EISSN: 2528 - 0112

JURNAL VIRTUAL OF MECHANICAL ENGINEERING ARTICLE (V-MAC)

https://ejournal.unibabwi.ac.id/index.php/vmac email: vmac.mesin@gmail.com

Perancangan dan Simulasi Sistem Pemilihan Warna Otomatis pada Proses Produksi Mobil Menggunakan Kamera Industri dan *DobotVisionStudio*

Muhamad Juliarto[1], A Djatmiko Edhi Sukaton[2].
[1]Akademi Komunitas Toyota Indonesia, Indonesia, muhamadjuliarto@gmail.com
[2]Akademi Komunitas Toyota Indonesia, Indonesia, ahfad230204@gmail.com

Corresponding Author: muhamadjuliarto@gmail.com

Abstrak: Industri otomotif modern menuntut sistem produksi yang mampu menghasilkan produk dengan kualitas tinggi dan konsistensi yang baik, khususnya dalam aspek keseragaman warna. Proses inspeksi warna yang masih dilakukan secara manual memiliki keterbatasan, seperti subjektivitas operator dan ketidakstabilan akibat variasi pencahayaan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mensimulasikan sistem pemilihan warna otomatis berbasis *machine vision* menggunakan kamera industri dan perangkat lunak *DobotVisionStudio*. Metode yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan pendekatan *engineering design*, yang meliputi tahap perancangan sistem, implementasi, pengujian performa, dan analisis hasil. Sistem dikembangkan menggunakan kamera industri dengan type *Hikkvision* U3V MV-CEO50-30UC untuk akuisisi citra dan *DobotVisionStudio* untuk pengolahan citra berbasis ruang warna RGB. Objek uji terdiri dari empat warna utama, yaitu merah, biru, hijau, dan kuning, yang diuji dalam 3 (tiga) kondisi pencahayaan yaitu pencahayaan normal (500-650 lux), pencahayaan kurang (200-300 lux), pencahayaan berlebih (700-800 lux). Dari data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif melalui pengukuran tingkat akurasi dan standar deviasi guna mengevaluasi performa dan konsistensi sistem dalam melakukan klasifikasi warna pada berbagai kondisi pencahayaan, dapat dilihat bahwa hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi dan mengklasifikasikan warna dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi(99,125%) pada kondisi pencahayaan normal, serta mengalami penurunan performa pada kondisi pencahayaan yang tidak stabil dengan tingkat ketepatan 52,5%. Dengan demikian, sistem yang dirancang dapat menjadi solusi alternatif dalam proses inspeksi warna otomatis pada industri otomotif serta mendukung implementasi konsep smart *manufacturing* dengan syarat dipenuhinya tingkat kestabilan pencahayaan pada sistem yang digunakan.

Kata Kunci: *Machine vision*, deteksi warna, RGB, *DobotVisionStudio*

1. PENDAHULUAN

Industri otomotif di era modern, konsep *smart manufacturing* dan Industry 4.0 berkembang secara signifikan dengan menekankan integrasi sistem digital, otomatisasi cerdas, serta peningkatan efisiensi dan kualitas produksi secara berkelanjutan. Transformasi ini didorong oleh pemanfaatan teknologi seperti *cyber-physical systems*, *Internet of Things* (IoT),

dan *machine vision* yang memungkinkan sistem produksi menjadi lebih adaptif, terhubung, dan berbasis data (*data-driven manufacturing*) [1][2], [3].

Penerapan *smart manufacturing* konsep di Indonesia diperkuat melalui inisiatif *Making Indonesia 4.0* yang mendorong adopsi teknologi digital dalam sektor manufaktur untuk meningkatkan daya saing industri nasional [4]. Dalam konteks industri otomotif, integrasi teknologi tersebut berperan penting dalam meningkatkan keandalan proses produksi, khususnya pada sistem inspeksi kualitas berbasis *machine vision* yang mampu menghasilkan proses deteksi yang lebih akurat dan konsisten dibandingkan metode manual [5], [6][7], [8], [9]. Dalam konteks ini, kualitas visual produk menjadi salah satu indikator penting, khususnya pada aspek konsistensi warna baik pada komponen eksterior maupun interior kendaraan.

Konsistensi warna merupakan salah satu parameter penting dalam menjaga kualitas estetika dan daya saing produk otomotif, karena keseragaman warna antar komponen secara langsung mempengaruhi persepsi visual dan kepuasan pelanggan. Ketidaksesuaian warna (*color mismatch*) dapat menyebabkan penurunan kualitas produk, peningkatan tingkat *reject* dan *rework*, serta berdampak pada efisiensi proses produksi [10]. Dampak tersebut telah dilaporkan dalam berbagai studi terbaru yang menunjukkan bahwa variasi atau deviasi warna menjadi salah satu penyebab utama cacat produk yang memicu peningkatan *scrap*, kebutuhan *rework*, dan penurunan efisiensi proses produksi di berbagai industri manufaktur, termasuk otomotif [11] . Oleh karena itu, proses inspeksi warna menjadi bagian krusial dalam sistem quality control di industri otomotif, yang saat ini semakin mengandalkan teknologi berbasis *machine vision* untuk meningkatkan akurasi, konsistensi, dan efisiensi dibandingkan metode inspeksi manual [11], [12].

Dalam praktik industri manufaktur konvensional, proses inspeksi dan pemilihan warna masih banyak dilakukan secara manual oleh operator manusia dengan menggunakan perbandingan antara produk dengan contoh warna yang sudah di standarkan atau visual langsung berdasarkan pemahaman operator terhadap warna yang sudah di tentukan. Metode ini memiliki berbagai keterbatasan, seperti subjektivitas persepsi visual, kelelahan operator, serta ketidakstabilan hasil akibat variasi kondisi pencahayaan. Beberapa studi terbaru menunjukkan bahwa inspeksi visual manual cenderung menghasilkan tingkat kesalahan yang lebih tinggi dan inkonsistensi dalam proses klasifikasi, terutama pada pekerjaan yang bersifat repetitif [11]. Selain itu, kemampuan manusia dalam membedakan warna secara konsisten juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan, seperti intensitas cahaya, sudut pengamatan, dan durasi kerja operator, sehingga meningkatkan potensi kesalahan klasifikasi dan cacat produk pada proses inspeksi visual [13],[14].

Seiring dengan perkembangan teknologi, penerapan *machine vision* berbasis kamera industri menjadi solusi yang efektif dalam meningkatkan akurasi dan konsistensi proses inspeksi warna pada industri manufaktur. Sistem *machine vision* bekerja melalui beberapa tahapan, yaitu akuisisi citra menggunakan kamera industri, pemrosesan citra digital, ekstraksi fitur warna, proses klasifikasi, hingga pengambilan keputusan secara otomatis. Sistem ini mampu melakukan analisis warna secara objektif, cepat, dan berulang dengan tingkat presisi tinggi, sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap inspeksi manual dan meningkatkan efisiensi proses produksi. Berbagai metode ruang warna telah digunakan dalam penelitian sebelumnya, seperti RGB (*Red, Green, Blue*) dan HSV (*Hue, Saturation, Value*). Metode RGB banyak digunakan karena memiliki struktur sederhana, proses komputasi yang ringan, serta sesuai untuk aplikasi *real-time*. Namun, metode RGB memiliki kelemahan utama berupa sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan pencahayaan, sehingga perubahan intensitas cahaya dapat menyebabkan fluktuasi nilai warna dan menurunkan akurasi deteksi [15], [16]. Di sisi lain, metode HSV dinilai lebih baik dalam merepresentasikan persepsi warna manusia karena memisahkan informasi warna dan intensitas cahaya, tetapi membutuhkan proses komputasi tambahan dan kalibrasi yang lebih kompleks. Sementara itu, metode CIELab memiliki tingkat akurasi warna yang lebih tinggi karena dirancang mendekati persepsi visual

manusia, namun implementasinya relatif lebih kompleks dan membutuhkan kapasitas pemrosesan yang lebih besar untuk aplikasi industri *real-time*.

Penggunaan metode RGB dalam penelitian ini dipilih karena kemudahan implementasi dan kemampuannya dalam mendukung pemrosesan cepat, dengan tetap mempertimbangkan pengaruh pencahayaan sebagai faktor penting dalam menjaga akurasi dan konsistensi sistem deteksi warna. Dengan dukungan perangkat lunak seperti *DobotVisionStudio*, sistem *machine vision* dapat diimplementasikan secara lebih terstruktur untuk melakukan deteksi, klasifikasi, dan pemilahan warna secara otomatis dan *real-time*. Teknologi ini memungkinkan integrasi langsung dengan sistem otomasi produksi, seperti robot manipulator dan konveyor, sehingga mendukung implementasi konsep *smart factory* dalam industri otomotif. Beberapa penelitian terdahulu juga telah mengembangkan sistem inspeksi warna berbasis *machine vision* dengan integrasi otomatisasi industri, seperti robot manipulator dan sistem konveyor. Teknologi tersebut mampu meningkatkan efisiensi proses produksi dan mengurangi kesalahan akibat faktor manusia secara signifikan [17], [18]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian sebelumnya masih memiliki beberapa keterbatasan, seperti belum adanya perbandingan performa antar metode ruang warna secara mendalam, sensitivitas sistem terhadap perubahan pencahayaan, serta keterbatasan akurasi pada objek dengan karakteristik warna yang mirip. Selain itu, beberapa sistem yang telah dikembangkan masih memerlukan pengaturan pencahayaan yang sangat terkontrol agar mampu menghasilkan performa deteksi yang stabil.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk simulasi sistem pemilahan warna otomatis menggunakan kamera industri dan perangkat lunak *DobotVisionStudio* dengan metode RGB. Penelitian dilakukan untuk menguji dan mengevaluasi performa sistem dalam hal akurasi, konsistensi, serta ketahanan terhadap variasi pencahayaan sebagai langkah awal sebelum implementasi pada lingkungan industri nyata. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan memberikan kajian yang lebih mendalam mengenai karakteristik metode RGB dibandingkan metode ruang warna lainnya sebagai dasar pengembangan sistem inspeksi warna yang lebih optimal pada industri otomotif.

2. METODE

Pada penelitian ini kami melakukan beberapa tahapan penelitian yang akan dilalui agar menjadikan penelitian ini terstruktur dan mendapatkan hasil yang optimal, tahapan tersebut meliputi:

1. Studi Literatur

   Tahap awal penelitian dilakukan dengan mempelajari berbagai referensi yang berkaitan dengan:

   a) Smart Manufacturing and Industry 4.0
   b) *Mesin Vision* dalam Dunia Industri
   c) Deteksi Warna pada Pengolahan Citra
   d) Pengaruh Pencahayaan terhadap Deteksi Warna
   e) Sistem Inspeksi Warna pada Industri Otomotif
   f) *DobotVisionStudio* sebagai Platform *Machine vision*

2. Perancangan

   Tahap ini meliputi perancangan arsitektur sistem *machine vision* yang meliputi perancangan perangkat lunak/pemrograman dan perancangan perangkat keras. Pemrograman dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *DobotVisionStudio* yang merupakan perangkat lunak terbatas yang hanya digunakan untuk membuat program pada *Dobot Studio*. Untuk perancangan perangkat keras sangat diperlukan agar perangkat seperti kamera, konveyor, robot dan peralatan lainnya dibutuhkan dapat persiapkan di dipasang dengan optimal.

3. Implementasi Perancangan

   Pada tahap ini, sistem yang telah dirancang diimplementasikan dalam lingkungan

eksperimen. Proses ini mencakup konfigurasi kamera, pengaturan pencahayaan, serta penerapan algoritma deteksi warna berbasis ruang warna RBG. Implementasi sistem bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh komponen dapat bekerja secara terintegrasi dan bekerja secara efektif dan efisien.

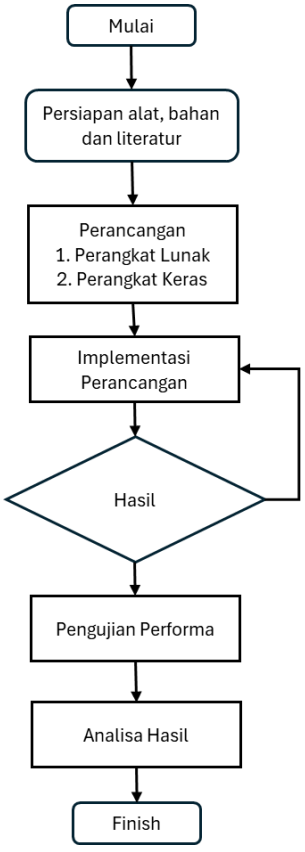
4. Pengujian Performa

   Tahap pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam mendeteksi dan mengklasifikasikan warna. Pengujian dilakukan dengan menggunakan objek berwarna merah, biru, hijau, dan kuning dalam berbagai kondisi pencahayaan. Parameter yang diukur meliputi akurasi dan konsistensi sistem dalam melakukan klasifikasi warna[19].

5. Analisis Hasil

   Data hasil pengujian dianalisis secara kuantitatif untuk mengetahui tingkat keberhasilan sistem. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil deteksi sistem dengan kondisi sebenarnya, serta mengevaluasi pengaruh variabel pencahayaan terhadap performa sistem. Hasil analisis ini digunakan untuk menarik kesimpulan mengenai efektivitas sistem yang dikembangkan.

Secara sederhana tahapan penelitian dapat digambarkan dalam diagram aalir penelitian seperti gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perancangan

Pada sistem *machine vision* yang kami rancang ini, menggunakan kamera industry dan perangkat lunak *DobotVisionStudio* dan berhasil diimplementasikan dengan metode segmentasi warna berbasis ruang warna RGB (*Red, Green, Blue*). Perangkat lunak *DobotVisionStudio* merupakan *software* bawaan dari *dobot studio* yang dirancang khusus untuk melakukan deteksi warna yang dilakukan oleh kamera vision dan dapat dihubungkan dengan robot. Sistem tersebut mampu menampilkan hasil deteksi dalam bentuk visual yang

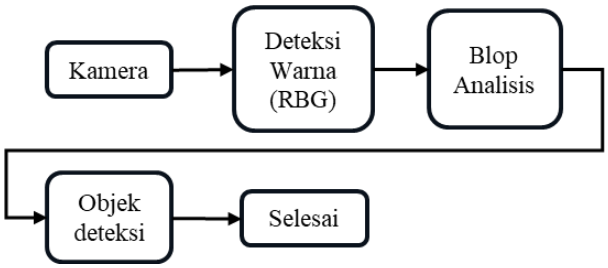
berupa area objek yang terdeteksi dan label warna secara langsung pada tampilan. Sistem tersebut mampu melakukan:

1. Akuisisi citra secara *real-time*
2. *Pre-processing* (ROI dan *filtering*)
3. Segmentasi warna menggunakan *threshold* HSV
4. Klasifikasi warna objek.

Untuk objek uji terdiri dari empat kelas warna yaitu merah, biru, hijau dan kuning. Sedangkan untuk pengkondisian terhadap objek uji kita kondisikan dalam tiga kondisi pencahayaan yaitu:

- Normal (550–650 lux)
- *Low light* (200–300 lux)
- *High light* (>800 lux)

Flow process dari pembacaan warna dapat dilihat seperti gambar dibawah ini:

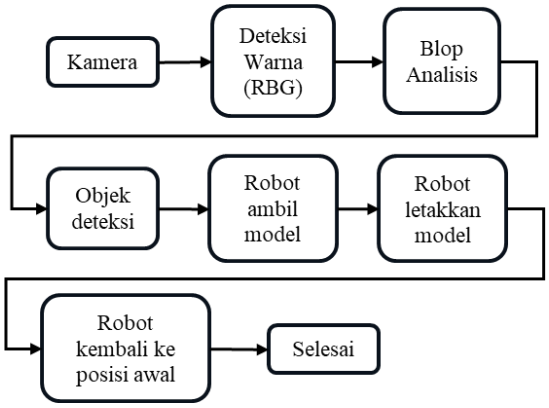


Gambar 2. *Flow* proses Analisa Warna

Implementasi Perancangan atau Pembuatan *Prototype*

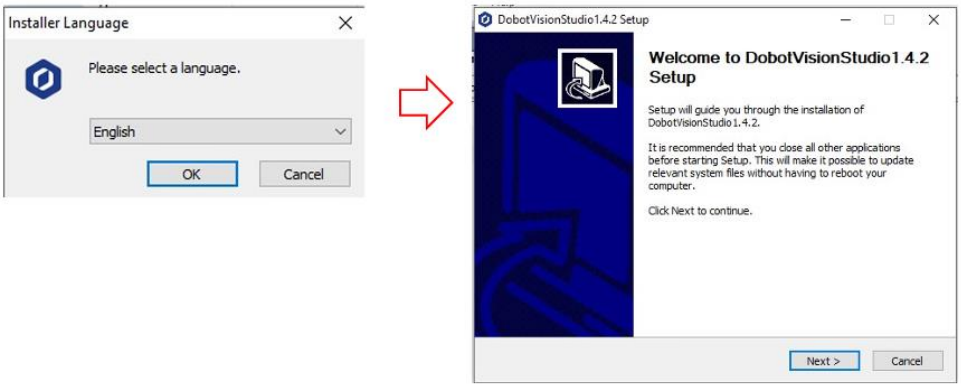
Proses perancangan atau pembuatan *prototype* dilakukan dengan mengikuti langkah-langkah sebagai berikut:

1. Merancang konsep pemodelan untuk proses pemilihan model mobil berdasarkan warna dalam bentuk diagram alir. Warna terdiri dari 4 warna yaitu merah, hijau, biru dan kuning. Perancangan flow chart dapat dilihat seperti gambar 2. dibawah ini.



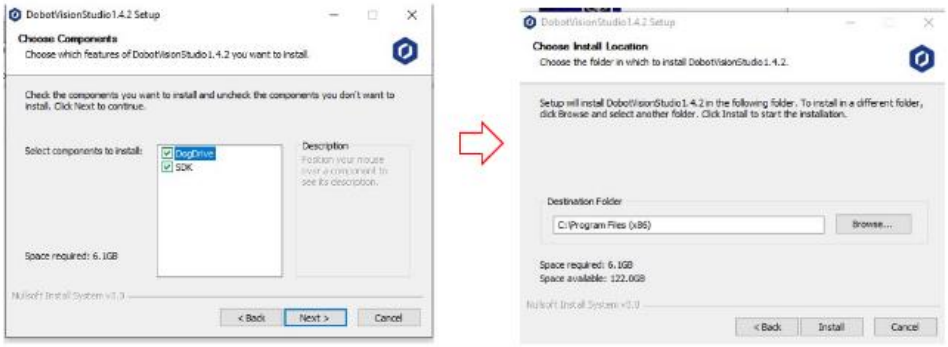
Gambar 3. *Flow Chart* proses pemilihan model berdasarkan warna

2. Merangkai alat simulator mekanik dan elektrik.
   a. Pasang dan rangkai alat hisap pada robot,
   b. Pemasangan kamera vision dengan robot dan computer,
3. Melakukan instalasi perangkat lunak dobot vision studio kedalam computer.
   Langkah-langkahnya untuk instalasi sebagai berikut:
   a. Jalankan dan instal program pada file *DobotVisionStudioV1.4.2Setup.exe*,
   b. Pilih bahasa perangkat lunak yang akan digunakan kemudian klik *Next* untuk melanjutkan instalasi perangkat lunak seperti gambar 4 dibawah ini.



Gambar 4. Pemasangan kamera *vision*
Sumber: Data riset, 2026

c. Pilih semua komponen yang akan di instal, lalu pilih lokasi tempat menginstal perangkat lunak, klik *Next* lalu tunggu proses instalasi berakhir seperti gambar 5,



Gambar 5. Proses instalasi
Sumber: Data riset, 2026

d. Apabila sudah selesai klik *finish*,

4. Membuat program pada perangkat lunak *DobotVisionStudio*.

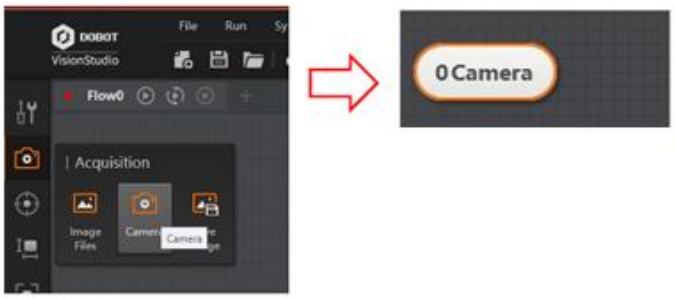
Langkah-langkah membuat program sebagai berikut:

a. Membuka perangkat lunak *Dobot Vision Studio*,
b. Sambungkan kabel kamera dengan PC/Laptop,
c. Membuka *General Solution* seperti pada gambar 6,



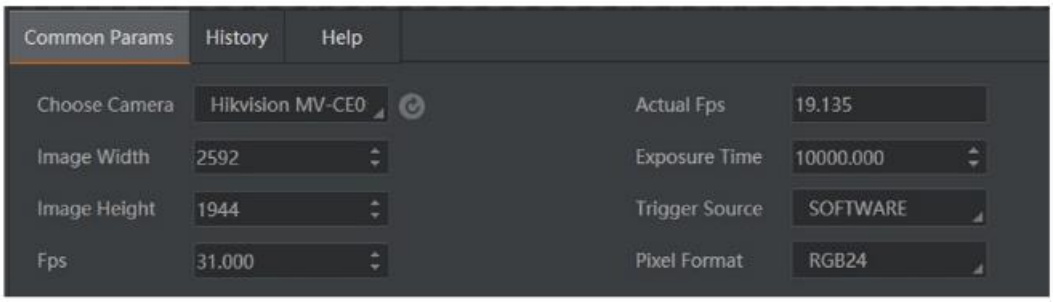
Gambar 6. Membuka *General Solution*
Sumber: Data riset riset, 2026

d. Pilih *Acquisition* kemudian pilih klik kamera maka akan muncul tampilan baru seperti gambar 7 dibawah ini,



Gambar 7. Memilih *Acquisition*
Sumber: Data riset, 2026

e. Pengaturan parameter dengan memilih kamera pada menu sebelah kanan bawah dan pilih *Choose Camera*, kemudian pilih yang bernama *Hikkvision* (lihat gambar 8) dibawah ini,



Gambar 8. Memilih Acquisition
Sumber: Data riset, 2026

f. Klik flow "0 *Camera*", kemudian klik "*Continues*" untuk menjalankan dan menampilkan hasil kamera,
g. Susun blok warna seperti gambar 9 pada area kamera,



Gambar 9. Letak blok
Sumber: Data riset, 2026

h. Pilih perintah flow *ColorExtraction* kemudian sambungkan ke "*0Camera*" dengan *flow Colorextrection*. Klik kanan *flow ColorExtraction* kemudian pilih *Rename*, ganti nama *flow ColorExtraction* menjadi "*Red*".
i. Klik sebanyak 2 kali "*flow Red*" kemudian, Pilih menu *Run Param* untuk mengatur parameter untuk warna merah,
j. Atur "*Channel 1 Upper limit*" hingga hanya blok merah yang terdeteksi pada kamera. Kemudian Klik "*Continous*" setelah itu pilih tampilan agar menampilkan tampilan blok yang akan di*sorting*,
k. Setting *noise* atau gangguan dengan menambahkan "*flow Blob*" setelah "*flow Red*" yang bertujuan untuk memisahkan *noise* atau gangguan sebelum proses *sorting*,

l. Mengatur minimum *Area Range* hingga hanya ada 1 blok putih dan garis hijau yang terlihat pada layar tampilan dan setelah selesai klik "*confirm*",
m. Buatlah program *flow* yang sama untuk warna hijau, biru dan kuning.

Pengujian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi pencahayaan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem deteksi warna berbasis RGB. Sistem menunjukkan akurasi tertinggi pada kondisi pencahayaan normal, yang mengindikasikan bahwa metode RGB bekerja optimal pada kondisi pencahayaan yang stabil dan terkontrol. Pada kondisi ini, distribusi cahaya yang merata menghasilkan nilai intensitas RGB yang konsisten sehingga proses segmentasi warna dapat dilakukan lebih akurat.

Sebaliknya, pada kondisi pencahayaan kurang, terjadi penurunan akurasi yang signifikan yang disebabkan oleh rendahnya intensitas Cahaya yang diterima sensor kamera sehingga nilai RGB objek menjadi kurang kontras terhadap latar belakang. Hal ini menyebabkan sistem kesulitan di dalam membedakan objek yamg berdasarkan nilai yang sudah ditetapkan. Hal ini dapat dinyatakan bahwa sistem berbasis RBG memiliki sensivitas yang tinggi terhadap perubahan intensitas Cahaya [20], [21].

Pada kondisi pencahayaan yang tinggi, penurunan akurasi disebabkan oleh efek *overexposure* yang mengurangi keakuratan representasi warna pada citra atau menyebabkan beberapa citra mengalami saturasi nilai. Kondisi ini akan mengurangi keakuratan representasi warna pada objek sehingga proses klasifikasi menjadi kurang optimal. Menurut [22], temuan ini memperkuat bahwa sistem berbasis RGB sangat bergantung pada kondisi pencahayaan, sehingga pengendalian lingkungan pencahayaan menjadi faktor penting dalam meningkatkan performa sistem. Hal ini juga sejalan dengan teori pengolahan citra digital yang menyatakan bahwa kualitas pencahayaan merupakan salah satu faktor utama yang menentukan keberhasilan sistem *machine vision* [21], [22]. Hasil pengukuran dapat dilihat dalam tabel berikut ini:

Tabel 1. Akurasi sistem deteksi warna pada berbagai kondisi pencahayaan

Warna	Pencahayaan Normal (500 ~ 650 Lux)	Pencahayaan Rendah (200 ~ 400 Lux)	Pencahayaan Berlebih (700 ~ 800 Lux)
Merah	100 %	60%	90%
Biru	100%	60%	90%
Hijau	97,5%	50%	80%
Kuning	95%	40%	80%
Rata - rata	98,125%	52,5%	85%

Sumber**:** Data riset, 2026

Tabel 2. Tabel hasil deteksi warna berdasarkan variasi intensitas pencahayaan

Warna	Total Sample	Pencahayaan Normal (500 ~ 650 Lux)	Pencahayaan Rendah (200 ~ 400 Lux)	Pencahayaan Berlebih (700 ~ 800 Lux)
Merah	160 unit	160 unit	96 unit	144 unit
Biru	160 unit	160 unit	96 unit	144 unit
Hijau	160 unit	156 unit	80 unit	128 unit
Kuning	160 unit	152 unit	64 unit	128 unit

Sumber**:** Data riset, 2026

Tabel 3. Analisis statistik akurasi dan stabilitas sistem deteksi warna pada berbagai kondisi pencahayaan

Kondisi	*Mean (%)*	*Std Dev.*	Keterangan
Pencahayaan Normal	98,125	2,39%	Sangat stabil
Pencahayaan Rendah	52,5	9,57%	Tidak stabil
Pencahayaan berlebih	85	5,75%	Cukup stabil

Sumber: Data riset, 2026

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem *machine vision* menggunakan kamera industri *Hikkvision* U3V MV-CEO50-30UC dan perangkat lunak *DobotVisionStudio*, penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pemilihan warna otomatis berbasis ruang warna RGB yang mampu mendeteksi dan mengklasifikasikan warna merah, biru, hijau, dan kuning secara *real-time*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kondisi pencahayaan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem. Pada kondisi pencahayaan normal (500–650 lux), sistem menunjukkan performa terbaik dengan rata-rata akurasi sebesar 98,125% dan standar deviasi sebesar 2,39%, yang mengindikasikan tingkat konsistensi sistem yang sangat tinggi. Sebaliknya, pada kondisi pencahayaan rendah (200–400 lux), terjadi penurunan akurasi menjadi 52,5% dengan standar deviasi 9,57% akibat rendahnya intensitas cahaya yang menyebabkan nilai RGB objek menjadi kurang kontras terhadap latar belakang sehingga proses segmentasi warna menjadi kurang optimal. Pada kondisi pencahayaan berlebih (700–800 lux), sistem memperoleh rata-rata akurasi sebesar 85% dengan standar deviasi 5,75%, di mana penurunan performa dipengaruhi oleh efek *overexposure* yang menyebabkan saturasi nilai piksel dan distorsi representasi warna pada citra. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa metode RGB memiliki keunggulan dalam hal kesederhanaan implementasi dan efisiensi komputasi untuk aplikasi *real-time*, namun sangat sensitif terhadap perubahan intensitas pencahayaan. Oleh karena itu, kestabilan pencahayaan menjadi faktor penting dalam meningkatkan akurasi dan konsistensi sistem deteksi warna berbasis *machine vision* pada aplikasi inspeksi otomatis di industri otomotif.

REFERENSI

[1] M. Juliarto, R. Amru Nityasa, and A. Dani Fajar Aditama, "Perancangan Keamanan Kendaraan Tanpa Kunci Dengan Menggunakan ESP32 dan Aplikasi BLYNK Berbasis IOT," *ejournal V-MAC (Virtual of Mechanical Engineering Article)*, vol. 9, no. 1, pp. 47–53, 2024.

[2] X. Xu, Y. Lu, B. Vogel-Heuser, and L. Wang, "Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception," *J. Manuf. Syst.*, vol. 61, pp. 530–535, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.JMSY.2021.10.006.

[3] M. Javaid, A. Haleem, R. P. Singh, R. Suman, and E. S. Gonzalez, "Understanding the adoption of Industry 4.0 technologies in improving environmental sustainability," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 3, pp. 203–217, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.SUSOC.2022.01.008.

[4] W. S. Taslim and P. Tonggak Equator, "Penerapan Strategi Dan Kebijakan Kementerian Perindustrian Republik Indonesia Dalam Menghadapi Revolusi Industri Keempat Khususnya Pada Wilayah Perbatasan," *Obis*, vol. 5, no. 1, pp. 15–25, Mar. 2023, doi: 10.63848/OBIS.V05N1.1.

[5] J. W. Choi, S. J. Cho, B. Li, and J. H. Park, "Automated sewing system enabled by machine vision for smart garment manufacturing," *ieeexplore.ieee.org*, vol. 691 AICT, no. 9, pp. 563–575, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-43670-3_39.

[6] Y. Choi, Y. Choi, J. Cho, D. Kim, J. K.- Sustainability, and undefined 2023, "A systematic literature review on artificial intelligence and explainable artificial intelligence for visual quality assurance in manufacturing," *mdpi.com*, [Online]. Available: https://www.mdpi.com/2079-9292/12/22/4572

[7] D. J. Lee, D. Zhang, R. Hoffmann, and C. Reich, "A Systematic Literature Review on Artificial Intelligence and Explainable Artificial Intelligence for Visual Quality Assurance in Manufacturing," *Electronics 2023, Vol. 12, Page 4572*, vol. 12, no. 22, p. 4572, Nov. 2023, doi: 10.3390/ELECTRONICS12224572.

[8] "Review of Surface-Defect Detection Methods for Industrial Products Based on Machine Vision | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore." Accessed: May 29, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/document/11006646

[9] Q. Wang, M. Wang, J. Sun, D. Chen, and P. Shi, "Review of Surface-Defect Detection Methods for Industrial Products Based on Machine Vision," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 90668–90697, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3571297.

[10] L. Habibie, A. Negara, and F. Khoirotunnisa, "Pelaksanaan Proses Quality Control terhadap Kualitas dan Efisiensi Produksi di B21 Digital Printing," *Jurnal Masharif Al-Syariah: Jurnal Ekonomi dan Perbankan Syariah*, vol. 10, no. 1, Feb. 2025, doi: 10.30651/JMS.V10I1.25652.

[11] I. Salsabila, "Pengembangan Sistem Robotika Berbasis Vision System untuk Deteksi Cacat Produk Secara Real-Time," *Jurnal Teknologi Rekayasa*, vol. 1, no. 1, pp. 21–27, Feb. 2026, Accessed: Apr. 26, 2026. [Online]. Available: https://publikasi.submit-jurnal.com/index.php/technoria/article/view/26

[12] O. O. Vergara-Villegas, V. G. Cruz-Sánchez, H. De Jesús Ochoa-Domínguez, M. De Jesús Nandayapa-Alfaro, and Á. Flores-Abad, "Automatic product quality inspection using computer vision systems," *Lean Manufacturing in the Developing World: Methodology, Case Studies and Trends from Latin America*, vol. 9783319049519, pp. 135–156, Apr. 2014, doi: 10.1007/978-3-319-04951-9_7.

[13] D. Alfavo-Viquez, M. A. Zamora-Hernandez, J. Azorín-López, and J. Garcia-Rodriguez, "Visual analysis of fatigue in Industry 4.0," *Springer*, vol. 133, no. 1–2, pp. 959–970, Jul. 2024, doi: 10.1007/S00170-023-12506-7.

[14] S. B. Bhaskoro *et al.*, "Sistem Identifikasi Jumlah Produk Berbasis Pengolahan Citra dengan Algoritma YOLO pada Proses Pengepakan Industri Manufaktur," *jtrm.polman-bandung.ac.id*, vol. 6, no. 1, 2024, doi: 10.48182/JTRM.V6I1.114.

[15] I. A. Mukaromah and Y. Heriyanto, "Comparison of K-NN and Naive Bayes Algorithms for Identification of Star Fruit Ripeness Using RGB-Based Digital Images," *JURNAL TEKNIK INFORMATIKA DAN SISTEM INFORMASI*, vol. 5, no. 2, pp. 1–9, Dec. 2025, Accessed: Apr. 26, 2026. [Online]. Available: https://jurtisi.umbs.ac.id/index.php/jurtisi/article/view/268

[16] J. Praktik Keinsinyuran, R. Sukwadi, and B. Yanto, "Penerapan Algoritma Hue Saturation Intensity (HIS) dengan Ruang Warna Red, Green, Blue (RGB) dan Implementasi Aplikasi Kematangan Buah Tomat," *Jurnal Praktik Keinsinyuran*, vol. 1, no. 1, pp. 33–40, Aug. 2024, doi: 10.25170/JPK.V1I1.5864.

[17] M. B. Ramzan, S. M. Qureshi, M. S. Habib, T. Naveed, M. Awais, and H. Jamshaid, "Evaluation of human factors on visual inspection skills in textiles and clothing: A statistical approach," *journals.sagepub.com*, vol. 17, Jan. 2022, doi: 10.1177/15589250221128115.

[18] R. Rustiyana, M. Lase, N. Imamah, and O. Yendri, "Pengolahan Citra Digital: Digital Image Processing," 2025, Accessed: Apr. 23, 2026. [Online]. Available: https://www.google.com/books?hl=id&lr=&id=n6WNEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=Rahman,+A.,+Putra,+D.+A.,+%26+Santoso,+H.+(2022).+Pengaruh+pencahayaan+terhadap+deteksi+warna+berbasis+citra+digital.+Jurnal+Teknik+Elektro,+14(2),+85%E2%80%9392.&ots=uXkPz9pazX&sig=mlDnr5_tw8RuQf5j20O0z5HKyC0

[19] S. B. Bhaskoro *et al.*, "Sistem Identifikasi Jumlah Produk Berbasis Pengolahan Citra dengan Algoritma YOLO pada Proses Pengepakan Industri Manufaktur," *jtrm.polman-bandung.ac.id*, vol. 6, no. 1, 2024, doi: 10.48182/JTRM.V6I1.114.

[20] Q. Wang, M. Wang, J. Sun, D. Chen, and P. Shi, "Review of Surface-Defect Detection Methods for Industrial Products Based on Machine Vision," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 90668–90697, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3571297.

[21] "Review of Surface-Defect Detection Methods for Industrial Products Based on Machine Vision | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore." Accessed: May 18, 2026. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/11006646

[22] M. El Helou *et al.*, "A Modular Smart Vision System for Industrial Inspection and Control of Conformity," *Smart Sustain. Manuf. Syst.*, vol. 6, no. 1, pp. 177–189, Apr. 2022, doi: 10.1520/SSMS20220003.