

# ANALISIS PENGARUH KONTAMINASI DEBU TERHADAP AKURASI DAN REPEATABILITAS SISTEM PENGISIAN TEPUNG OTOMATIS BERBASIS SENSOR OPTIK

Rehan Pinanda Prasetya<sup>1\*</sup>, Yuliarman Saragih<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Indonesia

\*Penulis korespondensi, E-mail: [2210631160064@student.unsika.ac.id](mailto:2210631160064@student.unsika.ac.id)

## Abstrak

Sistem pengisian tepung otomatis berbasis sensor optik banyak digunakan di industri untuk meningkatkan efisiensi dan konsistensi produksi. Namun, lingkungan berdebu berpotensi menurunkan kinerja sensor. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kontaminasi debu terhadap akurasi dan *repeatability* sistem pengisian tepung pada mesin *Automatic Spacfill*. Metode eksperimen dilakukan dengan membandingkan performa sistem pada kondisi mesin bersih dan kotor. Pengujian dilakukan pada lima variasi tinggi awal tepung (35–55 cm) dengan tiga kali pengulangan, kemudian dianalisis menggunakan parameter akurasi, *repeatability*, dan standar deviasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi mesin bersih menghasilkan akurasi lebih tinggi dan kinerja lebih stabil, dengan akurasi keseluruhan mencapai 99,32%, sedangkan kondisi kotor menurunkan akurasi menjadi 93,24% disertai fluktuasi hasil pengisian yang lebih besar. Temuan ini konsisten dengan studi terdahulu bahwa partikel debu mengganggu pembacaan sensor melalui hamburan cahaya dan atenuasi sinyal. Penurunan akurasi sebesar 6,08% berimplikasi pada risiko kerugian material dalam produksi massal. Oleh karena itu, diperlukan strategi mitigasi seperti pembersihan otomatis, material pelindung *self-cleaning*, dan metode *self-check* rutin untuk menjaga keandalan sistem di lingkungan berdebu.

*Kata kunci: sensor optik, sistem pengisian tepung otomatis, kontaminasi debu, akurasi, repeatabilitas.*

## Abstract

Automatic flour filling systems based on optical sensors are widely used in the industry to improve production efficiency and consistency. However, dusty environments can potentially degrade sensor performance. This study aims to analyze the effect of dust contamination on the accuracy and repeatability of an automatic flour filling system in an Automatic Spacfill machine. An experimental method was employed by comparing system performance under clean and dirty machine conditions. Tests were conducted at five initial flour level variations (35–55 cm) with three repetitions, then analyzed using accuracy, repeatability, and standard deviation parameters. The results showed that clean machine conditions produced higher accuracy and more stable performance, with an overall accuracy of 99.32%, while dirty conditions reduced accuracy to 93.24% accompanied by greater filling fluctuations. These findings are consistent with previous studies that dust particles interfere with sensor readings through light scattering and signal attenuation. The 6.08% decrease in accuracy implies a risk of material loss in mass production. Therefore, mitigation strategies such as automatic cleaning, self-cleaning protective materials, and routine self-check methods are necessary to maintain system reliability in dusty environments.

*Keywords: optical sensor, automatic flour filling system, dust contamination, accuracy, repeatability.*

## 1. Pendahuluan

Proses pengisian otomatis dalam industri makanan bubuk seperti tepung menuntut tingkat akurasi dan presisi yang tinggi untuk menjamin keseragaman berat dan mutu produk akhir [1]. Sistem pengisian yang tidak akurat dapat menyebabkan kerugian material dan ketidaksesuaian dengan regulasi industri [1]. Ketidaksesuaian berat produk

juga berdampak pada kepercayaan konsumen dan efisiensi produksi [2].

Lingkungan produksi tepung sangat rentan terhadap akumulasi debu halus, yang berasal dari proses penggilingan, pengayakan, dan transportasi material [3]. Partikel debu ini berpotensi mengganggu sensor fotoelektrik yang digunakan dalam sistem pengisian

otomatis, karena partikel dapat menghalangi atau memantulkan cahaya sensor secara tidak konsisten [1]. Sistem berbasis sensor cahaya sangat sensitif terhadap hamburan dan pemantulan dari partikel-partikel kecil di udara [4].

Debu juga memengaruhi sifat alir bahan bubuk. Partikel halus meningkatkan kohesi antar partikel, menurunkan aliran bebas bahan, dan menyebabkan inkonsistensi dalam pengisian [5]. Sifat aliran buruk dapat menyebabkan *hopper* tersumbat atau aliran bahan tidak stabil ke sistem pengisian [4]. Variasi ini mengurangi presisi pengisian dan meningkatkan deviasi berat antar kemasan.

Pada studi kasus di suatu tempat industri tepung, tahapan pengayakan dimanfaatkan untuk mengurangi kandungan debu dalam tepung sebelum masuk ke tahap pengemasan, karena partikel halus terbukti mengganggu kestabilan sistem pengisian [3]. Sementara itu, pada proses produksi di tempat industri tepung lainnya., mesin *scourer* digunakan untuk membersihkan gandum dari debu sebelum digiling, sebagai bagian dari sistem *second cleaning* [2]. Upaya ini penting untuk memastikan bahwa hanya partikel utama yang masuk ke sistem pengolahan lanjutan.

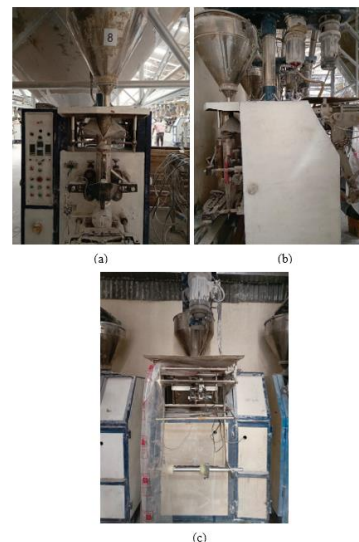
Analisis mendalam mengenai pengaruh gangguan debu terhadap karakteristik sistem pengisian seperti akurasi dan presisi sangat penting untuk pengembangan sistem yang andal dan sesuai standar mutu industri. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana partikel debu memengaruhi performa sistem pengisian otomatis berbasis sensor fotoelektrik, serta merumuskan strategi teknis untuk meminimalkan pengaruhnya.

## 2. Metode

### 2.1. Desain Sistem

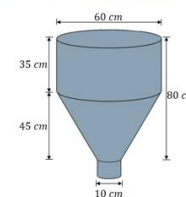
#### 2.1.1. Mesin Automatic Spacfill

Mesin *Automatic Spacfill* merupakan mesin yang digunakan pada suatu tempat industri tepung untuk mengemas tepung ke dalam kemasan plastik secara otomatis [3]. Mesin ini beroperasi dengan sistem kontrol berbasis *timer*, yang menentukan jumlah tepung yang akan dimasukkan ke dalam kemasan dengan tingkat akurasi yang tinggi. Prinsip kerja mesin ini didasarkan pada pengaturan waktu, di mana *timer* mengontrol durasi pengisian tepung. Sebagai contoh, ketika timer diatur selama 0,7 detik, mesin akan mengeluarkan 500 gram tepung ke dalam kemasan dengan tingkat *error* sekitar  $\pm 5$  gram. Gambar 1 di bawah ini adalah bentuk dari mesin *automatic spacfill*.



Gambar 1. Mesin automatic spacfill. (a) tampak depan; (b) tampak samping; (c) tampak belakang.

Mesin ini memiliki banyak fungsi yang terintegrasi untuk melakukan proses pengemasan tepung dengan baik. Kemampuan pengemasan menggunakan mesin *automatic spacfill* bisa mencapai  $\pm 19$  pcs 500 gram/menit [3]. Pada mesin inilah sistem pengisian tepung otomatis dipasang untuk mengisi tepung pada tangki mesin *automatic spacfill* dari tangki tepung utama. Gambar 2 menunjukkan bentuk tangki tepung mesin *automatic spacfill*.

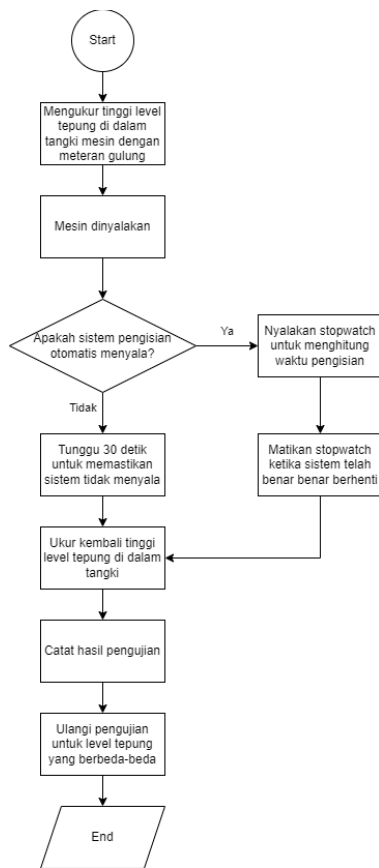


Gambar 2. Tangki Mesin Automatic Spacfill

#### 2.1.2. Desain Skematik dan Diagram Alir Sistem

Desain skematik sistem pengisian tepung otomatis ditunjukkan pada Gambar 3



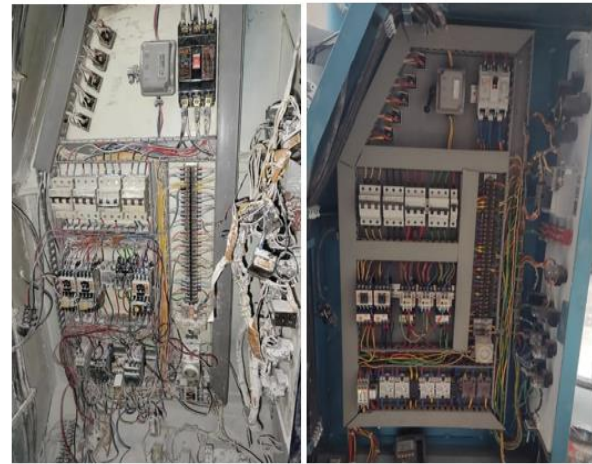


Gambar 5. Alur proses pengukuran data operasi sistem pengisian tepung otomatis pada mesin *Automatic Spacfill*.

Pengukuran ini dilakukan dengan 3x perulangan agar dapat dianalisis tingkat kekonsistenan sistem dalam beroperasi. Adapun variabel-variabel yang dicatat selama pengujian meliputi:

- Tinggi tepung di dalam tangki sebelum pengisian (cm).
- Kondisi output sensor optik (HIGH/LOW).
- Waktu pengisian (dalam detik).
- Tinggi tepung setelah pengisian (cm).
- Kondisi kebersihan panel mesin (apakah terdapat debu tepung yang berpotensi memengaruhi sensor atau sistem kontrol).

Terdapat 2 mesin *automatic spacfill* yang dijadikan target pengukuran data. Mesin *spacfill* pertama adalah mesin dengan kondisi panel yang bersih dan mesin *spacfill* kedua adalah mesin dengan kondisi panel yang dipenuhi oleh tepung-tepung residu yang terbuang. Dalam lingkungan industri yang keras seperti pabrik tepung, kontaminasi debu pada lensa atau jendela pelindung sensor optik dapat menurunkan kualitas sinyal secara signifikan dan meningkatkan ketidakpastian pengukuran [7]. Dapat dilihat pada Gambar 6 di bawah ini untuk kondisi dari panel masing-masing mesin.



Gambar 6. Kondisi panel mesin *automatic spacfill* untuk pengukuran; (a) Kondisi kotor; (b) Kondisi bersih.

### 2.3. Perhitungan Karakteristik Statis Sistem dari Hasil Pengukuran

Dalam sistem pengukuran, karakteristik instrumentasi mencerminkan kualitas dan keandalan suatu perangkat dalam menghasilkan data yang akurat dan konsisten[8]. Tiga karakteristik penting yang dibahas dalam bagian ini adalah akurasi, *repeatability* (keterulangan), dan standar deviasi.

#### 2.3.1. Akurasi

Akurasi mengacu pada kedekatan nilai yang diukur dengan nilai sebenarnya (*true value*) dari suatu besaran [8]. Secara matematis, kesalahan pengukuran (*error*) dapat dihitung dengan persamaan (1) di bawah ini.

$$Error = x_{measured} - x_{true} \quad (1)$$

Sedangkan akurasi secara kuantitatif dapat direpresentasikan dengan ketidakpastian pengukuran (*measurement uncertainty*), yaitu rentang nilai di mana nilai sebenarnya diyakini berada, dinyatakan sebagai:

$$U = k \cdot s \quad (2)$$

di mana:

- U adalah *expanded uncertainty*,
- k adalah faktor cakupan (*coverage factor*),
- s adalah simpangan baku gabungan (*combined standard deviation*).

Untuk perhitungan akurasi dalam persentase, dilakukan dengan menggunakan persamaan (3) di bawah ini.

$$Akurasi (\%) = 100\% - \left( \frac{Rata-rata selisih}{Nilai target} \times 100 \right) \quad (3)$$

### 2.3.2. Standar Deviasi

Standar deviasi adalah ukuran statistik yang menyatakan seberapa jauh data pengukuran tersebar dari nilai rata-ratanya[8]. Dalam instrumentasi, standar deviasi digunakan untuk mengkuantifikasi *precision* atau ketepatan instrumen, serta digunakan dalam menghitung ketidakpastian pengukuran[8]. Simpangan baku standar dihitung menggunakan rumus:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{4}$$

di mana:

- $x_i$  adalah hasil pengukuran ke-i,
- $\bar{x}$  adalah nilai rata-rata dari seluruh pengukuran
- $n$  adalah jumlah total data

### 2.3.3. Repeatability (Keterulangan)

*Repeatability* adalah kemampuan instrumen untuk menghasilkan hasil pengukuran yang sama dalam kondisi yang identik, termasuk instrumen, operator, lokasi, dan waktu[8]. Konsep ini sangat penting untuk menilai konsistensi jangka pendek. Dalam konteks ini, *repeatability* dapat dinilai melalui penyebaran data pengukuran, biasanya dalam bentuk simpangan baku dari pengulangan tersebut.

Jika dilakukan  $n$  pengukuran  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , maka nilai rata-rata:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{5}$$

*Repeatability* dapat dikaitkan dengan simpangan baku pengukuran (standar deviasi) yang rumus matematisnya telah diberikan pada persamaan (4). Perhitungan *repeatability* bisa menggunakan rumus yang sama dengan standar deviasi [8].

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1. Data Hasil Pengukuran

Pengukuran dilakukan pada 5 level tepung awal yang berbeda yaitu 35cm, 40cm, 45cm, 50cm, 55cm. Tabel 1 menunjukkan hasil pengambilan data kedua mesin spacfill bersih dan kotor.

Tabel 1. Hasil Pengukuran pada kedua mesin *automatic spacfill*

Perulangan ke-	Kondisi Kebersihan Mesin	Tinggi Tepung Awal (cm)	Kondisi Sensor (HIGH/LOW)	Tinggi Tepung Setelah Pengisian (cm)	Waktu Pengisian (s)
1	Bersih	35	HIGH	59	14.40
		40	HIGH	60	12.11
		45	HIGH	60	9.77
		50	HIGH	61	6.89
		55	HIGH	60	4.71
	Kotor	35	HIGH	62	15.13
		40	HIGH	50	10.52
		45	HIGH	57	9.34
		50	HIGH	60	4.76
		55	HIGH	61	5.13
2	Bersih	35	HIGH	60	15.07
		40	HIGH	60	12.52
		45	HIGH	63	9.61
		50	HIGH	59	6.71
		55	HIGH	60	5.26
	Kotor	35	HIGH	53	14.62
		40	HIGH	49	10.22
		45	HIGH	60	9.73
		50	HIGH	58	6.65
		55	HIGH	58	4.98
3	Bersih	35	HIGH	60	15.10
		40	HIGH	60	12.16
		45	HIGH	60	9.82
		50	HIGH	60	6.45
		55	HIGH	60	5.26
	Kotor	35	HIGH	57	14.95
		40	HIGH	50	10.58
		45	HIGH	63	9.62
		50	HIGH	54	6.45
		55	HIGH	61	4.80

Data yang diperoleh menunjukkan perbedaan performa sistem pengisian tepung otomatis berbasis sensor fotoelektrik antara kondisi mesin yang bersih dan yang kotor. Pada kondisi mesin bersih, sistem cenderung menghasilkan tinggi tepung akhir yang konsisten serta waktu pengisian yang stabil dan relatif lebih cepat, terutama ketika tinggi awal mendekati batas atas (50–55 cm).

Sebaliknya, pada kondisi mesin yang kotor, hasil pengisian menjadi kurang konsisten. Terdapat beberapa kasus di mana tinggi akhir tepung tidak mencapai target yang diharapkan, meskipun status sensor tetap menunjukkan kondisi “HIGH”. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun sensor aktif, keberadaan debu pada permukaannya dapat mengganggu akurasi pendeteksian level tepung. Selain itu, waktu pengisian dalam kondisi kotor juga menunjukkan fluktuasi yang lebih besar, menandakan adanya gangguan pada efisiensi sistem.

### 3.2. Analisis Karakteristik Sistem

Analisis pertama yang dilakukan adalah menganalisis standar deviasi hasil pengukuran. Dilakukan perhitungan standar deviasi dengan menggunakan persamaan (4). Pertama-tama, perlu dihitung terlebih dahulu rata-rata

tinggi tepung setelah pengisian hasil pengukuran keseluruhan yang telah dilakukan dengan persamaan (5). Didapat rata-rata tinggi tepung akhirnya adalah 58.5cm. Maka, standar deviasi tinggi tepung keseluruhannya adalah

$$s = \sqrt{\frac{1}{29} \sum_{i=1}^{30} (x_i - 58.5)^2} \tag{6}$$

$$s = 3.67 \text{ cm} \tag{7}$$

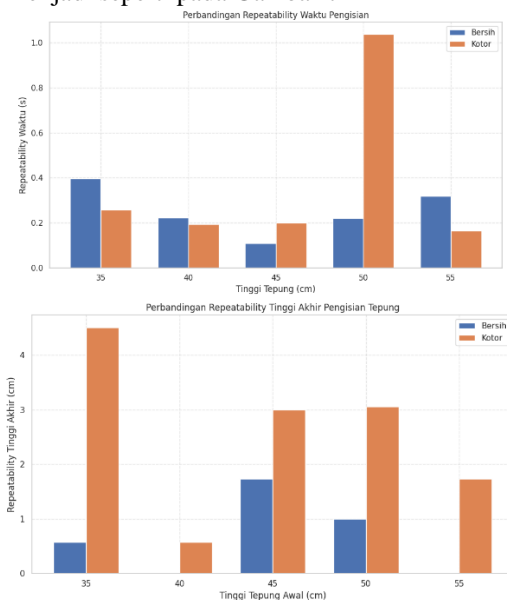
Standar deviasi sebesar 3,67 cm menunjukkan bahwa terdapat variasi yang cukup nyata pada hasil akhir tinggi tepung setelah proses pengisian. Meskipun rata-rata pengisian berada di angka 58,5 cm, sebagian data menyimpang hingga beberapa sentimeter dari nilai tersebut. Nilai deviasi ini mengindikasikan bahwa sistem belum sepenuhnya konsisten, terutama ketika mesin dalam kondisi kotor, yang kemungkinan besar disebabkan oleh gangguan debu terhadap sensor pengukuran. Dalam lingkungan berdebu, gangguan partikel dapat meningkatkan error pengukuran secara signifikan akibat noise latar yang diinduksi debu dan perubahan karakteristik serapan cahaya [9]. Oleh karena itu, meskipun sistem bekerja dengan baik secara umum, upaya peningkatan kebersihan sensor dan lingkungan kerja diperlukan untuk menjaga kestabilan dan akurasi sistem pengisian otomatis.

Untuk menilai *repeatability* atau tingkat pengulangan kinerja sistem, dilakukan pengujian sebanyak tiga kali pada variasi tinggi awal tepung yaitu 35 cm hingga 55 cm. Pengujian ini menggunakan dua variabel utama, yaitu waktu pengisian dan tinggi akhir tepung setelah proses pengisian otomatis. Melalui analisis terhadap hasil dari setiap pengulangan, dapat dievaluasi seberapa konsisten sistem merespons kondisi awal dan seberapa kecil variasi yang terjadi pada hasil akhirnya. Dengan menggunakan persamaan (4) dan (5) didapat hasil *repeatability* pada tabel di bawah ini. Penurunan konsistensi pengukuran (*repeatability*) pada kondisi berdebu ini sejalan dengan temuan bahwa interferensi partikel menyebabkan kesulitan pengenalan sinyal dan atenuasi intensitas cahaya, yang secara langsung menurunkan reliabilitas sistem pengukuran [10]. Hasil perhitungan analisis *repeatability* ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Hasil Perhitungan Analisis *Repeatability*

Tinggi Tepung (cm)	Rata-rata Waktu (s)	Rata-rata Tinggi Akhir (cm)	Repeatability Waktu (s)	Repeatability Tinggi Akhir (cm)	Kondisi Kebersihan Mesin
35	14.86	59.67	0.396	0.577	Bersih
	14.90	57.33	0.259	4.509	Kotor
40	12.26	60	0.224	0	Bersih
	10.44	49.67	0.193	0.577	Kotor
45	9.73	61	0.110	1.732	Bersih
	9.56	60	0.201	3	Kotor
50	6.68	60	0.221	1	Bersih
	5.95	57.33	1.038	3.055	Kotor
55	5.08	60	0.318	0	Bersih
	4.97	60	0.165	1.732	Kotor

Jika disajikan dalam bentuk diagram batang maka hasilnya akan menjadi seperti pada Gambar 7



Gambar 7. Grafik perhitungan *repeatability* sistem

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 7, sistem pengisian tepung otomatis menunjukkan performa yang lebih stabil saat kondisi panel mesin bersih dibandingkan saat kondisi kotor. Pada kondisi bersih, rata-rata waktu pengisian dan tinggi akhir cenderung konsisten, dengan nilai *repeatability* waktu yang lebih rendah, seperti terlihat pada tinggi tepung 45 cm dengan *repeatability* waktu 0.110 s dan *repeatability* tinggi akhir 1.732 cm. Sebaliknya, kondisi kotor menunjukkan fluktuasi yang lebih besar, seperti pada tinggi awal 50 cm yang memiliki *repeatability* waktu sebesar 1.038 s dan tinggi akhir sebesar 3.055 cm. Ini mengindikasikan bahwa keberadaan debu atau kotoran pada panel mesin dapat memengaruhi kestabilan pembacaan sensor, sehingga berdampak pada akurasi dan presisi proses pengisian.

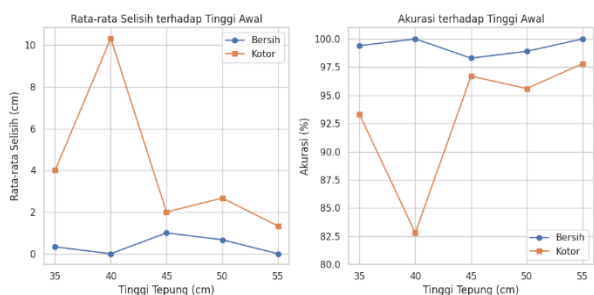
Untuk menilai ketepatan sistem dalam mencapai target pengisian, dilakukan perhitungan akurasi keseluruhan berdasarkan rata-rata selisih tinggi akhir terhadap target 60 cm. Selain itu, juga dihitung akurasi per titik tinggi awal

untuk melihat kestabilan sistem dalam berbagai kondisi pengisian awal. Perhitungan dilakukan dari tiga kali pengujian di setiap titik, menggunakan rata-rata selisih absolut terhadap target sebagai dasar evaluasi. Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan akurasi per titik tinggi awal.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Analisis Akurasi per Titik Tinggi Awal

Tinggi Tepung (cm)	Rata-rata selisih/error (cm)	Akurasi (%)	Kondisi Kebersihan Mesin
35	0.33	99.4	Bersih
	4	93.3	Kotor
40	0	100	Bersih
	10.33	82.8	Kotor
45	1	98.3	Bersih
	2	96.7	Kotor
50	0.67	98.9	Bersih
	2.67	95.6	Kotor
55	0	100	Bersih
	1.33	97.8	Kotor

Jika disajikan dalam bentuk diagram garis maka hasilnya akan menjadi seperti pada Gambar 8



Gambar 8. Grafik perbandingan akurasi sistem bersih dan kotor

Hasil analisis menunjukkan bahwa akurasi pengisian tepung jauh lebih tinggi pada kondisi mesin bersih, dengan nilai akurasi mendekati 100% di seluruh variasi tinggi awal. Sebaliknya, pada kondisi mesin kotor, terjadi penurunan akurasi signifikan, terutama pada tinggi awal 40 cm yang hanya mencapai 82,8%. Hal ini juga tercermin dari rata-rata selisih yang lebih besar pada kondisi kotor, menunjukkan bahwa debu atau kotoran dapat mengganggu deteksi sensor dan mempengaruhi keakuratan sistem pengisian otomatis.

Untuk menghitung akurasi keseluruhan masing-masing kondisi (bersih dan kotor), dapat digunakan rumus rata-rata dari akurasi tiap titik tinggi awal:

$$\begin{aligned}
 & \text{Akurasi total bersih} \\
 &= \frac{99.4 + 100 + 98.3 + 98.9 + 100}{5} \\
 &= 99.32\% \qquad (6)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Akurasi total kotor} \\
 &= \frac{93.3 + 82.8 + 96.7 + 95.6 + 97.8}{5} \\
 &= 93.24\% \qquad (7)
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa akurasi keseluruhan sistem dalam kondisi mesin bersih mencapai 99,32%, sedangkan dalam kondisi kotor menurun menjadi 93,24%. Hal ini mengindikasikan bahwa kebersihan mesin memiliki pengaruh signifikan terhadap akurasi sistem pengisian. Ketika mesin dalam kondisi bersih, sistem mampu mengisi tepung dengan presisi tinggi dan konsisten terhadap target tinggi awal. Sebaliknya, kondisi kotor cenderung menyebabkan ketidaktepatan, yang ditunjukkan oleh selisih pengisian yang lebih besar dan fluktuasi akurasi antar titik tinggi awal.

### 3.3. Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian ini menunjukkan bahwa kontaminasi debu pada sistem pengisian tepung otomatis menurunkan akurasi dari 99,32% (kondisi bersih) menjadi 93,24% (kondisi kotor), serta menurunkan *repeatability* yang ditandai dengan peningkatan standar deviasi pengukuran. Temuan ini sejalan dengan studi-studi terdahulu yang mengevaluasi dampak kontaminasi partikel terhadap kinerja sensor optik.

Hagan dan Kroll (2020) dalam penelitiannya tentang akurasi sensor partikel optik *low-cost* mengungkapkan bahwa sensor-sensor tersebut sering kali kurang terkarakterisasi dengan baik, dan pengukuran konsentrasi massa partikel dapat menyimpang secara signifikan dari nilai sebenarnya [11]. Hal ini relevan dengan temuan penulis, di mana akurasi sistem menurun drastis pada kondisi kotor akibat gangguan debu pada sensor fotoelektrik yang digunakan untuk mendeteksi level tepung.

Lebih lanjut, Jiang dkk. (2021) dalam evaluasi mereka terhadap sensor partikel optik *low-cost* menemukan bahwa meskipun terdapat korelasi yang kuat antar sensor ( $\geq 0,82$ ), deviasi pengukuran yang signifikan masih dapat terjadi dibandingkan dengan metode referensi [12]. Penelitian tersebut juga mengonfirmasi bahwa kalibrasi yang cermat diperlukan untuk memastikan keandalan sensor optik, terutama ketika digunakan di lingkungan dengan konsentrasi partikel yang bervariasi. Temuan ini memperkuat analisis penulis bahwa penurunan *repeatability* pada kondisi kotor (seperti pada tinggi awal 50 cm dengan *repeatability* waktu 1,038 detik) disebabkan oleh gangguan partikel yang memicu variasi respons sensor antar siklus pengukuran.

Huang dkk. (2021) menegaskan bahwa estimasi konsentrasi dan ukuran partikel oleh algoritma pabrikan memiliki keterbatasan inheren, karena hamburan partikel bergantung pada properti partikel seperti ukuran, bentuk,

dan indeks bias kompleks (*complex refractive index*) [13]. Dalam konteks penelitian ini, partikel tepung memiliki karakteristik unik yang berbeda dengan partikel uji standar, sehingga turut memengaruhi respons sensor dan akurasi pengisian. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya mengkonfirmasi temuan sebelumnya, tetapi juga memberikan kontribusi spesifik dalam konteks aplikasi industri tepung.

### **3.4. Implikasi Praktis dan Strategi Mitigasi**

Penurunan akurasi sebesar 6,08% (dari 99,32% menjadi 93,24%) pada kondisi mesin kotor memiliki implikasi praktis yang signifikan. Dalam produksi massal, *error* pengisian sebesar ini dapat menyebabkan kerugian material akibat kelebihan isi atau ketidaksesuaian produk dengan standar. Sebuah penelitian mengungkapkan bahwa ukuran partikel, indeks bias, dan bentuk partikel memiliki dampak signifikan terhadap penentuan koefisien hamburan cahaya pada sensor optik, sehingga karakteristik unik partikel tepung perlu dipertimbangkan dalam evaluasi kinerja sistem [14].

Untuk mengatasi kontaminasi debu, beberapa strategi mitigasi dapat diterapkan:

- Pembersihan otomatis: Sebuah penelitian tentang optimasi performa pembersihan semprot untuk sensor optik menemukan bahwa tekanan semprotan dan durasi penyemprotan merupakan faktor utama yang memengaruhi efektivitas pembersihan kontaminasi debu pada permukaan sensor [15].
- Material pelindung: Lapisan film tipis berbasis silika dengan struktur hierarkis mampu membersihkan sendiri kontaminasi debu melalui mekanisme fotokatalitik dan hidrofilik [16].
- Perawatan rutin: Sebuah penelitian mengembangkan metode *self-check* untuk sensor analog yang mampu mendeteksi dan mengoreksi gangguan pengukuran dengan memanfaatkan elemen *sensing dummy*, sehingga sensor dapat beralih antara mode normal dan mode *self-check* untuk mengkarakterisasi respons terhadap gangguan [17]. Pendekatan ini memungkinkan sensor mempertahankan akurasi pengukuran bahkan dalam kondisi lingkungan yang terganggu.

Penelitian lanjutan dapat difokuskan pada integrasi metode *self-check* dengan sistem pembersihan otomatis, serta desain *enclosure* bertekanan positif untuk mencegah masuknya partikel debu.

### **4. Kesimpulan**

Penelitian ini membuktikan bahwa kontaminasi debu pada sistem pengisian tepung otomatis berbasis sensor optik menurunkan akurasi dari 99,32% (kondisi bersih) menjadi 93,24% (kondisi kotor), serta menurunkan *repeatability* yang ditandai dengan peningkatan standar deviasi pengukuran. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya bahwa partikel debu mengganggu pembacaan sensor melalui hamburan cahaya dan atenuasi sinyal, serta properti partikel seperti ukuran dan indeks bias memengaruhi respons sensor.

Penurunan akurasi sebesar 6,08% berisiko menyebabkan kerugian material dan ketidaksesuaian produk dalam skala produksi massal. Untuk menjaga keandalan sistem di lingkungan berdebu, diperlukan strategi mitigasi seperti pembersihan otomatis, material pelindung *self-cleaning*, dan metode *self-check* rutin. Penelitian selanjutnya dapat mengintegrasikan deteksi dini kontaminasi dengan sistem pembersihan otomatis serta merancang *enclosure* bertekanan positif untuk mencegah akumulasi debu pada sensor.

## Referensi

- [1] V. Papade, G. D. S, and S. Palker, "Study on Increase the Dosing Efficiency of Auger Filling Unit by Improving Bulk Density of Powder," *Library Progress International*, vol. 44, no. 3, Dec. 2024, [Online]. Available: [www.bpasjournals.com](http://www.bpasjournals.com)
- [2] V. Sarumaha, "Laporan Kerja Praktik: Proses Produksi Tepung Terigu Pada Mill KL PT. Indofood Sukses Makmur Tbk.Bogasari Flour Mills," Jul. 2022.
- [3] B. Ramadhan, "Proses Produksi Pengolahan Tepung Beras Rose Brand di Pt. Budi Makmur Perkasa," *Jurnal SIGMAT Teknik Mesin UNSIKA*, vol. 2, no. 02, pp. 36–43, Dec. 2022, doi: 10.35261/sigmat.v2i02.8180.
- [4] R. Suhag, A. Kellil, and M. Razem, "Factors Influencing Food Powder Flowability," *Powders*, vol. 3, no. 1, pp. 65–76, Feb. 2024, doi: 10.3390/powders3010006.
- [5] J. P. Lopes Neto, A. S. Meira, and J. W. B. Do Nascimento, "Flow properties and pattern flow prediction of food industrial powders," *Engenharia Agricola*, vol. 37, no. 4, pp. 627–636, 2017, doi: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n4p627-636/2017.
- [6] M. Tang *et al.*, "Laboratory and field evaluation of a low-cost optical particle sizer," *Journal of Environmental Sciences*, vol. 142, pp. 215–225, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jes.2023.06.031.
- [7] V. Medici, M. Martarelli, G. Pandarese, and N. Paone, "Assessing the effectiveness of sharpness metrics to determine the presence of contamination on thermographic cameras in harsh environments," *Acta IMEKO*, vol. 14, no. 2, pp. 1–13, Jun. 2025, doi: 10.21014/actaimeko.v14i2.1944.
- [8] J. G. Webster and H. Eren, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement*, 2nd ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014.
- [9] Q. He, S. Nie, S. Yin, Y. Cheng, and F. Ma, "Quantitative analysis and mitigation of dust interference in laser methane sensors: Impact on false alarms and measurement accuracy," *Sens. Actuators A Phys.*, vol. 393, p. 116753, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.sna.2025.116753.
- [10] Q. He, S. Nie, S. Yin, Y. Cheng, and D. Zhao, "New anti-particle-interference optical model and demodulation method for TDLAS methane sensors," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 449, p. 139092, Feb. 2026, doi: 10.1016/j.snb.2025.139092.
- [11] D. H. Hagan and J. H. Kroll, "Assessing the accuracy of low-cost optical particle sensors using a physics-based approach," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 11, pp. 6343–6355, Nov. 2020, doi: 10.5194/amt-13-6343-2020.
- [12] Y. Jiang *et al.*, "On-field test and data calibration of a low-cost sensor for fine particles exposure assessment," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, vol. 211, no. 9, p. 111958, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ecoenv.2021.111958.
- [13] C.-H. Huang, J. He, E. Austin, E. Seto, and I. Novosselov, "Assessing the value of complex refractive index and particle density for calibration of low-cost particle matter sensor for size-resolved particle count and PM2.5 measurements," *PLoS One*, vol. 16, no. 11, pp. e0259745-, Nov. 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0259745>
- [14] M. Teri *et al.*, "Impact of particle size, refractive index, and shape on the determination of the particle scattering coefficient – an optical closure study evaluating different nephelometer angular truncation and illumination corrections," *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 15, no. 10, pp. 3161–3187, 2022, doi: 10.5194/amt-15-3161-2022.
- [15] S. Son *et al.*, "Examining the Optimization of Spray Cleaning Performance for LiDAR Sensor," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 18, p. 8340, Sep. 2024, doi: 10.3390/app14188340.
- [16] T. Kupa *et al.*, "Comparison of diffusion coatings resistance on ferritic and austenitic-stainless steels at 650 °C in steam oxidation," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 489, p. 131089, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.surfcoat.2024.131089.
- [17] Z. Jia *et al.*, "A Self-Check Method for Enhancing the Measurement Accuracy of Analog Sensors Under Electromagnetic Interference," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 74, pp. 1–13, 2025, doi: 10.1109/TIM.2025.3529047.