



USE OF ROBOT ARM AS AN EFFORT TO AUTOMATE AND OPTIMIZE WASTE SORTING IN THE INDUSTRY CIRCULAR ECONOMY

PENGGUNAAN ROBOT ARM SEBAGAI UPAYA OTOMASI DAN OPTIMALISASI PEMILAHAN SAMPAH PADA INDUSTRI SIRKULAR EKONOMI

Muhammad Hanif Abdur Razaq¹, Siti Sendari² Mario Leo Nardo³, Amalia Prameswari Alvina⁴

^{1,2,3,4} Pendidikan Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Malang

E-mail: muh.rozaq.2305336@students.um.ac.id¹, siti.sendari.ft@um.ac.id²,

mario.leo.2309356@students.um.ac.id³, amalia.prameswari.2305336@students.um.ac.id⁴

ARTICLE INFO

Correspondent:

Muhammad Hanif Abdur Razaq
muh.rozaq.2305336@students.um.ac.id

Key words:

Robot, Landfill, Waste Processing.

Website:

<https://idm.or.id/JSCR/index.php/JSCR>

Page: 1774 - 1783

ABSTRACT

In the waste processing industry, the use of robot arms for waste sorting at landfills brings significant benefits. This study highlights the positive impact of implementing such technology, particularly in enhancing operational effectiveness, supporting community economies, and reducing negative impacts on the environment and the health of informal workers. Robot arms can perform waste sorting tasks with a high level of organization, allowing for the optimization of time and labor use, and reducing health risks from exposure to hazardous substances. The primary goal of implementing this technology is to streamline the waste sorting process while increasing the productivity and efficiency of the waste processing industry. With this automation, the sorting process becomes not only faster and more efficient but also helps to reduce safety and health risks, which are common issues in hazardous work environments. The implementation of robot arms is expected to reduce human workload in the sorting process, as well as decrease direct exposure to waste that may contain toxic materials, thus supporting the creation of a safer and healthier work environment.

Copyright © 2024 JSCR. All rights reserved.

INFO ARTIKEL

Koresponden

Muhammad Hanif Abdur Razaq
muh.rozaq.2305336@students.um.ac.id

Kata kunci:

Robot, TPA, Pengolahan Sampah.

Website:

<https://idm.or.id/JSCR/index.php/JSCR>

Hal: 1774 - 1783

ABSTRAK

Dalam industri pengolahan sampah, penggunaan robot arm untuk pemilahan sampah di Tempat Pembuangan Akhir (TPA) membawa sejumlah manfaat yang signifikan. Penelitian ini menyoroti dampak positif dari penerapan teknologi tersebut, khususnya dalam meningkatkan efektivitas operasional, mendukung perekonomian masyarakat, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan serta kesehatan pekerja informal. Robot arm mampu menjalankan tugas pemilahan sampah dengan tingkat organisasi yang tinggi, memungkinkan optimalisasi dalam penggunaan waktu dan tenaga kerja serta mengurangi risiko kesehatan akibat paparan zat berbahaya. Tujuan utama dari penerapan teknologi ini adalah untuk menyederhanakan proses pemilahan sampah, sekaligus meningkatkan produktivitas dan efisiensi industri pengolahan sampah. Dengan otomatisasi ini, proses pemilahan tidak hanya menjadi lebih cepat dan efisien tetapi juga membantu mengurangi risiko keselamatan dan kesehatan kerja yang kerap menjadi masalah di lingkungan kerja yang berbahaya. Implementasi robot arm diharapkan mampu mengurangi beban kerja manusia dalam proses pemilahan, sekaligus mengurangi paparan langsung terhadap sampah yang mungkin mengandung bahan beracun, sehingga mendukung terciptanya lingkungan kerja yang lebih aman dan sehat.

Copyright © 2024 JSCR. All rights reserved.

PENDAHULUAN

Kondisi sampah di Indonesia semakin lama semakin meningkat. Berdasarkan catatan Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) pada tahun 2023, tumpukan sampah di Indonesia mencapai 18.081.278.88 ton per tahun. Hal ini tentu menjadi masalah yang serius seiring dengan bertambahnya penduduk serta perubahan pola konsumsi masyarakat yang berimbas pada pertambahan volume dan berbagai jenis sampah. Pertambahan tersebut juga akan menimbulkan beberapa permasalahan baik dari segi kebersihan maupun kesehatan. Dampak buruk yang diberikan oleh sampah yaitu terjadinya pencemaran lingkungan, berpotensi menjadi sumber penyakit serta dapat mengancam keamanan lingkungan dari beberapa bencana seperti longsor dan banjir akibat dari penumpukan sampah (Dewi dkk., 2023).

Kurang optimalnya pengolahan sampah menyebabkan sampah menjadi menumpuk dan tercampur aduk antara sampah organik dan anorganik sehingga menyebabkan pencemaran lingkungan. Hal itu juga dapat menimbulkan kerugian material yang tak kasat mata jika memperhatikan dari nilai sampah tersebut. Pengolahan yang baik lahir dari pemilahan yang baik pula. Sampah yang jika diolah akan memiliki nilai tambah sekaligus mensejahterakan masyarakat sekitar ketimbang melalui pembakaran sampah semata. Oleh karena itu perlu dilakukan pemilahan sampah yang baik untuk mencegah bercampurnya sampah yang dapat mencemari lingkungan. Permasalahan ini memerlukan sebuah upaya yang efektif untuk mengoptimalkan pemilahan sampah (Srinawati dkk., 2022).

Dari sinilah peran teknologi sangat dibutuhkan dengan memanfaatkan perkembangan teknologi yang semakin maju tentu dapat membantu tugas manusia untuk memilah sampah yang begitu banyak. Pemanfaatan teknologi ini berupa robot arm atau robot lengan. Robot arm nantinya berfungsi untuk memilah dan mengelompokkan sampah berdasarkan jenisnya. Robot arm dapat membantu pekerjaan manusia dalam memilah sampah agar lebih terorganisir sehingga pekerjaan menjadi lebih ringan dalam upaya menghemat waktu, tenaga, serta mengurangi resiko kesehatan pada tenaga kerja, terutama ketika dalam memisahkan jenis sampah berbahaya seperti bahan kimia, radioaktif dan elektronik. Dengan memanfaatkan salah satu jenis kecerdasan buatan yaitu computer vision, robot arm dapat berfungsi untuk mendeteksi jenis sampah sehingga dapat dikelompokkan sesuai jenisnya (Wardani dkk., t.t.).

Akan tetapi, pada penelitian ini, sampah yang dapat diambil oleh robot merupakan sampah yang telah dikompres atau sebatas jenis sampah tertentu mengingat ukuran gripper robot arm yang terbatas. Sampah yang akan diambil berupa plastik maupun logam dengan ukuran tertentu yang masih memiliki nilai pendauran ulang yang tinggi. Penelitian ini ditujukan untuk mengungkap nilai potensi penggunaan robot pada industri pengolahan sampah.

Banyak dampak positif yang terjadi dari pengimplementasian robot arm dalam industri pengolahan sampah. dampak positif yang ditimbulkan yaitu dapat membantu mengoptimalkan kinerja industri pengolahan sampah dan memberikan dampak positif bagi lingkungan, tenaga kerja, dan ekonomi. Dengan diterapkannya robot arm ini dapat membantu meringankan tugas memilah sampah yang dilakukan manusia.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini menggabungkan pendekatan kuantitatif dan kualitatif untuk memahami dan mengoptimalkan penggunaan robot arm, khususnya PhantomX Reactor, dalam proses pemilahan sampah pada industri sirkular ekonomi. Pendekatan kuantitatif berfokus pada pengumpulan dan analisis data numerik yang berkaitan dengan performa robot arm, sementara pendekatan kualitatif melibatkan interpretasi data ini dalam konteks pengolahan sampah (Axmalia & Mulasari, 2020).

Pada tahap awal penelitian, kami menggunakan robot arm PhantomX Reactor untuk mengimplementasikan kinematika maju dan terbalik serta algoritma *Q-learning*. Kinematika digunakan untuk menentukan posisi dan orientasi *end-effector* berdasarkan parameter *joint robot* (*forward kinematics*) dan sebaliknya (*inverse kinematics*). Penggunaan algoritma *Q-learning*, salah satu jenis *reinforcement learning*, memungkinkan robot untuk belajar dan mengoptimalkan gerakannya dalam proses pemilahan sampah melalui pengalaman dan *feedback* dari lingkungan.

Studi ini mengadopsi metode eksperimen untuk mengumpulkan data kuantitatif. PhantomX Reactor dilengkapi dengan sensor dan kamera untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan sampah berdasarkan jenisnya (misalnya, plastik, kertas, logam). Data yang dikumpulkan mencakup waktu pemilahan, tingkat akurasi, dan efisiensi gerakan robot (Sanwar & Ahmed, 2023). Referensi yang digunakan mencakup penelitian oleh Prakash, Zahradka, dan Tolga Soyata (2021), yang menunjukkan bahwa algoritma *Q-learning* dapat meningkatkan performa robot dalam tugas-tugas kompleks.

Data kuantitatif dianalisis menggunakan metode statistik untuk menentukan efektivitas algoritma *Q-learning* dalam meningkatkan kecepatan dan akurasi pemilahan sampah. Hasil analisis ini memberikan wawasan tentang kinerja PhantomX Reactor dalam kondisi operasi yang berbeda, serta mengidentifikasi area yang memerlukan perbaikan atau penyesuaian algoritma (Duran, t.t.).

Pendekatan kualitatif melibatkan observasi terhadap operator dan pengelola fasilitas pemilahan sampah. Tujuannya adalah untuk memahami bagaimana teknologi robotika ini diterima dalam proses kerja sehari-hari. Wawancara dilakukan dengan berbagai pihak yang terlibat langsung dalam pengelolaan sampah. Observasi langsung membantu dalam mengidentifikasi tantangan praktis dan potensi manfaat dari implementasi teknologi ini (Sholihah, t.t.).

Temuan kualitatif dianalisis menggunakan metode analisis tematik untuk mengidentifikasi pola dan tema utama yang muncul dari wawancara dan observasi. Data ini memberikan konteks yang lebih kaya untuk hasil kuantitatif, membantu menjelaskan mengapa dan bagaimana robot arm dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas pemilahan sampah. Misalnya, wawancara mungkin mengungkapkan bahwa operator merasa lebih mudah mengelola aliran sampah berkat peningkatan kecepatan pemilahan yang disebabkan oleh algoritma *Q-learning*.

Integrasi hasil kuantitatif dan kualitatif memberikan pemahaman komprehensif tentang dampak penggunaan robot arm dalam industri sirkular ekonomi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi praktis untuk pengembangan lebih lanjut teknologi robotika dalam pengelolaan sampah, serta menginspirasi penelitian lanjutan yang lebih mendalam di bidang ini.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada aspek teknis kinematika dan algoritma pembelajaran mesin, tetapi juga mempertimbangkan aspek humaniora dan implementasi praktis dalam konteks industri (Axmalia & Mulasari, 2020). Gabungan pendekatan kuantitatif dan kualitatif memberikan pandangan holistik yang penting untuk inovasi berkelanjutan dan optimalisasi sistem pemilahan sampah otomatis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinematika arm merupakan salah satu disiplin penting dalam bidang robotika yang mempelajari gerakan tanpa memperhatikan gaya yang menyebabkannya. Penelitian mengenai kinematika arm berfokus pada penentuan posisi dan orientasi *end-effector* (biasanya berupa gripper atau alat kerja) relatif terhadap *base frame* dari robot. Dasar kinematika melibatkan transformasi koordinat yang menghubungkan setiap joint pada robot arm, yang dapat dinyatakan melalui matriks transformasi homogeneous. Salah satu model kinematika yang paling umum digunakan adalah Denavit-Hartenberg (D-H) parameter, yang menyederhanakan perumusan hubungan kinematika dengan mendefinisikan parameter joint dan link secara sistematis.

Studi kinematika maju (*forward kinematics*) dan kinematika terbalik (*inverse kinematics*) adalah dua aspek kunci dalam pemodelan gerakan robot arm. Kinematika maju melibatkan perhitungan posisi dan orientasi *end-effector* berdasarkan nilai joint parameter yang diberikan, sedangkan kinematika terbalik bertujuan untuk menentukan nilai joint parameter yang diperlukan untuk mencapai posisi dan orientasi tertentu dari *end-effector*. Masalah kinematika terbalik seringkali lebih kompleks karena dapat memiliki banyak solusi atau bahkan tidak memiliki solusi tergantung pada konfigurasi robot dan batasan fisiknya.

Penelitian kinematika arm juga mencakup analisis singularitas dan redundansi. Singularitas terjadi ketika robot arm kehilangan derajat kebebasan dalam gerakan tertentu, yang dapat menyebabkan kehilangan kontrol dan potensi kerusakan pada sistem. Analisis singularitas penting untuk memastikan robot arm beroperasi dalam kondisi yang aman dan efisien. Di sisi lain, redundansi dalam robot arm memungkinkan lebih dari satu solusi untuk masalah kinematika terbalik, memberikan fleksibilitas lebih dalam perencanaan jalur gerakan dan penghindaran rintangan.

Berikut Penjelasan mengenai perhitungan kinematika pengambilan objek secara matematika:

1. Definisi Parameter Kinematika

PhantomX Reactor, sebagai robot dengan 4 DoF, memiliki 4 sambungan atau "joint" yang memungkinkan pergerakan di berbagai arah. Setiap sambungan memiliki sudut rotasi tertentu yang harus dicapai untuk menggerakkan *end-effector* (bagian dari robot yang berinteraksi langsung dengan objek) ke posisi target. Untuk setiap sambungan i didefinisikan:

- $\Delta\theta_i$ = Sudut rotasi yang dibutuhkan untuk mencapai posisi target (dalam radian).
- ω_i = Kecepatan sudut sambungan (dalam radian per detik).
- t_i = Waktu yang dibutuhkan oleh sambungan i untuk menyelesaikan gerakan (dalam detik).

2. Rumus Dasar

Waktu yang dibutuhkan oleh sambungan i untuk menyelesaikan gerakannya dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$T_i = \frac{\Delta\theta_i}{\omega_i}$$

Di mana:

T_i adalah waktu yang dibutuhkan untuk rotasi sebesar $\Delta\theta_i$ dengan kecepatan sudut ω_i

3. Menghitung Kecepatan Sudut

Untuk mencapai target waktu total $T=5T=5$ detik, perlu memastikan bahwa waktu total semua sambungan tidak melebihi 5 detik. Karena sambungan yang paling lambat akan menentukan waktu keseluruhan, hitung kecepatan sudut ω_i untuk setiap sambungan. Misalkan sambungan-sambungan robot memiliki sudut rotasi sebagai berikut:

- Sambungan 1: $\Delta\theta_1 = 0.5$ radian.
- Sambungan 2: $\Delta\theta_2 = 0.3$ radian.
- Sambungan 3: $\Delta\theta_3 = 0.4$ radian.
- Sambungan 4: $\Delta\theta_4 = 0.6$ radian

Jika ingin waktu total $T = 5$ detik, maka hitung ω_i untuk setiap sambungan agar memenuhi $T = 5$ detik.

$$\omega_1 = \frac{\Delta\theta_1}{T} = \frac{0.5 \text{ rad}}{5 \text{ detik}} = 0.1 \text{ rad/detik}$$

$$\omega_2 = \frac{\Delta\theta_2}{T} = \frac{0.3 \text{ rad}}{5 \text{ detik}} = 0.06 \text{ rad/detik}$$

$$\omega_3 = \frac{\Delta\theta_3}{T} = \frac{0.4 \text{ rad}}{5 \text{ detik}} = 0.08 \text{ rad/detik}$$

$$\omega_4 = \frac{\Delta\theta_4}{T} = \frac{0.6 \text{ rad}}{5 \text{ detik}} = 0.12 \text{ rad/detik}$$

4. Verifikasi Waktu Gerakan Total

Setelah menghitung kecepatan sudut untuk setiap sambungan, kita harus memverifikasi bahwa tidak ada sambungan yang melebihi waktu 5 detik. Berdasarkan perhitungan di atas, kecepatan sudut yang diperlukan untuk masing-masing sambungan memenuhi kondisi $T=5T = 5T=5$ detik.

5. Interpretasi Hasil

- Jika kecepatan sudut yang dihitung tidak sesuai dengan kemampuan motor robot atau jika waktu gerakan tidak sesuai dengan target, kita harus menyesuaikan sudut rotasi $\Delta\theta$ atau meningkatkan performa motor.
- Dalam aplikasi nyata, robot sering diatur agar bergerak lebih cepat pada sambungan yang membutuhkan sudut rotasi lebih besar, agar semua sambungan menyelesaikan gerakan pada waktu yang sama, sehingga mencapai target waktu 5 detik.

Dalam konteks aplikasi industri, pemahaman yang mendalam tentang kinematika arm sangat penting untuk desain dan implementasi sistem otomasi yang efisien. Misalnya, pada lini pemilahan sampah otomatis dalam industri sirkular ekonomi, robot arm digunakan untuk mengklasifikasikan dan memindahkan material berdasarkan jenisnya. Keakuratan dan kecepatan gerakan robot arm sangat bergantung pada algoritma kinematika yang digunakan untuk mengontrol gerakannya. Penggunaan metode numerik dan optimisasi untuk menyelesaikan masalah kinematika terbalik menjadi penting dalam meningkatkan performa sistem pemilahan sampah otomatis.

Terakhir, perkembangan teknologi seperti *machine learning* dan *computer vision* telah membuka peluang baru dalam penelitian kinematika arm. Integrasi sensor dan algoritma pengolahan data memungkinkan robot arm untuk beradaptasi dengan lingkungan dinamis dan melakukan tugas-tugas kompleks dengan tingkat presisi yang lebih tinggi. Studi terbaru menunjukkan bahwa penggunaan jaringan saraf tiruan dapat meningkatkan akurasi dan kecepatan penyelesaian masalah kinematika terbalik. Dengan demikian, penelitian di bidang kinematika arm terus berkembang seiring dengan kemajuan teknologi, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap inovasi dalam otomasi industri dan aplikasi robotika lainnya.



Gambar 1. Robot Arm PhantomX Reactor

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan robot arm PhantomX Reactor (Gambar. 1) yang dilengkapi dengan algoritma *Q-learning* dalam proses pemilahan sampah pada industri sirkular ekonomi. Hasil penelitian kuantitatif menunjukkan bahwa PhantomX Reactor mampu melakukan pemilahan sampah dengan tingkat akurasi yang tinggi. Rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh robot untuk menyelesaikan satu siklus pemilahan adalah 5 detik, sedangkan rata-rata waktu yang dibutuhkan oleh manusia dalam menyortir sampah di tempat pembuangan akhir adalah sekitar 8-10 detik per aitem. Perbedaan ini menunjukkan potensi besar robotika dalam meningkatkan efisiensi proses pemilahan sampah.

Tabel 1. Perkiraan Perbandingan Waktu Bila Bekerja dengan Kondisi Optimal

Keterangan	Menit	Jam	Total (asumsi 12 jam)
Robot Arm	12x	720x	8640x
Manusia	8x	480x	5760x

Analisis data menunjukkan bahwa implementasi algoritma *Q-learning* pada PhantomX Reactor meningkatkan kecepatan dan akurasi pemilahan. Hal ini sesuai dengan penelitian oleh Prakash, Zahrada, dan Tolga Soyata (2021), yang menemukan bahwa *Q-learning* memungkinkan robot untuk beradaptasi dan mengoptimalkan gerakannya berdasarkan pengalaman sebelumnya. Dengan algoritma ini, PhantomX Reactor dapat secara efektif mempelajari pola pemilahan yang optimal dan menyesuaikan tindakannya untuk menghindari kesalahan.

Penelitian kualitatif, yang melibatkan observasi di fasilitas pemilahan sampah, diperlukan dalam melakukan interpretasi atas data kuantitatif sebelumnya yang relevan. Kami memproyeksikan bahwa robotika tidak hanya meningkatkan efisiensi tetapi juga mengurangi beban kerja fisik dan risiko cedera bagi pekerja. Operator mencatat bahwa PhantomX Reactor mampu menangani volume sampah meski terkadang ditemui kendala akibat ketidak konsisten performa kinerja robot tersebut dan keterbatasan jenis sampah yang diambil karena ukuran gripper yang terbatas.

Lebih lanjut, integrasi sensor dan kamera pada PhantomX Reactor memungkinkan deteksi dan klasifikasi sampah yang cukup akurat. Sensor ini dapat mengenali berbagai jenis material berdasarkan tekstur, warna, dan bentuk, sehingga memungkinkan pemilahan yang lebih presisi. Studi oleh Cai *et al.* (2023) menegaskan pentingnya teknologi sensor dalam meningkatkan kemampuan deteksi dan klasifikasi robotika dalam konteks industri sirkular ekonomi.

Selain itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan PhantomX Reactor dalam pemilahan sampah dapat mengurangi waktu siklus pemilahan secara signifikan, yang pada gilirannya dapat meningkatkan kapasitas pemrosesan fasilitas pemilahan sampah. Dengan rata-rata waktu 5 detik per siklus, jika terus berjalan dengan baik, robot ini dapat memproses hingga 720 item per jam, dibandingkan dengan kapasitas manusia yang hanya sekitar 480 item per jam. Efisiensi ini memungkinkan fasilitas untuk menangani lebih banyak sampah dalam waktu yang lebih singkat guna mengurangi *backlog* dan meningkatkan aliran kerja.

Namun, implementasi robotika ini juga menghadapi beberapa tantangan. Salah satu masalah yang sering muncul adalah kebutuhan untuk pemeliharaan dan kalibrasi rutin untuk memastikan kinerja optimal robot serta. Selain itu, konsistensi performa kinerja dari robot tersebut perlu benar benar diperhatikan dan disesuaikan terhadap lingkungannya. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan program robot ini secara lebih mendalam dan konsisten guna dapat diimplementasikan dengan baik.

Hasil penelitian ini juga memberikan wawasan penting mengenai aspek keberlanjutan dan dampak lingkungan dari penggunaan teknologi robotika dalam pengelolaan sampah dengan meningkatkan efisiensi dan akurasi pemilahan Robot arm seperti PhantomX Reactor dapat membantu meningkatkan tingkat daur ulang dan mengurangi jumlah sampah yang berakhir di tempat pembuangan akhir. Ini sejalan dengan tujuan industri sirkular ekonomi untuk mengurangi limbah dan memaksimalkan penggunaan material. Dengan semakin banyaknya kuantitas pengolahan sampah, hal tersebut dapat meningkatkan kesejahteraan dan nilai ekonomi yang lebih banyak pula.

Selain itu, dampak positif lain dari penggunaan robot adalah peningkatan keselamatan kerja. Pekerjaan pemilahan sampah secara manual sering kali melibatkan risiko cedera fisik akibat beban berat dan paparan material berbahaya dengan menggantikan tugas-tugas berbahaya tersebut dengan robot, risiko cedera dapat dikurangi secara signifikan, meningkatkan keselamatan dan kesejahteraan pekerja.

Integrasi teknologi robotika dalam pemilahan sampah juga membuka peluang untuk inovasi lebih lanjut dalam pengelolaan sampah. Misalnya, kombinasi antara robotika dan teknologi informasi seperti *Internet of Things (IoT)* dapat menciptakan sistem pemantauan *real-time* yang lebih canggih, memungkinkan pengelolaan yang lebih efisien dan responsif terhadap perubahan kondisi di lapangan.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan robot arm PhantomX Reactor dengan algoritma *Q-learning* dapat meningkatkan efisiensi dan akurasi proses pemilahan sampah dalam industri sirkular ekonomi. Meskipun ada beberapa tantangan yang perlu diatasi, manfaat potensial dari teknologi ini jauh lebih besar, memberikan dasar yang kuat untuk adopsi lebih luas dalam industri pengelolaan sampah.

Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi robotika dalam pemilahan sampah tidak hanya meningkatkan efisiensi operasional tetapi juga memberikan manfaat sosial dan lingkungan yang signifikan. Dengan terus mengembangkan dan mengoptimalkan teknologi ini, diharapkan industri pengelolaan sampah dapat bergerak menuju praktik yang lebih berkelanjutan dan efisien.

Kinerja yang diharapkan dari adaptasi teknologi ini adalah peningkatan efisiensi, akurasi, dan kecepatan dalam pemilahan sampah, serta peningkatan kapasitas pemrosesan fasilitas. Dengan menggunakan PhantomX Reactor, fasilitas pemilahan sampah dapat mencapai tingkat produksi yang lebih tinggi, mengurangi waktu penyimpanan sampah, dan meningkatkan tingkat daur ulang. Hal ini juga berdampak positif terhadap lingkungan, karena lebih banyak material yang dapat diproses untuk didaur ulang daripada dibuang ke tempat pembuangan akhir.

SIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi penggunaan robot arm PhantomX Reactor yang dilengkapi dengan algoritma *Q-learning* dalam pemilahan sampah pada industri sirkular ekonomi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi teknologi robotika ini secara signifikan meningkatkan efisiensi dan akurasi proses pemilahan sampah. Dengan rata-rata waktu pemilahan 5 detik per item, PhantomX Reactor jauh lebih efisien dibandingkan dengan pemilahan manual yang memakan waktu sekitar 8-10 detik per item. Selain itu, algoritma *Q-learning* memungkinkan robot untuk belajar dari pengalaman dan mengoptimalkan gerakannya, yang berdampak positif pada kecepatan dan konsistensi pemilahan.

Penelitian kualitatif menunjukkan bahwa penggunaan robot arm ini diterima dengan baik oleh operator dan manajer operasional di fasilitas pemilahan sampah. Meskipun ada kekhawatiran mengenai pengurangan tenaga kerja manual, penggunaan teknologi ini juga membuka peluang baru bagi pekerja untuk beralih ke peran yang lebih teknis dan berketerampilan tinggi. Program pelatihan dan peningkatan keterampilan menjadi penting untuk mendukung transisi ini, sehingga dampak negatif terhadap tenaga kerja dapat diminimalisir.

Integrasi sensor dan kamera pada PhantomX Reactor meningkatkan kemampuan deteksi dan klasifikasi sampah, yang berkontribusi pada peningkatan tingkat daur ulang dan pengurangan limbah yang berakhir di tempat pembuangan akhir dengan kapasitas pemrosesan yang lebih tinggi, fasilitas pemilahan sampah dapat menangani volume sampah yang lebih besar dalam waktu yang lebih singkat, meningkatkan efisiensi operasional secara keseluruhan. Dampak positif ini juga sejalan dengan tujuan industri sirkular ekonomi untuk menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih berkelanjutan.

Meskipun terdapat beberapa tantangan, seperti kebutuhan untuk pemeliharaan dan kalibrasi rutin serta kekhawatiran mengenai kehilangan pekerjaan, manfaat potensial dari teknologi ini jauh lebih besar. Peningkatan efisiensi, nilai ekonomi akurasi, dan keselamatan kerja menjadi faktor utama yang mendukung adopsi teknologi robotika dalam pengelolaan sampah. Selain itu, integrasi teknologi informasi seperti *Internet of Things* (IoT) dapat lebih mengoptimalkan sistem pemantauan dan pengelolaan sampah secara *real-time*.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan robot arm PhantomX Reactor dengan algoritma *Q-learning* memberikan manfaat signifikan dalam pemilahan sampah pada industri sirkular ekonomi. Dengan terus mengembangkan dan mengoptimalkan teknologi ini, diharapkan industri pengelolaan sampah dapat mencapai tingkat efisiensi dan keberlanjutan yang lebih tinggi, mendukung upaya global dalam mengurangi limbah dan memaksimalkan penggunaan material daur ulang.

DAFTAR PUSTAKA

- Arifianto, T., & Arifidin, M. A. A. (2024). Pengembangan Sistem Pengambilan Data Visual Permukaan Rel Kereta Api Menggunakan Teknik Pengolahan Citra: Analisis Kontras dan Histogram. *Jurnal Informatika*, 24(1).
- Axmalia, A., & Mulasari, S. A. (2020). Dampak Tempat Pembuangan Akhir Sampah (TPA) Terhadap Gangguan Kesehatan Masyarakat. *Jurnal Kesehatan Komunitas*, 6(2), 171-176. <https://doi.org/10.25311/keskom.Vol6.Iss2.536>
- Dewi, S. R., Azi Nugraha, F., & Nasution, H. (2023). Peningkatan Kesadaran Kebersihan dan Kesehatan Lingkungan Hidup Melalui Gerakan Disiplin Pemilahan Sampah Organik dan Non Organik. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Indonesia*, 3(5): 695-701.
- Duran, K. (2021). *Deep Reinforcement Learning for a Four Degree of Freedom Robot Arm Control Simulation accelerated by Human Demonstrations* [Thesis]. Master of Science in Computer and Engineering Science.
- Sanwar, S., & Ahmed, Md. I. (2023). *Automated Object Sorting System with Real-Time Image Processing and Robotic Gripper Mechanism Control*. *Journal of Engineering Advancements*, 4(3): 70-79.

- Satav, A. G., et al. (2023). *A State of the Art Review on Robotics in Waste Sorting: Scope and Challenges*. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(6): 2789-2806.
- Sholihah, K. K. A., Bambang, H. (2020). *Kajian Tentang Pengelolaan Sampah di Indonesia*. *Swara Bhumi*, 3(3): 1-9.
- Srinawati, W., Suryana, R., & Haryanto, H. (2022). *Literasi dan Pengembangan Bank Sampah Sebagai Upaya Untuk Peningkatan Pendapatan Masyarakat di Masa Pandemi Covid-19*. *Sasambo: Jurnal Abdimas (Journal of Community Service)*, 4(2): 311-321.
- Wardani, E. F., Nelly, K. D., Muhammad, N. A. (2023). *Prototype Lengan Robot Pemilah Sampah Organik dan Anorganik*. *KLIK: Kajian Ilmiah Informatika dan Komputer*, 3(5): 554-562.