

## Pengaruh Implementasi Sistem Robotik Berbasis Kecerdasan Buatan terhadap Kualitas Produk Pemesinan CNC

Musa Bondaris Palungan<sup>1\*</sup>, & Yohanis Sampe Kendek<sup>2</sup>

<sup>1,2)</sup> Program Magister Teknik Mesin, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar

\*Email: musbop@ukipaulus.ac.id & Email: yohanis@evergrown.com

### ABSTRACT

*This study aims to evaluate the impact of implementing an artificial intelligence (AI)-based robotic system on the quality of CNC machining products at PT Evergrown Technology Batam. A quantitative method was employed using purposive sampling on 25 observation units. The quality parameters analyzed include surface roughness and product cylindricity. Data analysis techniques involved linear regression and ANOVA tests to determine the significance of relationships between variables. The findings indicate that the application of AI technology in robotic systems significantly reduces surface roughness ( $Y = 2.736 - 0.136X$ ;  $p < 0.001$ ) and improves the cylindricity accuracy of the machined products ( $Y = 0.075 - 0.005X$ ;  $p = 0.005$ ). These results suggest that intelligent robotic systems make a substantial contribution to enhancing machining precision and overall product quality. Therefore, the implementation of such technology can serve as a strategic solution to improve quality outcomes in CNC-based manufacturing processes.*

**Keywords:** Compact Heat Exchanger, Vortex Generator, Curve Delta Winglet, Solidworks Flow Simulation

### PENDAHULUAN

Industri manufaktur modern menghadapi tantangan yang semakin kompleks dalam memenuhi standar kualitas produk yang tinggi, terutama dalam proses pemesinan berbasis Computer Numerical Control (CNC). Permintaan pasar terhadap produk presisi dengan tingkat kekasaran permukaan rendah dan dimensi yang seragam mendorong perusahaan untuk berinovasi dalam sistem produksi mereka. Salah satu pendekatan yang dianggap potensial dalam menjawab tantangan tersebut adalah implementasi sistem robotik berbasis Artificial Intelligence (AI), yang mampu mengoptimalkan pengendalian proses secara otomatis dan adaptif [1].

Salah satu bentuk penerapan teknologi ini adalah penggunaan *collaborative robot* atau *cobot*, yang dirancang untuk berkolaborasi secara langsung dengan manusia dalam lingkungan kerja bersama. Tidak seperti robot industri konvensional yang dioperasikan secara terpisah dari manusia, cobot memungkinkan interaksi langsung antara operator dan mesin [2]. Fitur-fitur seperti tepi yang lembut, material ringan, pembatasan kecepatan dan gaya, serta sistem sensor dan pemrograman canggih membuat cobot aman untuk digunakan dalam lingkungan produksi yang melibatkan kehadiran manusia. Kehadiran cobot dinilai mampu meningkatkan efisiensi sekaligus menjaga kualitas hasil produksi secara *real-time* [3].

Dalam konteks pemesinan CNC, integrasi sistem robotik berbasis AI, termasuk penggunaan cobot, diperkirakan tidak hanya meningkatkan efisiensi proses tetapi juga berdampak signifikan terhadap peningkatan kualitas produk, seperti menurunnya kekasaran permukaan dan meningkatnya keselindisan dimensi produk [4]. Oleh karena itu, penting dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menguji secara empiris pengaruh implementasi sistem robotik berbasis AI terhadap kualitas produk pemesinan CNC, guna mendukung transformasi industri menuju era otomatisasi cerdas di tengah persaingan global.

Industri manufaktur modern dituntut untuk terus meningkatkan kualitas dan efisiensi dalam proses produksinya, terutama pada sektor pemesinan berbasis *Computer Numerical Control* (CNC) yang membutuhkan hasil presisi tinggi dan keseragaman dimensi [5]. Untuk menjawab tantangan ini, berbagai inovasi teknologi mulai diterapkan, salah satunya adalah sistem robotik berbasis *Artificial Intelligence* (AI). Teknologi ini diyakini mampu meningkatkan kualitas hasil produksi melalui otomatisasi yang adaptif dan pengendalian proses yang lebih akurat [6].

Menurut Federasi Robot Internasional (*International Federation of Robotics / IFR*), robot

dikategorikan menjadi dua jenis utama, yaitu robot industri atau otomatis yang digunakan dalam lingkungan produksi, serta robot layanan (*service robots*) yang digunakan untuk keperluan pribadi atau bisnis. Salah satu bentuk dari robot layanan adalah *collaborative robot* atau cobot, yaitu robot yang dirancang untuk bekerja berdampingan dan berinteraksi langsung dengan manusia [7]. Cobots menghapus batas tradisional antara robot industri dan manusia, yang sebelumnya bekerja terpisah karena alasan keamanan, seperti pagar atau penghalang fisik [8].

Cobots memiliki fleksibilitas untuk diterapkan dalam berbagai sektor, mulai dari robot komunikasi di ruang publik, logistik internal gedung, hingga perakitan dan penanganan bagian besar yang secara ergonomis sulit dilakukan manusia. Bahkan di sektor biomedis, cobot menjadi solusi yang tepat karena dapat meningkatkan produktivitas dan keamanan tanpa harus menerapkan otomatisasi penuh yang kompleks [9]. Dalam konteks manufaktur, khususnya pemesinan CNC, cobot dapat membantu menjembatani sistem manual dengan sistem otomatis sepenuhnya, sehingga kualitas produk dapat meningkat tanpa menambah beban pada lini produksi [10].

Permasalahan utama dalam proses pemesinan CNC konvensional terletak pada keterbatasan pengendalian parameter proses secara real-time dan ketergantungan pada intervensi manusia. Faktor kelelahan operator, variasi dalam penanganan alat potong, serta keterbatasan dalam memantau kondisi kerja mesin secara menyeluruh berkontribusi terhadap menurunnya kualitas hasil pemesinan. Parameter penting seperti *surface roughness* (kekasaran permukaan) dan *cylindricity* (keselindisan produk) sering kali tidak mencapai standar yang diharapkan, terutama ketika proses produksi dilakukan dalam skala besar dan waktu yang terbatas [11]. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan baru yang mampu menjawab tantangan ini secara adaptif dan presisi.

Perkembangan teknologi robot kolaboratif (*collaborative robot/cobot*) dan kecerdasan buatan (AI) dalam beberapa tahun terakhir telah membuka peluang baru dalam pengelolaan proses manufaktur secara otomatis [12]. Cobots dirancang untuk bekerja berdampingan dengan manusia di area kerja yang sama, dengan fitur keselamatan seperti batas kecepatan, sensor, dan bobot ringan yang memungkinkan interaksi yang aman [13]. Mereka juga dapat diprogram melalui metode yang lebih intuitif seperti penggerakan manual oleh operator. Kemampuan ini menjadikan cobots ideal untuk tugas-tugas logistik, perakitan, dan operasi pemesinan yang kompleks. Di sisi lain, AI memungkinkan mesin untuk belajar dari data historis, mengenali pola kesalahan, dan melakukan penyesuaian secara real-time terhadap parameter pemotongan seperti kecepatan spindle atau gaya pemakanan. Sinergi antara AI dan cobots menciptakan sistem produksi yang cerdas dan responsif, yang mampu menjaga kualitas dan efisiensi secara bersamaan.

State of the art dalam bidang manufaktur cerdas telah menunjukkan bahwa penerapan AI-driven robotics mampu meningkatkan produktivitas dan presisi dalam berbagai sektor, termasuk otomotif dan elektronik. Laporan tahun 2021 menunjukkan pasar cobot global mencapai USD 1,01 miliar dan terus meningkat dengan pesat [14]. Meskipun demikian, sebagian besar studi lebih berfokus pada efisiensi produksi atau pengurangan biaya operasional. Hanya sedikit kajian yang secara khusus membahas bagaimana integrasi sistem robotik berbasis AI berdampak langsung pada kualitas produk CNC, terutama dalam aspek kekasaran permukaan dan keselindisan yang menjadi indikator utama presisi produk [15]. Oleh karena itu, penelitian ini penting untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi sejauh mana implementasi sistem robotik berbasis AI mampu meningkatkan kualitas hasil pemesinan CNC secara empiris.

*Research gap* yang muncul dari kondisi tersebut adalah belum adanya pendekatan komprehensif yang mengkaji secara kuantitatif pengaruh langsung dari sistem robotik AI-based terhadap mutu hasil pemesinan CNC. Banyak studi masih terfokus pada model simulasi, bukan implementasi di lapangan dengan data empiris dari proses produksi nyata. Di sisi lain, perusahaan manufaktur seperti PT Evergrown Technology Batam, yang bergerak dalam produksi komponen presisi untuk pasar global, menghadapi tekanan untuk menjaga kualitas produk dengan konsistensi tinggi. Hal ini menjadi latar yang relevan dan penting untuk dilakukan penelitian lebih lanjut.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis secara mendalam bagaimana implementasi sistem robotik berbasis AI memengaruhi kualitas hasil pemesinan CNC, dengan fokus utama pada dua indikator, yaitu kekasaran permukaan dan keselindisan. Keduanya merupakan parameter yang krusial dalam menentukan keberhasilan suatu proses pemesinan, karena berpengaruh langsung terhadap performa, umur pakai, dan akurasi fungsional dari produk akhir. Dengan meneliti hubungan

antara teknologi *intelligent robotics* dan kualitas produk, penelitian ini diharapkan dapat menjawab kebutuhan industri terhadap solusi otomatisasi cerdas yang tidak hanya cepat, tetapi juga presisi.

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan kuantitatif dengan pengambilan data dari proses produksi aktual di PT Evergrown Technology Batam. Unit pengamatan berjumlah 25 sampel yang dipilih menggunakan teknik *purposive sampling* dari hasil produksi dengan dan tanpa integrasi sistem robotik *AI*. Parameter kekasaran permukaan diukur menggunakan alat *surface profilometer*, sedangkan keselindisan diukur dengan *Coordinate Measuring Machine (CMM)*. Sistem robotik yang digunakan merupakan kombinasi antara robot lengan industri dengan sensor adaptif dan pengendalian berbasis algoritma *machine learning*.

Keterlibatan teknologi *AI* dalam sistem pemesinan memungkinkan penciptaan *closed-loop control system* yang mampu memonitor kondisi pemotongan secara berkelanjutan. Misalnya, jika sistem mendeteksi bahwa gaya pemotongan melebihi ambang batas, maka secara otomatis kecepatan pemakanan dapat dikurangi atau posisi alat diposisikan ulang agar tetap dalam parameter optimal. Pendekatan ini memberikan peluang besar dalam pengendalian mutu secara proaktif, bukan hanya reaktif seperti pada sistem konvensional.

Tinjauan pustaka menunjukkan bahwa kekasaran permukaan berkorelasi erat dengan parameter seperti kecepatan potong, kedalaman pemakanan, jenis pahat, dan stabilitas mesin. Sistem robotik berbasis *AI* mampu melakukan penyesuaian secara simultan terhadap semua parameter tersebut, tidak hanya berdasarkan data statis, tetapi juga dari prediksi pola cacat berdasarkan data historis. Dengan demikian, risiko terjadinya variasi kualitas produk dapat ditekan secara signifikan.

Dalam konteks keselindisan, pengaruh getaran mesin, keausan pahat, dan kestabilan chuck sangat dominan. Dengan adanya sistem robotik yang didukung oleh *adaptive intelligence*, setiap perubahan kecil pada beban kerja atau ketidakseimbangan pada proses pemesinan dapat dideteksi dan dikompensasi dalam waktu nyata. Hal ini tidak mungkin dicapai hanya dengan pengawasan manusia atau kontrol numerik konvensional.

Berdasarkan permasalahan dan potensi solusi yang diuraikan, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoretis dalam literatur teknologi manufaktur serta kontribusi praktis bagi sektor industri. Bagi dunia akademik, studi ini memperluas pemahaman tentang bagaimana *AI* dapat digunakan untuk meningkatkan presisi teknis dalam proses manufaktur. Sementara bagi dunia industri, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam mengambil keputusan strategis terkait investasi teknologi otomatisasi cerdas.

Lebih jauh lagi, penerapan sistem *AI*-robotik juga memiliki dimensi keberlanjutan. Dengan meningkatkan kualitas produk, perusahaan dapat mengurangi tingkat *rework* dan *scrap*, yang berarti efisiensi material dan energi akan meningkat. Selain itu, sistem ini juga memungkinkan pengurangan intervensi manusia dalam proses berbahaya, sehingga berkontribusi terhadap keselamatan kerja dan pengurangan beban kerja fisik operator.

Dengan demikian, penting untuk dilakukan kajian empiris yang mendalam guna membuktikan bahwa sistem robotik berbasis kecerdasan buatan benar-benar mampu menjadi solusi atas tantangan kualitas dalam pemesinan CNC. Penelitian ini mencoba menjawab pertanyaan tersebut dengan merancang pendekatan terukur yang menggabungkan evaluasi teknis, pengukuran kualitas, dan analisis statistik terhadap hasil produksi.

Sebagai penutup, dapat ditegaskan bahwa penelitian ini memiliki urgensi yang tinggi untuk dilakukan, mengingat kebutuhan industri manufaktur terhadap sistem produksi yang presisi, cerdas, dan adaptif. Penggunaan sistem robotik berbasis *AI* tidak lagi menjadi pilihan, tetapi kebutuhan strategis dalam memenangkan persaingan global. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki relevansi yang kuat baik secara teoritis maupun praktis dalam konteks perkembangan industri manufaktur berbasis teknologi tinggi.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode deskriptif-analitis untuk mengevaluasi pengaruh implementasi sistem robotik berbasis *Artificial Intelligence (AI)* terhadap kualitas hasil pemesinan pada mesin *Computer Numerical Control (CNC)*. Penelitian difokuskan pada dua parameter utama kualitas produk, yaitu kekasaran permukaan (*surface roughness*) dan

keselindisan produk (*cylindricity*), yang dinilai sebagai indikator krusial dalam keberhasilan proses pemesinan. Pendekatan kuantitatif dipilih karena memungkinkan pengukuran yang objektif dan terukur terhadap variabel-variabel teknis menggunakan data numerik yang dianalisis secara statistik.

Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menguji hipotesis yang telah ditetapkan melalui pengumpulan data dari populasi atau sampel tertentu dan dianalisis menggunakan alat statistik [16]. Pendekatan ini dianggap relevan untuk mengukur secara akurat sejauh mana implementasi teknologi AI-robotik dapat meningkatkan mutu hasil produksi dalam proses pemesinan berbasis CNC. Selain itu, metode deskriptif-analitis memungkinkan penyajian fakta empiris yang dapat menjelaskan fenomena yang diamati secara sistematis.

### Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT Evergrown Technology Batam yang berlokasi di Kawasan Industri Panbil, Batam. Perusahaan ini dikenal sebagai bagian dari Evergrown Holdings Berhad dan telah menerapkan sistem manufaktur berbasis *Industry 4.0*, termasuk teknologi *Internet of Things (IoT)*, *AI*, dan robotisasi dalam proses produksinya. Lokasi ini dipilih karena telah menerapkan sistem CNC dengan integrasi *AI* dan robotik dalam skala industri.

Waktu pelaksanaan penelitian direncanakan selama enam bulan, dimulai sejak Maret hingga Agustus, yang mencakup tahap persiapan, pelaksanaan eksperimen, pengumpulan data, serta pengolahan dan analisis hasil.

### Bahan dan Alat Penelitian

Objek utama penelitian adalah mesin CNC Brother 31A yang telah terintegrasi dengan sistem *AI* dan robotisasi. Mesin ini memiliki *control panel*, *spindle*, *tool changer*, dan *coolant system* yang mendukung proses pemesinan secara efisien dan presisi. Mesin ini berfungsi sebagai pusat aktivitas pemotongan material, dan dilengkapi teknologi *smart automation* yang mampu melakukan penyesuaian pemotongan secara otomatis berdasarkan kondisi real-time.

Berikut pada Gambar 1 disajikan mesin CNC Brother 31A yang digunakan dalam proses pemesinan. Mesin ini merupakan tipe yang telah dilengkapi sistem *AI* dan robotisasi untuk meningkatkan presisi dan efisiensi kerja.



Gambar 1. Mesin CNC Brother 31A

Untuk validasi hasil pemesinan, digunakan alat ukur *Coordinate Measuring Machine (CMM)* 4D yang memungkinkan pengukuran dimensi secara tiga dimensi dan presisi tinggi. Selain itu, digunakan *surface profilometer* untuk mengukur tingkat kekasaran permukaan, serta *caliper* digital dan *contracter* untuk evaluasi lebih lanjut terhadap dimensi produk. Alat-alat ini memastikan bahwa hasil yang diperoleh dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis statistik terkait kualitas hasil pemesinan.



Gambar 2. Melsin CMM 4D untuk Pelngukuran Dimensi

Pada gambar 2 penggunaan mesin CMM 4D berperan penting dalam memastikan ketepatan dimensi produk, khususnya dalam mengukur keselindisan secara presisi tinggi untuk mendukung validitas analisis kualitas pemesinan CNC. Hasil pengukuran dimensi menggunakan caliper, CMM, dan contracer yang ditampilkan pada Gambar 3 menjadi dasar evaluasi keselindisan dan kekasaran permukaan, serta mendukung analisis statistik terhadap pengaruh sistem AI dan robotisasi dalam proses pemesinan.

PT. EYERDOWN TECHNOLOGY IN-PROCESS INSPECTION REPORT									
Customer	Part Name		Part No.	QMS	QC No.	Date			
DIKONIC	S22217		S24 2025 Rev 01	012723	01010				
SN	Specification	Method	Unit	Min	Max	Min	Max	Min	Max
PR.1 (S24 2025 Rev 01)									
1	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
2	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
3	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
4	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
5	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
6	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
7	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
8	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
9	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
10	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
11	Ø 4.4 ± 0.05 (S24 2025 Rev 01)	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
PR.2 (S24 2025 Rev 01)									
12	11.8 ± 0.05	PRO	mm	11.75	11.85	11.75	11.85	11.75	11.85
13	11.8 ± 0.05	PRO	mm	11.75	11.85	11.75	11.85	11.75	11.85
14	11.8 ± 0.05	PRO	mm	11.75	11.85	11.75	11.85	11.75	11.85
15	11.8 ± 0.05	PRO	mm	11.75	11.85	11.75	11.85	11.75	11.85
16	11.8 ± 0.05	PRO	mm	11.75	11.85	11.75	11.85	11.75	11.85
PR.3 (S24 2025 Rev 01)									
17	Ø 4.4 ± 0.05	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
18	Ø 4.4 ± 0.05	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
19	Ø 4.4 ± 0.05	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
20	Ø 4.4 ± 0.05	PRO	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
PR.4 (S24 2025 Rev 01)									
21	11.8 ± 0.05	CALIPER	mm	11.75	11.85	11.75	11.85	11.75	11.85
22	11.8 ± 0.05	CALIPER	mm	11.75	11.85	11.75	11.85	11.75	11.85
PR.5 (S24 2025 Rev 01)									
23	Ø 4.4 ± 0.05	TRUSS	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
24	Ø 4.4 ± 0.05	TRUSS	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
25	Ø 4.4 ± 0.05	GAUGE	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
26	Ø 4.4 ± 0.05	TRUSS	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
27	Ø 4.4 ± 0.05	TRUSS	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
28	Ø 4.4 ± 0.05	TRUSS	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45
29	Ø 4.4 ± 0.05	TRUSS	mm	4.35	4.45	4.35	4.45	4.35	4.45

Gambar 3. Hasil Dimensi Produk

Gambar 3 menunjukkan perbedaan nyata dimensi produk sebelum dan sesudah penerapan AI dan robotisasi, menegaskan bahwa otomatisasi meningkatkan ketepatan dan konsistensi produksi serta berdampak signifikan terhadap kualitas produk manufaktur.

**Tata Laksana Penelitian**

Penelitian ini menggunakan metode **deskriptif-analitis** dengan pendekatan kuantitatif untuk menggambarkan secara sistematis proses implementasi sistem robotik berbasis kecerdasan buatan (AI) dalam lingkungan pemesinan CNC. Metode ini dipilih karena memungkinkan peneliti untuk mengamati dan menganalisis hubungan antara variabel secara objektif, sekaligus menginterpretasikan data hasil pengukuran yang diperoleh dari proses produksi aktual. Penelitian dilakukan melalui pengambilan data primer berupa hasil pengukuran dimensi produk—terutama kekasaran permukaan dan keselindisan—dengan menggunakan alat ukur presisi seperti *surface roughness tester*, *contracer*, dan *CMM 4D*. Selain itu, parameter operasional seperti waktu produksi, biaya produksi, jumlah cacat produk, serta tingkat keausan alat juga dicatat sebagai data penunjang.

Fokus utama penelitian ini adalah membandingkan parameter kualitas produk antara proses pemesinan CNC yang menggunakan sistem robotik berbasis AI dan proses konvensional tanpa intervensi AI. Analisis dilakukan dengan uji statistik inferensial seperti uji *t*, uji regresi linier sederhana, ANOVA, serta korelasi, guna mengetahui signifikansi dan kekuatan pengaruh dari penerapan sistem AI terhadap kualitas hasil produksi. Dengan pendekatan ini, penelitian bertujuan untuk memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai seberapa besar dampak teknologi AI-robotik dalam meningkatkan presisi dan mutu produk manufaktur, khususnya dalam konteks parameter geometrik dan permukaan. Temuan dari studi ini diharapkan dapat menjadi dasar pertimbangan dalam pengembangan sistem produksi berbasis otomatisasi di sektor industri manufaktur.

### Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini mencakup seluruh unit mesin CNC di PT Evergrown Technology Batam yang relevan dengan implementasi sistem AI-robotik. Teknik pengambilan sampel dilakukan secara *purposive sampling* terhadap 25 unit pengamatan, yang terdiri dari proses pemesinan dengan dan tanpa sistem AI. Pemilihan ini didasarkan pada pertimbangan bahwa sampel yang dipilih mewakili kondisi operasional aktual dan relevan dengan tujuan penelitian. Teknik *purposive sampling* memungkinkan peneliti menentukan subjek berdasarkan pertimbangan tertentu yang dianggap paling representatif [17].

Data yang dikumpulkan meliputi parameter kekasaran permukaan (*Ra*) dan keselindisan, yang masing-masing diukur menggunakan *profilometer* dan *CMM*. Hasil pengukuran kemudian dianalisis untuk mengetahui signifikansi perbedaan antara kondisi dengan sistem AI dan tanpa sistem AI.

### Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui tiga metode utama, yaitu observasi langsung, dokumentasi, dan pengukuran eksperimental. Observasi dilakukan untuk mencatat proses pemesinan secara real-time pada unit mesin CNC. Dokumentasi digunakan untuk mengumpulkan data sekunder berupa catatan teknis dan riwayat pengoperasian mesin. Sedangkan pengukuran eksperimental dilakukan secara langsung terhadap sampel produk hasil pemesinan.

Seluruh data dikumpulkan berdasarkan standar prosedur operasional perusahaan, dan diukur dalam kondisi terkendali untuk memastikan validitas hasil. Variabel seperti jenis material, kecepatan potong, dan kedalaman pemakanan disamakan untuk menghindari bias dalam hasil pengukuran.

### Teknik Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan uji *Analysis of Variance (ANOVA)* untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara dua kelompok, yakni proses pemesinan dengan dan tanpa sistem robotik AI. Selain itu, digunakan regresi linier sederhana untuk menganalisis hubungan antara penerapan sistem AI-robotik (variabel independen X) dan kualitas produk (variabel dependen Y), khususnya kekasaran permukaan dan keselindisan produk. Model regresi dirumuskan dalam bentuk  $Y = a + bX + e$ , di mana Y adalah variabel kualitas, X adalah penerapan sistem AI, a adalah konstanta, b adalah koefisien regresi, dan e adalah error.

Selain uji statistik inferensial, juga dilakukan analisis deskriptif untuk menyajikan data hasil pengukuran dalam bentuk tabel dan grafik, serta analisis komparatif untuk membandingkan hasil antara dua kelompok eksperimen. Interpretasi hasil analisis difokuskan pada signifikansi perubahan parameter kualitas sebagai dampak dari penerapan sistem robotik berbasis AI.

### Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilaksanakan melalui empat tahapan utama. Tahap pertama adalah persiapan, yang meliputi studi pustaka, penyusunan instrumen penelitian, dan koordinasi dengan pihak perusahaan. Tahap kedua adalah pengumpulan data melalui observasi dan eksperimen. Tahap ketiga adalah pengolahan dan analisis data menggunakan perangkat lunak statistik. Tahap terakhir adalah interpretasi hasil dan penyusunan kesimpulan berdasarkan temuan empiris.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Analisis Deskriptif

Analisis deskriptif dilakukan untuk memberikan gambaran awal mengenai karakteristik data dari masing-masing variabel penelitian yang difokuskan pada *pengaruh implementasi sistem robotik berbasis kecerdasan buatan terhadap kualitas produk pemesinan CNC*. Dalam hal ini, kualitas produk difokuskan pada dua parameter utama, yaitu kekasaran permukaan dan keselindisan produk. Statistik deskriptif yang ditampilkan meliputi nilai minimum, maksimum, rata-rata (mean), dan simpangan baku (standard deviation).

Tabel 1. Statistik Deskriptif

Variabel	N	Min	Max	Mean	Std. Deviation
Implementasi Sistem Robotik AI	25	4.00	9.00	6.92	1.470
Kekasaran Permukaan	25	1.00	2.00	1.80	0.263
Keselindisan Produk	25	0.013	0.061	0.03980	0.013805

Berdasarkan Tabel 2, implementasi sistem robotik berbasis kecerdasan buatan berada pada kategori sedang hingga tinggi dengan nilai rata-rata sebesar 6,92 dan simpangan baku sebesar 1,470. Hal ini menunjukkan bahwa pemanfaatan teknologi berbasis AI dalam proses pemesinan CNC telah cukup optimal di lingkungan yang diteliti. Dari sisi kualitas produk, kekasaran permukaan sebagai salah satu indikator utama menunjukkan rata-rata sebesar 1,80 dengan simpangan baku 0,263, yang mengindikasikan bahwa hasil permukaan produk tergolong cukup halus dan memiliki variasi data yang rendah. Sementara itu, keselindisan produk memiliki rata-rata sebesar 0,03980 dengan penyebaran data yang rendah pula, sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil pemesinan tergolong presisi dalam aspek bentuk silindris. Secara umum, data ini memberikan gambaran awal yang penting mengenai hubungan antara penerapan sistem robotik berbasis AI dengan kualitas produk yang dihasilkan, yang akan dianalisis lebih lanjut melalui pendekatan inferensial untuk mengetahui sejauh mana pengaruh yang ditimbulkan antar variabel.

### Uji Normalitas

Tabel 2. Hasil Uji Normalitas

		One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
		Ap AI & Robot	Kekerasan	Keselindisan
N		25	25	25
Normal	Mean	6.92	1.80	.03980
Parameters <sup>a,b</sup>	Std. Deviation	1.470	.263	.013805
Most Extreme	Absolute	.169	.096	.092
Differences	Positive	.134	.082	.073
	Negative	-.169	-.096	-.092
Test Statistic		.169	.096	.092
Asymp. Sig. (2-tailed)		.064 <sup>c</sup>	.200 <sup>c,d</sup>	.200 <sup>c,d</sup>

a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

c. Lilliefors Significance Correction.

d. This is a lower bound of the true significance.

Uji normalitas dilakukan untuk memastikan bahwa data pada variabel utama penelitian terdistribusi normal, yang merupakan syarat untuk analisis statistik parametrik. Berdasarkan hasil One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test pada Tabel 2, diketahui bahwa variabel *Implementasi*

◆ *Sistem Robotik Berbasis AI, Kekasaran Permukaan, dan Keselindisan Produk* masing-masing memiliki nilai signifikansi sebesar 0,064; 0,200; dan 0,200 ( $p > 0,05$ ). Hal ini menunjukkan bahwa seluruh variabel utama berdistribusi normal, sehingga dapat dilanjutkan ke tahap analisis inferensial seperti regresi linier untuk menguji pengaruh sistem AI terhadap kualitas produk pemesinan CNC secara valid dan reliabel.

## Uji Linieritas

Tabel 3. Hasil Uji Linearitas

			ANOVA Table				
			Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Kekerasan * Aplikasi AI dan Robotisasi	Between Groups	(Combined) Linearity	1.012	5	.202	5.974	.002
		Linearity	.955	1	.955	28.196	.000
		Deviation from Linearity	.057	4	.014	.419	.793
		Within Groups	.644	19	.034		
Total			1.656	24			
Keselindisan * Aplikasi AI dan Robotisasi	Between Groups	(Combined) Linearity	.002	5	.000	1.946	.134
		Linearity	.001	1	.001	8.407	.009
		Deviation from Linearity	.000	4	.000	.331	.854
		Within Groups	.003	19	.000		
Total			.005	24			

Berdasarkan Tabel 3, hasil uji linieritas menunjukkan bahwa terdapat hubungan linier yang signifikan antara implementasi sistem AI dan robotisasi dengan kekasaran permukaan serta keselindisan produk. Nilai signifikansi uji *Linearity* berada di bawah 0,05 (masing-masing 0,000 dan 0,009), sedangkan nilai *Deviation from Linearity* di atas 0,05 (0,793 dan 0,854), menandakan tidak adanya penyimpangan dari pola linier. Dengan demikian, hubungan antara variabel-variabel tersebut dapat dianalisis lebih lanjut menggunakan regresi linier secara valid.

## Uji T

Tabel 4. Hasil Uji T

Hubungan Variabel	t-hitung	t-tabel	Keterangan
Aplikasi AI dan Robotisasi → Kekerasan	15.969	2.080	t-hitung > t-tabel → <b>Signifikan</b>
Aplikasi AI dan Robotisasi → Keselindisan	6.438	2.080	t-hitung > t-tabel → <b>Signifikan</b>

Berdasarkan Tabel 4 hasil uji *t*, diketahui bahwa variabel Aplikasi AI dan Robotisasi memiliki pengaruh yang signifikan terhadap variabel Kekasaran dan Keselindisan produk hasil pemesinan CNC. Untuk variabel kekasaran, nilai *t-hitung* sebesar 15,969 jauh melebihi nilai *t-tabel* sebesar 2,080. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara kondisi sebelum dan sesudah penerapan sistem robotik berbasis AI, di mana kekasaran permukaan mengalami penurunan. Artinya, teknologi AI mampu mengatur parameter pemesinan secara lebih presisi, sehingga menghasilkan permukaan produk yang lebih halus dan konsisten.

Sementara itu, pada variabel keselindisan, nilai *t-hitung* sebesar 6,438 juga lebih besar dari nilai *t-tabel*, yang menunjukkan bahwa AI dan robotisasi juga memberikan dampak yang nyata dalam meningkatkan keseragaman bentuk silindris produk. Hasil ini menegaskan bahwa sistem berbasis AI tidak hanya mampu mengoptimalkan kecepatan dan efisiensi proses pemesinan, tetapi juga berdampak langsung pada peningkatan kualitas geometri produk. Dengan demikian, implementasi sistem robotik berbasis kecerdasan buatan dalam pemesinan CNC dapat dianggap sebagai solusi yang efektif dan strategis untuk menjawab tuntutan pasar terhadap produk-produk manufaktur dengan standar kualitas tinggi.

## Hasil Uji ANOVA

Tabel 5. Hasil Uji ANOVA

		ANOVA					
		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.	
Kekerasan	Between Groups	1.012	5	.202	5.974	.002	
	Within Groups	.644	19	.034			
	Total	1.656	24				
Keselindisan	Between Groups	.002	5	.000	1.946	.134	
	Within Groups	.003	19	.000			
	Total	.005	24				

Berdasarkan hasil *Uji ANOVA* pada Tabel 5, diketahui bahwa terdapat perbedaan yang signifikan dalam variabel kekasaran berdasarkan tingkat penerapan sistem AI dan robotisasi, dengan nilai signifikansi sebesar 0,002 (lebih kecil dari 0,05). Hal ini menunjukkan bahwa variasi dalam tingkat adopsi teknologi AI secara nyata memengaruhi tingkat kekasaran permukaan produk, yang merupakan salah satu indikator penting kualitas hasil produksi. Sementara itu, pada variabel keselindisan, nilai signifikansi sebesar 0,134 (lebih besar dari 0,05), yang berarti tidak terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa implementasi sistem robotik berbasis AI memiliki pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran produk, namun belum menunjukkan perbedaan yang berarti terhadap keselindisan dalam konteks data yang dianalisis.

### Regresi Linear Sederhana

Tabel 6. Hasil Uji Regresi Linier Sederhana X terhadap Y1

		Coefficients <sup>a</sup>				
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
Model		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	2.736	.171		15.969	.000
	Aplikasi AI dan Robotisasi	-.136	.024	-.760	-5.601	.000

a. Dependent Variable: Kekerasan

Hasil analisis regresi linier sederhana menunjukkan adanya hubungan negatif yang signifikan antara penerapan sistem AI dan robotisasi terhadap kekasaran permukaan produk (Y1). Berdasarkan Tabel 7, diperoleh persamaan regresi:

$$Y = 2,736 - 0,136X,$$

dengan nilai signifikansi sebesar 0,000, yang lebih kecil dari 0,05. Ini berarti bahwa setiap peningkatan skor implementasi AI dan robotisasi akan menurunkan tingkat kekasaran permukaan sebesar 0,136 satuan. Dengan kata lain, semakin tinggi pemanfaatan teknologi AI dan robotik dalam proses pemesinan CNC, maka permukaan produk akan semakin halus, sehingga kualitas produk meningkat.

Tabel 7. Hasil Uji Regresi Sederhana X terhadap Y2

		Coefficients <sup>a</sup>				
		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
Model		B	Std. Error	Beta		
1	(Constant)	.075	.012		6.438	.000
	Aplikasi AI dan Robotisasi	-.005	.002	-.541	-3.084	.005

a. Dependent Variable: Keselindisan

Selanjutnya, hasil regresi linier sederhana terhadap variabel keselindisan produk (Y2) juga menunjukkan hubungan yang negatif dan signifikan. Berdasarkan Tabel 8, diperoleh persamaan regresi:

$$Y = 0,075 - 0,005X,$$

dengan nilai signifikansi sebesar 0,005, yang menunjukkan bahwa peningkatan penerapan AI dan robotisasi dapat menurunkan tingkat keselindisan produk sebesar 0,005 satuan. Hal ini menegaskan bahwa sistem AI dan robotik tidak hanya berdampak pada hasil permukaan, tetapi juga

secara signifikan meningkatkan presisi bentuk dimensi, khususnya keselindisan, dalam proses pemesinan CNC. Dengan demikian, penerapan teknologi ini terbukti efektif dalam mendukung peningkatan kualitas hasil produksi secara keseluruhan.

### ANOVA (Regresi)

Tabel 8. Hasil Uji ANOVA Regresi

No	Variabel Dependen	Sum of Squares (Regresi)	df	Mean Square	F Hitung	Sig.
1	Kekasaran	0.955	1	0.955	31.366	0.000
2	Keselindisan	0.001	1	0.001	9.513	0.005

Hasil uji ANOVA regresi pada Tabel 8 menunjukkan bahwa model regresi yang digunakan untuk menjelaskan pengaruh Aplikasi AI dan Robotisasi terhadap kedua variabel dependen, yaitu kekasaran dan keselindisan, bersifat signifikan secara statistik.

Untuk variabel kekasaran, diperoleh nilai F hitung sebesar 31.366 dengan tingkat signifikansi 0.000, yang jauh lebih kecil dari 0.05. Ini menandakan bahwa model regresi yang menghubungkan AI dan robotisasi dengan kekasaran permukaan produk sangat signifikan, dan bahwa variabel independen tersebut secara nyata menjelaskan variasi yang terjadi pada variabel kekasaran.

Sementara itu, untuk variabel keselindisan, nilai F hitung adalah 9.513 dengan tingkat signifikansi 0.005. Ini juga lebih kecil dari 0.05, menunjukkan bahwa model regresi yang menghubungkan AI dan robotisasi dengan keselindisan bermakna secara statistik. Dengan demikian, penerapan sistem AI dan robotisasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap peningkatan presisi bentuk produk pemesinan CNC.

Secara keseluruhan, hasil ANOVA ini memperkuat temuan sebelumnya bahwa model regresi yang digunakan dalam penelitian ini valid dan signifikan, serta mampu menjelaskan hubungan antara penerapan teknologi cerdas dan kualitas hasil produksi.

### Uji Koefisien Korelasi

Tabel 9. Model Summary Hasil Uji Korelasi X terhadap Y1

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.760 <sup>a</sup>	.577	.559	.175

a. Predictors: (Constant), Aplikasi AI dan Robotisasi

Berdasarkan Tabel 14, hasil uji korelasi antara Aplikasi AI dan Robotisasi terhadap variabel kekasaran hasil permesinan CNC menunjukkan adanya hubungan negatif yang kuat dengan nilai koefisien korelasi (R) sebesar 0,760. Artinya, semakin tinggi penerapan teknologi AI dan robotik, maka tingkat kekasaran permukaan produk semakin menurun. Nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,577 mengindikasikan bahwa 57,7% variasi kekasaran dapat dijelaskan oleh penerapan sistem AI dan robotisasi, sementara sisanya dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Nilai Adjusted  $R^2$  sebesar 0,559 juga memperkuat bahwa model regresi yang digunakan memiliki kecocokan yang baik dengan data yang diteliti.

Tabel 10. Model Summary Hasil Uji Korelasi X terhadap Y2

Model Summary				
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate
1	.541 <sup>a</sup>	.293	.262	.012

a. Predictors: (Constant), Aplikasi AI dan Robotisasi

Sementara itu, pada Tabel 15, hubungan antara Aplikasi AI dan Robotisasi terhadap keselindisan produk juga menunjukkan korelasi negatif dengan nilai R sebesar 0,541, yang termasuk dalam kategori sedang. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan pemanfaatan AI dan robotisasi turut menurunkan tingkat keselindisan, atau dengan kata lain, produk yang dihasilkan menjadi lebih presisi secara geometrik. Nilai  $R^2$  sebesar 0,293 mengindikasikan bahwa 29,3% variasi keselindisan dapat dijelaskan oleh AI dan robotisasi, sementara 70,7% sisanya disebabkan oleh faktor lain. Nilai

Adjusted R<sup>2</sup> sebesar 0,262 menandakan bahwa model ini masih cukup relevan untuk digunakan dalam menjelaskan pengaruh AI dan robotik terhadap presisi hasil produksi.

Secara keseluruhan, hasil uji korelasi ini menguatkan bahwa penerapan teknologi AI dan robotisasi memiliki kontribusi nyata terhadap peningkatan kualitas hasil pemrosesan, baik dari sisi kekasaran maupun keselindisan produk.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh implementasi sistem robotik berbasis kecerdasan buatan terhadap kualitas produk pemrosesan CNC, dapat disimpulkan bahwa integrasi teknologi ini memberikan dampak signifikan dan terukur terhadap peningkatan mutu hasil produksi. Penerapan sistem robotik AI secara nyata mampu meningkatkan kualitas permukaan dan presisi dimensi produk, serta memberikan manfaat tambahan dalam hal efisiensi operasional.

Secara kuantitatif, penerapan sistem AI dan robotisasi berpengaruh signifikan dalam menurunkan tingkat kekasaran permukaan produk dari rata-rata 2,736 menjadi 2,336 satuan (penurunan 14,3%) dan meningkatkan keselindisan produk dari 0,075 menjadi 0,045 satuan (peningkatan presisi 40%). Hasil uji regresi menunjukkan bahwa terdapat hubungan negatif yang kuat antara AI dan robotisasi terhadap kedua parameter kualitas tersebut, yang diperkuat oleh nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,577 untuk kekasaran dan 0,293 untuk keselindisan. Artinya, variasi dalam kualitas produk secara nyata dapat dijelaskan oleh variabel penerapan AI dan robotisasi.

Selain itu, temuan dari uji T, ANOVA, dan regresi linier sederhana juga menunjukkan bahwa pengaruh teknologi AI terhadap kualitas produksi adalah signifikan, dengan nilai signifikansi < 0,05 untuk kedua parameter utama. Hasil pengujian mendalam menggunakan alat ukur seperti CMM 4D dan contracer memperkuat bahwa teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi waktu dan biaya, tetapi juga mendukung akurasi pengukuran dan kontrol kualitas yang lebih tinggi.

Dengan demikian, implementasi sistem robotik berbasis kecerdasan buatan terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas produk pemrosesan CNC. Teknologi ini sangat direkomendasikan untuk diadopsi lebih luas dalam industri manufaktur sebagai bagian dari strategi menuju transformasi digital dan peningkatan daya saing di era Industri 4.0. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model penerapan AI pada proses pemrosesan lain dan mengevaluasi dampaknya dalam jangka panjang terhadap produktivitas dan efisiensi sistem produksi secara keseluruhan.

### SARAN

1. Peningkatan Integrasi Teknologi AI di Proses Produksi  
Perusahaan manufaktur dianjurkan untuk mengintegrasikan sistem robotik berbasis AI tidak hanya pada proses pemrosesan inti, tetapi juga dalam pemantauan kualitas dan pemeliharaan mesin secara otomatis. Pendekatan ini terbukti dapat meningkatkan efisiensi dan konsistensi kualitas produk.
2. Penguatan Kompetensi SDM dalam Teknologi AI-Robotik  
Diperlukan pelatihan khusus bagi operator dan teknisi agar mampu mengoperasikan serta merawat sistem AI dan robotika secara optimal. SDM yang kompeten merupakan kunci utama dalam keberhasilan penerapan teknologi canggih.
3. Optimalisasi Pemanfaatan Data Produksi  
Data yang dihasilkan dari sistem AI perlu dianalisis secara berkelanjutan guna mengidentifikasi pola produksi, prediksi kegagalan, dan peluang peningkatan proses, sehingga mendukung efisiensi dan pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven decision making*).
4. Penerapan Bertahap dan Evaluasi Berkala  
Bagi industri yang baru mulai mengadopsi sistem AI dan robotik, disarankan untuk melakukan implementasi secara bertahap dan disertai evaluasi terukur. Strategi ini membantu adaptasi teknologi berjalan lebih lancar dan mengurangi risiko gangguan operasional.
5. Kolaborasi dengan Pusat Riset dan Akademisi  
Agar penerapan AI dan robotik lebih optimal dan sesuai kebutuhan industri lokal, perusahaan disarankan menjalin kerja sama dengan perguruan tinggi atau lembaga penelitian. Kolaborasi

ini dapat mempercepat pengembangan solusi inovatif serta membuka peluang pelatihan dan pengembangan teknologi secara berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Borboni, K. V. V. Reddy, I. Elamvazuthi, M. S. AL-Quraishi, E. Natarajan, and S. S. Azhar Ali, "The Expanding Role of Artificial Intelligence in Collaborative Robots for Industrial Applications: A Systematic Review of Recent Works," *Machines*, vol. 11, no. 1, 2023, doi: 10.3390/machines11010111.
- [2] A. Hentout, M. Aouache, A. Maoudj, and I. Akli, "Human-robot interaction in industrial collaborative robotics: a literature review of the decade 2008-2017," *Adv. Robot.*, vol. 33, no. 15-16, pp. 764-799, 2019, doi: 10.1080/01691864.2019.1636714.
- [3] IFR, "A positioning paper: Demystifying Collaborative Industrial Robots," no. December, pp. 1-5, 2018, [Online]. Available: [https://web.archive.org/web/20190823143255/https://ifr.org/downloads/papers/IFR\\_Demystifying\\_Collaborative\\_Robots.pdf](https://web.archive.org/web/20190823143255/https://ifr.org/downloads/papers/IFR_Demystifying_Collaborative_Robots.pdf)
- [4] Y. Li *et al.*, "A review on interaction control for contact robots through intent detection," *Prog. Biomed. Eng.*, vol. 4, no. 3, 2022, doi: 10.1088/2516-1091/ac8193.
- [5] D. Mukherjee, K. Gupta, L. H. Chang, and H. Najjaran, "A Survey of Robot Learning Strategies for Human-Robot Collaboration in Industrial Settings," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 73, no. July 2021, 2022, doi: 10.1016/j.rcim.2021.102231.
- [6] S. Robots, "WORLD™ 2022 Program," *Mol. Genet. Metab.*, vol. 135, no. 2, pp. S7-S14, 2022, doi: 10.1016/j.ymgme.2021.12.015.
- [7] L. Gualtieri, E. Rauch, and R. Vidoni, "Emerging research fields in safety and ergonomics in industrial collaborative robotics: A systematic literature review," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 67, no. May 2020, p. 101998, 2021, doi: 10.1016/j.rcim.2020.101998.
- [8] M. Maadi, H. A. Khorshidi, and U. Aickelin, "A review on human-ai interaction in machine learning and insights for medical applications," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 4, pp. 1-21, 2021, doi: 10.3390/ijerph18042121.
- [9] E. Matheson, R. Minto, E. G. G. Zampieri, M. Faccio, and G. Rosati, "Human-robot collaboration in manufacturing applications: A review," *Robotics*, vol. 8, no. 4, pp. 1-25, 2019, doi: 10.3390/robotics8040100.
- [10] M. Faccio *et al.*, "Human factors in cobot era: a review of modern production systems features," *J. Intell. Manuf.*, vol. 34, no. 1, pp. 85-106, 2023, doi: 10.1007/s10845-022-01953-w.
- [11] C. A. Buckner *et al.*, "We are IntechOpen , the world ' s leading publisher of Open Access books Built by scientists , for scientists TOP 1 %," *Intech*, vol. 11, no. tourism, p. 13, 2016, [Online]. Available: <https://www.intechopen.com/books/advanced-biometric-technologies/liveness-detection-in-biometrics>
- [12] F. Semeraro, A. Griffiths, and A. Cangelosi, "Human-robot collaboration and machine learning: A systematic review of recent research," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 79, no. August 2022, 2022, doi: 10.1016/j.rcim.2022.102432.
- [13] A. Desai, "A Review of Collaborative Robotics ( Cobots ) in Industrial Automation," vol. 11, no. 1, 2025.
- [14] R. G. Lins and S. N. Givigi, "Cooperative Robotics and Machine Learning for Smart Manufacturing: Platform Design and Trends within the Context of Industrial Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 95444-95455, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3094374.
- [15] M. Spezialetti, G. Placidi, and S. Rossi, "Emotion Recognition for Human-Robot Interaction: Recent Advances and Future Perspectives," *Front. Robot. AI*, vol. 7, no. December, pp. 1-11, 2020, doi: 10.3389/frobt.2020.532279.
- [16] Sugiyono, *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta, 2019.
- [17] S. Arikunto, *Prosedur Penelitian: Suatu Pendekatan Praktik*. Jakarta: Rineka Cipta, 2018.