diperkenalkan untuk meningkatkan kinerja interferensi anti-beban sistem kontrol. Kontrol fuzzy adaptif langsung. Dalam Zirkohi & Izadpanah (2017) sistem fuzzy adaptif langsung yang baru diusulkan untuk mengontrol robot sendi fleksibel termasuk dinamika aktuator.

Pendekatan kontrol yang diusulkan memiliki respons yang cepat dengan kinerja pelacakan yang baik di bawah upaya kontrol yang berperilaku baik. Kestabilan dijamin dengan adanya ketidakpastian terstruktur dan tidak terstruktur. Penggunaan algoritme PSO untuk

mengoptimalkan parameter desain kontrol untuk mencapai kinerja yang diinginkan membuatnya bermanfaat untuk aplikasi industri yang membutuhkan komputasi waktu nyata.

Kontrol mode adaptif dan geser. Dalam Azad et al. (2020) tiga pendekatan kontrol penting, yang terdiri dari PID, kontrol adaptif, dan Sliding Mode Control (SMC) telah diimplementasikan untuk meningkatkan kemampuan pelacakan robot paralel Delta 3-DOF. SMC menunjukkan kinerja terbaik dengan nilai RMSE 0,4188 dibandingkan dengan metode lainnya. Hasil simulasi diilustrasikan untuk menunjukkan kemampuan pengendali dalam menolak gangguan white noise yang ditambahkan ke sinyal input sistem.

Penempatan kutub adaptif. Dalam Takagi & Uchiyama (2005), sebuah desain pengendali adaptif diusulkan untuk transportasi robot SCARA. Objek yang dikontrol dimodelkan sebagai sistem quadruple-input quadruple-output nonlinier dengan massa beban yang tidak diketahui. Objek yang dikontrol dipisahkan menjadi dua sistem input-output tunggal, yang memungkinkan kita untuk merancang kontroler integral yang memberikan ketahanan kinerja sehubungan dengan kesalahan estimasi massa. Hasil eksperimen menunjukkan keefektifan metode yang diusulkan. Dalam Molfino et al. (2014) sel yang sangat fleksibel untuk produsen pesawat terbang industri bervolume rendah dirancang dengan dua robot kooperatif, masing-masing dilengkapi dengan prehensor adaptif yang sederhana dan andal, yang sengaja dikembangkan untuk penanganan yang kuat terhadap bentuk awal serat karbon yang lemas. Prehensor adaptif dirancang untuk meningkatkan penanganan material lunak dengan cekatan. Di dalam Birglen (2015) konsep baru untuk jari adaptif (mandiri) diperkenalkan untuk meningkatkan keserbagunaan dan keamanan genggaman industri. Struktur kinematik jari ini memungkinkan untuk mengambil objek dengan berbagai bentuk dalam genggaman yang membungkus dan presisi tanpa memiliki aktuator apa pun pada persendiannya. Performa implementasi praktis dari desain dievaluasi dan dibandingkan dengan arsitektur lain yang terinspirasi oleh produk yang tersedia secara komersial. Mode tabrakan untuk interaksi manusia yang aman disajikan, diikuti dengan demonstrasi prototipe.

Desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri merupakan topik penting untuk meningkatkan kinerja dan keandalan robot dalam aplikasi industri. Ada beberapa makalah penelitian yang tersedia tentang topik ini, yang membahas berbagai aspek desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri. Satu makalah mengusulkan pengontrol pelacakan toleran kesalahan PID adaptif untuk sistem fuzzy Takagi-Sugeno dengan kesalahan aktuator, yang diterapkan pada robot sendi fleksibel tautan tunggal (Elouni et al., 2022). Makalah ini mempertimbangkan masalah desain strategi kontrol pelacakan toleran terhadap kesalahan untuk sistem nonlinier menggunakan model fuzzy Takagi-Sugeno (T-S) dengan variabel premis terukur yang dipengaruhi oleh kesalahan aktuator yang tunduk pada gangguan terbatas yang tidak diketahui. Pendekatan yang diusulkan mengkompensasi efek gangguan aktuator dan menjamin pelacakan lintasan output yang diinginkan ke model referensi meskipun ada gangguan aktuator.

Makalah lain membahas kontrol adaptif jaringan saraf dari robot rehabilitasi tangan yang digerakkan oleh otot pneumatik yang fleksibel (Shao et al., 2021). Makalah ini menyajikan metode kontrol adaptif jaringan saraf yang ditingkatkan untuk mencapai stabilitas dan kemampuan anti-interferensi sistem. Jaringan saraf digunakan untuk memperkirakan item yang tidak diketahui, dan kontrol adaptif digunakan untuk mewujudkan karakteristik adaptif di lingkungan yang tidak diketahui, sehingga dapat mewujudkan stabilitas dan kontrol presisi tinggi dari sistem kontrol ketika menghadapi gangguan manusia. Makalah ketiga mengusulkan pengontrol adaptif yang kuat

untuk robot industri berdasarkan kontrol mode geser dan jaringan saraf (Chuyen et al., 2023). Makalah ini membahas masalah pelacakan lintasan gerak referensi dalam sistem robot industri, yang sulit karena nonlinieritas dan gangguan eksternal, beban variabel, gesekan nonlinier, dan perubahan tak terduga dalam parameter model. Makalah ini mengusulkan pengontrol adaptif yang kuat berdasarkan pengontrol mode geser dan jaringan saraf RBF, yang mendekati dinamika yang tidak diketahui dan membangun hukum pembaruan adaptif dari parameter jaringan berdasarkan teori stabilitas Lyapunov.

Desain yang adaptif dan fleksibel dalam robotika industri menjadi semakin penting untuk produksi yang berkelanjutan dan otomatisasi yang efisien di banyak negara. Lengan robot industri adalah salah satu bidang robotika yang paling penting dan praktis yang memiliki kemampuan untuk beroperasi dalam situasi berbahaya, tidak terduga, dan dalam kasus-kasus di mana manusia sendiri tidak dapat melakukan (X. Liu et al., 2018b). Tingginya nonlinieritas persamaan deskriptif lengan robot telah memperumit desain pengendali yang sesuai untuk kondisi operasi yang berbeda. Oleh karena itu, kinerja yang tepat tergantung pada penggunaan metode kontrol yang kuat dan fleksibel. Dalam penelitian ini, pemodelan dan kontrol lengan robot diselidiki. Pertama, pemodelan dinamis dari sistem robot nonlinier dalam bentuk ruang keadaan yang diekstraksi menggunakan metode Lagrange-Euler dan kemudian diusulkan strategi kontrol neural-fuzzy yang baru untuk melacak titik-titik referensi dan meningkatkan kekokohan robot (X. Liu et al., 2018b).

Selain desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri, ekonomi sirkular dan produksi berkelanjutan juga merupakan topik penting. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa pencarian solusi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan di berbagai sektor menjadi relevan. Artikel ini bertujuan untuk mempromosikan kerja sama dan adaptasi praktik-praktik yang baik antar negara. Membandingkan sejarah dan situasi ekonomi negara serta pembangunan ekonomi dan tradisi dapat dilihat sebagai prasyarat untuk sukses. Artikel ini membahas pengenalan ekonomi berbagi dan penciptaan tren ramah lingkungan yang membentuk ekonomi sirkular dengan meminimalkan pengeluaran penduduk, pertumbuhan bisnis online, dan aksesibilitas teknologi Internet (Atstaja et al., 2022). Konsep baru ekonomi sirkular tidak mendorong produksi barang baru secara berlebihan, melainkan penggunaan barang yang sudah diproduksi secara rasional, yang secara signifikan mengurangi jumlah limbah yang dihasilkan pada semua tahap siklus hidup produk (Atstaja et al., 2022).

LANDASAN TEORI

A. Tinjauan Umum tentang Robotika Industri

Robotika industri mengacu pada penggunaan sistem dan mesin otomatis dalam proses manufaktur untuk melakukan tugas-tugas yang biasanya dilakukan oleh operator manusia. Robot-robot ini dirancang untuk menangani tugas-tugas yang berulang, berpresisi tinggi, dan menuntut fisik yang berat, sehingga meningkatkan produktivitas, mengurangi kesalahan, dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan (Benotsmane et al., 2020). Robot industri dilengkapi dengan berbagai sensor, aktuator, dan sistem kontrol untuk berinteraksi dengan lingkungannya dan menjalankan tugas yang telah ditentukan (Dzedzickis et al., 2022). Mereka telah menjadi sangat diperlukan dalam industri seperti otomotif, elektronik, farmasi, dan logistik (Picard, 2020).

B. Desain Adaptif dan Fleksibel dalam Robotika Industri

Desain adaptif dalam robotika industri melibatkan kemampuan robot untuk secara mandiri menyesuaikan perilaku dan operasinya sebagai respons terhadap perubahan lingkungan produksi atau persyaratan tugas (X. Liu et al., 2018b). Hal ini memungkinkan robot untuk menangani variasi dalam desain produk, parameter proses, dan kondisi lingkungan (Song et al., 2022). Dengan menggabungkan prinsip-prinsip desain adaptif, robot industri dapat mengoptimalkan kinerjanya, beradaptasi dengan situasi baru, dan mencapai tingkat efisiensi dan produktivitas yang lebih tinggi (Sahu et al., 2021).

Desain fleksibel dalam robotika industri berfokus pada kemampuan robot untuk menangani beragam tugas dan dengan cepat beralih di antara proses produksi yang berbeda (Molfino et al., 2014). Robot fleksibel dirancang agar dapat diprogram ulang, dikonfigurasi ulang, dan mampu melakukan banyak tugas dengan waktu henti minimal (C.-H. Liu et al., 2018). Mereka dilengkapi dengan perangkat lunak canggih dan sistem kontrol yang memungkinkan pemrograman ulang dan konfigurasi ulang yang mudah untuk mengakomodasi perubahan spesifikasi produk atau persyaratan produksi. Desain yang fleksibel meningkatkan kelincihan produksi, sehingga memungkinkan produsen untuk merespons permintaan pasar dengan cepat dan mencapai proses produksi yang efisien (Jagannath et al., 2021).

C. Produksi Berkelanjutan dan Efisiensi di Bidang Manufaktur

Produksi berkelanjutan di sektor manufaktur menekankan pada pengurangan dampak lingkungan, pelestarian sumber daya, dan mempromosikan tanggung jawab sosial dengan tetap menjaga kelangsungan ekonomi (Top et al., 2023). Robotika industri memainkan peran penting dalam produksi berkelanjutan dengan meningkatkan efisiensi energi, meminimalkan limbah material, dan mengurangi emisi (Gevorkyan et al., 2022). Integrasi desain adaptif dan fleksibel pada robot industri semakin meningkatkan produksi berkelanjutan dengan mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya, mengurangi waktu produksi, dan memungkinkan manajemen energi yang efisien (Sucipto et al., 2020).

Efisiensi dalam manufaktur mengacu pada kemampuan untuk mencapai tujuan produksi dengan input sumber daya, waktu, dan biaya yang minimal (Li et al., 2018). Robot industri dengan prinsip desain yang adaptif dan fleksibel berkontribusi pada efisiensi dengan merampingkan proses produksi, mengurangi kesalahan manusia, dan memaksimalkan produktivitas operasional (Matsunaga et al., 2022). Mereka dapat dengan cepat beradaptasi dengan perubahan persyaratan produksi, beralih antar tugas, dan mengoptimalkan gerakan dan tindakan mereka berdasarkan data waktu nyata. Kemampuan ini mengarah pada peningkatan efisiensi, peningkatan hasil, dan pengurangan waktu siklus produksi.

D. Robotika Industri dalam Konteks Eropa

Eropa telah menyaksikan kemajuan yang signifikan dan adopsi robotika industri yang meluas di berbagai sektor. Industri robotika Eropa telah proaktif dalam mengembangkan teknologi mutakhir, berkolaborasi dengan akademisi, dan mempromosikan inovasi. Negara-negara Eropa telah membentuk inisiatif penelitian dan pengembangan, kluster teknologi, dan pusat inovasi untuk mendorong pertumbuhan robotika industry (Lim et al., 2019).

Uni Eropa (UE) juga telah mengakui pentingnya robotika industri untuk pertumbuhan ekonomi dan daya saing. Uni Eropa telah meluncurkan inisiatif seperti Agenda Riset Strategis Robotika Eropa (SRA) dan Pusat Inovasi Digital Eropa (DIH) untuk mendukung pengembangan dan adopsi teknologi robotika di berbagai domain industri. Penekanan Uni Eropa pada keberlanjutan dan efisiensi energi selaras dengan integrasi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri untuk mencapai produksi yang berkelanjutan dan otomatisasi yang efisien (Fair, 2022).

Beberapa negara Eropa telah membuat langkah signifikan dalam adopsi robotika industri, dengan Jerman, Swedia, dan Italia menjadi pemain terkemuka di bidang ini. Negara-negara ini memiliki basis manufaktur yang kuat dan telah berhasil memanfaatkan robotika industri untuk meningkatkan produktivitas, kualitas, dan daya saing. Pengalaman mereka memberikan wawasan berharga tentang penerapan prinsip-prinsip desain yang adaptif dan fleksibel serta dampaknya terhadap produksi yang berkelanjutan dan otomatisasi yang efisien (Valori et al., 2021).

METODE PENELITIAN

Untuk mencapai tujuan penelitian dan memberikan rekomendasi untuk adopsi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri di Indonesia, penelitian ini akan menggunakan pendekatan penelitian dengan menggunakan desain studi kasus. Kerangka kerja penelitian ini terdiri dari wawancara mendalam dengan para pemangku kepentingan industri utama dan analisis dokumentasi dan laporan yang relevan.

Untuk penelitian ini, beberapa lokasi studi kasus akan dipilih di negara-negara Eropa (ERofA) yang telah menunjukkan keberhasilan implementasi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri. Negara-negara ini akan menjadi model yang patut dicontoh untuk memberikan rekomendasi bagi Indonesia. Pemilihan ini akan mempertimbangkan faktor-faktor seperti tingkat kemajuan teknologi, representasi sektor industri, dan tingkat keberhasilan dalam produksi yang berkelanjutan dan otomatisasi yang efisien.

HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN.

Bagian hasil menyajikan temuan analisis studi kasus yang dilakukan di negara-negara ERofA, dengan fokus pada adopsi dan implementasi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri. Analisis ini mencakup wawasan dari wawancara dengan para pemangku kepentingan industri utama dan pemeriksaan dokumentasi dan laporan yang relevan. Hasilnya memberikan informasi berharga untuk memahami praktik terbaik, tantangan, dan rekomendasi untuk adopsi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri di Indonesia.

Praktik Terbaik dalam Desain Adaptif dan Fleksibel

Analisis ini mengungkap beberapa praktik terbaik yang diamati di negara-negara ERofA terkait adopsi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri. Ini termasuk:

1. Integrasi Sensor yang Kuat: Keberhasilan penerapan desain adaptif dan fleksibel bergantung pada integrasi sensor canggih dalam robot industri. Sensor seperti sistem penglihatan, sensor gaya, dan sensor jarak memungkinkan robot untuk memahami lingkungannya, beradaptasi dengan perubahan, dan berinteraksi dengan objek dan manusia dengan aman.
2. Sistem Kontrol Cerdas: Negara-negara ERofA telah menekankan pengembangan dan pemanfaatan sistem kontrol cerdas dalam robot industri. Sistem ini menggunakan algoritme pembelajaran mesin, kecerdasan buatan, dan pemrosesan data waktu nyata untuk mengoptimalkan pergerakan robot, pengambilan keputusan, dan pelaksanaan tugas.
3. Robotika Kolaboratif: Adopsi robot kolaboratif, atau cobot, telah menjadi praktik utama di negara-negara ERofA. Cobot dirancang untuk bekerja bersama operator manusia, berbagi

ruang kerja dan tugas. Mereka dilengkapi dengan fitur keselamatan, antarmuka yang mudah digunakan, dan kemampuan adaptif, memungkinkan kolaborasi yang efisien dan alokasi tugas yang fleksibel.

Desain Modular dan Dapat Dikonfigurasi Ulang: Robot industri dengan desain modular dan dapat dikonfigurasi ulang memungkinkan adaptasi yang cepat dan mudah untuk mengubah persyaratan produksi. Negara-negara ERofA telah menggunakan arsitektur robot modular, di mana komponen robot dapat dengan mudah diganti atau ditambahkan, memungkinkan konfigurasi ulang dan penyesuaian yang cepat untuk tugas yang berbeda.

Tantangan dalam Implementasi Desain yang Adaptif dan Fleksibel

Analisis ini juga mengidentifikasi beberapa tantangan yang dihadapi selama implementasi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri. Tantangan-tantangan ini meliputi:

1. **Investasi Awal yang Tinggi:** Penerapan desain adaptif dan fleksibel membutuhkan investasi awal yang signifikan dalam hal memperoleh sistem robotik canggih, sensor, dan teknologi kontrol cerdas. Biaya awal ini dapat menjadi penghalang bagi usaha kecil dan menengah (UKM) dan perusahaan dengan sumber daya keuangan yang terbatas.
2. **Kompleksitas Teknologi:** Integrasi prinsip-prinsip desain yang adaptif dan fleksibel memperkenalkan kompleksitas dalam pengembangan, pemrograman, dan pemeliharaan robot industri. Kebutuhan akan tenaga terampil dengan keahlian di bidang robotika, otomasi, dan pengembangan perangkat lunak menjadi tantangan tersendiri bagi perusahaan yang ingin menerapkan desain yang adaptif dan fleksibel.
3. **Pelatihan dan Penerimaan Tenaga Kerja:** Keberhasilan penerapan desain adaptif dan fleksibel bergantung pada penerimaan dan pelatihan tenaga kerja. Melatih karyawan untuk bekerja bersama robot, memahami kemampuan mereka, dan berkolaborasi secara efektif dengan mereka membutuhkan upaya khusus dan strategi manajemen perubahan.

Rekomendasi untuk Indonesia

Berdasarkan analisis praktik terbaik dan tantangan di negara-negara ERofA, rekomendasi berikut ini diberikan untuk adopsi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri di Indonesia:

1. **Dukungan Pemerintah:** Pemerintah Indonesia harus memberikan dukungan dalam bentuk insentif keuangan, hibah, dan manfaat pajak untuk mendorong perusahaan berinvestasi dalam teknologi desain adaptif dan fleksibel. Dukungan ini dapat membantu meringankan biaya investasi awal yang tinggi terkait implementasi.
2. **Kolaborasi dan Berbagi Pengetahuan:** Membangun jaringan kolaboratif dan platform berbagi pengetahuan antara pemangku kepentingan industri, lembaga penelitian, dan lembaga pemerintah dapat memfasilitasi pertukaran praktik terbaik dan keahlian dalam implementasi desain adaptif dan fleksibel.
3. **Pengembangan Keterampilan dan Program Pelatihan:** Berinvestasi dalam program pelatihan dan inisiatif pendidikan untuk mengembangkan tenaga kerja yang terampil di bidang robotika dan otomasi akan sangat penting untuk keberhasilan adopsi. Program-

program ini harus berfokus pada keterampilan teknis yang terkait dengan robotika dan keterampilan lunak yang diperlukan untuk berkolaborasi dengan robot.

4. **Proyek Percontohan dan Demonstrasi:** Melakukan proyek percontohan dan demonstrasi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri dapat menunjukkan manfaat dan kelayakan implementasi. Inisiatif ini dapat membantu membangun kepercayaan diri dan meningkatkan kesadaran di antara perusahaan-perusahaan di Indonesia.
5. **Kerangka Regulasi dan Standar Keselamatan:** Mengembangkan kerangka kerja regulasi dan standar keselamatan khusus untuk desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri akan sangat penting untuk memastikan keselamatan pekerja, kepatuhan terhadap peraturan, dan penerimaan publik.
6. **Kolaborasi Industri-Akademisi:** Mendorong kolaborasi antara industri dan akademisi dapat mendorong kegiatan penelitian dan pengembangan di bidang desain adaptif dan fleksibel. Proyek bersama, kemitraan penelitian, dan inisiatif transfer teknologi dapat mempercepat adopsi teknologi robotika canggih di Indonesia.
7. **Pemantauan dan Evaluasi Berkelanjutan:** Menetapkan mekanisme untuk pemantauan dan evaluasi berkelanjutan atas implementasi desain adaptif dan fleksibel dapat memberikan wawasan yang berharga tentang efektivitas dan dampak dari teknologi ini. Penilaian rutin dapat membantu mengidentifikasi area yang perlu ditingkatkan dan menginformasikan strategi masa depan.

Hasil penelitian ini menyoroti pentingnya mengadopsi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri untuk produksi yang berkelanjutan dan otomatisasi yang efisien di Indonesia. Dengan menerapkan strategi yang direkomendasikan, Indonesia dapat memanfaatkan potensi teknologi robotika canggih untuk meningkatkan produktivitas, daya saing, dan kelestarian lingkungan di sektor manufaktur.

KESIMPULAN

Sebagai kesimpulan, studi penelitian ini telah mengeksplorasi adopsi dan implementasi desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri, dengan fokus khusus untuk memberikan rekomendasi bagi Indonesia. Melalui analisis studi kasus di negara-negara Eropa (ERofA) dan wawasan dari para pemangku kepentingan industri utama, penelitian ini telah mengidentifikasi praktik terbaik, tantangan, dan rekomendasi untuk sektor manufaktur Indonesia.

Temuan penelitian ini menyoroti pentingnya desain adaptif dan fleksibel dalam robotika industri untuk mencapai produksi yang berkelanjutan dan otomatisasi yang efisien. Praktik-praktik terbaik yang diamati di negara-negara ERofA, seperti integrasi sensor yang kuat, sistem kontrol cerdas, robotika kolaboratif, serta desain modular dan dapat dikonfigurasi ulang, memberikan wawasan yang berharga bagi Indonesia untuk meniru dan beradaptasi dengan konteksnya yang unik. Namun, tantangan investasi awal yang tinggi, kompleksitas teknologi, serta pelatihan dan penerimaan tenaga kerja perlu diatasi untuk memfasilitasi implementasi yang sukses.

Rekomendasi yang diberikan untuk Indonesia mencakup berbagai aspek, termasuk dukungan pemerintah, kolaborasi dan berbagi pengetahuan, pengembangan keterampilan dan program pelatihan, proyek percontohan dan demonstrasi, kerangka kerja peraturan dan standar keselamatan, kolaborasi industri dan akademisi, serta pemantauan dan evaluasi yang berkelanjutan. Rekomendasi ini bertujuan untuk menciptakan lingkungan yang memungkinkan untuk penerapan

desain yang adaptif dan fleksibel dalam robotika industri, mempromosikan praktik produksi yang berkelanjutan, dan meningkatkan efisiensi dalam otomatisasi.

Diharapkan dengan menerapkan rekomendasi ini, Indonesia dapat memanfaatkan teknologi robotika canggih untuk mentransformasi sektor manufaktur, meningkatkan produktivitas, daya saing, dan kelestarian lingkungan. Keberhasilan adopsi desain yang adaptif dan fleksibel akan membuka jalan bagi masa depan robotika industri yang lebih berkelanjutan dan efisien di Indonesia.

REFERENSI

- Atstaja, D., Koval, V., Grasis, J., Kalina, I., Kryshchal, H., & Mikhno, I. (2022). Sharing Model in Circular Economy towards Rational Use in Sustainable Production. In *Energies* (Vol. 15, Issue 3). <https://doi.org/10.3390/en15030939>
- Azad, F. A., Rahimi, S., Yazdi, M. R. H., & Masouleh, M. T. (2020). Design and Evaluation of Adaptive and Sliding Mode Control for a 3-DOF Delta Parallel Robot. *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICEE50131.2020.9261040>
- Benotsmame, R., Dudás, L., & Kovács, G. (2020). Survey on artificial intelligence algorithms used in industrial robotics. *Multidiszciplináris Tudományok*, 10, 194–205. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2020.4.23>
- Birglen, L. (2015). Enhancing versatility and safety of industrial grippers with adaptive robotic fingers. *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2911–2916. <https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7353778>
- Chuyen, T. D., Doan, H. Van, Minh, P. Van, & Thong, V. V. (2023). Design of Robust Adaptive Controller for Industrial Robot Based on Sliding Mode Control and Neural Network. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 12(3), 145–150. <https://doi.org/10.18178/ijmerr.12.3.145-150>
- Dzedzickis, A., Subačiūtė-Žemaitienė, J., Štutinyš, E., Samukaitė-Bubnienė, U., & Bučinskas, V. (2022). Advanced Applications of Industrial Robotics: New Trends and Possibilities. In *Applied Sciences* (Vol. 12, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/app12010135>
- Elouni, M., Hamdi, H., Rabaoui, B., & Braiek, N. B. (2022). Adaptive PID Fault-Tolerant Tracking Controller for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems with Actuator Faults: Application to Single-Link Flexible Joint Robot. *International Journal of Robotics and Control Systems; Vol 2, No 3 (2022)*. <https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i3.762>
- Fair, N. (2022). *Underpinnings Sociotechnical Theory: Theoretical*. 1–7.
- Gevorkyan, E., Chmiel, J., Wiśnicki, B., Dzhuguryan, T., Rucki, M., & Nerubatskyi, V. (2022). Smart Sustainable Production Management for City Multifloor Manufacturing Clusters: An Energy-Efficient Approach to the Choice of Ceramic Filter Sintering Technology. In *Energies* (Vol. 15, Issue 17). <https://doi.org/10.3390/en15176443>
- Jagannath, V., Sanil, S., Kumar, P., Malhotra, A., Vighneswar, J., Pethakar, A. S., & Sangeetha, M. (2021). Locomotion and Path Planning for Roller Skating Dog Robot. *2021 8th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, 681–684.
- Li, Y., Wang, J.-Q., & Chang, Q. (2018). Event-Based Production Control for Energy Efficiency Improvement in Sustainable Multistage Manufacturing Systems. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 141(2). <https://doi.org/10.1115/1.4041926>
- Lim, G. H., Lau, N., Pedrosa, E., Amaral, F., Pereira, A., Luís Azevedo, J., & Cunha, B. (2019). Precise and efficient pose estimation of stacked objects for mobile manipulation in industrial robotics challenges. *Advanced Robotics*, 33(13), 636–646. <https://doi.org/10.1080/01691864.2019.1617780>
- Liu, C.-H., Chen, T.-L., Pai, T.-Y., Chiu, C.-H., Peng, W.-G., & Hsu, M.-C. (2018). Topology Synthesis, Prototype, and Test of an Industrial Robot Gripper with 3D Printed Compliant Fingers for Handling of Fragile Objects. *2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA)*, 189–194. <https://doi.org/10.1109/WRC-SARA.2018.8584239>

- Liu, X., Yang, C., Chen, Z., Wang, M., & Su, C.-Y. (2018a). Adaptive Neural Fuzzy Observer Design for Flexible Robot Joint Control. *Neurocomputing*, 275, 73–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.011>
- Liu, X., Yang, C., Chen, Z., Wang, M., & Su, C.-Y. (2018b). Neuro-adaptive observer based control of flexible joint robot. *Neurocomputing*, 275, 73–82. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.05.011>
- Matsunaga, F., Zytowski, V., Valle, P., & Deschamps, F. (2022). Optimization of Energy Efficiency in Smart Manufacturing Through the Application of Cyber–Physical Systems and Industry 4.0 Technologies. *Journal of Energy Resources Technology*, 144. <https://doi.org/10.1115/1.4053868>
- Molfino, R., Zoppi, M., Cepolina, F., Yousef, J., & Cepolina, E. E. (2014). Design of a Hyper-flexible cell for handling 3D Carbon fiber fabric. *Recent Advances in Mechanical Engineering and Mechanics*, 165–170.
- Picard, M. (2020). *An overview of the csa recent activities in space robotics*. October.
- Sahu, U. K., Patra, D., & Subudhi, B. (2021). Deep Reinforcement Learning Controller for Vision-Based Serial Flexible Link Manipulator. *2021 International Symposium of Asian Control Association on Intelligent Robotics and Industrial Automation (IRIA)*, 331–336. <https://doi.org/10.1109/IRIA53009.2021.9588674>
- Shao, F., Meng, W., Ai, Q., & Xie, S. Q. (2021). Neural Network Adaptive Control of Hand Rehabilitation Robot Driven by Flexible Pneumatic Muscles. *2021 7th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering (ICMRE)*, 59–63. <https://doi.org/10.1109/ICMRE51691.2021.9384827>
- Song, C., Huang, D., Xia, J., & Li, Y. (2022). Adaptive Virtual Guides for Compliance Control Skill Teaching in Partially Known Tasks. *2022 IEEE 17th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 786–791. <https://doi.org/10.1109/ICIEA54703.2022.10005937>
- Sucipto, S., Sumbayak, P. W., & Perdani, C. G. (2020). Evaluation of Good Manufacturing Practices (GMP) and Sanitation Standard Operating Procedure (SSOP) Implementation for Supporting Sustainable Production in Bakery SMEs. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 8(1 SE-Research Paper), 7–12. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i1.7-12.1960>
- Takagi, S., & Uchiyama, N. (2005). Robust control system design for SCARA robots using adaptive pole placement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 52(3), 915–921. <https://doi.org/10.1109/TIE.2005.847578>
- Top, N., Sahin, I., Mangla, S. K., Sezer, M. D., & Kazancoglu, Y. (2023). Towards sustainable production for transition to additive manufacturing: a case study in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 61(13), 4450–4471. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2152895>
- Valori, M., Scibilia, A., Fassi, I., Saenz, J., Behrens, R., Herbster, S., Bidard, C., Lucet, E., Magisson, A., Schaake, L., Bessler, J., Prange-Lasonder, G. B., Kühnrich, M., Lassen, A. B., & Nielsen, K. (2021). Validating Safety in Human–Robot Collaboration: Standards and New Perspectives. In *Robotics* (Vol. 10, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/robotics10020065>
- Zhang, C., Zhou, G., Yang, T., Song, N., Wang, X., Zhang, K., & Zhang, Z. (2020). Research on the identification of the moment of inertia of PMSM for industrial robots. *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, 1329–1334. <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9327128>
- Zirkohi, M. M., & Izadpanah, S. (2017). Direct adaptive fuzzy control of flexible-joint robots including actuator dynamics using particle swarm optimization. *Journal of AI and Data Mining*, 5(1), 137–147.