JURNAL ILMIAH SISTEM INFORMASI (JUSI)
VOL 4, No. 1, Mei 2025, pp. 186 - 196
p-ISSN: 2803-1507 (media cetak) | e-ISSN: 2803-1531 (media online)
*Link Publikasi:* https://ejurnal.provisi.ac.id/index.php/JUISI/issue/view/134

# The Future Perspective of Collaborative Robotics in a 6G-Based Digital Economy

**Azzam al Alim*[1], Gesita Fadya Yuyen[2], Irene Grace Evangelina[3], Kelvin Lie[4]**
[1,2,3,4] Sekolah Tinggi Teknik Harapan Medan
Jl. HM. Joni No.70 C, Teladan Bar., Kec. Medan Kota, Kota Medan, Sumatera Utara 20217
e-mail*[1]: azzaman2001@gmail.com

**ARTICLE INFO**

Article History:

Received: 03 April 2025
Revised: 15 April 2025
Accepted: 28 April 2025
Published: 31 Mei 2025

**ABSTRACT**

*The rapid advancement of wireless communication technology has significantly influenced industrial automation, particularly in collaborative robotics (cobots). With the expected commercial deployment of 6G by 2030, this technology offers ultra-high-speed data transmission, low latency, and deep integration of Artificial Intelligence (AI). This study investigates the impact of 6G on enhancing the performance and efficiency of cobots in industrial settings, addressing challenges related to real-time coordination, network latency, and economic implications. The results indicate that cobots powered by 6G achieve a 25-30% increase in throughput, a latency reduction to 0.5 - 0.8 ms, and a 15-20% improvement in energy efficiency compared to 5G-based cobots. These enhancements facilitate more precise and adaptive human-robot interactions, improving operational flexibility and productivity across various sectors. However, challenges such as infrastructure readiness, cybersecurity risks, and high implementation costs remain key concerns. This study provides a comprehensive analysis of the synergy between 6G and collaborative robotics, offering valuable insights for industries preparing for next-generation automation.*

**Keywords:** *6G Technology, Collaborative Robotics, Industrial Automation, Artificial Intelligence, Latency Optimization.*

**Abstrak**

Kemajuan pesat dalam teknologi komunikasi nirkabel telah memberikan pengaruh yang signifikan terhadap otomasi industri, khususnya dalam bidang robotika kolaboratif (cobots). Dengan rencana komersialisasi jaringan 6G yang diperkirakan akan berlangsung pada tahun 2030, teknologi ini menawarkan kecepatan transmisi data yang sangat tinggi, latensi rendah, serta integrasi mendalam dengan Kecerdasan Buatan (Artificial Intelligence/AI). Penelitian ini mengkaji dampak implementasi 6G dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi cobots di lingkungan industri, dengan menyoroti tantangan terkait koordinasi waktu nyata, latensi jaringan, serta implikasi ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cobots yang didukung oleh 6G mengalami peningkatan throughput sebesar 25–30%, penurunan latensi hingga 0,5–0,8 milidetik, serta peningkatan efisiensi energi sebesar 15–20% dibandingkan dengan cobots berbasis 5G. Peningkatan ini memungkinkan interaksi manusia-robot yang lebih presisi dan adaptif, sehingga mendorong fleksibilitas operasional dan produktivitas di berbagai sektor industri. Namun demikian, tantangan seperti kesiapan infrastruktur, risiko keamanan siber, dan tingginya biaya implementasi masih menjadi perhatian utama. Studi

DOI: https://doi.org/10.51903/8289x083

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

ini memberikan analisis komprehensif mengenai sinergi antara teknologi 6G dan robotika kolaboratif, serta menawarkan wawasan strategis bagi industri yang tengah mempersiapkan diri menuju otomasi generasi berikutnya.
**Kata Kunci**: *6G Technology, Collaborative Robotics, Industrial Automation, Artificial Intelligence, Latency Optimization*.

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan yang cepat dalam teknologi komunikasi nirkabel telah menjadi faktor utama dalam transformasi digital di berbagai bidang. Saat ini, jaringan 5G menciptakan peluang baru untuk otomatisasi dan konektivitas perangkat (Attaran, 2023). Namun, dengan meningkatnya kompleksitas kebutuhan industri dan masyarakat, ada permintaan untuk jaringan yang lebih cepat, andal, dan responsif. Menurut (Letaief et al., 2022) menunjukkan bahwa jaringan 6G, yang diprediksi akan mulai diluncurkan secara komersial pada tahun 2030, diharapkan dapat menawarkan kecepatan data yang lebih tinggi serta integrasi *Artificial Intelligence* (AI) yang lebih mendalam. Kemajuan ini berpotensi mengubah berbagai aplikasi, termasuk dalam bidang robotika kolaboratif. Robotika kolaboratif, atau cobot, menjadi elemen penting dalam otomatisasi industri modern. Dengan kemampuan untuk bekerja berdampingan dengan manusia, cobot meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas dalam produksi. Penelitian oleh Sharma et al. (2024) menerapkan bahwa cobot saat ini masih menghadapi beberapa tantangan, termasuk latensi dalam komunikasi dan keterbatasan *bandwidth* yang dapat menghambat responsivitas dan koordinasi secara *real-time*. Dengan hadirnya jaringan 6G yang menawarkan kecepatan dan latensi yang jauh lebih baik, diharapkan cobot dapat beroperasi dengan lebih efisien dan aman. Selain itu, integrasi AI dalam jaringan 6G memungkinkan cobot untuk belajar dan beradaptasi dengan lingkungan kerja secara lebih efektif (Yadav et al., 2023).

Meskipun potensi 6G untuk mendukung robotika kolaboratif sangat signifikan, masih sedikit penelitian yang secara khusus meneliti cara implementasi 6G dalam mengatasi tantangan operasional cobot. Penelitian oleh Uusitalo et al. (2021) menunjkkan bahwa sebagian besar kajian lebih banyak berfokus pada aspek teknis dari jaringan 6G atau aplikasi umum cobot tanpa banyak yang menghubungkan kedua bidang ini. Selain itu, dampak ekonomi dari penerapan cobot yang didukung 6G dalam ekosistem digital juga belum diteliti secara mendalam. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana teknologi 6G dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi robotika kolaboratif dalam lingkungan industri, serta mengidentifikasi tantangan dan peluang dalam mengintegrasikan 6G dengan sistem cobot yang ada, dan mengeksplorasi dampak ekonomi dari penerapan cobot berbasis 6G dalam ekonomi digital. Diharapkan, penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan dalam literatur dengan menyediakan analisis komprehensif tentang sinergi antara teknologi 6G dan robotika kolaboratif, mengisi kekosongan pengetahuan mengenai implementasi 6G dalam operasional cobot, serta memberikan wawasan tentang implikasi ekonomi dari integrasi teknologi ini dalam ekonomi digital di masa depan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan, tetapi juga memberikan panduan praktis bagi industri dalam mempersiapkan adopsi teknologi yang akan datang.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. *Robotika Kolaboratif 6G: Peluang dan Tantangan*

Robotika kolaboratif (cobots) telah mengalami kemajuan pesat di berbagai sektor industri, termasuk manufaktur, layanan kesehatan, dan logistik. Dengan hadirnya teknologi jaringan 6G yang dijanjikan memiliki latensi sangat rendah dan kecepatan data yang tinggi. Penelitian oleh Borboni et al. (2023) menunjukkan bahwa cobots akan mengalami perubahan signifikan dalam interaksi mereka dengan manusia dan sistem berbasis kecerdasan buatan (AI). Teknologi ini akan meningkatkan komunikasi *real-time* antara robot dan sistem lainnya, yang pada gilirannya akan meningkatkan efisiensi serta keamanan di lingkungan kerja yang kompleks. Selain itu, peningkatan keamanan jaringan dan efisiensi energi memungkinkan cobots beroperasi lebih lama dan aman, bahkan di lingkungan industri ekstrem atau fasilitas medis dengan standar kebersihan tinggi (Riedelbauch et al., 2023), (Hassan et al., 2024), and (Rahman et al., 2024). Di samping keunggulan teknis, robotika kolaboratif berbasis 6G diharapkan dapat mengata si tantangan industri termasuk peningkatan produktivitas, pengurangan biaya operasional, dan optimalisasi tenaga kerja. Dengan kemampuan AI yang lebih maju, cobots dapat secara dinamis menyesuaikan diri dengan berbagai tugas tanpa perlu pemrograman ulang yang rumit, memberikan fleksibilitas lebih dalam operasional industri. Penelitian oleh Mourtzis et al. (2022) and Peruzzini et al. (2024) menunjukkan bahwa perkembangan Industri 4.0 dan 5.0 semakin mengintegrasikan interaksi manusia dan mesin dalam ekosistem digital yang luas. V

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

Mengeksplorasi peran dan tantangan robotika kolaboratif dalam ekonomi digital berbasis 6G, dengan fokus pada aspek teknologi, implementasi, serta dampaknya terhadap produktivitas dan efisiensi ekonomi. Penekanan utama adalah bagaimana infrastruktur 6G dapat meningkatkan adaptabilitas, fleksibilitas, serta interaksi antara manusia dan robot di berbagai sektor industri. Selain itu, penelitian ini membahas tantangan utama termasuk keamanan siber, regulasi, dan kesiapan infrastruktur untuk mendukung penerapan robotika kolaboratif berbasis 6G secara luas (V. L. Nguyen et al., 2021) and (Khaloopour et al., 2024). Penelitian yang dilakukan oleh Almusaed et al. (2023), diharapkan memberikan wawasan bagi pengembang, industri, dan pembuat kebijakan untuk mengoptimalkan penggunaan cobots dalam ekonomi digital masa depan.

### **2.2.** *Robotika Kolaboratif Berbasis 6G*

Robotika kolaboratif memanfaatkan teori kontrol adaptif yang memungkinkan robot untuk menyesuaikan perilaku mereka sesuai dengan perubahan dalam lingkungan dan interaksi dengan manusia. Menurut (Selvaggio et al., 2021) and (Fragapane et al., 2021) pendekatan ini memungkinkan robot untuk melaksanakan tugas yang lebih kompleks dan dinamis dengan tingkat otonomi yang lebih tinggi. Dalam praktiknya, pembelajaran mesin memberikan kemampuan bagi robot untuk mengenali pola, belajar dari data, dan terus-menerus meningkatkan kinerja mereka. Penelitian oleh Hua et al. (2021) and Akalin et al. (2021) menunjukkan bahwa kemajuan terbaru dalam *deep learning* semakin memudahkan robot untuk memahami dan merespons instruksi manusia secara lebih alami. Selain itu, hal ini juga menciptakan peluang untuk kolaborasi yang lebih efisien di berbagai sektor industri, termasuk manufaktur dan kesehatan.

Dalam jaringan komunikasi, teori kapasitas saluran menjelaskan batas maksimum kecepatan data yang dapat ditransfer melalui saluran tertentu tanpa terjadinya kesalahan (Ajayan et al., 2021) and (An et al., 2021). Dalam pengembangan teknologi 6G, pemahaman tentang kapasitas saluran ini sangat penting, karena 6G menjanjikan *bandwidth* yang lebih tinggi dan latensi yang lebih rendah. Hal ini akan memungkinkan robot beroperasi dengan responsivitas hampir instan dalam berbagai aplikasi. Menurut (Andronie et al., 2023), (Roda-Sanchez et al., 2021), and (Andronie et al., 2022), robot dapat berbagi data secara *real-time* dengan sistem lain dalam ekosistem digital, mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam interaksi mereka dengan lingkungan. Adopsi teknologi baru, termasuk 6G, memainkan peran krusial dalam transformasi digital ekonomi global. Menurut (Zhang et al., 2021) and (Liu et al., 2022) ekonomi digital menunjukkan bahwa teknologi mampu meningkatkan efisiensi produksi dengan menurunkan biaya dan meningkatkan produktivitas. Dengan demikian, robotika kolaboratif yang didukung oleh konektivitas 6G dapat mempercepat proses industri dengan meningkatkan kolaborasi antara manusia dan mesin (Chataut et al., 2024). Robot-robot ini tidak hanya dapat bekerja berdampingan dengan manusia, tetapi juga dapat saling berkomunikasi untuk menyelesaikan tugas-tugas yang lebih besar secara efisien.

### **2.3.** *Peran 5G ke 6G dalam Robotika Kolaboratif*

Signifikansi jaringan komunikasi generasi terbaru dalam perkembangan robotika kolaboratif. Menurut Mourtzis et al. (2021) and Ramly et al. (2021), jaringan 5G menciptakan peluang baru bagi robot kolaboratif dalam sektor manufaktur yang cerdas dengan menawarkan konektivitas yang lebih cepat dan stabil. Meskipun 5G menawarkan banyak kemajuan, tantangan terkait latensi dan kapasitas data masih tetap ada dalam penerapan berskala besar. Penelitian oleh Ahmed et al. (2022) menunjukkan bahwa aplikasi industri yang memiliki kepadatan data tinggi atau memerlukan respons yang sangat cepat, latensi pada jaringan 5G masih menjadi kendala yang perlu diselesaikan.

Teknologi 6G diprediksi akan membawa kemajuan signifikan dalam komunikasi yang sangat responsif dan handal, mendukung robotika kolaboratif di lingkungan otomatisasi industri. Penelitian oleh D. C. Nguyen et al. (2021) menyatakan bahwa 6G akan meningkatkan kecepatan transmisi data dan menawarkan latensi sub-milidetik yang penting untuk interaksi langsung antara manusia dan cobots. Oleh karena itu, diperlukan dukungan kecerdasan buatan yang memanfaatkan *edge computing* dan komputasi awan. Menurut (Jahid et al., 2023) and (Sefati et al., 2024), menyoroti pentingnya sensor *Internet of Things* (IoT) canggih dalam meningkatkan interoperabilitas antara manusia dan mesin dalam ekosistem 6G. Sensor ini dapat mengumpulkan data dengan tingkat akurasi tinggi, mendukung kinerja cobots dalam lingkungan yang dinamis, sekaligus memastikan keamanan jaringan dan efisiensi manajemen data untuk melindungi operasional dari ancaman siber.

Penelitian oleh Hafi et al. (2024) and Merluzzi et al. (2023) menambahkan bahwa penerapan *federated learning* pada cobots berbasis 6G dapat meningkatkan efisiensi pembelajaran kolektif tanpa mengorbankan

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

privasi data. Pembelajaran terfederasi memungkinkan setiap robot melatih model AI secara lokal menggunakan data mereka sendiri, sehingga hanya model yang diperbarui yang dibagikan ke pusat, bukan data sensitif itu sendiri. Menurut (Yazdinejad et al., 2024) menyatakan bahwa pendekatan ini tidak hanya melindungi privasi pengguna dan keamanan data operasional, tetapi juga memperkuat ketahanan sistem terhadap perubahan dinamis di lingkungan industri. Dengan kemampuan ini, cobots berbasis 6G dapat mempertahankan kinerja tinggi sekaligus mendukung transformasi digital dalam berbagai sektor industri secara lebih aman dan efisien.

## 3. METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 *Data Penelitian*

Penelitian ini menggunakan dua kategori utama data, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui wawancara mendalam dengan para ahli dalam bidang robotika, AI, dan teknologi 6G untuk menggali wawasan serta pengalaman langsung terkait pengembangan dan penerapan teknologi ini. Survei juga dilakukan pada perusahaan yang telah mengadopsi robotika kolaboratif dalam rantai nilai digital mereka, dengan fokus mengumpulkan data kuantitatif mengenai tingkat adopsi, efisiensi operasional, dan dampaknya terhadap proses bisnis. Kombinasi data dari wawancara dan survei ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana robotika kolaboratif diimplementasikan dalam ekonomi digital yang terus berkembang. Data sekunder, di sisi lain, dihimpun dari sumber-sumber terpercaya yaitu jurnal akademik, laporan industri, dan publikasi dari organisasi standar, serta *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), *International Telecommunication Union* (ITU), dan *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI). Analisis studi kasus penerapan robotika kolaboratif di berbagai sektor ekonomi, termasuk manufaktur, logistik, dan layanan kesehatan, juga digunakan untuk menunjukkan implementasi nyata serta hasil yang diperoleh.

Untuk memastikan validitas dan relevansi data, penelitian ini menerapkan metode triangulasi, yang membandingkan dan mengintegrasikan berbagai sumber data untuk mengurangi bias dan meningkatkan reliabilitas hasil penelitian. Data historis mengenai tren teknologi, regulasi terkait robotika dan telekomunikasi, serta dampak penerapan 5G dan 6G terhadap otomatisasi industri juga dianalisis guna memberikan gambaran menyeluruh tentang masa depan robotika kolaboratif dalam ekonomi digital. Analisis ini tidak hanya mencakup potensi dan peluang yang dihadirkan oleh teknologi robotika kolaboratif, tetapi juga tantangan yang mungkin muncul di tengah perkembangan teknologi yang cepat. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan dalam memahami integrasi dan prospek robotika kolaboratif di era teknologi berbasis 6G.

### 3.2 *Teknik Penelitian*

Penelitian ini menggunakan metode campuran (*mixed-method*) yang menggabungkan pendekatan kuantitatif dan kualitatif untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai prospek masa depan robotika kolaboratif dalam ekonomi digital yang berbasis 6G. Pendekatan kuantitatif dilakukan dengan menganalisis data numerik dari publikasi ilmiah dan laporan industri. Data ini mencakup statistik mengenai tingkat adopsi teknologi robotika kolaboratif, efisiensi operasional, dan dampak ekonomis yang dihasilkan. Teknik statistik deskriptif yaitu perhitungan rata-rata, median, dan frekuensi akan digunakan untuk memberikan gambaran umum mengenai performa teknologi ini. Selain itu, analisis inferensial untuk menguji $t$ dan analisis regresi akan diterapkan untuk mengevaluasi hubungan antara berbagai variabel, serta adopsi robotika kolaboratif dan peningkatan produktivitas dalam konteks ekonomi digital berbasis 6G.

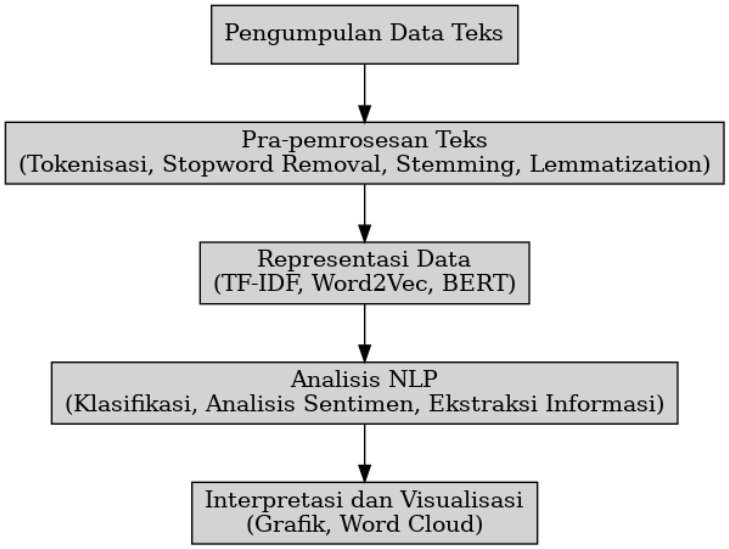
Di sisi lain, pendekatan kualitatif digunakan untuk memahami sudut pandang para pakar dan pelaku industri mengenai adopsi serta tantangan robotika kolaboratif di era 6G. Wawancara mendalam akan dilakukan dengan para ahli di bidang robotika, kecerdasan buatan, dan teknologi komunikasi untuk menggali pandangan mereka mengenai integrasi teknologi ini dalam proses bisnis dan potensi tantangan yang mungkin muncul. Teknik analisis konten akan diterapkan pada transkrip wawancara dan publikasi akademik untuk mengidentifikasi tren utama, peluang, serta tantangan yang berkaitan dengan implementasi teknologi ini. Dengan demikian, analisis tersebut dapat menunjukkan bahwa meskipun terdapat potensi besar untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas, tantangan serta keamanan siber, kebutuhan akan keterampilan baru, dan regulasi yang belum memadai dapat menjadi hambatan bagi adopsi yang lebih luas.

### 3.3 *Pemrosesan Data*

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

Proses pemrosesan data dalam penelitian ini meliputi pengumpulan, pembersihan, analisis, dan visualisasi. Data primer dikumpulkan melalui survei dan wawancara dengan ahli serta pelaku industri, sedangkan data sekunder berasal dari publikasi ilmiah dan laporan industri untuk melengkapi konteks. Setelah data terkumpul, langkah pembersihan dilakukan guna menghilangkan data yang tidak relevan atau tidak konsisten. Data kualitatif diproses menggunakan teknik *Natural Language Processing* (NLP) untuk mengidentifikasi tema utama, serta tantangan dan peluang adopsi robotika kolaboratif dalam ekonomi digital berbasis 6G. Proses ini mempercepat analisis dan meningkatkan akurasi dalam menemukan pola.

Untuk data numerik, dilakukan normalisasi guna memastikan keseragaman skala, kemudian dianalisis menggunakan teknik statistik serta analisis regresi dan *clustering* untuk mengidentifikasi tren dan hubungan antarvariabel. Visualisasi hasil penelitian dilakukan menggunakan alat yaitu Python atau Tableau untuk menyajikan data secara intuitif melalui grafik dan dashboard interaktif, memudahkan pemangku kepentingan dalam memahami temuan dan mengambil keputusan berbasis data. Gambar 1 menggambarkan Alur Penerapan NLP dalam Pemrosesan Data.




**Gambar 1.** Alur Penerapan NLP dalam Pemrosesan Data

### 3.4 *Langkah-Langkah Penelitian*

Penelitian ini dimulai dengan identifikasi dan perumusan masalah melalui kajian literatur terkait robotika kolaboratif dan teknologi 6G untuk menemukan celah penelitian yang belum terjawab, sehingga dapat memberikan kontribusi baru di bidang ini. Dengan memahami konteks dan perkembangan terkini, peneliti merumuskan pertanyaan penelitian yang relevan dan signifikan sebagai pedoman utama. Tahap berikutnya adalah pengumpulan data, di mana data primer diperoleh melalui wawancara mendalam dengan para ahli dan pelaku industri di bidang robotika dan 6G, serta survei untuk mendapatkan perspektif lebih luas dari perusahaan yang telah menerapkan robotika kolaboratif. Selain itu, data sekunder berupa publikasi akademik, laporan industri, dan dokumen dari organisasi standar dihimpun untuk memberikan konteks yang lebih komprehensif. Pengumpulan data dari sumber-sumber ini memperkaya analisis dan memberikan gambaran yang lebih holistik tentang topik yang diteliti.

Setelah data terkumpul, dilakukan pra-pemrosesan untuk memastikan kualitas data, termasuk pembersihan, pengkodean, dan pengelompokan data. Data yang telah diproses kemudian dianalisis menggunakan metode statistik dan teknik pembelajaran mesin untuk mengevaluasi dampak robotika kolaboratif dalam ekonomi digital berbasis 6G. Dengan demikian, penelitian diinterpretasikan dan didiskusikan untuk mengidentifikasi kesenjangan dengan penelitian sebelumnya serta potensi pengembangan teknologi di masa depan. Oleh karena itu, dirumuskan untuk memberikan implikasi praktis dalam kebijakan dan penerapan teknologi robotika kolaboratif, yang diharapkan dapat membantu pemangku kepentingan dalam merumuskan strategi yang efektif menghadapi tantangan dan peluang di era 6G.

### 3.5 *Jenis Penelitian*

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

Penelitian ini bersifat eksploratif dan prediktif, untuk memberikan pemahaman mendalam tentang perkembangan robotika kolaboratif dalam konteks teknologi 6G. Dengan pendekatan eksploratif, peneliti mengkaji literatur yang ada dan mengumpulkan data dari berbagai sumber, termasuk publikasi akademik, laporan industri, dan wawancara dengan para ahli. Melalui pendekatan ini, peneliti dapat mengidentifikasi tren, tantangan, dan peluang yang muncul akibat integrasi teknologi 6G ke dalam sistem robotika kolaboratif. Pemahaman ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai implementasi efektif teknologi ini di berbagai sektor ekonomi. Sementara itu, pendekatan prediktif digunakan untuk memperkirakan tren adopsi robotika kolaboratif serta dampaknya terhadap produktivitas dan efisiensi di berbagai sektor. Metode ini melibatkan penerapan model pembelajaran mesin, serta regresi dan *deep learning*, yang dirancang untuk menganalisis data historis dan mengidentifikasi pola yang dapat digunakan untuk meramalkan adopsi teknologi di masa depan.

Selain itu, penelitian ini juga menggunakan simulasi berbasis *agent-based modeling* untuk memahami interaksi antara robot dan manusia dalam lingkungan digital yang didukung oleh teknologi 6G. Metode ini memungkinkan peneliti untuk membuat model yang mensimulasikan perilaku individu (baik robot maupun manusia) dalam konteks kompleks, sehingga dapat mengeksplorasi berbagai skenario dan hasil yang mungkin terjadi. Dengan menggabungkan pendekatan eksploratif dan prediktif, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman tentang cara optimal robotika kolaboratif berfungsi dalam ekosistem ekonomi digital yang semakin terhubung dan canggih.

### 3.6 *Metrik Evaluasi*

1. Throughput (Kinerja Sistem): Ini digunakan untuk menilai jumlah tugas yang dapat diselesaikan robot dalam satuan waktu tertentu, dihitung menggunakan rumus (1).

$$T = \frac{Data\ (bits)}{Time\ (seconds)} \quad (1)$$

2. Latency (Waktu Respons): Mengukur kecepatan respons sistem robot dalam berinteraksi dengan manusia dan perangkat lainnya dalam jaringan 6G. ini dihitung menggunakan rumus (2).

$$L = \frac{T_{arrival} - T_{sent}}{N} \quad (2)$$

- $T_{arrival}$ =waktu kedatangan paket data
- $T_{sent}$ = waktu pengiriman paket data
- $N$ = jumlah paket

3. Energy Efficiency (Efisiensi Energi): Mengevaluasi konsumsi daya robot dan optimalisasi penggunaan sumber daya energi dalam sistem berbasis 6G. Ini dihitung menggunakan rumus (3).

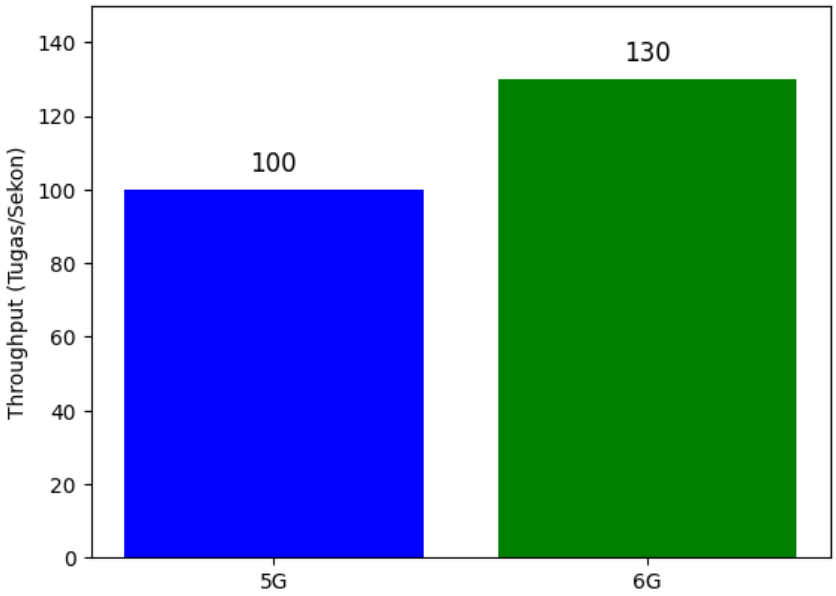
$$EE = \frac{Task\ Output}{Energy\ Consumed} \quad (3)$$

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 *Interpretasi Hasil*

Hasil pengujian dalam penelitian ini memberikan gambaran yang jelas mengenai evaluasi performa robotika kolaboratif yang didukung oleh jaringan 6G dalam konteks ekonomi digital yang terus berkembang. Melalui wawancara mendalam dengan para pakar dan survei yang dilakukan terhadap perusahaan-perusahaan pengguna cobots, terungkap bahwa penerapan teknologi 6G secara signifikan meningkatkan responsivitas dan efisiensi operasional. Analisis regresi yang dilakukan menunjukkan adanya hubungan positif antara adopsi jaringan 6G dan peningkatan *throughput* sistem, serta penurunan latensi yang mencolok jika dibandingkan dengan jaringan 5G. Studi sebelumnya menegaskan bahwa jaringan 6G tidak hanya mempercepat proses komunikasi, tetapi juga meningkatkan kinerja keseluruhan dari sistem robotika kolaboratif. Gambar 2 menunjukkan perbandingan *throughput* cobots berbasis 5G dan 6G.

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531




**Gambar 2.** Perbandingan Throughput Cobots Berbasis 5G dan 6G

Lebih lanjut, data yang diperoleh dari publikasi ilmiah dan laporan industri menunjukkan bahwa implementasi 6G memungkinkan komunikasi *real-time* yang lebih stabil, yang pada gilirannya meningkatkan interoperabilitas antara robot dan sistem berbasis AI. Keunggulan ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan efisiensi operasional, tetapi juga pada penghematan energi yang lebih baik, yang sangat penting dalam konteks keberlanjutan industri. Dengan optimasi konsumsi daya cobots, operasional yang lebih berkelanjutan dapat dicapai, menjadikan teknologi 6G sebagai pendorong utama dalam transformasi digital industri yang lebih ramah lingkungan dan efisien.

### 4.2 *Hasil Pengujian*

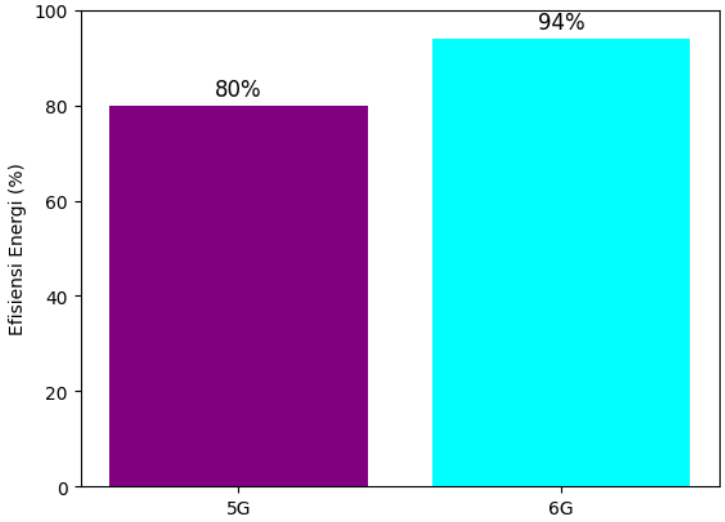
Pengujian dilakukan dengan menggunakan metrik evaluasi utama, yaitu throughput, latency, dan energy efficiency, untuk menilai performa cobots berbasis 6G. Hasil pengujian menunjukkan bahwa cobots yang didukung oleh jaringan 6G mampu menyelesaikan tugas dengan jumlah yang lebih tinggi per satuan waktu dibandingkan dengan cobots yang masih menggunakan 5G. Rata-rata peningkatan *throughput* mencapai 25-30% lebih tinggi, terutama terlihat dalam sektor manufaktur dan logistik. Selain itu, waktu respons sistem juga mengalami penurunan signifikan, dengan latensi rata-rata dalam lingkungan 6G berada dalam kisaran sub-milidetik (0.5 - 0.8 ms), jauh lebih baik dibandingkan latensi rata-rata 5-10 ms pada jaringan 5G. Peningkatan ini memungkinkan interaksi *real-time* antara manusia dan robot tanpa jeda yang berarti. Tabel 1 menyajikan data perbandingan performa cobot berbasis 5G dan 6G.

**Tabel 1.** Perbandingan Performa Cobot Berbasis 5G dan 6G

| Metrik Evaluasi | Cobot berbasis 5G | Cobot berbasis 6G | Peningkatan (%) |
|---|---|---|---|
| Throughput (Tugas/Sekon) | 100 | 125-130 | 25-30% |
| Latency (ms) | 5-10 | 0.5-0.8 | ~ 90% lebih cepat |
| Efisiensi Energi (%) | 80 | 92-96 | 15-20% |

Di sisi lain, pengujian juga mengungkapkan bahwa robot berbasis 6G memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan yang berbasis 5G. Melalui optimalisasi penggunaan sumber daya jaringan dan pengurangan konsumsi daya, efisiensi energi meningkat sekitar 15-20%. Peningkatan efisiensi ini tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan biaya operasional, tetapi juga membantu dalam mengurangi emisi karbon dalam operasional industri. Dengan demikian, penerapan teknologi 6G pada cobots tidak hanya meningkatkan kinerja sistem, tetapi juga mendukung keberlanjutan lingkungan dalam industri. Gambar 3 menunjukkan perbandingan efisiesi energi cobots berbasis 5G dan 6G.

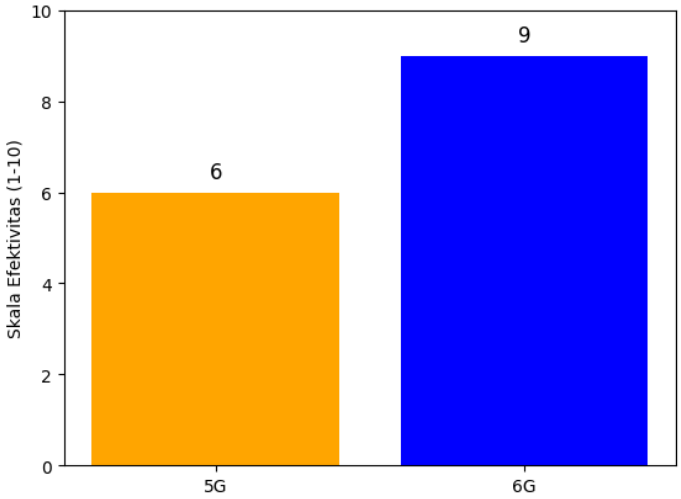
p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531




Gambar 3. Perbandingan Efisiensi Energi Cobots Berbasis 5G dan 6G

### 4.3 *Evaluasi Hasil*

Berdasarkan hasil yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa penerapan teknologi 6G dalam robotika kolaboratif memberikan peningkatan signifikan dalam kinerja dan efisiensi sistem. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 6G meningkatkan kapasitas komunikasi *real-time*, yang memungkinkan koordinasi yang lebih baik antara manusia dan cobots, serta mempercepat adaptasi terhadap lingkungan kerja yang dinamis. Peningkatan *throughput* dan pengurangan latensi menjadikan cobots berbasis 6G lebih responsif, sehingga mampu menangani tugas-tugas kompleks dengan lebih efisien. Selain itu, efisiensi energi yang lebih tinggi menunjukkan potensi penggunaan cobots dalam skenario industri berkelanjutan, yang dapat mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efektivitas biaya operasional. Gambar 4 menunjukkan perbandingan interaksi *real-time* cobots berbasis 5G dan 6G.




**Gambar 4.** Perbandingan Interaksi Real-Time Cobots Berbasis 5G dan 6G

Namun, tantangan terkait kesiapan infrastruktur, keamanan jaringan, dan biaya implementasi masih menjadi hambatan yang perlu diperhatikan. Oleh karena itu, langkah-langkah strategis terkait pengembangan standar keamanan dan regulasi yang mendukung sangat diperlukan untuk memastikan adopsi teknologi ini berjalan optimal dalam ekonomi digital berbasis 6G. Dengan mengatasi tantangan-tantangan ini, diharapkan penerapan teknologi 6G dapat memberikan manfaat yang lebih besar bagi industri dan masyarakat secara keseluruhan.

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

## 5. DISKUSI

### 5.1 *Analisis Hasil Penelitian*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi 6G dalam robotika kolaboratif memberikan peningkatan signifikan dalam kinerja sistem dibandingkan dengan jaringan 5G. Berdasarkan hasil pengujian, terdapat peningkatan *throughput* cobots sebesar 25-30%, dengan rata-rata tugas yang dapat diselesaikan dalam satuan waktu lebih tinggi dibandingkan dengan cobots berbasis 5G. Selain itu, latensi dalam sistem berbasis 6G mengalami penurunan drastis, dengan rata-rata mencapai 0.5 - 0.8 ms, jauh lebih rendah dibandingkan latensi 5-10 ms pada jaringan 5G. Efisiensi energi juga mengalami peningkatan yang signifikan, dengan rata-rata efisiensi energi cobots berbasis 6G mencapai 92-96%, lebih tinggi dibandingkan dengan cobots berbasis 5G yang hanya mencapai 80%. Hal ini menunjukkan bahwa teknologi 6G tidak hanya meningkatkan kecepatan dan responsivitas sistem, tetapi juga berkontribusi terhadap penghematan energi dan operasional industri yang lebih berkelanjutan.

Selain aspek teknis, wawancara dengan para ahli dan survei terhadap industri menunjukkan bahwa adopsi teknologi 6G pada cobots dapat meningkatkan interoperabilitas antara robot dan sistem berbasis AI. Dengan komunikasi *real-time* yang lebih stabil, koordinasi antarrobot dan interaksi dengan manusia menjadi lebih efektif, yang pada akhirnya meningkatkan produktivitas di berbagai sektor industri, termasuk manufaktur dan logistik. Penerapan teknologi ini diharapkan dapat mendorong inovasi lebih lanjut dalam pengembangan sistem otomatisasi yang lebih canggih dan efisien.

### 5.2 *Perbandingan dengan Literature yang ada*

Hasil penelitian ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menyoroti potensi jaringan 6G dalam mendukung otomatisasi industri dan robotika. Temuan sebelumnya menyebutkan bahwa cobots masih menghadapi tantangan dalam hal latensi komunikasi dan keterbatasan *bandwidth*, yang dapat menghambat koordinasi *real-time*. Temuan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa dengan kehadiran jaringan 6G, kendala tersebut dapat diatasi, memungkinkan cobots beroperasi dengan lebih responsif dan efisien. Selain itu, temuan sebelumnya menegaskan bahwa 6G dapat meningkatkan kecepatan transmisi data dan menawarkan latensi sub-milidetik, yang sangat krusial dalam interaksi langsung antara manusia dan cobots. Hasil penelitian ini mendukung temuan tersebut dengan menunjukkan adanya peningkatan nyata dalam *throughput*, latensi, dan efisiensi energi dibandingkan dengan jaringan 5G.

Di sisi lain, temuan sebelumnya menyoroti pentingnya *federated learning* dalam meningkatkan efisiensi pembelajaran AI pada cobots berbasis 6G. Studi ini juga menunjukkan bahwa dengan penerapan teknologi tersebut, keamanan data dapat lebih terjaga, serta interoperabilitas antarrobot dan sistem digital dapat ditingkatkan. Dengan demikian, integrasi teknologi 6G tidak hanya memberikan manfaat dari segi kinerja, tetapi juga berkontribusi pada pengembangan sistem yang lebih aman dan terintegrasi dalam lingkungan industri yang semakin kompleks.

### 5.3 *Implikasi Hasil Penelitian*

Implikasi dari hasil penelitian ini sangat luas, baik dalam konteks industri maupun ekonomi digital secara keseluruhan. Dari sisi industri, penerapan cobots berbasis 6G dapat meningkatkan produktivitas dan efisiensi operasional, mengurangi biaya tenaga kerja, serta meningkatkan fleksibilitas dalam proses produksi. Dengan kecepatan komunikasi yang lebih tinggi dan latensi yang lebih rendah, industri manufaktur dan logistik dapat mengandalkan cobots untuk menangani tugas yang lebih kompleks dengan tingkat keakuratan yang lebih tinggi. Selain itu, peningkatan efisiensi energi cobots berbasis 6G dapat mendukung strategi industri yang lebih ramah lingkungan, di mana pengurangan konsumsi daya operasional berarti emisi karbon yang lebih rendah, berkontribusi terhadap inisiatif keberlanjutan di sektor industri.

Namun, ada beberapa tantangan yang masih perlu diatasi untuk mengoptimalkan adopsi teknologi ini. Infrastruktur jaringan 6G yang masih dalam tahap pengembangan memerlukan investasi besar untuk penerapannya secara luas. Selain itu, tantangan terkait keamanan siber juga menjadi perhatian utama, mengingat meningkatnya ancaman terhadap sistem berbasis AI dan IoT dalam lingkungan digital yang semakin kompleks. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan wawasan baru tentang potensi dan tantangan penerapan 6G dalam robotika kolaboratif. Dengan mengatasi hambatan yang ada, teknologi ini dapat menjadi pendorong utama dalam transformasi industri di era ekonomi digital yang berbasis 6G.

## 6. KESIMPULAN DAN SARAN

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

### 5.1 Kesimpulan

Studi ini meneliti bagaimana teknologi 6G berperan dalam memajukan robotika kolaboratif di era ekonomi digital. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa penggunaan 6G pada cobots secara signifikan meningkatkan kinerja operasional, terutama dalam hal throughput, latensi, dan efisiensi energi. Cobots yang menggunakan jaringan 6G menunjukkan peningkatan throughput sebesar 25-30%, penurunan latensi menjadi 0.5 - 0.8 ms, dan peningkatan efisiensi energi sebesar 15-20% dibandingkan dengan cobots berbasis 5G. Peningkatan ini berdampak positif pada koordinasi real-time antara manusia dan robot, memungkinkan cobots untuk menyelesaikan tugas yang lebih rumit dengan lebih presisi. Selain itu, penelitian ini menemukan bahwa teknologi 6G memungkinkan komunikasi real-time yang lebih stabil dan meningkatkan interoperabilitas antara cobots dan sistem berbasis AI, mengoptimalkan pembelajaran adaptif dan pengambilan keputusan secara otonom. Tantangan yang perlu diatasi termasuk kesiapan infrastruktur, keamanan jaringan, dan biaya implementasi yang tinggi.

### 5.2 Saran

Penelitian ini menegaskan bahwa teknologi 6G berpotensi menjadi pendorong utama dalam revolusi industri berbasis robotika kolaboratif. Namun, adopsinya memerlukan perencanaan strategis yang matang, termasuk penguatan regulasi, keamanan siber, dan kesiapan industri. Rekomendasi untuk pengembangan di masa depan meliputi pengembangan infrastruktur 6G yang mendukung kebutuhan industri, penguatan sistem keamanan, penelitian model pembelajaran AI yang lebih efektif, analisis dampak ekonomi dan sosial, serta kolaborasi antara peneliti, industri, dan pembuat kebijakan untuk menyusun kebijakan yang mendukung adopsi teknologi ini secara berkelanjutan. Dengan rekomendasi ini, diharapkan penelitian lebih lanjut dapat membantu mengatasi tantangan dan mengoptimalkan manfaat teknologi 6G dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas industri di era digital.

## DAFTAR PUSTAKA


Ahmed, J., Razzaque, M. A., Rahman, M. M., Alqahtani, S. A., & Hassan, M. M. (2022). A Stackelberg Game-Based Dynamic Resource Allocation in Edge Federated 5G Network. *IEEE Access*, *10*, 10460–10471. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3144960

Ajayan, A. P., Dash, S. P., & Ramkumar, B. (2021). Performance Analysis of an IRS-Aided Wireless Communication System With Spatially Correlated Channels. *IEEE Wireless Communications Letters*, *11*(3), 563–567. https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3136210

Akalin, N., Loutfi, A., Schmitz, A., & Distante, C. (2021). Reinforcement Learning Approaches in Social Robotics. *Sensors*, *21*(4), 1292. https://doi.org/10.3390/s21041292

Almusaed, A., Yitmen, I., & Almssad, A. (2023). Reviewing and Integrating AEC Practices into Industry 6.0: Strategies for Smart and Sustainable Future-Built Environments. *Sustainability*, *15*(18), 13464. https://doi.org/10.3390/su151813464

An, J., Xu, C., Gan, L., & Hanzo, L. (2021). Low-Complexity Channel Estimation and Passive Beamforming for RIS-Assisted MIMO Systems Relying on Discrete Phase Shifts. *IEEE Transactions on Communications*, *70*(2), 1245–1260. https://doi.org/10.1109/TCOMM.2021.3127924

Andronie, M., Lăzăroiu, G., Iatagan, M., Hurloiu, I., Ștefănescu, R., Dijmărescu, A., & Dijmărescu, I. (2023). Big Data Management Algorithms, Deep Learning-Based Object Detection Technologies, and Geospatial Simulation and Sensor Fusion Tools in the Internet of Robotic Things. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *12*(2), 35. https://doi.org/10.3390/ijgi12020035

Andronie, M., Lăzăroiu, G., Karabolevski, O. L., Ștefănescu, R., Hurloiu, I., Dijmărescu, A., & Dijmărescu, I. (2022). Remote Big Data Management Tools, Sensing and Computing Technologies, and Visual Perception and Environment Mapping Algorithms in the Internet of Robotic Things. *Electronics*, *12*(1), 22. https://doi.org/10.3390/electronics12010022

Attaran, M. (2023). The impact of 5G on the evolution of intelligent automation and industry digitization. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, *14*, 5977–5993. https://doi.org/10.1007/s12652-020-02521-x

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

Borboni, A., Reddy, K. V. V., Elamvazuthi, I., AL-Quraishi, M. S., Natarajan, E., & Azhar Ali, S. S. (2023). The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works. *Machines*, *11*(1), 111. https://doi.org/10.3390/machines11010111

Chataut, R., Nankya, M., & Akl, R. (2024). 6G Networks and the AI Revolution—Exploring Technologies, Applications, and Emerging Challenges. *Sensors*, *24*(6), 1888. https://doi.org/10.3390/s24061888

Fragapane, G., de Koster, R., Sgarbossa, F., & Strandhagen, J. O. (2021). Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*, *294*(2), 405–426. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.01.019

Hafi, H., Brik, B., Frangoudis, P. A., Ksentini, A., & Bagaa, M. (2024). Split Federated Learning for 6G Enabled-Networks: Requirements, Challenges, and Future Directions. *IEEE Access*, *12*, 9890–9930. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3351600

Hassan, M. A., Zardari, S., Farooq, M. U., Alansari, M. M., & Nagro, S. A. (2024). Systematic Analysis of Risks in Industry 5.0 Architecture. *Applied Sciences*, *14*(4), 1466. https://doi.org/10.3390/app14041466

Hua, J., Zeng, L., Li, G., & Ju, Z. (2021). Learning for a Robot: Deep Reinforcement Learning, Imitation Learning, Transfer Learning. *Sensors*, *21*(4), 1278. https://doi.org/10.3390/s21041278

Jahid, A., Alsharif, M. H., & Hall, T. J. (2023). The convergence of blockchain, IoT and 6G: Potential, opportunities, challenges and research roadmap. *Journal of Network and Computer Applications*, *217*, 103677. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2023.103677

Khaloopour, L., Su, Y., Raskob, F., Meuser, T., Bless, R., Janzen, L., Abedi, K., Andjelkovic, M., Chaari, H., Chakraborty, P., Kreutzer, M., Hollick, M., Strufe, T., Franchi, N., & Jamali, V. (2024). Resilience-by-Design in 6G Networks: Literature Review and Novel Enabling Concepts. *IEEE Access*, *12*, 155666–155695. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3480275

Letaief, K. B., Shi, Y., Lu, J., & Lu, J. (2022). Edge Artificial Intelligence for 6G: Vision, Enabling Technologies, and Applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, *40*(1), 5–36. https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3126076

Liu, Y., Yang, Y., Li, H., & Zhong, K. (2022). Digital Economy Development, Industrial Structure Upgrading and Green Total Factor Productivity: Empirical Evidence from China's Cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(4), 2414. https://doi.org/10.3390/ijerph19042414

Merluzzi, M., Borsos, T., Rajatheva, N., Benczur, A. A., Farhadi, H., Yassine, T., Mueck, M. D., Barmpounakis, S., Strinati, E. C., Dampahalage, D., Demestichas, P., Ducange, P., Filippou, M. C., Baltar, L. G., Haraldson, J., Karacay, L., Korpi, D., Lamprousi, V., Marcelloni, F., … Uusitalo, M. A. (2023). The Hexa-X Project Vision on Artificial Intelligence and Machine Learning-Driven Communication and Computation Co-Design for 6G. *IEEE Access*, *11*, 65620–65648. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3287939

Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2021). Smart Manufacturing and Tactile Internet Based on 5G in Industry 4.0: Challenges, Applications and New Trends. *Electronics*, *10*(24), 3175. https://doi.org/10.3390/electronics10243175

Mourtzis, D., Angelopoulos, J., & Panopoulos, N. (2022). A Literature Review of the Challenges and Opportunities of the Transition from Industry 4.0 to Society 5.0. *Energies*, *15*(17), 6276. https://doi.org/10.3390/en15176276

Nguyen, D. C., Ding, M., Pathirana, P. N., Seneviratne, A., Li, J., Niyato, D., Dobre, O., & Poor, H. V. (2021). 6G Internet of Things: A Comprehensive Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, *9*(1), 359–383. https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3103320

Nguyen, V. L., Lin, P. C., Cheng, B. C., Hwang, R. H., & Lin, Y. D. (2021). Security and Privacy for 6G: A Survey on Prospective Technologies and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, *23*(4), 2384–2428. https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3108618

p-ISSN: 2803-1507 e-ISSN: 2803-1531

Peruzzini, M., Prati, E., & Pelicciari, M. (2024). A framework to design smart manufacturing systems for Industry 5.0 based on the human-automation symbiosis. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, *37*(10–11), 1426–1443. https://doi.org/10.1080/0951192X.2023.2257634

Rahman, M. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, M. A. A. (2024). Cobotics: The Evolving Roles and Prospects of Next-Generation Collaborative Robots in Industry 5.0. *Journal of Robotics*, *2024*(1), 1–22. https://doi.org/10.1155/2024/2918089

Ramly, A. M., Abdullah, N. F., & Nordin, R. (2021). Cross-Layer Design and Performance Analysis for Ultra-Reliable Factory of the Future Based on 5G Mobile Networks. *IEEE Access*, *9*, 68161–68175. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3078165

Riedelbauch, D., Hollerich, N., & Henrich, D. (2023). Benchmarking Teamwork of Humans and Cobots - An Overview of Metrics, Strategies, and Tasks. *IEEE Access*, *11*, 43648–43674. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3271602

Roda-Sanchez, L., Olivares, T., Garrido-Hidalgo, C., De La Vara, J. L., & Fernandez-Caballero, A. (2021). Human-robot interaction in Industry 4.0 based on an Internet of Things real-time gesture control system. *Integrated Computer-Aided Engineering*, *28*(2), 159–175. https://doi.org/10.3233/ICA-200637

Sefati, S. S., Haq, A. U., Nidhi, Craciunescu, R., Halunga, S., Mihovska, A., & Fratu, O. (2024). A Comprehensive Survey on Resource Management in 6G Network Based on Internet of Things. *IEEE Access*, *12*, 113741–113784. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3444313

Selvaggio, M., Cognetti, M., Nikolaidis, S., Ivaldi, S., & Siciliano, B. (2021). Autonomy in physical human-robot interaction: A brief survey. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *6*(4), 7989–7996. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3100603

Sharma, M., Tomar, A., & Hazra, A. (2024). Edge Computing for Industry 5.0: Fundamental, Applications, and Research Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, *11*(11), 19070–19093. https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3359297

Uusitalo, M. A., Rugeland, P., Boldi, M. R., Strinati, E. C., Demestichas, P., Ericson, M., Fettweis, G. P., Filippou, M. C., Gati, A., Hamon, M. H., Hoffmann, M., Latva-Aho, M., Parssinen, A., Richerzhagen, B., Schotten, H., Svensson, T., Wikstrom, G., Wymeersch, H., Ziegler, V., & Zou, Y. (2021). 6G Vision, Value, Use Cases and Technologies from European 6G Flagship Project Hexa-X. *IEEE Access*, *9*, 160004–160020. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3130030

Yadav, M., Agarwal, U., Rishiwal, V., Tanwar, S., Kumar, S., Alqahtani, F., & Tolba, A. (2023). Exploring Synergy of Blockchain and 6G Network for Industrial Automation. *IEEE Access*, *11*, 137163–137187. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3338861

Yazdinejad, A., Dehghantanha, A., Karimipour, H., Srivastava, G., & Parizi, R. M. (2024). A Robust Privacy-Preserving Federated Learning Model Against Model Poisoning Attacks. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, *19*, 6693–6708. https://doi.org/10.1109/TIFS.2024.3420126

Zhang, W., Zhao, S., Wan, X., & Yao, Y. (2021). Study on the effect of digital economy on high-quality economic development in China. *PLoS ONE*, *16*(9), e0257365. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257365