

---

# ANALISIS INTEGRASI SENSOR PHOTOELECTRIC DAN VARIABLE FREQUENCY DRIVE PADA SISTEM KONVEYOR DISTRIBUSI PINTU KULKAS DI PT. LG ELECTRONICS INDONESIA

Sabda Dwi Arvinda<sup>1\*</sup>, Irwanto Irwanto<sup>2</sup>

<sup>12</sup> Pendidikan Vokasional Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Indonesia

\*email: 2283230019@untirta.ac.id

DOI : 10.48144/suryateknika.v10i1.2396

---

Received: 23 Februari 2026

Revised: 9 Maret 2026

Accepted: 11 Maret 2026

---

## Abstract

This study analyzes the integration of Variable Frequency Drive (VFD) and photoelectric sensors in a nine-segment conveyor system used for refrigerator-door distribution at PT LG Electronics Indonesia. The objective is to evaluate whether the actual heterogeneous frequency settings applied in production can maintain inter-segment coordination and prevent *bottleneck*s at transfer points. The study was designed as an industrial case study with system-level operational performance evaluation under normal production conditions. Data consisted of VFD frequency setpoints for each segment, functional observation of sensor-triggered interlock behavior, and cycle-based *bottleneck* records collected during steady-state operation. The observed VFD frequencies ranged from 55 to 79 Hz, with an average of 62.5 Hz and a standard deviation of 9.30 Hz. Across 180 observed cycles, no *bottleneck* event was identified, indicating 100% zero-*bottleneck* performance within the observation window. These findings show that the integrated VFD-sensor control logic was adequate to maintain stable material flow under the studied operating condition. The contribution of this study lies in emphasizing system-level evaluation using verifiable operational output rather than solely electrical motor parameters.

**Keywords:** Stability; conveyor; sensor; *bottleneck*

---

## Abstrak

Penelitian ini menganalisis integrasi *Variable Frequency Drive* (VFD) dan sensor *photoelectric* pada sistem konveyor sembilan segmen untuk distribusi pintu kulkas di PT LG Electronics Indonesia. Tujuan penelitian adalah mengevaluasi apakah konfigurasi frekuensi heterogen yang digunakan pada kondisi produksi normal mampu menjaga koordinasi antarsegmen dan mencegah *bottleneck* pada titik transisi. Penelitian dirancang sebagai studi kasus industri dengan evaluasi kinerja operasional pada level sistem. Data yang digunakan meliputi setpoint frekuensi VFD tiap segmen, observasi fungsional terhadap interlock berbasis deteksi sensor, dan pencatatan *bottleneck* berbasis siklus selama kondisi *steady state*. Frekuensi VFD yang teramati berada pada rentang 55–79 Hz dengan rata-rata 62,5 Hz dan simpangan baku 9,30 Hz. Selama 180 siklus pengamatan, tidak ditemukan kejadian *bottleneck* sehingga kinerja zero-*bottleneck* dalam jendela observasi mencapai 100%. Temuan ini menunjukkan bahwa logika kontrol terintegrasi VFD–sensor memadai untuk menjaga kestabilan alur material pada kondisi operasi yang diamati. Kontribusi penelitian terletak pada penegasan evaluasi level sistem menggunakan keluaran operasional yang dapat diverifikasi, bukan hanya parameter kelistrikan motor.

**Kata kunci:** Stabilitas; konveyor; sensor; *bottleneck*

---

## 1. Pendahuluan

Peningkatan volume produksi manufaktur menuntut sistem distribusi internal yang mampu menjaga kontinuitas aliran material secara stabil. Pada lini yang bersifat berkelanjutan, konveyor berfungsi sebagai penghubung antarstasiun kerja sehingga

gangguan kecil pada satu segmen dapat menimbulkan penumpukan, penghentian sementara, dan intervensi manual pada segmen lain [1], [2], [3]. Karena itu, pada konveyor multi-segmen, isu utama bukan hanya apakah motor dapat berputar, tetapi apakah perpindahan produk antartitik transisi dapat berlangsung sinkron dan bebas *bottleneck*.

Perkembangan riset konveyor menunjukkan pergeseran dari pendekatan mekanis menuju otomasi, pemantauan kondisi, dan pengendalian yang lebih adaptif. VFD memungkinkan penyesuaian kecepatan sesuai kebutuhan proses, sedangkan sensor berperan sebagai pemicu keputusan kontrol secara real time [4], [5], [6], [7], [8]. Literatur terbaru juga menegaskan bahwa pemantauan sensor, kendali kecepatan, dan evaluasi kondisi operasi merupakan komponen penting untuk meningkatkan keandalan dan efisiensi sistem konveyor [9], [10], [11].

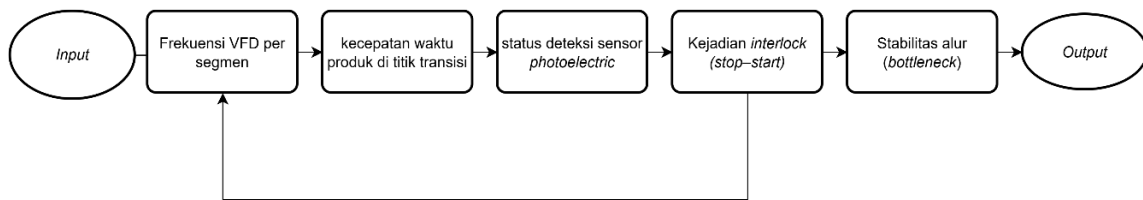
Namun, sebagian besar studi masih menitikberatkan pada aspek komponen, seperti parameter kelistrikan motor, maintenance, atau algoritme kontrol individual. Penelitian pada multispeed conveyor misalnya lebih menonjolkan stabilisasi arus motor dan pencegahan overload [12], sementara studi kontrol belt conveyor modern banyak berfokus pada desain pengendali robust atau efisiensi energi [9], [13]. Masih terbatas laporan yang mengevaluasi integrasi VFD dan sensor photoelectric pada level sistem untuk konveyor unit-load multi-segmen dengan setpoint frekuensi heterogen di lingkungan industri nyata.

Pada sistem konveyor multi-segmen, permasalahan operasional utama bukan hanya pengaturan kecepatan tiap motor secara individual, melainkan potensi *bottleneck* pada titik transfer akibat *mismatch* kecepatan antarsegmen. Ketika laju keluaran satu segmen lebih tinggi daripada kapasitas penerimaan segmen berikutnya, akumulasi produk, stop-start berantai, dan intervensi operator dapat terjadi. Dalam konteks ini, posisi penelitian ini berbeda dari studi-studi sebelumnya karena menempatkan integrasi VFD dan sensor photoelectric sebagai mekanisme koordinasi alur antarsegmen pada level sistem, bukan semata sebagai pengendalian motor atau evaluasi komponen secara terpisah.

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja operasional integrasi sensor photoelectric dan VFD pada sistem konveyor distribusi pintu kulkas di PT LG Electronics Indonesia. Kontribusi penelitian terletak pada evaluasi level sistem menggunakan indikator keluaran operasional yang dapat diverifikasi, yaitu *zero-bottleneck* berbasis siklus, untuk menilai apakah konfigurasi frekuensi aktual di lapangan mampu menjaga koordinasi antarsegmen selama operasi produksi normal.

Sistem yang diamati berbentuk lintasan loop dengan sembilan segmen (CON1–CON9). Setiap segmen dikendalikan oleh VFD dengan setpoint berbeda, sedangkan perpindahan antarsegmen diatur melalui interlock berbasis sensor photoelectric. Konfigurasi ini relevan untuk dikaji karena perbedaan frekuensi antarsegmen berpotensi mengubah waktu kedatangan produk pada titik transisi dan memicu stop-start berantai bila koordinasi sistem tidak memadai.

Hubungan antarvariabel penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu frekuensi VFD per segmen memengaruhi estimasi kecepatan motor dan waktu kedatangan produk; status deteksi sensor memicu interlock; dan keluaran sistem dinilai melalui ada atau tidaknya *bottleneck* pada titik transisi.

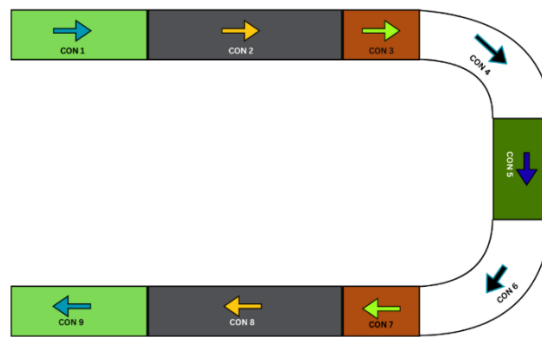


Gambar 1. Kerangka Konseptual Hubungan Variabel

## 2. Metode

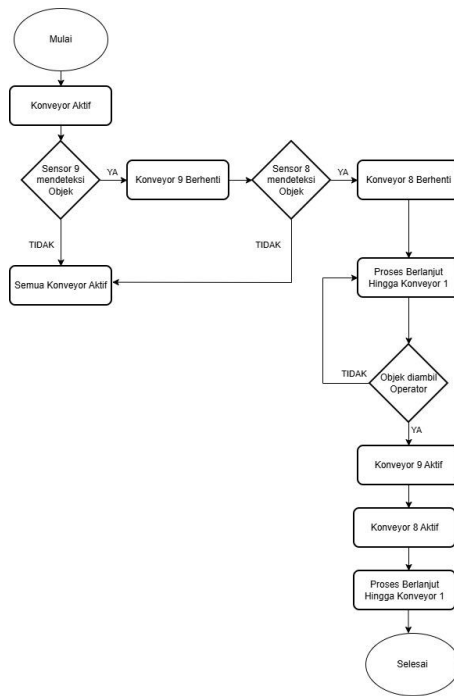
### 2.1 Desain Penelitian dan Deskripsi Sistem

Penelitian ini menggunakan desain studi kasus industri dengan pendekatan observasional non-intervensi dan orientasi evaluasi kinerja operasional level sistem (*system-level operational performance evaluation*). Desain ini dipilih karena objek kajian merupakan lini produksi aktif sehingga perubahan parameter operasi secara eksperimental tidak dimungkinkan. Fokus penelitian bukan pengujian laboratorium komponen, melainkan evaluasi apakah konfigurasi kontrol yang telah diterapkan di lapangan mampu menjaga alur distribusi material secara stabil. *Layout* konveyor dapat dilihat pada gambar 2 yang merepresentasikan alur kerja sistem konveyor.



Gambar 2. Layout Sistem Konveyor

Objek penelitian adalah sistem konveyor distribusi pintu kulkas di PT LG Electronics Indonesia yang tersusun sebagai lintasan *loop* dan terdiri dari sembilan segmen (CON 1 hingga CON 9) seperti yang terlihat pada gambar 2. Setiap segmen digerakkan oleh motor induksi tiga fasa yang dikendalikan VFD, sedangkan koordinasi perpindahan antar segmen dipicu oleh sensor *photoelectric* pada titik transisi melalui mekanisme *interlock stop-hold-release*, sehingga aliran material dikondisikan tetap stabil dan tidak menumpuk pada area transisi seperti di gambar 2 yang menjelaskan alur kerja sistem konveyor ini.



Gambar 3. Alur Kerja Sistem Konveyor

Kemudian spesifikasi dari sensor dan motor yang digunakan dalam sistem ini dapat dilihat pada tabel 1 dan tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi Motor Induksi

No.	Spesifikasi	Deskripsi
1.	Model	R17DRS7154
2.	Tipe Motor	<i>Gear Motor Helical</i>
3.	Daya	0,37 kW
4.	Tegangan Operasi	380–420 V
5.	Kecepatan Putar	1380 RPM (4 kutub)
6.	Frekuensi	50 Hz
7.	Arus Nominal	2,15 A
8.	Proteksi	IP65
9.	Berat	9,8 kg

Tabel 2. Spesifikasi Sensor *Photoelectric*

No.	Parameter	Kisaran Nilai
1.	Jenis cahaya	Infra merah,
2.	Model	BEN10M-TFR
3.	Rentang Deteksi	10 m
4.	Tegangan kerja	24 VDC
5.	<i>Output</i>	NPN, PNP,
6.	Respons waktu	<1 ms hingga 20 ms
7.	Proteksi	IP67
8.	Suhu kerja	-25°C sampai +70°C

## 2.2 Data Operasional dan Konfigurasi Frekuensi VFD

Data utama penelitian berupa setpoint frekuensi VFD pada masing-masing segmen yang dibaca langsung dari display VFD ketika sistem berada pada kondisi produksi normal. Data ini dilengkapi dengan observasi status aliran material pada titik transisi serta observasi respons sistem ketika sensor mendeteksi objek dan memicu interlock. Tabel 3 menyajikan konfigurasi frekuensi aktual yang menjadi dasar evaluasi.

Tabel 3. Data *Setpoint* Frekuensi VFD Per Segmen Konveyor

Segmen	Frekuensi Pada <i>Display</i> VFD
--------	-----------------------------------

CON 1	60
CON 2	79
CON 3	55
CON 4	78
CON 5	60
CON 6	60
CON 7	60
CON 8	55
CON 9	56

Analisis statistik pada variasi frekuensi dilakukan secara deskriptif menggunakan nilai minimum, maksimum, rata-rata, dan simpangan baku. Analisis ini tidak dimaksudkan untuk generalisasi populasi, tetapi untuk menggambarkan derajat heterogenitas setpoint antarsegmen yang kemudian diinterpretasikan terhadap perilaku sistem pada periode observasi.

### 2.3 Variabel Penelitian, Definisi Operasional, dan Kerangka Konseptual

Variabel independen pada penelitian ini adalah frekuensi VFD tiap segmen ( $f_i$ , Hz). Variabel antara digunakan untuk menjelaskan hubungan sebab-akibat operasional, yaitu estimasi kecepatan putar motor (rpm) dan implikasinya terhadap waktu kedatangan produk pada titik transisi. Variabel dependen dinilai pada level sistem berupa stabilitas alur distribusi yang dioperasionalkan sebagai indikator *bottleneck* (ada atau tidak). *Bottleneck* didefinisikan sebagai kondisi penumpukan objek pada segmen atau titik transisi yang menyebabkan aliran terhenti secara berulang di luar pola *interlock* normal. Kerangka konseptual hubungan variabel mengikuti Gambar 1, yang menjelaskan alur sebab-akibat dari frekuensi VFD per segmen, kecepatan atau waktu kedatangan produk di titik transisi, status deteksi sensor *photoelectric*, kejadian *interlock stop-start*, hingga keluaran berupa stabilitas alur distribusi.

### 2.4 Prosedur Observasi, Definisi Siklus Produksi, dan Verifikasi Sensor Terbatas

Pengamatan dilakukan melalui observasi langsung pada kondisi steady-state selama 60 menit per hari selama tiga hari 28-30 Juli. Satu siklus didefinisikan sebagai satu unit pintu kulkas yang melewati pickup point operator hingga aliran kembali normal untuk unit berikutnya. Dengan keterbatasan akses pada log produksi, jumlah siklus ditetapkan menggunakan batas bawah konservatif satu unit per menit yang diperoleh dari ritme aliran minimum yang masih konsisten teramati selama *steady-state*. Atas dasar ini, total siklus observasi yang digunakan dalam evaluasi adalah 180 siklus. Angka tersebut diperlakukan sebagai basis evaluasi operasional, bukan estimasi throughput pabrik secara umum.  $N = 180$

Validasi sensor tidak dilakukan melalui kalibrasi instrumen atau pengukuran *error rate* terhadap *ground truth*. Penelitian ini secara tegas berfokus pada evaluasi sistem, bukan pengukuran akurasi sensor sebagai komponen mandiri. Oleh karena itu, verifikasi sensor dilakukan secara fungsional-operasional, yaitu menilai apakah deteksi objek diikuti respons *interlock* yang sesuai dan tidak menimbulkan penghentian salah atau *miss detection* yang berujung pada gangguan alur selama periode pengamatan.

Untuk memperkuat evaluasi pada penelitian lanjutan, pengumpulan data sebaiknya dilengkapi dengan pengukuran rpm *roller* konveyor, pencatatan event *interlock* dari PLC atau sistem kontrol, pengukuran response time sensor sampai dengan aksi, serta pengukuran arus motor pada tiap segmen. Penambahan data tersebut akan memungkinkan analisis

hubungan antara variasi frekuensi, dinamika transfer produk, dan beban motor dilakukan secara lebih komprehensif.

## 2.5 Model Matematis dan Analisis Kinerja Sistem

Untuk memberikan dukungan analitis terhadap perbedaan laju antarsegmen, estimasi kecepatan motor dihitung menggunakan model dasar motor induksi empat kutub. Persamaan kecepatan sinkron dan kecepatan rotor digunakan sebagai pendekatan teoretis untuk menggambarkan pengaruh perubahan frekuensi terhadap kecenderungan rpm.

$$N_s = \frac{120f}{P}$$

dengan  $N_s$  adalah kecepatan sinkron (rpm),  $f$  adalah frekuensi VFD (Hz), dan  $P$  adalah jumlah kutub motor. Slip motor dihitung dengan:

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

dengan  $N_r$  adalah kecepatan rotor (rpm). Karena pengukuran kecepatan aktual *roller* dan slip aktual pada setiap *setpoint* tidak dilakukan, slip diasumsikan konstan menggunakan kondisi nominal motor pada 50 Hz berdasarkan *nameplate*. Dengan asumsi tersebut, estimasi kecepatan rotor pada frekuensi operasi dihitung menggunakan

$$N_r \approx N_s(1 - s).$$

Pendekatan ini digunakan untuk menggambarkan kecenderungan perubahan kecepatan akibat variasi frekuensi, tanpa mengklaim sebagai hasil pengukuran langsung kecepatan konveyor.

Analisis kinerja sistem dinyatakan melalui indikator stabilitas alur berbasis siklus, yaitu persentase stabilitas sistem yang dihitung menggunakan

$$\text{Stabilitas}(\%) = \frac{N_{\text{tanpa bottleneck}}}{N} \times 100\%.$$

Pada penelitian ini, selama  $N = 180$  siklus yang diamati tidak ditemukan *bottleneck* pada titik transisi, sehingga  $N_{\text{tanpa bottleneck}} = N$  dan stabilitas sistem pada periode pengamatan adalah 100%. Reliabilitas sistem diperlakukan sebagai reliabilitas operasional berbasis siklus, yaitu kemampuan sistem mempertahankan alur distribusi tanpa *bottleneck* pada periode observasi, sehingga indikator reliabilitas operasionalnya konsisten dengan persentase stabilitas yang diperoleh. Pendekatan proporsional  $n = (f/50) \times 1380$  diperlakukan sebagai estimasi linier berbasis data nominal *nameplate* dan hanya valid sebagai pendekatan awal, karena kecepatan motor induksi dipengaruhi slip, pada penelitian ini slip tidak diukur sehingga diasumsikan konstan berdasarkan kondisi nominal, dan hasil yang disajikan dinyatakan sebagai estimasi, bukan kecepatan aktual.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### Hasil

#### Karakteristik Sistem dan Konfigurasi Frekuensi VFD

Hasil pembacaan *display* VFD pada sembilan segmen konveyor (CON 1 hingga CON 9) menunjukkan *setpoint* frekuensi yang heterogen pada kondisi produksi normal. *Setpoint* frekuensi yang digunakan bersifat diskret, yaitu 55 Hz, 56 Hz, 60 Hz, 78 Hz, dan 79 Hz, dengan frekuensi tertinggi yang teramati sebesar 79 Hz pada segmen CON 2 dan frekuensi terendah sebesar 55 Hz pada segmen CON 3 dan CON 8. Frekuensi 60 Hz merupakan *setpoint* dominan karena digunakan pada empat segmen (CON 1, CON 5, CON 6, dan CON 7). Rentang frekuensi operasi aktual sistem berada pada 55–79 Hz.

Tabel 4. Statistik Deskriptif Frekuensi VFD

Parameter	Nilai
Minimum (Hz)	55
Maksimum (Hz)	79
Rata-rata (Hz)	62,5
Simpangan baku (Hz)	9,30

### Estimasi Kecepatan Motor pada Frekuensi Operasi Aktual

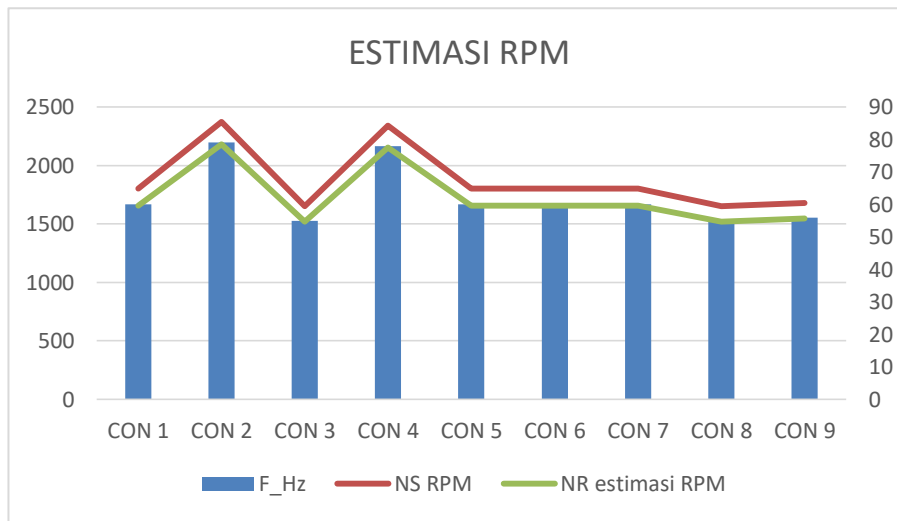
Estimasi kecepatan motor dihitung berdasarkan model motor induksi 4 kutub menggunakan persamaan kecepatan sinkron  $N_s = \frac{120f}{p}$  dan estimasi kecepatan rotor  $N_r \approx N_s(1 - s)$ . Nilai slip diasumsikan konstan berdasarkan kondisi nominal motor pada 50 Hz, yaitu  $N_s = 1500$  rpm (4 kutub) dan kecepatan nameplate  $N_r = 1380$  rpm, sehingga slip nominal diperoleh sebesar 0,08. Berdasarkan *setpoint* operasi aktual 55–79 Hz, estimasi kecepatan rotor berada pada rentang 1518,0 – 2180,4 rpm.

Tabel 5. Estimasi Kecepatan Sinkron dan Rotor pada *Setpoint* Frekuensi Diskret

Segmen	F_Hz	N <sub>S</sub> RPM	N <sub>R</sub> estimasi RPM
CON 1	60	1800	1656
CON 2	79	2370	2180,4
CON 3	55	1650	1518
CON 4	78	2340	2152,8
CON 5	60	1800	1656
CON 6	60	1800	1656
CON 7	60	1800	1656
CON 8	55	1650	1518
CON 9	56	1680	1545,6

### Hubungan Frekuensi VFD terhadap Estimasi RPM

Hubungan frekuensi VFD terhadap estimasi kecepatan rotor menunjukkan kecenderungan peningkatan rpm seiring kenaikan frekuensi pada rentang operasi aktual 55–79 Hz. Frekuensi maksimum operasi 79 Hz menghasilkan estimasi kecepatan rotor tertinggi, yaitu 2180,4 rpm, sedangkan frekuensi terendah 55 Hz menghasilkan estimasi 1518,0 rpm. Visualisasi hubungan frekuensi dan estimasi rpm ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Estimasi Kecepatan RPM Berdasarkan Frekuensi

Gambar 4 memperlihatkan hubungan positif antara frekuensi VFD dan estimasi rpm. Secara operasional, kenaikan frekuensi pada segmen tertentu dapat dipahami sebagai upaya menyesuaikan kecepatan lokal agar aliran tetap lancar pada titik transfer. Dalam konteks sistem multi-segmen, temuan ini penting karena perbedaan laju teoritis antarsegmen tidak otomatis menimbulkan gangguan selama logika interlock masih mampu menyerap variasi kedatangan produk pada area transisi.

**Stabilitas Alur Distribusi dan Kejadian *Bottleneck***

Selama 180 siklus pengamatan pada kondisi *steady-state*, tidak ditemukan kejadian *bottleneck* pada titik transisi antarsegmen. Hasil ini menunjukkan bahwa pada jendela observasi yang digunakan, konfigurasi frekuensi aktual dan interlock berbasis sensor mampu mempertahankan *zero-bottleneck performance*. Meskipun demikian, jumlah observasi ini tetap bersifat deskriptif dan belum cukup untuk mengklaim generalisasi statistik terhadap seluruh kondisi produksi atau seluruh variasi beban operasi.

Meskipun indikator *zero-bottleneck* menunjukkan keluaran sistem yang stabil pada periode observasi, hasil ini akan menjadi lebih kuat apabila dilengkapi dengan pengukuran kecepatan linier konveyor (m/s), throughput produk per satuan waktu, dan transit time antarsegmen. Pada penelitian ini, parameter-parameter tersebut belum direkam secara instrumentatif sehingga interpretasi kestabilan tetap dibatasi pada indikator operasional berbasis siklus.

Tabel 6. Rekap Kejadian *Bottleneck* dan Stabilitas Sistem Berbasis Siklus

Indikator	Nilai
Total Siklus Diamati	180
Kejadian <i>Bottleneck</i>	0
Siklus tanpa <i>bottleneck</i>	180
Stabilitas sistem	100%

**Kondisi *Overspeed* Operasional pada Frekuensi 79 Hz**

Operasi di atas frekuensi dasar 50 Hz meningkatkan kecepatan sinkron motor secara proporsional. Pada frekuensi maksimum 79 Hz, estimasi kecepatan rotor mencapai sekitar 1,58 kali kecepatan nominal. Dalam sistem ini, kondisi tersebut dapat dipahami sebagai penyesuaian laju pada segmen tertentu untuk menjaga kontinuitas distribusi. Namun, interpretasi manfaat operasional harus tetap disertai kehati-hatian karena penelitian ini tidak mengukur arus, temperatur, getaran, atau batas rpm komponen secara langsung.

Operasi VFD pada frekuensi di atas 50 Hz meningkatkan kecepatan sinkron motor induksi secara proporsional terhadap frekuensi. Pada motor 4 kutub, 50 Hz menghasilkan

( $N_s = 1500$ ) rpm, sedangkan pada frekuensi maksimum operasi aktual 79 Hz meningkat menjadi ( $N_s = 2370$ ) rpm. Dengan asumsi slip nominal konstan 0,08 berdasarkan kondisi nameplate, estimasi kecepatan rotor meningkat dari 1380 rpm pada 50 Hz menjadi sekitar 2180,4 rpm pada 79 Hz, atau setara dengan rasio sekitar 1,58 kali dibanding kecepatan nominal. Dalam implementasi di lapangan, perbedaan *setpoint* frekuensi antar segmen digunakan untuk menyesuaikan kebutuhan aliran material pada titik-titik tertentu, sehingga segmen dengan frekuensi lebih tinggi berfungsi menjaga kontinuitas distribusi pada kondisi operasional yang menuntut laju perpindahan lebih cepat, selama tetap selaras dengan logika interlock dan kondisi transisi antar segmen.

Karena tidak tersedia data instrumentasi mekanis dan termal, pembahasan mengenai overspeed diposisikan sebagai risiko potensial, bukan temuan kegagalan. Implikasi praktisnya adalah perlunya pembatasan frekuensi maksimum sesuai spesifikasi pabrikan serta monitoring berkala terhadap arus motor, temperatur, bearing, gearbox, dan roller pada segmen berfrekuensi tinggi.

### **Verifikasi Fungsional Sensor dan Ketersediaan Data Waktu Respon Sistem**

Verifikasi sensor dilakukan secara verifikasi fungsional operasional dengan mengamati dua bentuk error operasional, yaitu *false trigger* yang menyebabkan penghentian tanpa objek dan *miss detection* yang menyebabkan objek melewati titik transisi tanpa memicu *interlock*. Selama periode pengamatan, tidak teramati kejadian error operasional yang berujung pada penumpukan atau *bottleneck* pada titik transisi. Pengukuran waktu respon aktual sistem dari deteksi sensor hingga respons stop–start segmen tidak dilakukan secara instrumentasi pada penelitian ini, sehingga data kuantitatif waktu respon aktual sistem tidak tersedia pada bagian hasil.

## **PEMBAHASAN**

Temuan utama penelitian ini adalah bahwa integrasi VFD dan sensor photoelectric mampu menjaga kestabilan alur distribusi pada sistem konveyor multi-segmen dalam kondisi produksi normal yang diamati. Indikator yang digunakan bukan parameter komponen, melainkan keluaran sistem berupa zero-*bottleneck* performance selama 180 siklus. Pendekatan ini sesuai dengan kebutuhan evaluasi pada sistem material handling industri, karena keberhasilan kontrol pada akhirnya ditentukan oleh kelancaran perpindahan produk antarsegmen.

Dibandingkan penelitian terdahulu yang lebih menekankan multispeed control dari sisi arus motor dan perlindungan beban [12], studi ini menempatkan integrasi VFD-sensor sebagai mekanisme koordinasi alur pada level sistem. Posisi ini juga berbeda dari studi-studi terbaru yang banyak membahas conveyor dari sisi predictive maintenance, sensor-based monitoring, atau control design [7], [8], [9], [10], [11], [13]. Dengan demikian, kontribusi artikel ini bukan pada kebaruan algoritme kontrol, melainkan pada bukti operasional bahwa konfigurasi frekuensi heterogen dapat tetap stabil ketika digabungkan dengan interlock berbasis deteksi objek pada lingkungan industri nyata.

Dari sudut pandang sinkronisasi antarsegmen, variasi frekuensi 55–79 Hz secara teoritis akan memengaruhi waktu transit produk menuju titik transfer. Jika tidak diimbangi mekanisme koordinasi, perbedaan ini berpotensi menimbulkan akumulasi produk atau stop-start berantai. Fakta bahwa *bottleneck* tidak muncul pada jendela observasi mengindikasikan bahwa logika interlock yang diterapkan cukup efektif untuk menyelaraskan variasi waktu kedatangan tersebut. Namun, karena waktu transit aktual

dan event interlock tidak direkam, kesimpulan ini tetap dibatasi sebagai inferensi operasional berbasis output.

Dari sisi mekanik sistem, perbedaan estimasi rpm antarsegmen juga dapat diasosiasikan dengan perbedaan laju tarik lokal, waktu tinggal produk pada area transisi, dan potensi perubahan pola kontak produk dengan roller atau belt pada titik perpindahan. Pada konfigurasi multi-segmen, mismatch laju tidak selalu menghasilkan bottleneck jika terdapat ruang akumulasi yang cukup dan logika interlock mampu menahan pelepasan produk hingga segmen berikutnya siap menerima. Namun demikian, karena penelitian ini tidak mengukur kecepatan aktual roller, transit time, beban mekanik, maupun gaya interaksi produk pada titik transfer, pembahasan dinamika mekanik masih bersifat inferensial. Oleh sebab itu, artikel ini memosisikan temuannya sebagai bukti kestabilan operasional berbasis output sistem, bukan sebagai karakterisasi mekanik lengkap dari konveyor.

Pembahasan efisiensi energi pada penelitian ini harus dibaca secara hati-hati. Literatur menunjukkan bahwa VFD dapat meningkatkan efisiensi ketika kecepatan disesuaikan dengan kebutuhan proses dan kondisi beban [13], tetapi pada studi ini data daya, arus, dan duty cycle tidak tersedia. Oleh sebab itu, artikel ini tidak mengklaim adanya penghematan energi, melainkan hanya menegaskan bahwa konfigurasi kontrol yang diamati berhasil menjaga kontinuitas alur tanpa *bottleneck*.

Keterbatasan utama penelitian ini meliputi ukuran observasi yang kecil untuk generalisasi, tidak adanya pencatatan event interlock, tidak adanya pengukuran waktu respons sensor-aksi, serta tidak tersedianya data arus, temperatur, getaran, dan rpm aktual. Penelitian lanjutan perlu menggabungkan log event, pengukuran transit time, dan data listrik-mekanis agar evaluasi sistem dapat ditingkatkan dari deskriptif-operasional menjadi analisis performa kontrol yang lebih kuat.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem konveyor distribusi pintu kulkas di PT LG Electronics Indonesia beroperasi dengan konfigurasi frekuensi VFD heterogen 55-79 Hz, dengan rata-rata 62,5 Hz dan simpangan baku 9,30 Hz. Pada 180 siklus observasi steady-state, tidak ditemukan bottleneck pada titik transisi, sehingga pada jendela pengamatan yang digunakan sistem menunjukkan zero-bottleneck performance sebesar 100%.

Kontribusi utama penelitian terletak pada pembuktian operasional level sistem bahwa integrasi sensor photoelectric dan VFD dapat menjaga koordinasi antarsegmen meskipun setpoint frekuensi berbeda-beda. Secara praktis, temuan ini menunjukkan bahwa konfigurasi frekuensi heterogen masih dapat diterapkan selama didukung interlock yang sesuai pada titik transfer. Namun, penguatan analisis selanjutnya perlu dilakukan melalui pencatatan event interlock, pengukuran response time sensor, pengukuran rpm/kecepatan konveyor, transit time antarsegmen, throughput, dan arus motor.

#### Referensi

- [1] N. R. Mohamad *et al.*, "ARCHITECTURE OF RECONFIGURABLE CONVEYOR SYSTEM IN MANUFACTURING SYSTEM," *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, no. 2018, Vol. 12 No. 1(2), Dec. 2017.

- 
- [2] T. Pangaribowo and E. Mahdy, “Design of an Automatic Slat Conveyor Prototype Based on PLC,” *J. Electr. Tech. Explor.*, vol. 2, no. 2, pp. 43–48, Jan. 2025, doi: 10.52465/joetex.v2i2.520.
- [3] F. Feby, “PERANCANGAN SISTEM KONVEYOR OTOMATIS BERBASIS PLC DAN IOT UNTUK DETEKSI SERTA PENGHITUNGAN TELUR MENGGUNAKAN SENSOR INFRARED,” *JITET*, vol. 13, no. 3S1, Oct. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i3S1.7565.
- [4] F. P. Kristian, J. Mulyono, and H. Santosa, “Preventive Maintenance Scheduling on Belt Conveyor Using Failure Mode Effect and Criticality Analysis,” *j.sist.teknik.industri.*, vol. 23, no. 1, pp. 111–120, Jan. 2021, doi: 10.32734/jsti.v23i1.4368.
- [5] R. Bhat, S. Suresh, D. Devakumar, K. R. Subramanian, D. Dhanush, and S. Krishnan, “Design and simulation of a PLC-controlled omni wheel conveyor sorting system for high-speed material handling,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, p. 34150, Oct. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-13164-3.
- [6] Desmira, “PENERAPAN SENSOR PROXIMITY DAN SENSOR PHOTOELECTRIC UNTUK MENGETAHUI PERBANDINGAN KUALITAS BENANG YANG BAIK PADA MESIN RIETER E7/5-A,” *PROSISKO: Jurnal Pengembangan Riset dan Observasi Sistem Komputer*, vol. 2023, Vol. 10, No. 2, September 2023, 2023, doi: 10.30656/prosisko.v10i2.7742.
- [7] V. Pulcini and V. Pulcini, “Machine learning-based digital twin of a conveyor belt for predictive maintenance,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 133, pp. 6095–6110, 2024, doi: 10.1007/s00170-024-14097-3.
- [8] V. Gupta, R. Mitra, and F. Koenig, “Predictive maintenance of baggage handling conveyors using IoT,” *Computers & Industrial Engineering*, vol. 177, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2023.109033.
- [9] D. Zhang, Y. Zhang, and Y. Yue, “Optimal design of robust control for belt conveyor systems based on fuzzy dynamic model and Nash game,” *Journal of the Franklin Institute*, 2024, doi: 10.1016/j.jfranklin.2024.106925.
- [10] R. Błażej, L. Jurdziak, and A. Rzeszowska, “Sensor-Based Diagnostics for Conveyor Belt Condition Monitoring and Predictive Refurbishment,” *Sensors*, vol. 25, no. 11, 2025, doi: 10.3390/s25113459.
- [11] T. Jurtsch, J. Moryson, and G. Wiczyński, “Machine vision-based detection of forbidden elements in the high-speed automatic scrap sorting line,” *Waste Management*, 2024, doi: 10.1016/j.wasman.2024.08.015.
- [12] G. D. Prenata and A. Prayoga, “Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Sistem Multispeed pada Konveyor Mesin Crusher,” vol. 10, no. 02, 2024.
- [13] M. Konieczna-Fuławka, “Energy-saving solutions applied in belt conveyors: A literature review,” *Energies*, vol. 18, 2025, doi: 10.3390/en18123019.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

---