

Implementasi Pemilah Sampah Otomatis Menggunakan ESP32-CAM dengan Metode *Gaussian blur*

M. Ilham Sabial Muna¹, Gentur Wahyu Nyipto Wibowo², Nadia Annisa Maori³

^{1,2,3}Teknik Informatika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Nahdlatul Ulama Jepara

¹sabialchanel@gmail.com, ²gentur@unisnu.ac.id, ³nadia@unisnu.ac.id

Abstract

The exponential increase in solid waste volume requires a transformation from conventional management to structured recycling mechanisms. Source separation is the main key, but in educational institutions like SMK Hasan Kafrawi Mayong, it still relies on inefficient manual labor due to limited awareness and infrastructure. Although IoT-based smart trash systems have been developed, most do not integrate computer vision logic for autonomous sorting. This study aims to implement an automatic waste sorting prototype using the ESP32-CAM module combined with the Gaussian Blur method as a spatial filter (low-pass filter) to reduce high-frequency noise and glare caused by dynamic lighting. The filtered image is then classified using HSV color thresholding to drive a servo actuator. Experimental results show that without Gaussian Blur, the system only achieved 35% accuracy due to unstable HSV values. By applying the Gaussian Blur preprocessing stage, the classification accuracy increased significantly to 85%, with the system successfully classifying 17 out of 20 samples correctly. Although the filtering process added a computational load of 29 ms to the response time (from 2062 ms to 2091 ms), this increase is relatively small and does not disrupt the real-time operation of the embedded device.

Keywords: gaussian blur, esp32-cam, pemilah sampah, computer vision, thresholding hsv

Abstrak

Pertambahan volum limbah padat secara eksponensial mengharuskan adanya transformasi dari sistem pengelolaan konvensional menuju mekanisme daur ulang. Pemilahan di titik sumber masih bergantung pada tenaga manual yang tidak efisien, termasuk di lingkungan SMK Hasan Kafrawi Mayong. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan prototipe pemilah sampah otomatis menggunakan modul ESP32-CAM yang dikombinasikan dengan metode *Gaussian Blur* sebagai filter spasial (*low-pass filter*) untuk meredam *noise* frekuensi tinggi dan *glare* akibat pencahayaan dinamis. Citra yang terfilter kemudian diklasifikasikan menggunakan *thresholding* warna HSV untuk menggerakkan aktuator servo. Hasil eksperimen menunjukkan tanpa *Gaussian Blur*, sistem hanya mencapai akurasi 35% akibat nilai HSV yang tidak stabil. Dengan penerapan tahap pra-pemrosesan *Gaussian Blur*, akurasi klasifikasi meningkat signifikan menjadi 85%, di mana sistem berhasil mengklasifikasikan 17 dari 20 sampel dengan benar. Meskipun proses filtrasi menambah beban komputasi sebesar 29 ms pada *response time* (dari 2062 ms menjadi 2091 ms), peningkatan tersebut relatif kecil dan tidak mengganggu operasi *real-time* perangkat.

Kata kunci: gaussian blur, esp32-cam, pemilah sampah, computer vision, thresholding hsv

1. Pendahuluan

Pertambahan volume limbah padat secara eksponensial menjadi permasalahan ekologi global yang mengharuskan adanya transformasi dari sistem pengelolaan konvensional menuju mekanisme daur ulang yang terstruktur. Tahapan pemilahan di titik sumber (*source separation*) merupakan kunci utama keberhasilan rantai daur ulang. Namun, keterbatasan kesadaran manusia menyebabkan proses ini masih banyak bergantung pada tenaga manual yang tidak efisien, sehingga diperlukan teknologi klasifikasi otomatis untuk membedakan jenis limbah secara akurat [1]. Permasalahan tersebut turut dirasakan di lingkungan institusi pendidikan, khususnya di SMK

Hasan Kafrawi Mayong. Meskipun integrasi konsep *smart trash* berbasis IoT mulai dikembangkan untuk memantau limbah, sistem tersebut umumnya belum sepenuhnya mengintegrasikan logika penglihatan mesin (*computer vision*) untuk pemilahan otonom [2]. Padahal, pengenalan teknologi IoT di lingkungan sekolah sangat krusial untuk menciptakan sistem pengelolaan sampah yang lebih cerdas sekaligus menjadi alat bantu pembelajaran yang inovatif [3]. bagi siswa SMK [4]. Otomasi sistem pemilah berbasis *computer vision* dan *Internet of Things* (IoT) hadir sebagai solusi untuk menggantikan peran manusia. Namun, penggunaan perangkat akuisisi gambar pada lingkungan terbuka sering kali terkontaminasi derau (*noise*) berfrekuensi tinggi dan artefak cahaya (*glare*)

akibat fluktuasi pencahayaan matahari, sebagaimana diidentifikasi dalam kajian tentang gangguan pada citra digital [5]. Pendekatan menggunakan metode *Deep Learning* seperti YOLOv8 memang mampu mengatasi hambatan tersebut dengan akurasi tinggi, namun metode ini membutuhkan beban komputasi berat yang sulit dijalankan pada memori terbatas perangkat *embedded* seperti ESP32-CAM tanpa menyebabkan *latency* [6]. Guna mengatasi batasan tersebut, optimasi deteksi tong sampah pintar kini mulai dikembangkan menggunakan modul ESP dan algoritma cerdas untuk klasifikasi organik dan anorganik yang lebih efisien [7]. Oleh karena itu, diperlukan teknik pra-pemrosesan citra yang ringan namun efektif. Metode *Gaussian Blur* dipilih karena secara matematis terbukti efektif sebagai filter penghalus linier (*low-pass filter*) yang mampu meredam *noise* secara selektif tanpa mengorbankan informasi tepi objek [8]. Hal ini diperkuat oleh studi komparasi yang menunjukkan bahwa filter Gaussian menawarkan efektivitas yang lebih baik dalam mereduksi *noise* pada citra berwarna dibandingkan filter median maupun mean [9]. Kombinasi filtrasi Gaussian dan teknik *thresholding* telah terbukti sukses dalam mengekstraksi data visual secara kuantitatif pada berbagai studi pengolahan citra [10]. Keunggulan lain dari metode ini adalah kemampuannya untuk dioptimasi melalui penyesuaian parameter kernel sesuai dengan kebutuhan objek yang diamati [11]. Selain itu, jika dibandingkan dengan filter lain seperti Median Filter, *Gaussian Blur* menawarkan kompromi komputasi yang lebih efisien bagi prosesor *embedded* [12]. Keandalan metode ini juga terbukti dalam pengolahan citra warna secara *real-time* untuk klasifikasi berdasarkan intensitas piksel [13], serta efektif digunakan pada berbagai instrumen sensor sensitif untuk meningkatkan kualitas citra dari gangguan *noise* frekuensi tinggi [14].

Berdasarkan kesenjangan (*gap*) tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan Metode *Gaussian Blur* sebagai tahapan pra-pemrosesan pada modul ESP32-CAM untuk menstabilkan fitur warna citra sampah dari gangguan *noise* dan *glare*, serta mengintegrasikannya dengan logika *Thresholding HSV* untuk membangun sebuah prototipe pemilah sampah otonom. Implementasi ini diharapkan dapat mendukung pemberdayaan manajemen sampah berbasis digital di tingkat masyarakat maupun instansi [15].

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pengembangan *Prototyping* yang berfokus pada iterasi desain perangkat keras dan perangkat lunak untuk menghasilkan sistem otonom. Tahapan riset diawali dengan perancangan arsitektur sistem, diikuti oleh proses implementasi kode program pada mikrokontroler, serta pengujian lapangan untuk

mengekstraksi data kuantitatif. Alur kerja sistem dirancang secara sekuensial dimulai dari modul kamera yang menangkap citra *frame-by-frame*, kemudian citra tersebut disuntikkan ke dalam pipeline pra-pemrosesan menggunakan Metode *Gaussian Blur* sebelum akhirnya diklasifikasikan menggunakan *Thresholding HSV* pada ESP32-CAM. Hasil klasifikasi kemudian dikirimkan secara serial ke Arduino Uno untuk mengendalikan motor servo dan menampilkan status sistem pada *OLED Display*.

2.1. Spesifikasi Perangkat Sistem

Perancangan prototipe membutuhkan integrasi antara komponen elektronik dan logika pemrograman. Spesifikasi perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) yang digunakan dalam membangun sistem pemilah sampah otomatis ini dirangkum secara detail pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Perangkat Keras dan Lunak Sistem

Komponen	Spesifikasi	Fungsi Utama
ESP32-CAM	Mikrokontroler 32-bit, RAM 520KB, Kamera OV2640 2MP	Unit pemrosesan pusat (<i>main processor</i>) dan akuisisi citra visual
Motor Servo (SG90)	<i>Torque</i> 1.8kg/cm, Rotasi 0-180 derajat	Aktuator mekanis pemisah jalur sampah organik dan anorganik
OLED Display 0.96"	Resolusi 128x64, Komunikasi I2C	Antarmuka (<i>interface</i>) untuk menampilkan status klasifikasi secara <i>real-time</i>
Power Supply	Adaptor 5V 2A	Sumber daya utama untuk mikrokontroler dan aktuator
Arduino IDE v2.x	<i>Compiler</i> bahasa C++	Lingkungan pengembangan (<i>IDE</i>) untuk menulis dan <i>upload firmware</i> ke ESP32-CAM
Arduino Uno	Mikrokontroler ATmega328P	Pengendali OLED dan aktuator servo

Sistem dirancang menggunakan arsitektur dual-*microcontroller* untuk mengatasi keterbatasan *resource* pada ESP32-CAM. ESP32-CAM digunakan khusus untuk akuisisi dan pemrosesan citra, meliputi pengambilan *frame*, penerapan Gaussian Blur, konversi warna RGB ke HSV, serta proses klasifikasi objek. Sementara itu, Arduino Uno bertugas menangani *output* periferil berupa pengendalian motor servo dan penampilan status klasifikasi pada *OLED Display*

berdasarkan data hasil klasifikasi yang dikirimkan melalui komunikasi serial dari ESP32-CAM.

2.2. Implementasi Metode Gaussian Blur

Metode *Gaussian Blur* diimplementasikan pada ESP32-CAM sebagai filter spasial (*low-pass filter*) untuk meredam komponen frekuensi tinggi (*noise*) pada matriks citra sebelum masuk ke tahap klasifikasi. Secara matematis, proses penyaringan menggunakan konvolusi dua dimensi dengan matriks bobot yang diturunkan dari fungsi distribusi normal (*Gaussian*), yang dirumuskan pada persamaan berikut :

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

dimana $G(x,y)$ adalah nilai bobot matriks kernel pada koordinat (x,y) , σ adalah standar deviasi yang menentukan tingkat kehalusan (*blur level*), dan adalah bilangan *Euler*. Variabel σ dikalibrasi secara manual pada program agar sesuai dengan batas memori ESP32, menghasilkan kernel linear sederhana berbobot $[1 \ 2 \ 1]/4$ yang diadaptasi dari distribusi *Gaussian* untuk memenuhi keterbatasan memori ESP32-CAM. Untuk mempercepat waktu eksekusi tanpa mengorbankan stabilitas tepi objek.

2.3. Penentuan Ambang Batas (*Thresholding*) HSV

Setelah citra melewati tahap filtrasi *Gaussian* untuk mereduksi *noise*, sistem melakukan ekstraksi fitur warna untuk membedakan kategori sampah. Ruang warna HSV (*Hue, Saturation, Value*) digunakan karena kemampuannya memisahkan informasi warna (*Hue*) dari pencahayaan (*Value*), yang sangat penting untuk pengujian di lingkungan SMK Hasan Kafrawi Mayong dengan kondisi cahaya matahari yang dinamis. Berdasarkan implementasi kode pada ESP32-CAM, sistem melakukan klasifikasi melalui tiga kategori ambang batas (*threshold*) yang dirancang secara spesifik. Penentuan angka-angka ini didasarkan pada hasil eksperimen untuk mendapatkan titik optimal dalam membedakan plastik mengkilap, daun hijau, dan bahan organik kecokelatan. Parameter ambang batas tersebut dirinci pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Ambang Batas HSV pada Sistem Klasifikasi

Kategori	Hue	Saturation	Value	Logika
Fitur	(H)	(S)	(V)	Klasifikasi
Anorganik (Plastik)	-	< 20	> 70	Pantulan cahaya tinggi (<i>glare</i>)
Organik Hijau	40° - 85°	> 35	15 - 80	Warna hijau vegetasi
Organik Cokelat	15° - 35°	> 25	20 - 75	Warna daun kering/ranting

Logika yang diterapkan dalam program memastikan

bahwa objek plastik diprioritaskan terlebih dahulu jika memiliki saturasi rendah (mendekati putih/abu-abu) dengan kecerahan tinggi. Jika objek tidak memenuhi kriteria plastik, sistem akan memeriksa apakah nilai piksel masuk ke dalam rentang *greenOrganic* atau *brownOrganic*. Konversi dari RGB ke HSV dilakukan secara programatik dengan menormalisasi nilai RGB ke rentang 0-1 sebelum dihitung nilai *Hue*-nya. Berikut adalah cuplikan logika penentuan

```

keputusan pada kode program:
// Logika Klasifikasi berdasarkan Threshold
bool plastic = (s < 20 && v > 70);
bool greenOrganic = (h >= 40 && h <= 85) && (s > 35) && (v > 15 && v < 80);
bool brownOrganic = (h >= 15 && h <= 35) && (s > 25) && (v > 20 && v < 75);

if (!plastic && (greenOrganic || brownOrganic)) {
    organicCount++;
}

```

Penerapan dua jenis ambang batas organik (hijau dan coklat) bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas sistem terhadap berbagai variasi sampah taman di sekolah. Penggunaan nilai *avgBrightness* (rata-rata kecerahan) sebagai faktor koreksi akhir dalam pengambilan keputusan bertujuan untuk mencegah kesalahan klasifikasi (*falsely identified*) pada kondisi bayangan yang gelap.

2.4. Mekanisme Komunikasi Data Serial

Sistem pemilah sampah ini mengadopsi arsitektur *multi-processor* untuk mendistribusikan beban kerja secara efisien antara dua mikrokontroler. Mengingat proses pengolahan citra dan filtrasi *Gaussian* memerlukan sumber daya komputasi yang intensif pada ESP32-CAM, maka tugas pengendalian aktuator dan antarmuka pengguna dialihkan ke Arduino Uno. Integrasi antara kedua perangkat tersebut dilakukan melalui protokol komunikasi serial UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), di mana data hasil pemrosesan pada ESP32-CAM dikirimkan menuju Arduino Uno dalam format *string* terdelimitasi koma atau *Comma Separated Values* (CSV). Format ini dipilih karena karakteristiknya yang ringan dan mudah diparsing oleh mikrokontroler dengan memori terbatas. Berdasarkan struktur kode program, paket data yang dikirimkan dalam satu siklus transmisi terdiri dari empat parameter utama, yaitu *Result*, *OrganicPercent*, *AvgBrightness*, dan *ResponseTime*.

Logika pengiriman dan penerimaan data diatur sedemikian rupa agar transmisi berjalan sinkron. Pada sisi pengirim yaitu ESP32-CAM, data dikemas menjadi satu baris pesan utuh yang diakhiri dengan karakter *newline* ($\backslash n$) sebagai penanda akhir transmisi (*end of frame*). Penggunaan karakter penanda tersebut

memungkinkan Arduino Uno sebagai penerima untuk mengenali batas data yang masuk sebelum melakukan ekstraksi variabel. Berikut merupakan implementasi logika transmisi data yang diterapkan pada kode program:

```
// Format pengiriman data dari ESP32-CAM ke
// Arduino Uno
Serial.print(result); // Label 'O' (Organik) atau
// 'A' (Anorganik)
Serial.print(",");
Serial.print(organicPercent); // Nilai persentase
// organik
Serial.print(",");
Serial.print(avgBrightness); // Nilai rata-rata
// kecerahan
Serial.print(",");
Serial.println(responseTime); // Waktu respon
// dalam ms
```

Pada sisi penerima (Arduino Uno), data yang masuk ke *buffer* serial dibaca karakter demi karakter hingga ditemukan karakter `\n`. Setelah pesan lengkap diterima, Arduino melakukan proses *parsing* menggunakan fungsi `indexOf(',')` dan `substring()` untuk memisahkan kembali keempat parameter tersebut. Nilai label (*result*) digunakan untuk menentukan sudut gerak motor servo, sedangkan parameter lainnya ditampilkan pada layar OLED untuk keperluan monitoring teknis.

Tabel 3. Definisi Perintah Gerak Servo Berdasarkan Data Serial

Data Label Terdeteksi	Perintah Sudut Servo	Status Wadah	Durasi Jeda (Delay)
"O"	30°	Sampah Organik	1500 ms
"A"	150°	Sampah Anorganik	1500 ms
Idle	90°	Posisi Netral	-

2.5. Desain Implementasi Perangkat Keras

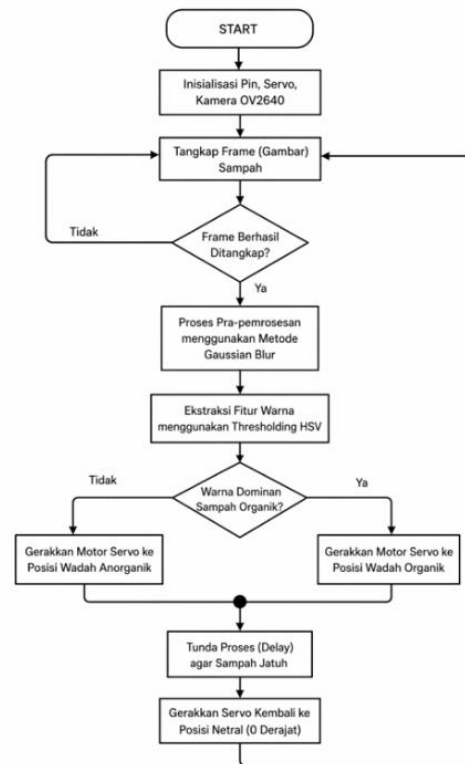
Implementasi fisik sistem dilakukan dengan sangat memperhatikan stabilitas distribusi daya dan integritas sinyal. ESP32-CAM dihubungkan ke Arduino Uno menggunakan jalur komunikasi serial *cross-wiring* pada pin GPIO1 (TX) ke Pin 0 (RX). Sistem ini menggunakan skema *Common Ground* untuk mencegah terjadinya *noise* yang dapat menyebabkan data serial menjadi korup saat proses *parsing* berlangsung. Keterangan visual mengenai antarmuka pengguna pada layar OLED diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Keterangan Visual OLED Display

2.5. Alur Logika Pemrosesan Sistem

Setelah citra melewati tahap filtrasi Gaussian, sistem melakukan ekstraksi fitur menggunakan konversi warna HSV (*Hue, Saturation, Value*) untuk menentukan kategori sampah. Diagram alir (*flowchart*) lengkap yang menggambarkan bagaimana ESP32-CAM memproses data piksel secara siklis dari kondisi *idle* hingga Gerak Servo diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir (*Flowchart*) Logika Sistem Pemilah Sampah Otomatis

2.4. Teknik Pengukuran Data

Evaluasi kinerja sistem dilakukan secara kuantitatif dengan mengekstraksi dua variabel utama, yaitu tingkat akurasi klasifikasi dan kecepatan respon (*response time*). Persentase akurasi dihitung menggunakan formulasi rasio keberhasilan sistem dalam mengklasifikasikan keseluruhan sampel uji ke dalam wadah yang sesuai, sebagaimana didefinisikan dalam

$$Akurasi = \frac{N_{benar}}{N_{total}} \times 100\%$$

Dari persamaan tersebut, variable *N_{benar}* merepresentasikan jumlah objek sampah yang berhasil dipilah oleh aktuator secara tepat sesuai dengan label kelas aslinya, baik organik maupun anorganik. Sementara itu, sedangkan *N_{total}* adalah total keseluruhan populasi sampel yang diujikan dalam satu siklus pengujian. Pengukuran ini bertujuan untuk membuktikan secara empiris bahwa penerapan prapemrosesan *Gaussian Blur* mampu menstabilkan fitur

citra sehingga menurunkan angka kesalahan klasifikasi akibat gangguan *noise* frekuensi tinggi. Selain aspek akurasi, kecepatan respon sistem diukur dalam satuan milidetik (ms) untuk mengevaluasi beban komputasi yang ditimbulkan oleh algoritma filter pada mikrokontroler ESP32-CAM. Pengukuran dilakukan secara programatik dengan merekam durasi eksekusi menggunakan fungsi waktu internal sistem (*millis*). Waktu mulai dihitung tepat saat matriks piksel memasuki proses konvolusi *Gaussian*, dan berakhir pada saat aktuator motor servo mencapai posisi sudut akhir pemisahan. Rata-rata waktu dari seluruh iterasi pengujian kemudian dianalisis untuk memastikan bahwa proses penyaringan *noise* tidak menimbulkan latensi yang mengganggu fungsi operasi *real-time* pada perangkat *embedded*.

3. Hasil dan Pembahasan

Bagian ini menyajikan data hasil rancang bangun prototipe pemilah sampah otomatis dan data pengujian performa sistem dalam mengklasifikasikan sampah organik dan anorganik. Data disajikan secara logis mulai dari implementasi fisik hingga perbandingan kinerja sistem sebelum dan sesudah penerapan metode *Gaussian Blur*.

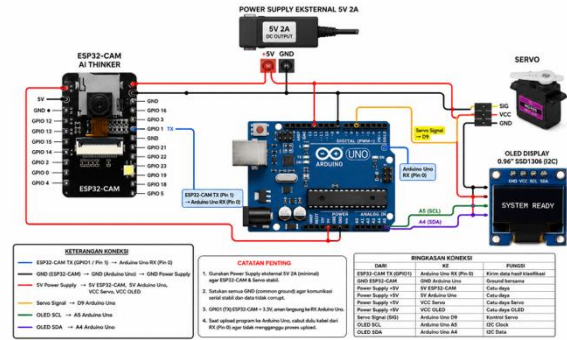
3.1. Implementasi Prototipe Perangkat Keras

Penelitian ini menghasilkan sebuah prototipe fisik pemilah sampah otonom yang mengintegrasikan unit akuisisi citra berbasis ESP32-CAM dengan unit kendali mekanik berbasis Arduino Uno. Wujud fisik sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Prototipe Sistem Pemilah Sampah Otomatis

Struktur alat terdiri dari kompartemen atas sebagai tempat peletakan kamera dan mikrokontroler, serta bagian bawah sebagai wadah penampung sampah. Konfigurasi interkoneksi antar komponen, termasuk jalur komunikasi UART antara ESP32-CAM dan Arduino Uno serta jalur I2C untuk OLED Display, dirinci pada skema *wiring* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Skema Wiring dan Interkoneksi Sistem

3.2. Hasil Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk memverifikasi performa klasifikasi sampah organik dan anorganik pada kondisi lingkungan dengan pencahayaan dinamis. Proses pengujian ini dilaksanakan dalam dua tahap utama yang diawali dengan pengujian menggunakan penerapan metode *Gaussian Blur* sebagai tahap pra-pemrosesan citra. Data hasil pengujian terhadap 20 sampel dengan filter tersebut disajikan secara rinci pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Sistem Dengan Gaussian Blur

No	Sampel	Organic %	Brightness Avg	Hasil Sistem	Label Asli	Status	Response Time
1	Kulit Pisang	9.44	70.01	Organik	Organik	Benar	2048
2	Plastik Bening	5.37	86.54	Anorganik	Anorganik	Benar	2179
3	Daun Kering	9.35	73.15	Anorganik	Organik	Salah	2048
4	Daun Hijau	4.73	79.48	Anorganik	Organik	Salah	2176
5	Kulit Buah	3.35	81.95	Anorganik	Organik	Salah	2050
6	Rumpun	8.71	71.51	Organik	Organik	Benar	2049
7	Bunga Layu Rantin	10.63	70.54	Organik	Organik	Benar	2048
8	Daun Kering	9.21	71.48	Organik	Organik	Benar	2048
9	Daun Gugur	10.46	70.90	Organik	Organik	Benar	2049
10	Batang Kering	7.25	65.97	Organik	Organik	Benar	2048
11	Kulit Buah Kantin	12.04	76.73	Organik	Organik	Benar	2049

12	Plastik	1.25	91.01	Anorganik	Anorganik	Bener	2180	2	Plastik Bening	4.73	75.64	Anorganik	Anorganik	Bener	2048
13	Kulit Snack	1.54	91.09	Anorganik	Anorganik	Bener	2180	3	Daun Kering	6.21	74.47	Anorganik	Organik	Salah	2048
14	Botol Cup	10.83	78.29	Anorganik	Anorganik	Bener	2049	4	Daun Hijau	5.98	70.58	Anorganik	Organik	Salah	2047
15	Kaleng	10.00	73.89	Anorganik	Anorganik	Bener	2049	5	Kulit Buah	4.65	80.61	Anorganik	Organik	Salah	2176
16	Kemasan Susu	2.65	91.17	Anorganik	Anorganik	Bener	2180	6	Rumpun Bunga Layu	2.83	65.47	Anorganik	Organik	Salah	2048
17	Gelas Plastik	3.50	65.09	Anorganik	Anorganik	Bener	2048	7	Potongan Ranting Kering	3.52	84.92	Anorganik	Organik	Salah	2178
18	Sedotan	1.29	91.81	Anorganik	Anorganik	Bener	2180	8	Daun Gugur	6.94	71.83	Anorganik	Organik	Salah	2048
19	Kardus Laminasi	1.79	91.58	Anorganik	Anorganik	Bener	2180	9	Batang Kering	2.77	75.08	Anorganik	Organik	Salah	2048
20	Sachet Kopi	1.35	91.20	Anorganik	Anorganik	Bener	2180	10	Kulit Buah Kantin	6.25	73.25	Anorganik	Organik	Salah	2048

Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa penggunaan filter *Gaussian* memberikan performa yang optimal di mana sistem berhasil mengklasifikasikan 17 dari 20 sampel dengan benar sehingga diperoleh akurasi sebesar 85% dengan rata-rata waktu respon sebesar 2091 ms. Selanjutnya, dilakukan pengujian tahap kedua tanpa menggunakan filter spasial untuk melihat perbandingan kinerja sistem saat menghadapi *noise* dan *glare* secara langsung, sebagaimana datanya disajikan pada Tabel 5.

Data pada Tabel 5 menunjukkan penurunan akurasi yang sangat signifikan di mana sistem hanya mampu mengklasifikasikan 7 dari 20 sampel dengan benar sehingga akurasi merosot menjadi 35%. Meskipun akurasi menurun, rata-rata waktu respon pada kondisi tanpa filter ini tercatat sedikit lebih cepat yaitu 2062 ms. Sebagai bukti autentik jalannya proses klasifikasi secara *real-time*, Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan cuplikan *log* data pada *Serial Monitor* yang memperlihatkan rincian parameter yang diproses sistem meliputi nilai *Organic %*,

11	Sachet Kopi	1.35	91.20	Anorganik	Anorganik	Bener	2180	11	Plastik	1.06	70.51	Anorganik	Anorganik	Bener	2048
12	Kulit Snack	7.79	75.30	Anorganik	Anorganik	Bener	2050	12	Kulit Snack	7.79	75.30	Anorganik	Anorganik	Bener	2050
13	Botol Cup	8.13	81.31	Anorganik	Anorganik	Bener	2050	13	Botol Cup	8.13	81.31	Anorganik	Anorganik	Bener	2050
14	Kaleng	6.19	75.57	Anorganik	Anorganik	Bener	2048	14	Kaleng	6.19	75.57	Anorganik	Anorganik	Bener	2048
15	Kemasan Susu	7.81	77.30	Anorganik	Anorganik	Bener	2049	15	Kemasan Susu	7.81	77.30	Anorganik	Anorganik	Bener	2049
16	Gelas Plastik	0.44	72.74	Anorganik	Anorganik	Bener	2049	16	Gelas Plastik	0.44	72.74	Anorganik	Anorganik	Bener	2049
17	Sedotan	7.48	69.71	Organik	Anorganik	Salah	2047	17	Sedotan	7.48	69.71	Organik	Anorganik	Salah	2047
18	Kardus Laminasi	11.02	71.23	Organik	Anorganik	Salah	2047	18	Kardus Laminasi	11.02	71.23	Organik	Anorganik	Salah	2047
19	Sachet Kopi	10.40	71.91	Organik	Anorganik	Salah	2048	19	Sachet Kopi	10.40	71.91	Organik	Anorganik	Salah	2048

Tabel 5. Hasil Pengujian Sistem Tanpa Gaussian Blur

No	Sampe l Uji	Orga nic %	Brig htnes s Avg	Hasil Siste m	Labe l Asli	Statu s	Resp onse Time (Ms)
1	Kulit Pisang	4.23	76.13	Anorganik	Orga nik	Sala h	2174

```

-----
Organic %      : 10.63
Brightness Avg : 70.54
HASIL : ORGANIK
Servo -> Wadah Organik
Servo kembali netral
Response Time  : 2048 ms
-----

```

Gambar 5. Tampilan Output Serial Monitor Sampel 1

```

-----
Organic %      : 7.25
Brightness Avg : 65.97
HASIL : ORGANIK
Servo -> Wadah Organik
Servo kembali netral
Response Time  : 2048 ms
-----
    
```

Gambar 6. Tampilan Output Serial Monitor Sampel 2

```

-----
Organic %      : 2.77
Brightness Avg : 75.08
HASIL : ANORGANIK
Servo -> Wadah Anorganik
Servo kembali netral
Response Time  : 2048 ms
-----
    
```

Gambar 7. Tampilan Output Serial Monitor Sampel 3

```

-----
Organic %      : 5.98
Brightness Avg : 70.58
HASIL : ANORGANIK
Servo -> Wadah Anorganik
Servo kembali netral
Response Time  : 2047 ms
-----
    
```

Gambar 8. Tampilan Output Serial Monitor Sampel 4

3.3. Pembahasan

Berdasarkan rangkaian hasil penelitian yang telah dipaparkan, terlihat hubungan yang sangat erat antara penerapan filtrasi citra dengan kestabilan fitur warna yang diekstraksi. Perbandingan performa sistem secara keseluruhan dirangkum pada Tabel 6, yang menunjukkan bahwa implementasi *Gaussian Blur* terbukti meningkatkan akurasi klasifikasi secara signifikan sebesar 50%.

Tabel 6. Perbandingan Performa Sistem

Metode	Akurasi	Avg Response Time
Tanpa <i>Gaussian Blur</i>	35%	2062 ms
Dengan <i>Gaussian Blur</i>	85%	2091 ms

Meskipun penggunaan filter ini menambah waktu komputasi sebesar 29 ms, peningkatan beban tersebut relatif sangat kecil dan tidak mengganggu fungsi

operasi *real-time* sistem karena selisihnya yang tidak signifikan dibandingkan kondisi tanpa filter. Fakta bahwa akurasi menurun drastis ketika filter dilepaskan membuktikan bahwa metode *Gaussian Blur* memegang peranan krusial dalam mereduksi *noise* frekuensi tinggi dan pantulan cahaya (*glare*) yang mengganggu pembacaan nilai HSV. Secara teknis, penghalusan citra membantu menjaga nilai saturasi tetap berada dalam ambang batas yang ditentukan sehingga distribusi piksel objek organik dapat dibedakan secara konsisten.

Namun demikian, hasil penelitian ini juga menunjukkan adanya limitasi objektif di mana masih ditemukan kesalahan klasifikasi pada sampel organik berupa daun kering, daun hijau, dan kulit buah. Ketiga objek tersebut memiliki nilai kecerahan (*brightness*) relatif tinggi yang berada pada rentang 73.15 hingga 81.95, di mana tingginya intensitas cahaya ini menggeser distribusi nilai HSV sehingga persentase piksel organik turun di bawah ambang batas sistem. Hal ini menunjukkan bahwa performa metode *thresholding* warna masih memiliki kelemahan terhadap variasi pencahayaan ekstrem yang menyebabkan warna objek memudar (*overexposure*).

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya, hasil ini sejalan dengan studi yang menyatakan bahwa *Gaussian Blur* efektif sebagai *low-pass filter* untuk menstabilkan data visual pada lingkungan yang dinamis. Berbeda dengan pendekatan *deep learning* yang mampu mengatasi variasi pencahayaan ekstrem namun membutuhkan sumber daya komputasi tinggi, metode yang diusulkan dalam penelitian ini mampu berjalan pada ESP32-CAM dengan sumber daya terbatas. Kompromi terhadap toleransi kesalahan pada objek dengan kecerahan ekstrem merupakan konsekuensi logis dari penggunaan metode pra-pemrosesan ringan (*lightweight preprocessing*) demi mempertahankan kecepatan respon sistem secara *real-time*.

3. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil merealisasikan prototipe sistem pemilahan sampah otomatis berbasis ESP32-CAM dan Arduino Uno yang mampu mengklasifikasikan sampah organik dan anorganik secara otonom. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penerapan metode *Gaussian Blur* sebagai tahap pra-pemrosesan citra terbukti efektif meningkatkan akurasi sistem secara signifikan sebesar 50%, yaitu dari akurasi 35% pada kondisi tanpa filter menjadi 85% setelah filtrasi diterapkan. Peningkatan akurasi ini dicapai dengan penambahan waktu respon yang sangat minimal sebesar 29 ms, sehingga sistem tetap mampu beroperasi secara *real-time* untuk kebutuhan pemilahan sampah harian.

Secara teknis, integrasi antara pemrosesan citra pada ESP32-CAM dan kendali aktuator pada Arduino Uno melalui protokol komunikasi serial telah berjalan sesuai dengan rancangan logika sistem. Penggunaan algoritma *thresholding* HSV yang didahului oleh filter *low-pass* terbukti mampu menstabilkan ekstraksi fitur warna meskipun perangkat bekerja dengan sumber daya komputasi yang terbatas. Keberhasilan ini menunjukkan bahwa sistem tidak hanya unggul dalam aspek presisi klasifikasi, tetapi juga efisien dalam penggunaan memori dan daya, sehingga sangat layak untuk diimplementasikan sebagai solusi teknologi tepat guna di lingkungan pendidikan.

Selain pencapaian teknis tersebut, penelitian ini memberikan kontribusi pada pengembangan sistem *embedded* murah (*low-cost*) yang mampu melakukan tugas visi komputer (*computer vision*) kompleks tanpa ketergantungan pada *server* eksternal. Stabilitas sistem dalam menangani variasi sampah taman seperti daun kering dan ranting melalui optimasi *kernel* Gaussian menunjukkan bahwa pendekatan pra-pemrosesan yang tepat dapat menutupi keterbatasan *hardware* pada mikrokontroler kelas rendah. Dengan demikian, model arsitektur *multi-processor* yang diusulkan dalam studi ini dapat menjadi referensi bagi pengembangan instrumen pemantauan lingkungan berbasis *Internet of Things* (IoT) lainnya yang mengutamakan kecepatan respon dan kemandirian perangkat dalam pengambilan keputusan.

Meskipun sistem menunjukkan performa yang stabil, ditemukan limitasi pada objek dengan intensitas cahaya tinggi yang menyebabkan penurunan presisi deteksi warna akibat efek *overexposure*. Sebagai saran untuk pengembangan selanjutnya, sistem ini dapat dioptimalkan dengan penambahan kendali pencahayaan konstan di dalam kompartemen atau penggunaan algoritma klasifikasi yang lebih resilien terhadap perubahan luminansi ekstrem. Prototipe ini memiliki potensi besar untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi sistem pengelolaan limbah yang lebih cerdas dan terintegrasi dalam skala yang lebih luas.

Daftar Rujukan

- [1] Pambayun, M.R.B. and Azhar, Y., 2024. Implementasi Data Augmentation untuk Klasifikasi Sampah Organik dan Non Organik Menggunakan Inception-V3. *JISKA (Jurnal Informatika Sunan Kalijaga)*, 9 (3), pp.192-204. <https://doi.org/10.14421/jiska.2024.9.3.192-204>
- [2] Setiawan, M.A., Syauqi, D. and Ichsan, M.H.H., 2022. Pengembangan Smart Trash sebagai Media Monitoring Lingkungan Hidup Larva Lalat Tentara Hitam (*Hermetia Illucens*) menggunakan Metode Gaussian Naive Bayes. *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, 6 (4), pp.1797-1806.
- [3] Dasuki, M., Lusiana, D. dan Rahman, M., 2025. Pengenalan Teknologi Internet Of Things (Iot) Untuk Pengelolaan Sampah Pintar Di Sekolah. *BERNAS: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, 6(3), hal. 1850-1856.
- [4] Quzwain, K., dkk., 2025. Alat Bantu Pembelajaran Sistem Pemilah Sampah Otomatis. *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat Nusantara (JPkMN)*, 6(4), hal. 6514-6521.
- [5] Wibowo, S.H. and Susanto, F., 2016. Penerapan Metode Gaussian Smoothing Untuk Mereduksi Noise Pada Citra Digital. *Jurnal Media Infotama*, 12 (2), pp.129-135. <https://doi.org/10.37676/jmi.v12i2.416>
- [6] Prasetyo, B. and Pratiwi, N., 2025. Deteksi Sampah Organik dan Anorganik Menggunakan Model YOLOv8. *JUPI (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, 10 (1), pp.494-506. <https://doi.org/10.29100/jupi.v10i1.5965>
- [7] Tsaqofah, M., Harahap, L.S. and Hasibuan, D.S., 2025. Optimization of Digital Image Processing Through Gaussian Filtering for Noise Reduction. *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications*, 4 (3), pp.2158-2164. <https://doi.org/10.59934/jaiea.v4i3.1120>
- [8] Denice, R. O. A., dkk., 2025. Implementasi Dan Deteksi Tong Sampah Pintar Menggunakan Esp8266 dengan Algoritma CNN. *METIK JURNAL*, 9(2), hal. 364-374.
- [9] Jeffry., 2025. Sistem Deteksi Kekeruhan Air Berbasis Citra Digital Menggunakan Gaussian Filtering dan Thresholding. *Indonesian Journal of Intellectual Publication*, 5 (2), pp.146-151. <https://doi.org/10.51577/ijpublication.v5i2.696>
- [10] Wibisono, R. A. dan Soetanto, H., 2024. Perbandingan Efektifitas Filter Median, Gaussian Dan Mean Dalam Mengurangi Noise Pada Citra Digital. *5th Seminar Nasional Mahasiswa Fakultas Teknologi Informasi (SENAFTI)*, 3(2), hal. 974-983. <https://doi.org/10.55606/juitik.v5i2.1148>
- [11] Devita, R., Putra, O.E. and Rianti, E., 2024. Perbandingan Kernel Penajaman, Gaussian Blur dan Deteksi Tepi pada Citra Otak. *Journal of Science and Social Research*, 7 (4), pp.1521-1526.
- [12] Alhriani, P.S., Harahap, L.S. and Chantika, R., 2025. Analisis Perbandingan Filter Median dan Gaussian dalam Mengurangi Noise pada Citra Digital. *Juitik (Jurnal Ilmiah Teknik Informatika dan Komunikasi)*, 5 (2), pp.495-505. <https://doi.org/10.55606/juitik.v5i2.1148>
- [13] Herriyance., Panjaitan, Z., Andika, B. and Dahria, M., 2025. Pengelompokan Citra Warna Kulit Untuk Rekomendasi Shade Make-Up Kecantikan Dengan Konsep Pengolahan Citra Digital. *Jurnal Sistem Informasi TGD*, 4 (4), pp.989-998. <https://doi.org/10.53513/jursi.v4i4.11820>
- [14] Nainggolan, S.Y., 2020. Peningkatan Kualitas Citra MRI Scan dengan Metode Gaussian Filter. *Jurnal Unit Haul Median Medan*, 1 (1), pp.348-355.
- [15] Afriansyah, R., dkk., 2025. Pemberdayaan Masyarakat Desa Bank Sampah Karya Mandiri melalui Edukasi Bank Sampah dan Penerapan Sistem Manajemen Berbasis IoT. *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat (Indonesian Journal of Society Engagement)*, 6(2), hal. 104-120. <https://doi.org/10.33753/ijse.v6i2.223>