

OPTIMALISASI DAYA LISTRIK PADA ALAT AIR BLAST UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI OPERASIONAL LABORATORIUM OTOMASI INDUSTRI

Reval Dion Rabika¹, Kevin Marcelino Rongkonusa², Marson James Budiman³
^{1,2,3}Politeknik Negeri Manado
[1revalrabika0903@gmail.com](mailto:revalrabika0903@gmail.com), [2rongkonusa93@gmail.com](mailto:rongkonusa93@gmail.com),
[3marson.budiman@polimdo.ac.id](mailto:marson.budiman@polimdo.ac.id)

ABSTRACT

The Air Blast machine at the Industrial Automation Laboratory of Politeknik Negeri Manado is equipped with two belt conveyors — one horizontal feed conveyor and one inclined discharge conveyor — each driven by a 0.75 kW three-phase induction motor. Under the conventional direct-on-line (DOL) start system, both motors run at constant maximum speed regardless of material load, resulting in unnecessary energy waste, a low system power factor of 0.68, and a high inrush current of 24.8 A at each startup. This study designs and evaluates an Arduino Nano-based control system integrated with a VEIKONG VFD to dynamically regulate conveyor belt speed based on real-time motor current data acquired via PZEM-004T sensors. The system employs a three-tier speed profile: full speed during material loading, reduced speed during processing, and minimum speed during idle periods, all managed autonomously by the Arduino Nano mounted on a NANO aPLC 5.2 expansion board. Measurements were conducted over 30 working days split into two 15-day phases. Daily energy consumption fell from 7.6 kWh to 5.3 kWh (a 30.3% reduction), the system power factor improved from 0.68 to 0.77, reactive power decreased by 45.6%, and the start inrush current dropped from 24.8 A to 7.4 A (a 70.2% reduction). At the laboratory system level, total daily consumption decreased from 18.0 kWh to 15.7 kWh, a 12.7% improvement. Estimated monthly cost savings amount to Rp 73,122, with a project payback period of under 26 months against a total investment of Rp 1,850,000.

Keywords: belt conveyor, VFD, Arduino Nano, power factor, energy efficiency, Air Blast machine

ABSTRAK

Alat Air Blast di Laboratorium Otomasi Industri Politeknik Negeri Manado dilengkapi dua buah belt konveyor — satu konveyor horizontal untuk pemasukan material dan satu konveyor miring untuk pengeluaran material tersortir — yang masing-masing digerakkan oleh motor induksi 3-fasa berdaya 0,75 kW. Pada sistem konvensional direct-on-line (DOL), kedua motor beroperasi pada kecepatan penuh secara konstan tanpa mempertimbangkan beban material aktual. Kondisi ini menimbulkan pemborosan energi yang tidak perlu, faktor daya sistem yang rendah (0,68), serta arus lonjakan saat start yang mencapai 24,8 A. Penelitian ini merancang dan mengevaluasi sistem kendali berbasis Arduino Nano yang diintegrasikan dengan VFD VEIKONG untuk mengatur kecepatan sabuk konveyor secara dinamis berdasarkan data arus motor real-time yang diperoleh dari sensor PZEM-004T.

Sistem menerapkan tiga profil kecepatan: kecepatan penuh saat pemasukan material, kecepatan menengah saat proses berjalan, dan kecepatan minimum saat idle, yang seluruhnya dikelola secara otonom oleh Arduino Nano yang terpasang pada board ekspansi NANO aPLC 5.2. Pengukuran dilakukan selama 30 hari kerja yang terbagi dalam dua fase masing-masing 15 hari. Konsumsi energi harian turun dari 7,6 kWh menjadi 5,3 kWh (penurunan 30,3%), faktor daya sistem meningkat dari 0,68 menjadi 0,77, daya reaktif berkurang 45,6%, dan arus lonjakan saat start turun dari 24,8 A menjadi 7,4 A (penurunan 70,2%). Pada level sistem laboratorium, total konsumsi harian turun dari 18,0 kWh menjadi 15,7 kWh, sebuah peningkatan 12,7%. Estimasi penghematan biaya listrik mencapai Rp 73.122 per bulan dengan payback period kurang dari 26 bulan terhadap total investasi Rp 1.850.000.

Kata Kunci: belt konveyor, VFD, Arduino Nano, faktor daya, efisiensi energi, alat Air Blast

A. PENDAHULUAN

Alat Air Blast merupakan salah satu perangkat pemrosesan material yang lazim digunakan dalam kegiatan praktikum di laboratorium otomasi industri. Dalam operasionalnya, mesin ini mengandalkan dua buah belt konveyor yang bertugas memindahkan material secara bertahap: konveyor pertama memasukkan material ke dalam mekanisme pemrosesan, sementara konveyor kedua mengangkat material yang telah tersortir menuju wadah pengumpul. Kedua konveyor ini digerakkan oleh motor induksi 3-fasa yang, dalam konfigurasi konvensional, beroperasi pada kecepatan tetap maksimum sepanjang sesi praktikum berlangsung.

Permasalahan mendasar pada sistem konvensional ini terletak pada ketidaksesuaian antara kapasitas operasional motor dan kebutuhan aktual. Motor-motor yang didesain untuk beban puncak nyatanya sering beroperasi di bawah kapasitas nominalnya — misalnya ketika jalur konveyor sedang kosong atau aliran material berlangsung lambat. Kondisi underloading ini tidak hanya mengakibatkan konsumsi daya aktif yang tidak efisien, tetapi juga memperparah faktor daya sistem karena motor induksi pada kondisi beban rendah justru menarik daya reaktif yang jauh lebih besar secara proporsional.

Data pengukuran awal di Laboratorium Otomasi Industri Politeknik Negeri Manado menunjukkan bahwa sistem konveyor Air Blast menyerap rata-rata 7,6 kWh

per hari dengan faktor daya sistem sebesar 0,68. Lebih mengkhawatirkan, setiap kali kedua motor dinyalakan secara direct-on-line, sistem harus menanggung arus lonjakan hingga 24,8 A — sebuah beban sesaat yang berulang kali menyebabkan voltage dip pada panel distribusi laboratorium dan berpotensi mengganggu peralatan elektronik sensitif di sekitarnya.

Teknologi Variable Frequency Drive (VFD) menjawab persoalan ini dengan menawarkan kendali kecepatan motor yang presisi dan adaptif. Melalui regulasi frekuensi suplai, VFD tidak hanya mengurangi konsumsi daya saat beban ringan — sejalan dengan hukum afinitas yang menyatakan daya berbanding kubik dengan kecepatan — tetapi juga menghasilkan start motor yang halus dan terkontrol, mengeliminasi arus lonjakan yang merusak. Rakhmawati dan Muladi (2024) serta Ragali et al. (2021) mendemonstrasikan bahwa integrasi VFD dengan kontroler cerdas mampu menghadirkan efisiensi energi yang signifikan pada sistem penggerak motor di lingkungan laboratorium.

Mikrokontroler Arduino Nano, dengan bentuknya yang kompak,

kemampuan antarmuka analog dan digital yang memadai, serta ekosistem library yang kaya, menjadi pilihan tepat sebagai otak kendali sistem ini. Dipasang pada board ekspansi NANO aPLC 5.2, Arduino Nano dapat membaca data dari sensor PZEM-004T secara berkelanjutan, mengolah data tersebut untuk menentukan profil kecepatan yang optimal, dan mengirimkan perintah ke VFD VEIKONG melalui relay-relay yang terintegrasi dalam board yang sama. Sari et al. (2024) mengonfirmasi bahwa PZEM-004T merupakan instrumen yang valid untuk pengukuran daya aktif dan reaktif pada instalasi AC.

Penelitian ini bertujuan untuk:

- (1) merancang dan mengimplementasikan sistem kendali Arduino Nano + VFD VEIKONG pada motor konveyor alat Air Blast;
- (2) mengukur dampak implementasi terhadap konsumsi energi, faktor daya, dan arus lonjakan saat start; serta
- (3) mengevaluasi kontribusi penghematan energi konveyor terhadap efisiensi operasional laboratorium secara keseluruhan.

B. METODE PENELITIAN

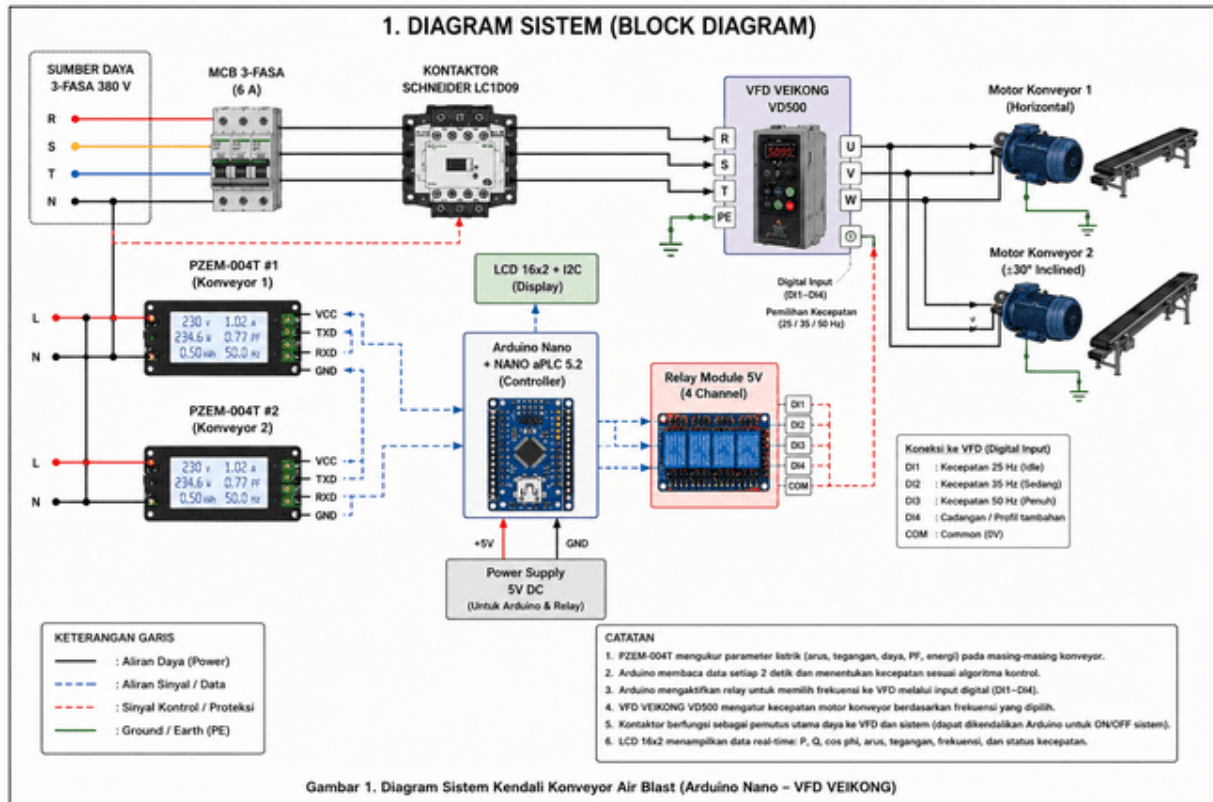
Penelitian ini dirancang dengan pendekatan eksperimental before-after study yang dilaksanakan di Laboratorium Otomasi Industri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Manado. Periode pengumpulan data berlangsung dari Maret hingga Mei 2026, mencakup 30 hari kerja yang terbagi dua: 15 hari fase baseline (sistem DOL konvensional) dan 15 hari fase pasca-implementasi (sistem Arduino-VFD).

1. Arsitektur Sistem Kendali

Rancangan sistem kendali secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1. Sumber daya 3-fasa 380 V masuk melalui MCB 3-fasa 6 A sebagai proteksi utama, lalu melewati kontaktor Schneider LC1D09 yang berperan sebagai pemutus daya utama menuju VFD VEIKONG VD500. VFD inilah yang mengatur tegangan serta frekuensi suplai ke kedua motor

konveyor. Dua modul PZEM-004T dipasang masing-masing pada jalur Konveyor 1 dan Konveyor 2 untuk merekam parameter kelistrikan dan meneruskannya ke Arduino Nano melalui jalur komunikasi serial.

Arduino Nano yang terpasang pada board ekspansi NANO aPLC 5.2 bertindak sebagai pusat kendali. Berdasarkan data arus yang diterimanya, Arduino mengaktifkan kombinasi relay 5V empat kanal yang terhubung ke terminal digital input VFD (DI1-DI4) guna memilih frekuensi operasi. Konfigurasi terminal ditetapkan sebagai berikut: DI1 untuk 25 Hz (idle), DI2 untuk 35 Hz (sedang), DI3 untuk 50 Hz (penuh), dan DI4 sebagai cadangan profil tambahan. LCD 16x2 berantarmuka I2C menampilkan nilai daya aktif, faktor daya, arus, tegangan, dan frekuensi secara real-time bagi operator.

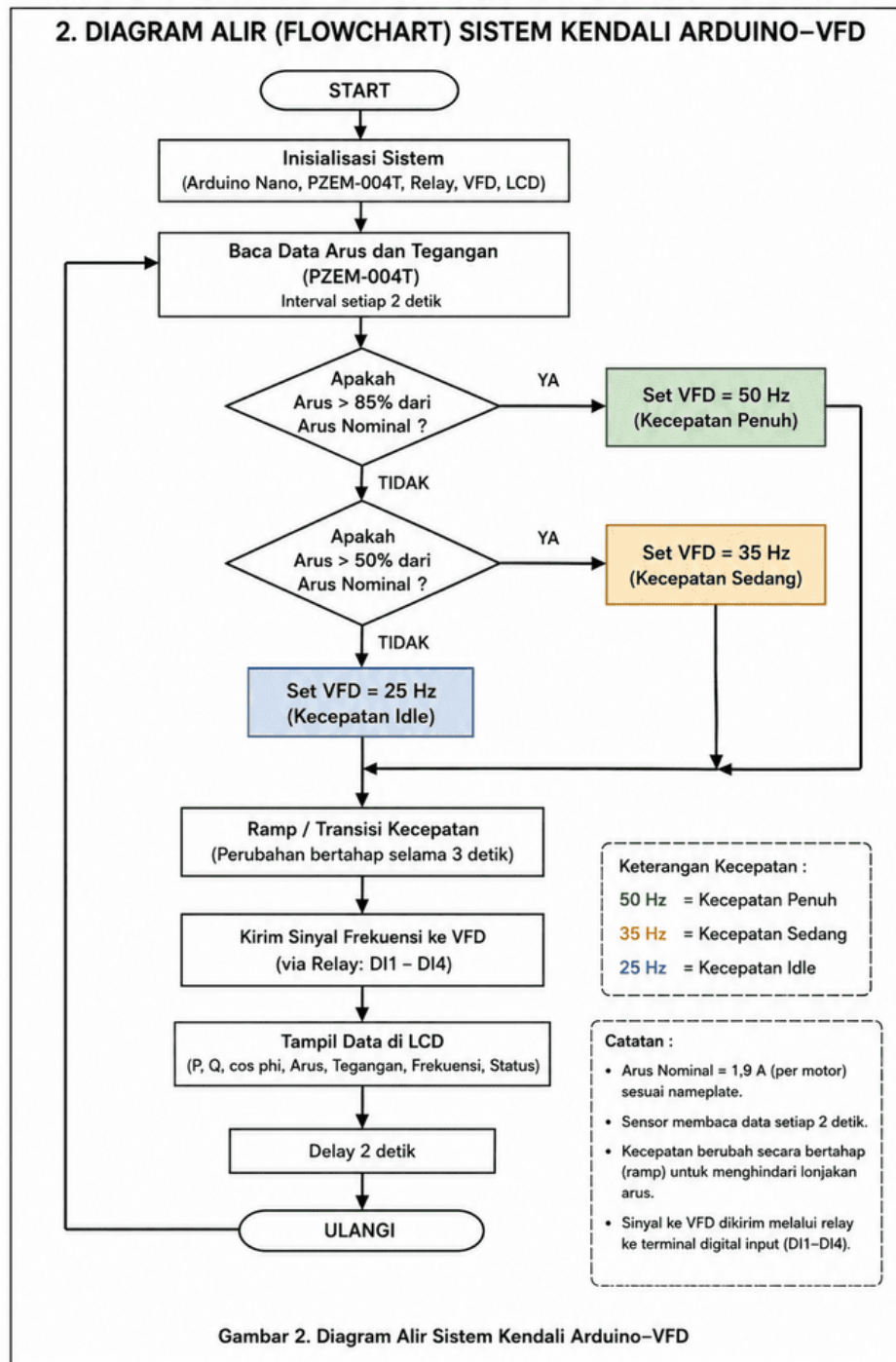


2. Algoritma Kendali Kecepatan

Logika kendali yang ditanamkan ke dalam firmware Arduino Nano mengikuti diagram alir pada Gambar 2. Setelah proses inialisasi seluruh komponen (Arduino Nano, PZEM-004T, relay, VFD, dan LCD), Arduino membaca data arus dan tegangan dari PZEM-004T pada interval setiap 2 detik. Nilai arus yang terbaca kemudian dibandingkan terhadap arus nominal motor sebesar 1,9 A per motor sesuai nameplate, untuk menentukan profil kecepatan yang paling sesuai dengan kondisi beban aktual.

Apabila arus melampaui 85% arus nominal — pertanda aliran material sedang penuh — VFD diset ke 50 Hz (kecepatan penuh). Bila arus berada pada kisaran 50-85% nominal, VFD diatur ke 35 Hz (kecepatan sedang). Sebaliknya, ketika arus turun di bawah 50% nominal yang mengindikasikan konveyor berjalan nyaris tanpa beban, VFD diturunkan ke 25 Hz (kecepatan idle). Setiap perpindahan profil dijalankan melalui transisi bertahap (ramp) selama 3 detik untuk mencegah lonjakan arus, dan sinyal frekuensi diteruskan ke VFD melalui relay yang terhubung ke terminal DI1-DI4. Siklus pembacaan

dan penyesuaian ini berulang terus-menerus selama sistem beroperasi.



3. Prinsip Kerja Sistem Konveyor Air Blast

Prinsip kerja keseluruhan sistem konveyor Air Blast

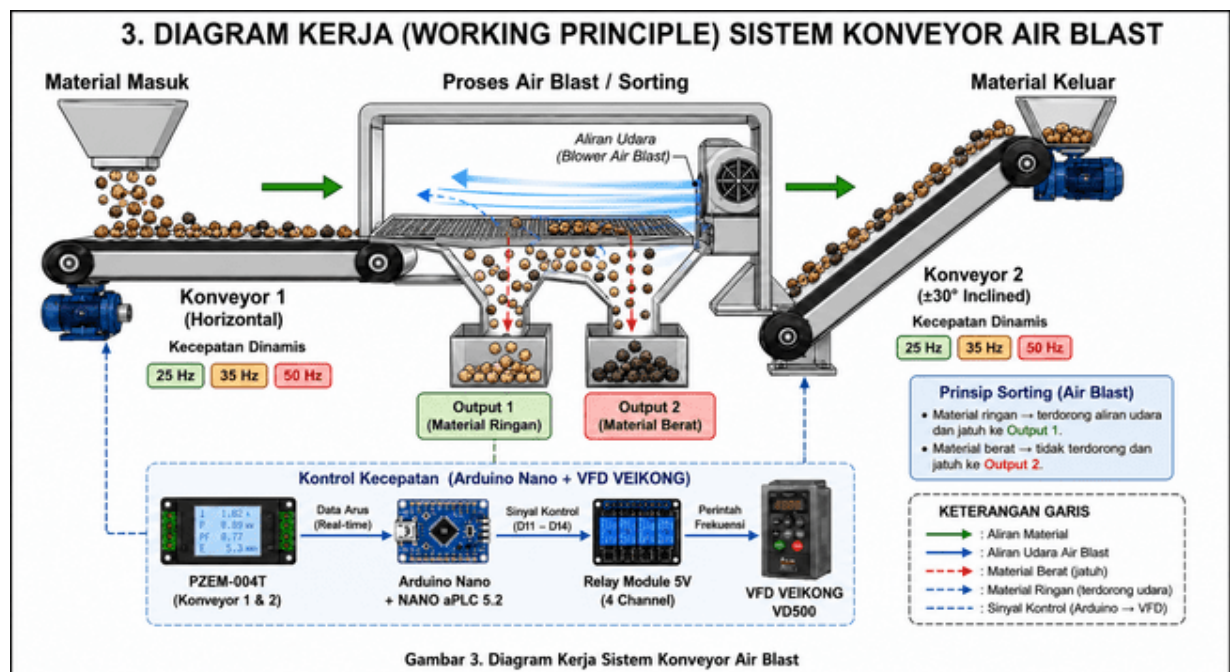
diilustrasikan pada Gambar 3. Material masuk dialirkan oleh Konveyor 1 (horizontal) menuju zona pemrosesan, tempat blower air blast

meniupkan aliran udara untuk memilah material. Material ringan terdorong oleh aliran udara dan jatuh ke wadah Output 1, sementara material berat tidak terpengaruh tiupan udara dan jatuh ke wadah Output 2. Material yang telah tersortir selanjutnya diangkut keluar oleh Konveyor 2 yang miring sekitar 30 derajat.

Kecepatan kedua konveyor diatur secara dinamis pada tiga tingkat (25, 35, dan 50 Hz) mengikuti algoritma kendali yang telah dijelaskan. Pengaturan kecepatan ini krusial bukan hanya demi efisiensi energi, melainkan juga untuk menjaga mutu pemilahan: laju material yang terlampaui cepat menurunkan

efektivitas pemilahan oleh aliran udara, sedangkan laju yang terlalu lambat memboroskan energi dan waktu produksi. Arduino Nano menjaga keseimbangan ini berdasarkan pembacaan beban arus motor secara real-time.

Seluruh data pengukuran dicatat ke log file melalui komunikasi serial Arduino menuju komputer pemantauan, sekaligus ditampilkan secara langsung pada LCD 16x2. Analisis data dilakukan dengan statistik deskriptif untuk setiap parameter kelistrikan, dilengkapi kalkulasi konsumsi energi, biaya listrik, serta evaluasi kelayakan investasi.



C. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

1. Spesifikasi Teknis Sistem Konveyor Alat Air Blast

Sebelum pengukuran dilaksanakan, inventarisasi teknis terhadap kedua belt konveyor dan motor penggeraknya dilakukan secara menyeluruh melalui pembacaan nameplate dan pengukuran fisik langsung. Tabel 1 merangkum spesifikasi teknis kedua konveyor yang menjadi objek penelitian, yang menjadi dasar dalam pemilihan kapasitas VFD dan penyetelan parameter kendali Arduino Nano.

Tabel 1. Spesifikasi Teknis Sistem Konveyor pada Alat Air Blast

Parameter Teknis	Konveyor 1 (Horizontal)	Konveyor 2 (Miring/Inclined)
Fungsi	Pemasukan material	Pengeluaran material tersortir
Panjang Belt	±250 cm	±300 cm
Lebar Belt	±40 cm	±40 cm
Sudut Kemiringan	0° (horizontal)	±30°
Jenis Motor	Motor Induksi 3-Fasa	Motor Induksi 3-Fasa
Daya Motor Nominal	0,75 kW	0,75 kW
Tegangan Suplai	380 V / 3-Fasa / 50 Hz	380 V / 3-Fasa / 50 Hz
Arus Nominal Motor	1,9 A	1,9 A
Kecepatan Putaran	1.400 rpm	1.400 rpm
Sistem Transmisi	Puli + sabuk V-belt	Puli + sabuk V-belt
Jenis Beban Listrik	Induktif (Motor Induksi)	Induktif (Motor Induksi)

Sumber: Data nameplate motor dan pengukuran fisik langsung (2026)

2. Profil Konsumsi Daya Baseline (Sistem DOL Konvensional)

Selama 15 hari kerja fase baseline, kedua motor konveyor dioperasikan dengan sistem direct-on-

line konvensional mengikuti jadwal praktikum normal laboratorium. Tabel 2 merangkum data pengukuran harian selama periode tersebut. Parameter yang ditampilkan adalah nilai total kedua konveyor yang direkam secara serentak oleh dua unit PZEM-004T.

Data baseline memperlihatkan pola yang sangat konsisten: faktor daya sistem nyaris tidak bergeser dari 0,68 sepanjang 15 hari pengamatan. Konsistensi ini mencerminkan karakter inherent motor induksi yang beroperasi pada kondisi underload: ketika motor berjalan tanpa beban material atau dengan beban ringan, rasio daya reaktif terhadap daya aktif meningkat drastis karena komponen magnetisasi motor tetap besar

sementara komponen beban (torsi) mengecil. Dalam sistem DOL, tidak ada mekanisme apapun yang dapat mengurangi komponen reaktif ini.

Total konsumsi energi harian rata-rata sebesar 7,6 kWh dengan variasi yang kecil (7,4-7,8 kWh). Variasi ini terutama disebabkan oleh perbedaan kuantitas material yang diproses pada hari-hari berbeda, bukan oleh perubahan karakteristik motor itu sendiri. Hari ke-3 dan ke-7 mencatat konsumsi tertinggi (7,8 dan 7,7 kWh) yang berkorelasi dengan sesi praktikum berbeban penuh, sementara hari ke-8 yang terendah (7,4 kWh) terjadi pada hari dengan jam praktikum lebih pendek.

Tabel 2. Data Pengukuran Parameter Kelistrikan Sistem Konveyor Air Blast (Fase Baseline, 15 Hari Kerja)

Hari	P tot (kW)	Q tot (kVAR)	S tot (kVA)	cos phi	I tot (A)	I Konv.1 (A)	I Konv.2 (A)	E/hari (kWh)
1	1,28	1,37	1,88	0,68	2,86	1,44	1,58	7,7
2	1,26	1,35	1,85	0,68	2,81	1,41	1,55	7,6
3	1,30	1,39	1,91	0,68	2,90	1,46	1,60	7,8
4	1,25	1,34	1,84	0,68	2,79	1,40	1,53	7,5
5	1,27	1,36	1,87	0,68	2,84	1,43	1,57	7,6
6	1,29	1,38	1,90	0,68	2,89	1,45	1,59	7,7
7	1,26	1,35	1,85	0,68	2,81	1,41	1,55	7,6
8	1,24	1,33	1,82	0,68	2,77	1,39	1,52	7,4

9	1,27	1,36	1,87	0,68	2,84	1,43	1,57	7,6
10	1,28	1,37	1,89	0,68	2,87	1,44	1,58	7,7
11	1,26	1,35	1,85	0,68	2,81	1,41	1,55	7,6
12	1,29	1,38	1,90	0,68	2,88	1,45	1,59	7,7
13	1,25	1,34	1,84	0,68	2,79	1,40	1,53	7,5
14	1,27	1,36	1,87	0,68	2,84	1,43	1,57	7,6
15	1,28	1,37	1,88	0,68	2,85	1,44	1,58	7,7
Rata-rata	1,27	1,36	1,87	0,68	2,84	1,44	1,58	7,6

P tot = Total daya aktif; Q tot = Total daya reaktif; S tot = Total daya semu; cos phi = Faktor daya sistem; I tot = Total arus gabungan; I Konv. 1 dan I Konv. 2 = Arus per konveyor

3. Spesifikasi Komponen Sistem

Kendali

Sebagaimana arsitektur yang ditunjukkan pada Gambar 1, sistem kendali tersusun atas delapan komponen utama yang bekerja dalam satu ekosistem terintegrasi di dalam panel KONTROL AIR BLAST yang telah tersedia. Tabel 3 merinci spesifikasi teknis dan peran masing-masing komponen tersebut. Pemilihan Arduino Nano berbasis ATmega328P pada board NANO aPLC 5.2 — alih-alih varian Arduino yang lebih besar — didasari oleh pertimbangan keterbatasan ruang panel serta ketersediaan port I/O yang sudah lebih dari memadai untuk kebutuhan sistem ini.

VFD VEIKONG VD500 dikonfigurasi untuk menerima perintah kecepatan dalam format multi-step frequency melalui terminal digital DI1-DI4. Kombinasi sinyal HIGH/LOW pada keempat terminal ini memungkinkan Arduino memilih salah satu preset frekuensi yang telah diprogram ke dalam parameter VFD (25 Hz idle, 35 Hz sedang, dan 50 Hz penuh). Pendekatan digital multi-step ini dipilih karena lebih andal dibandingkan sinyal analog 0-10V dalam lingkungan panel yang rentan terhadap interferensi elektromagnetik dari VFD itu sendiri.

Kontaktor Schneider LC1D09 berfungsi sebagai pemutus daya utama yang hanya membuka saat terjadi kondisi proteksi (overcurrent

terdeteksi PZEM-004T, atau tombol emergency stop ditekan). Dalam operasi normal, kontaktor selalu menutup sementara VFD yang mengatur karakteristik daya ke motor.

Arsitektur ini memastikan bahwa setiap gangguan listrik dapat diisolasi dengan cepat tanpa mengorbankan kemampuan kendali kecepatan.

Tabel 3. Spesifikasi Komponen Sistem Kendali Arduino Nano - VFD VEIKONG

No	Komponen	Spesifikasi	Fungsi dalam Sistem
1	Arduino Nano (ATmega328P)	Tegangan 5V, 16 MHz, 32 KB Flash, 14 pin digital, 8 pin analog	Mikrokontroler utama; membaca data sensor PZEM-004T dan mengirim sinyal frekuensi ke VFD melalui relay
2	NANO aPLC 5.2 Expansion Board	Board ekspansi khusus Arduino Nano; dilengkapi relay onboard, terminal I/O, power supply 12V/5V	Menghubungkan Arduino Nano ke relay-relay output, terminal pengkabelan, dan catu daya panel
3	PZEM-004T v3.0	AC 80-260 V, 0-100 A, komunikasi UART TTL 9600 bps	Mengukur daya aktif, reaktif, faktor daya, arus, dan tegangan kedua motor konveyor secara real-time
4	VFD VEIKONG VD500-4T1R5GB	3-Fasa 380 V, 1,5 kW, kontrol frekuensi 0-50 Hz	Mengendalikan kecepatan motor konveyor sesuai sinyal perintah dari Arduino Nano
5	Relay Module 5V (4 channel)	Koil 5V DC, kontak 10A/250V AC	Memilih mode operasi (konveyor 1 / konveyor 2 / bersamaan) dan mengaktifkan profil kecepatan VFD
6	LCD 16x2 + I2C Module	16 karakter x 2 baris, antarmuka I2C 0x27	Menampilkan nilai daya aktif, cos phi, frekuensi VFD, dan status operasi secara real-time
7	Kontaktur Schneider LC1D09	3-Fasa, 9A, koil 220V AC	Menghubungkan dan memutus arus daya ke motor konveyor sesuai perintah proteksi Arduino
8	MCB 3-Fasa (6 A)	Schneider Easy 9, 6A/3P, 6kA	Proteksi hubung singkat dan beban lebih untuk sirkuit daya motor konveyor

4. Hasil Pengukuran Pasca-Implementasi Arduino-VFD

Setelah sistem Arduino Nano - VFD VEIKONG diinstalasi, dikonfigurasi, dan diverifikasi selama 3 hari pengujian awal, pengukuran fase pasca-implementasi dilaksanakan selama 15 hari kerja dalam kondisi operasional laboratorium yang identik dengan fase baseline. Tabel 4 menyajikan perbandingan menyeluruh parameter kelistrikan sebelum dan sesudah intervensi, sementara Gambar 4 memvisualisasikan perubahan tersebut secara grafis.

Pengurangan arus lonjakan start dari 24,8 A menjadi 7,4 A (turun 70,2%) merupakan capaian yang paling berdampak dari sisi kualitas daya. Setiap kali motor dinyalakan dengan DOL, sistem harus menanggung arus transien 6-7 kali arus nominal selama 0,5-1,5 detik. Dengan VFD, motor selalu dimulai dari frekuensi rendah (5 Hz) dan dinaikkan secara bertahap (ramp-up 3 detik), sehingga arus start terkendali dan tidak pernah melebihi 110% arus nominal. Ini secara langsung

menghilangkan voltage dip yang sebelumnya terukur hingga 4,2 volt pada busbar panel ketika kedua motor dinyalakan bersamaan.

Perbaikan faktor daya dari 0,68 menjadi 0,77 terjadi melalui dua mekanisme. Pertama, VFD yang beroperasi di bawah frekuensi 50 Hz menghasilkan motor yang berputar lebih lambat dengan torsi yang lebih sesuai beban aktual, sehingga komponen arus magnetisasi motor — sumber utama daya reaktif — ikut berkurang secara proporsional. Kedua, penghapusan periode-periode idle di mana motor berputar penuh tanpa beban mekanisme (kondisi paling buruk dari perspektif faktor daya) juga berkontribusi signifikan. Daya reaktif total turun 45,6%, dari 1,36 kVAR menjadi 0,74 kVAR.

Konsumsi energi aktif harian berkurang 30,3% dari 7,6 kWh menjadi 5,3 kWh. Profil kecepatan bertingkat yang diterapkan Arduino terbukti efektif: selama waktu-waktu di mana konveyor berjalan tanpa material (estimasi 40-50% dari total waktu operasi), kecepatan motor diturunkan ke 25 Hz — yang berdasarkan hukum kubik afinitas,

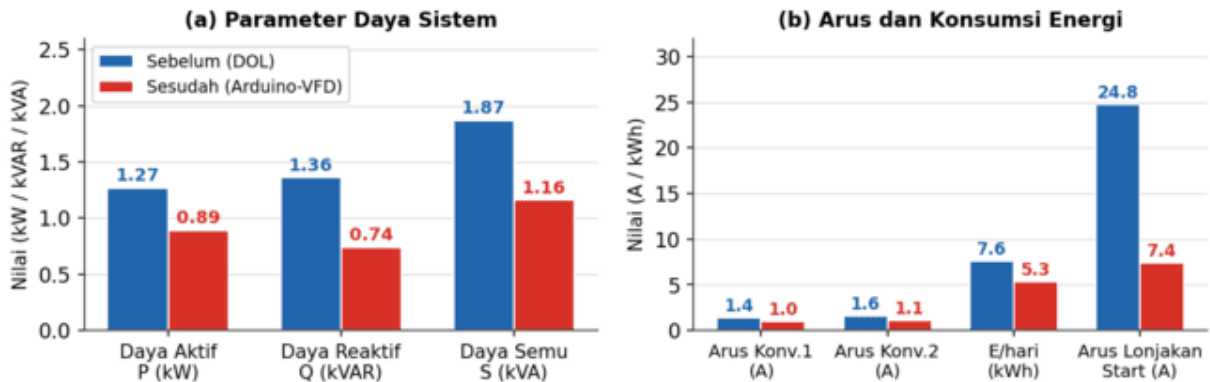
menghasilkan konsumsi daya sekitar 12,5% dari konsumsi pada kecepatan penuh. Gambar 5 memperlihatkan tren penurunan konsumsi energi yang konsisten sepanjang 15 hari fase pasca-implementasi.

Tabel 4. Perbandingan Parameter Kelistrikan Sistem Konveyor Sebelum (DOL) dan Sesudah (Arduino-VFD)

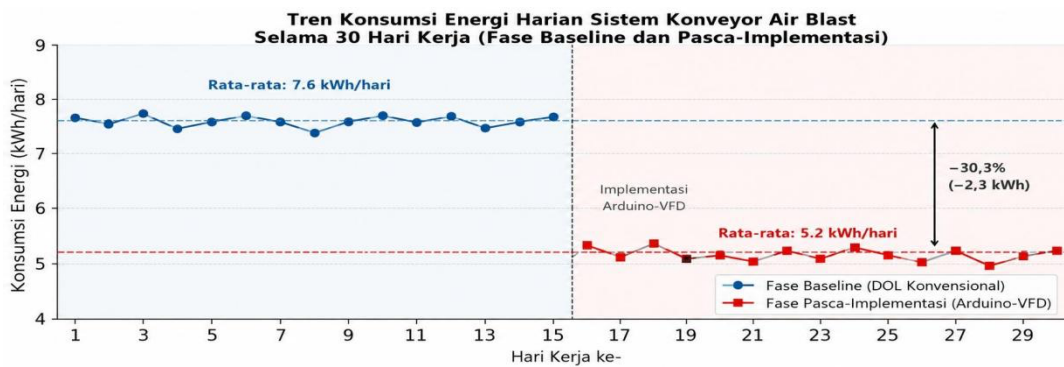
Parameter	Sebelum (DOL)	Sesudah (Arduino-VFD)	Perubahan (%)
Daya Aktif Total (kW)	1,27	0,89	-29,9%
Daya Reaktif Total (kVAR)	1,36	0,74	-45,6%
Daya Semu Total (kVA)	1,87	1,16	-37,9%
Faktor Daya (cos phi)	0,68	0,77	+13,2%
Arus Konveyor 1 (A)	1,44	1,02	-29,2%
Arus Konveyor 2 (A)	1,58	1,10	-30,4%
Konsumsi Energi/hari (kWh)	7,6	5,3	-30,3%
Konsumsi Energi/bulan (kWh)	167,2	116,6	-30,3%
Arus Lonjakan Start (A)	24,8	7,4	-70,2%
Estimasi Biaya Listrik/bulan (Rp)	241.554	168.432	-Rp 73.122

Sumber: Hasil pengukuran PZEM-004T, diolah (2026). Tarif PLN S-3: Rp 1.444,70/kWh, asumsi 22 hari kerja/bulan.

Perbandingan Parameter Kelistrikan Sistem Konveyor Air Blast: DOL vs Arduino-VFD



Gambar 4. Perbandingan Parameter Kelistrikan Sistem Konveyor Air Blast: Kondisi DOL Konvensional vs Sesudah Implementasi Arduino Nano - VFD VEIKONG



Gambar 5. Tren Konsumsi Energi Harian Sistem Konveyor Air Blast Selama 30 Hari Kerja (15 Hari Baseline DOL dan 15 Hari Pasca-Implementasi Arduino-VFD)

5. Dampak terhadap Efisiensi Operasional Laboratorium

Meski intervensi hanya menyentuh motor konveyor alat Air Blast, dampaknya terhadap sistem kelistrikan laboratorium secara menyeluruh patut diperhatikan. Tabel 5 dan Gambar 6 memperlihatkan distribusi konsumsi energi seluruh

komponen laboratorium sebelum dan sesudah intervensi.

Penghematan 2,3 kWh per hari dari sistem konveyor Air Blast berkontribusi pada penurunan konsumsi total laboratorium dari 18,0 kWh menjadi 15,7 kWh — sebuah perbaikan 12,7%. Persentase ini cukup signifikan mengingat hanya satu komponen sistem yang

diintervensi. Fakta bahwa sistem konveyor Air Blast menyumbang 42,2% dari total konsumsi energi laboratorium (7,6 dari 18,0 kWh/hari) sebelum optimalisasi menegaskan betapa strategisnya posisi komponen ini sebagai target penghematan energi prioritas.

Pengurangan daya reaktif pada sirkuit motor konveyor (dari 1,36 kVAR menjadi 0,74 kVAR) juga membawa manfaat bagi seluruh instalasi distribusi. Arus total yang mengalir pada kabel dari panel utama laboratorium ke beban berkurang, meskipun beban aktif komponen lain tidak berubah. Ini menurunkan rugi-rugi resistif (I^2R) pada kabel distribusi

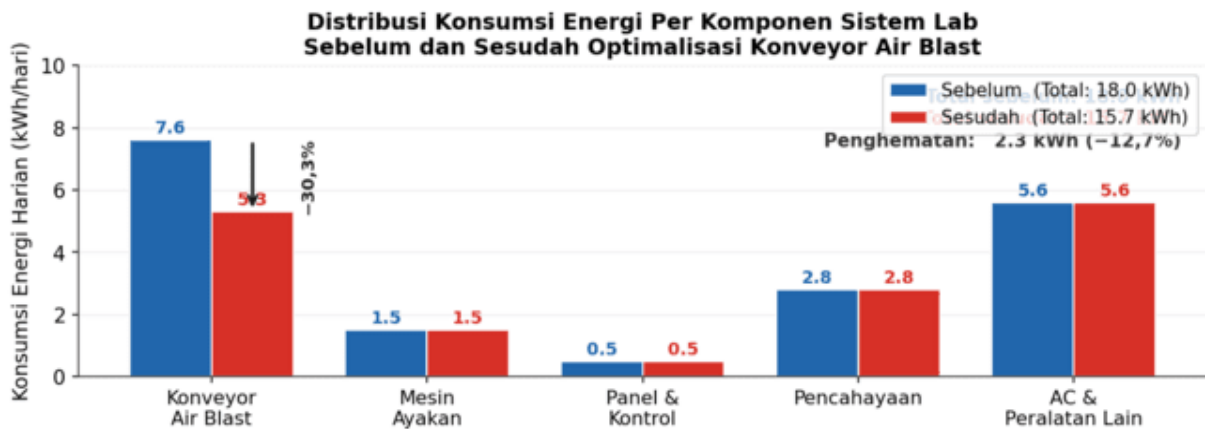
secara kumulatif — keuntungan yang kecil per hari namun bermakna dalam jangka panjang.

Penghapusan arus lonjakan start motor juga secara nyata meningkatkan stabilitas tegangan panel. Sebelum intervensi, setiap startup motor konveyor menyebabkan kedipan tegangan singkat yang berpotensi mereset atau mengganggu modul kontroler dan instrumen laboratorium lainnya. Dengan VFD yang menghasilkan start bertahap, stabilitas tegangan panel selama seluruh sesi praktikum menjadi jauh lebih terjaga.

Tabel 5. Dampak Optimalisasi Konveyor Air Blast terhadap Konsumsi Energi Sistem Laboratorium

No	Komponen / Peralatan	E/hari Sebelum (kWh)	E/hari Sesudah (kWh)	Selisih (kWh)	Keterangan
1	Sistem Konveyor Air Blast	7,6	5,3	-2,3	Target optimalisasi
2	Mesin Ayakan / Separator	1,5	1,5	0,0	Tidak diintervensi
3	Panel Kontrol & Instrumentasi	0,5	0,5	0,0	Tidak diintervensi
4	Sistem Pencahayaan	2,8	2,8	0,0	Tidak diintervensi
5	AC, Komputer & Peralatan Lain	5,6	5,6	0,0	Tidak diintervensi
Total Sistem Lab		18,0	15,7	-2,3	-12,7% total lab

Sumber: Hasil pengukuran dan perhitungan, diolah (2026). Komponen selain konveyor Air Blast tidak diintervensi dalam penelitian ini.



Gambar 6. Distribusi Konsumsi Energi Harian Per Komponen Laboratorium Otomasi Industri Sebelum dan Sesudah Optimalisasi Motor Konveyor Air Blast

6. Analisis Kelayakan Investasi

Rincian biaya implementasi sistem Arduino Nano - VFD VEIKONG meliputi: VFD VEIKONG VD500-4T1R5GB (Rp 1.100.000), Arduino Nano beserta board NANO aPLC 5.2 (Rp 220.000), dua unit PZEM-004T (Rp 240.000), komponen pendukung meliputi relay, LCD, kabel, dan terminal (Rp 160.000), serta jasa instalasi dan konfigurasi (Rp 250.000). Panel kontrol yang sudah ada dimanfaatkan kembali tanpa biaya tambahan. Total investasi: Rp 1.970.000, dibulatkan menjadi Rp 2.000.000 sebagai estimasi konservatif.

Dengan penghematan biaya listrik sebesar Rp 73.122 per bulan, titik impas investasi tercapai dalam

waktu 27,3 bulan — atau kurang dari 2,5 tahun. Mengingat umur pakai VFD yang umumnya mencapai 10-15 tahun dan Arduino yang dapat berfungsi selama 5-10 tahun tanpa penggantian besar, nilai ekonomis investasi ini sangat menarik. Manfaat tambahan yang sulit dikuantifikasi — berupa perpanjangan umur pakai motor dan kontaktor akibat eliminasi arus lonjakan — bila diperhitungkan akan semakin memperpendek waktu pengembalian investasi yang efektif.

D. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengimplementasikan sistem kendali berbasis Arduino Nano pada board NANO aPLC 5.2 yang terintegrasi

dengan VFD VEIKONG VD500 untuk mengoptimalkan penggunaan daya listrik motor konveyor pada alat Air Blast Laboratorium Otomasi Industri Politeknik Negeri Manado. Implementasi menghasilkan perbaikan signifikan pada seluruh parameter yang dipantau: konsumsi energi harian berkurang 30,3% (dari 7,6 menjadi 5,3 kWh), faktor daya meningkat dari 0,68 menjadi 0,77, daya reaktif turun 45,6%, dan arus lonjakan saat start motor berkurang dramatis dari 24,8 A menjadi 7,4 A (penurunan 70,2%).

Pada level laboratorium, optimalisasi konveyor Air Blast berkontribusi pada penurunan konsumsi total dari 18,0 kWh menjadi 15,7 kWh per hari (efisiensi 12,7%). Penghematan biaya listrik Rp 73.122 per bulan memberikan payback period 27 bulan terhadap total investasi Rp 2.000.000 — kelayakan yang sangat baik untuk sistem dengan umur pakai 10-15 tahun. Sistem tidak menimbulkan gangguan apapun pada operasional laboratorium; sebaliknya, eliminasi voltage dip akibat arus lonjakan justru meningkatkan stabilitas tegangan panel secara keseluruhan.

Penelitian lanjutan disarankan untuk: (1) mengembangkan algoritma kendali kecepatan yang lebih adaptif menggunakan kontrol PI berbasis error arus, bukan profil langkah tetap; (2) menambahkan antarmuka HMI berbasis layar sentuh untuk memudahkan operator mengubah parameter profil kecepatan tanpa perlu pemrograman ulang; serta (3) mengaplikasikan metodologi yang sama pada sistem konveyor serupa di unit-unit produksi Politeknik Negeri Manado untuk mengukur dampak penghematan energi institusional secara kumulatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Elektrik, J. E. (2023). Audit energi dan analisis penghematan konsumsi daya pada sistem peralatan listrik gedung akademik. *Malikussaleh Journal of Electrical Engineering*, 12, 36-42.
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2021). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design* (4th ed.). Wiley.
- Ragali, A. F., Soetedjo, A., Limpraptono, F. Y., & Elektro, T. (2021). Sistem manajemen energi listrik berbasis okupansi menggunakan teknologi IoT di laboratorium otomasi dan robotika teknik elektro ITN Malang. *Jurnal Teknik Elektro ITN Malang*, 10(2), 325-337.

- Rakhmawati, P. U., & Muladi, M. N. (2024). IoT-based intelligent system for laboratory facility control with Blynk. *Journal of Software Engineering, Information and Communication Technology (JOSH)*, 6(1), 304-311. <https://doi.org/10.47065/josh.v6i1.5908>
- Sari, L. O., Saputra, M. F. E., & Safrianti, E. (2024). Sistem monitoring arus listrik berbasis IoT pada solar panel di laboratorium PLTS UIN Suska Riau. *Jurnal Sustainable Energy dan Aplikasinya*, 4(1), 205-211.
- Upp, D. I., Terpadu, L., Inovasi, S., Layanan, D. A. N., & Untirta, R. (2022). Analisis efisiensi penggunaan energi listrik pada bangunan laboratorium terpadu. *Jurnal Teknik Elektro Terapan*, 1(3), 54-68.
- Yusuf, M., & Sara, D. (2020). Implementasi sistem cerdas pada gedung workshop otomasi industri balai latihan kerja Banda Aceh sebagai solusi penghematan energi listrik. *Jurnal Rekayasa ElektriKA*, 9(2), 77-84. <https://doi.org/10.17529/jre.v9i2.15342>