



# UNJUK KERJA BOOSTER FAN BERDASARKAN DATA OPERASIONAL DAN BEBAN PRODUKSI

Revaldo Nur Hidayat<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Negeri Padang, Jalan Prof. Dr. Hamka, Air Tawar Padang, Sumatera Barat, Kota Padang 25131, Indonesia

\*Corresponding authors at: [Hidayat061004@gmail.com](mailto:Hidayat061004@gmail.com) Tel.: +6282114234082

## INFO ARTIKEL

### Riwayat artikel:

Diajukan pada 07 Desember 2025

Direvisi pada 05 Mei 2026

Disetujui pada 22 Mei 2026

Tersedia daring pada 30 Juni 2026

### Kata kunci:

Booster Fan, Konsumsi energi spesifik, pabrik semen, energi listrik.

### Keywords:

Booster Fans, Specific energy consumption, cement plant, electrical energy.

## ABSTRAK

*Booster fan* merupakan peralatan *turbomachinery* yang berperan penting dalam menjaga kestabilan aliran dan tekanan gas pada proses produksi industri semen. Penurunan kinerja *booster fan* dapat menyebabkan meningkatnya konsumsi energi dan menurunnya efisiensi sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis unjuk kerja *Booster Fan 6W1P76* berdasarkan data operasional dan variasi beban produksi. Metode penelitian dilakukan menggunakan data operasional harian yang diperoleh dari *Central Control Room (CCR)*. Parameter yang dianalisis meliputi tekanan *inlet–outlet*, *pressure rise* ( $\Delta P$ ), laju aliran (*flowrate*), kecepatan putar (RPM), daya listrik, efisiensi fan, serta konsumsi energi spesifik (*Specific Energy Consumption/SEC*). Analisis difokuskan pada evaluasi titik operasi fan terhadap kondisi desain dan identifikasi indikasi kehilangan energi berdasarkan penyimpangan parameter operasional. Hasil analisis menunjukkan bahwa *booster fan* beroperasi pada kisaran *flowrate* 44–152 m<sup>3</sup>/s, jauh di bawah kapasitas desain sebesar 250 m<sup>3</sup>/s, dengan deviasi mencapai 39,12–83,02%. Kondisi tersebut menyebabkan fan tidak bekerja pada daerah *Best Efficiency Point (BEP)*, sehingga efisiensi fan relatif rendah dengan nilai rata-rata sebesar 32,94%. Selain itu, nilai *SEC* harian berada pada rentang 119–352 kWh/ton, di mana nilai tertinggi terjadi pada kondisi produksi rendah, yang mengindikasikan belum optimalnya pemanfaatan energi listrik. Penelitian ini memberikan manfaat sebagai dasar evaluasi kinerja *booster fan* serta mendukung pengambilan keputusan operasional dalam upaya peningkatan efisiensi energi, pengurangan *losses*, dan perbaikan strategi pengendalian operasi di industri semen.

## ABSTRACT

*Booster fans* are *turbomachinery* equipment that play an essential role in maintaining gas flow and pressure stability in cement production processes. A decline in booster fan performance can lead to increased energy consumption and reduced system efficiency. This study aims to analyze the performance of *Booster Fan 6W1P76* based on operational data and production load variations. The research was conducted using daily operational data obtained from the *Central Control Room (CCR)*. The analyzed parameters include *inlet–outlet pressure*, *pressure rise* ( $\Delta P$ ), flow rate, rotational speed (RPM), electrical power, fan efficiency, and specific energy consumption (SEC). The analysis focuses on evaluating the fan operating point relative to design conditions and identifying indications of energy losses based on deviations in operational parameters. The results show that the booster fan operates within a flow rate range of 44–152 m<sup>3</sup>/s, which is significantly lower than the design capacity of 250 m<sup>3</sup>/s, with deviations ranging from 39.12% to 83.02%. Consequently, the fan does not operate near the *Best Efficiency Point (BEP)*, resulting in relatively low average fan efficiency of 32.94%. Furthermore, the daily SEC values range from 119 to 352 kWh/ton, with higher SEC occurring under low production loads, indicating inefficient energy utilization. This study provides a practical basis for evaluating booster fan performance and supports operational decision-making to improve energy efficiency, reduce energy losses, and enhance control strategies in the cement industry.

## 1. PENGANTAR

Energi merupakan kebutuhan fundamental dalam setiap aktivitas kehidupan manusia modern. Seluruh proses industri, transportasi, dan aktivitas rumah tangga bergantung pada ketersediaan energi dalam berbagai bentuk. Pada hakikatnya, energi adalah kemampuan untuk

melakukan kerja, dan setiap bentuk kerja mekanis maupun proses produksi selalu membutuhkan energi. Menurut Hukum Pertama Termodinamika, energi tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan, melainkan hanya dapat berubah bentuk dari satu bentuk energi ke bentuk energi lainnya (Çengel & Cimbala, 2014). Efisiensi energi merupakan isu krusial di sektor industri karena meningkatnya pertumbuhan ekonomi dan tuntutan masyarakat berkorelasi langsung dengan meningkatnya konsumsi energi.

Salah satu sektor manufaktur yang paling banyak menggunakan energi adalah industri semen. Pemanasan material di dalam tanur, penggilingan klinker, pengangkutan material, dan proses pneumatik di berbagai titik produksi hanyalah beberapa langkah yang membutuhkan banyak energi dalam proses produksi semen. Listrik merupakan salah satu sumber energi yang paling banyak digunakan, yang menggerakkan perangkat bertenaga fluida seperti kipas, kompresor, dan *blower*. Mesin-mesin ini berperan dalam sirkulasi udara panas, suplai oksigen pembakaran, serta distribusi material pada hampir seluruh unit proses industri semen.

Dalam industri semen, *Booster fan* merupakan bagian penting dari sistem sirkulasi udara. Untuk menjaga kestabilan operasi di kiln, *raw mill*, dan pabrik semen, kipas ini meningkatkan tekanan dan aliran udara. Dalam konsep mekanika fluida, fan bekerja dengan mengubah energi mekanik poros menjadi energi tekanan dan energi kinetik fluida (Young dkk., 2010). Akibatnya, efisiensi energi unit produksi, stabilitas proses termal, dan kualitas aliran udara semuanya dipengaruhi secara signifikan oleh kinerja *booster fan*.

Kinerja *booster fan* dipengaruhi oleh berbagai parameter operasional seperti kecepatan putaran (RPM), konsumsi daya listrik (kW), tekanan *inlet* dan *outlet*, temperatur proses, serta beban produksi harian. Berdasarkan hukum afinitas kipas (*fan affinity laws*), peningkatan kecepatan putar akan menyebabkan kenaikan laju aliran udara secara linier, tekanan secara kuadrat, dan konsumsi daya secara kubik. Beberapa studi terkini menunjukkan bahwa kenaikan RPM yang relatif kecil dapat menyebabkan peningkatan konsumsi daya yang signifikan, sehingga optimasi kecepatan putar menjadi faktor penting dalam efisiensi energi sistem ventilasi industri (Corry, 2017). Hal ini menunjukkan betapa pentingnya menganalisis *booster fan* berdasarkan data operasional, khususnya dalam industri berskala besar yang beroperasi terus-menerus seperti pabrik semen.

Oleh karena itu, penelitian tentang analisis unjuk kerja *booster fan* berdasarkan data operasional dan beban produksi memiliki urgensi yang tinggi, baik dari perspektif akademik maupun operasional industri. Pemanfaatan data operasional harian yang diperoleh dari *Central Control Room* (CCR) memungkinkan dilakukannya evaluasi performa *booster fan* secara komprehensif. Melalui analisis tren, regresi, dan hubungan antar parameter fluida, dapat diperoleh gambaran mengenai efisiensi, stabilitas operasi, dan potensi optimasi energi pada unit produksi. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi dalam meningkatkan efisiensi energi, mengoptimalkan pengoperasian fan, serta mendukung praktik *predictive* dan *preventive maintenance* pada industri semen.

### 1.1. Pengertian Booster Fan

*Booster fan* merupakan salah satu jenis peralatan *turbomachinery* yang berfungsi untuk meningkatkan tekanan aliran udara atau gas didalam suatu sistem saluran udara. Secara prinsip, *booster fan* bekerja dengan mengubah energi mekanik dari motor listrik menjadi energi kinetik dan energi tekanan pada fluida menggunakan *impeller* yang berputar berkecepatan tinggi. *Booster fan* terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu *impeller*, *casing*, poros (*shaft*), motor penggerak, dan sistem kontrol yang mengatur kecepatan maupun beban operasional. Unjuk kerja *booster fan* ditentukan oleh beberapa parameter seperti tekanan, kecepatan putar (rpm), debit udara, temperatur. Hubungan antara parameter tersebut dapat dijelaskan menggunakan hukum fan (*fan laws*), yang menunjukkan bahwa perubahan pada kecepatan putar dapat berpengaruh terhadap debit, tekanan, dan daya yang diperlukan (Ragauskas dkk., 2024).

Pada penelitian ini, objek yang dianalisis adalah *booster fan* yang digunakan pada proses industri di PT Semen Padang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. *Booster fan* tersebut berperan penting dalam menjaga kontinuitas aliran udara proses, sehingga evaluasi kinerjanya menjadi aspek krusial dalam upaya peningkatan efisiensi energi dan keandalan operasi sistem.



Gambar 1: *Booster fan* PT Semen Padang

## 2. METODE

### 2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di PT Semen Padang, tepatnya pada Unit Finish Mill, selama 1 bulan yaitu pada bulan juni 2025.

### 2.2. Profil Lokasi Penelitian

PT Semen Padang didirikan pada tanggal 18 Maret 1910 dan merupakan perusahaan semen tertua di Indonesia dan Asia Tenggara. Perusahaan ini berlokasi di Indarung, Kota Padang, Sumatera Barat. Untuk meningkatkan distribusi, PT Semen Padang saat ini mengoperasikan jaringan fasilitas pengemasan (pabrik pengemasan) di berbagai lokasi, selain kompleks industri terpadu di Indarung dengan kapasitas produksi tahunan lebih dari 8,4 juta ton semen. Produk semen yang dihasilkan meliputi *Portland Composite Cement* (PCC), *Portland Pozzolan Cement* (PPC), *Oil Well Cement* (OWC), dan jenis-jenis semen Portland lainnya (Tipe I, II, III, dan V).

### 2.3. Rancangan Kegiatan

Untuk memahami unjuk kerja *Booster fan* dan kondisi operasionalnya, penelitian ini diawali dengan dengan fokus pada parameter tekanan, kecepatan putar, temperatur, dan konsumsi daya selama periode produksi. Data operasional *booster fan* diperoleh melalui pembacaan instrumen yang tersedia di *Central Control Room (CCR)*, termasuk tekanan *inlet*, tekanan *outlet*, daya listrik (kW), serta data produksi harian (*Total Silo CDay*). Selain itu, digunakan pula data pendukung dari divisi mekanik untuk memastikan validitas informasi terkait kondisi operasi fan selama proses berlangsung.

Selanjutnya, ditemukan adanya ketidakaturan performa fan yang terlihat dari fluktuasi tekanan dan daya *power motor*. Sebagai dasar analisis, data operasional dikumpulkan dari divisi mekanik dan dari data CCR (*Central Control Room*) untuk dihitung dan dievaluasi guna mengetahui efisiensi serta kinerja aktual *Booster fan*.

### 2.4. Bahan dan Alat Utama

Objek penelitian dalam studi ini adalah *Booster fan* 6W1P76 yang beroperasi pada unit Finish Mill PT Semen Padang. Parameter tersebut diukur menggunakan sensor tekanan, sensor kecepatan, dan *power meter* yang terpasang pada sistem *booster fan*. Seluruh alat tersebut digunakan sebagai pendukung dalam pengumpulan data yang selanjutnya dianalisis untuk evaluasi kinerja *booster fan*.

### 2.5. Ruang Lingkup/Objek Penelitian

Analisis unjuk kerja *Booster fan* ini merupakan satu-satunya topik yang dibahas dalam penelitian ini. Tujuannya adalah untuk menentukan sejauh mana parameter operasional, seperti tekanan, kecepatan putar, dan daya listrik, mempengaruhi performa dan efisiensi kerja *booster fan*. Evaluasi terhadap pola operasi dan rekomendasi teknis yang diperlukan untuk menjaga kinerja peralatan juga dibahas, terutama yang berkaitan langsung dengan kondisi operasional. Adapun faktor-faktor lain di luar parameter operasional, seperti inspeksi fisik komponen mekanis gangguan kelistrikan, kondisi *impeller*, tidak dibahas secara mendalam.

### 2.6. Teknik Pengumpulan Data

#### 2.6.1 Proses Pengambilan Data

Data unjuk kerja *Booster fan* diperoleh melalui perhitungan berdasarkan data operasional yang dicatat oleh system CCR (*Central Control Room*) selama periode pengamatan 30 hari pada bulan juni 2025. Data tersebut dicatat dengan interval per jam dan selanjutnya diseleksi untuk menentukan hari dengan kondisi operasi stabil. Parameter yang dikumpulkan meliputi tekanan *inlet*, tekanan *outlet*, kecepatan poros (RPM), daya listrik (kW), serta data produksi harian (*Total Silo CDay*). Seluruh data ini digunakan sebagai dasar perhitungan efisiensi dan evaluasi performa *Booster fan* selama periode penelitian. Rekapitulasi data rata-rata parameter operasional *booster fan* yang digunakan dalam analisis disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1: Data rata-rata parameter

Tanggal	$P_{inlet}$ (Pa)	$P_{outlet}$ (Pa)	$\Delta P$ (Pa)	Flowrate ( $m^3/s$ )	RPM (rpm)	Power Daya (kW)	Produksi (CDay/ton)
01/06/2025	402,9231	157	245,9231	117,885	233,4123	70,56846	20111,92
05/06/2025	399,1176	306,4118	92,70588	79,5612	157,5312	34,55353	45048,1
06/06/2025	399,1667	282,4167	116,75	76,28072	151,0358	27,87833	15918,02
10/06/2025	403,0526	261,7368	141,3158	152,1964	301,3489	98,27684	48444,42
13/06/2025	391,4583	214,125	177,3333	77,74285	153,9308	38,01917	68837,82
14/06/2025	397,875	262,9167	134,9583	42,45518	84,06125	15,48	72819,26
22/06/2025	405,3636	264	141,3636	119,8873	237,3768	64,64045	68206,42
25/06/2025	403	289,3	113,7	62,28586	123,326	21,045	12770,27
26/06/2025	414,4286	305,1429	109,2857	44,41919	87,95	15,07857	7367,34
27/06/2025	384,5	230	154,5	43,17045	85,4775	12,85	4613,48
28/06/2025	400,4583	255,4583	145	135,8418	268,9667	65,12667	56298,05
29/06/2025	395,2	242,6	152,6	78,93165	156,2847	33,03267	21187,03
30/06/2025	413,6	242,4	171,2	132,0687	261,496	62,368	6501,82

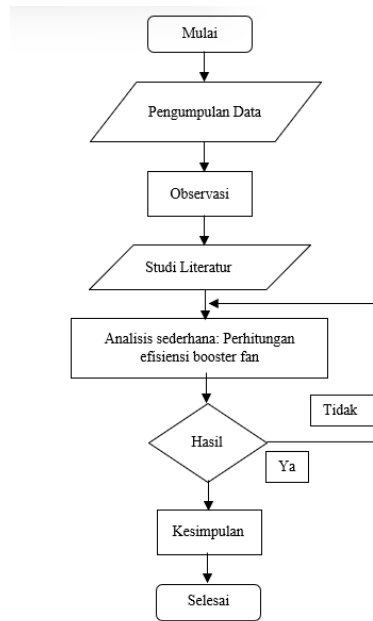
Sumber: CCR PT Semen Padang

#### 2.6.2 Validasi Data

Validasi dilakukan untuk memastikan bahwa data operasional *Booster fan* yang diperoleh dari CCR memiliki reliabilitas yang memadai untuk digunakan dalam analisis efisiensi dan performa mekanis. Proses validasi dilakukan menggunakan pendekatan statistik berupa analisis regresi dan statistik deskriptif untuk melihat konsistensi hubungan antar-parameter utama, yaitu *flowrate* ( $m^3/s$ ), tekanan ( $\Delta P$ ), kecepatan putaran (RPM), dan daya listrik (kW). Analisis statistik digunakan untuk mengevaluasi kestabilan data melalui nilai rata-rata, simpangan baku, dan rentang data. Sementara itu, uji regresi dilakukan untuk mengonfirmasi hubungan fungsional antara variabel mekanis. Validasi ini memastikan bahwa seluruh dataset yang digunakan dalam analisis unjuk kerja telah memenuhi syarat konsistensi, reliabilitas, dan kelayakan untuk dihitung lebih lanjut.

### 2.6.3 Diagram Alir Penelitian

Bagian alir penelitian yang di lakukan seperti pada gambar 2.



Gambar 2: Diagram Alir Penelitian

## 2.7. Metode Pengolahan Data

### 2.7.1. Perhitungan Efisiensi Fan

Analisis unjuk kerja *Booster fan* dilakukan dengan membandingkan daya fluida yang dihasilkan dengan daya Listrik yang digunakan oleh motor. Efisiensi fan dihitung menggunakan persamaan dasar hubungan antaran tekanan, aliran udara, dan daya yang diperlukan untuk memindahkan fluida. Hasil perhitungan digunakan untuk mengevaluasi performa fan terhadap variasi beban produksi dan menentukan tingkat efisiensi aktual selama periode pengamatan (Hidayat dkk., 2022). Persamaan efisiensi fan ditunjukkan pada Persamaan (3) dan mengacu pada teori performa fan yang umum digunakan dalam analisis sistem ventilasi industri (ASHRAE, 2017).

$$P_{Shaft} = \eta_{Motor} \times P_{Listrik} \quad (1)$$

Keterangan:

$P_{Shaft}$  = daya mekanik pada poros fan (W).

$P_{Listrik}$  = daya listrik motor (W).

$\eta_{Motor}$  = efisiensi motor

$$P_{fluida} = \Delta P \times Q \times 0.001 \quad (2)$$

Keterangan:

Q = debit aliran udara ( $m^3/s$ ).

$\Delta P$  = selisih tekanan *outlet-inlet* (Pa).

$P_{Fluida}$  = daya fluida (W)

$$\eta_{fan} = \frac{P_{fluida}}{P_{Shaft}} \times 100\% \quad (3)$$

### 2.7.2. Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik (SEC)

Selain efisiensi unjuk kerja *booster fan*, performa energi *Booster fan* juga dievaluasi berdasarkan konsumsi energi spesifik (*Specific Energy Consumption / SEC*), yaitu besarnya energi listrik yang digunakan per satuan produksi. Nilai ini digunakan untuk menilai seberapa besar kebutuhan energi yang diperlukan *booster fan* mendukung proses produksi dalam satu hari operai. Perhitungan ini menggunakan standar evaluasi efisiensi energi industri (Pranolo dkk., 2018). Perhitungan SEC ditunjukkan pada Persamaan 4 (IEA, 2014).

$$SEC = \frac{Kwh}{Total\ Silo\ CDay} \quad (4)$$

Keterangan:

SEC = *Specific Energy Consumption* (kWh/ton produk).

Kwh = total konsumsi energi listrik *booster fan* dalam satu hari operasi (kWh).

Total Silo Day = total produksi harian (ton/hari).

### 2.7.3. Perhitungan Flowrate Menggunakan Fan Laws

Perhitungan kapasitas aliran (*flowrate*) *Booster fan* dilakukan dengan menggunakan *Fan Laws*, yaitu hubungan dasar antara perubahan kecepatan putaran fan terhadap perubahan kapasitas aliran. Karena pabrik hanya menyediakan nilai *flowrate* standar dari data pabrikan, maka nilai *flowrate actual* dapat dihitung dengan perubahan RPM selama operasi. Metode ini digunakan untuk memperkirakan aliran aktual tanpa harus melakukan pengukuran langsung di lapangan. Hubungan ini dinyatakan pada Persamaan (5) (Corry, 2017).

$$Q = Q_{\text{ref}} \times \frac{N}{N_{\text{ref}}} \quad (5)$$

Keterangan:

Q = laju aliran volumetrik aktual (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>ref</sub> = laju aliran volumetrik pada kondisi referensi (m<sup>3</sup>/s).

N<sub>ref</sub> = kecepatan putar pada kondisi referensi (rpm).

N = kecepatan putar aktual *booster fan* (rpm)

Perhitungan *flowrate* aktual dalam penelitian ini menggunakan pendekatan *Fan Laws* yang secara teoritis berlaku pada kondisi fluida seragam, densitas konstan, *impeller* bersih, dan sistem *ducting* tanpa gangguan. Namun pada aplikasi industri semen, gas proses memiliki temperatur tinggi sehingga densitas fluida dapat berubah. Selain itu, potensi *fouling* pada *impeller* serta kemungkinan kebocoran (*false air*) pada sistem *ducting* dapat mempengaruhi karakteristik aliran. Oleh karena itu, penggunaan *Fan Laws* dalam penelitian ini diposisikan sebagai pendekatan estimasi berbasis data operasional CCR dan digunakan untuk analisis tren kinerja relatif, bukan sebagai representasi nilai absolut kapasitas aliran di lapangan.

### 2.7.4. Analisis Operating Point dan Jarak dari BEP

Analisis *operating point* dilakukan untuk mengetahui sejauh mana kondisi kerja *Booster fan* berada dari titik performa terbaiknya atau *Best Efficiency Point* (BEP). Titik BEP merupakan kondisi dimana fan beroperasi pada efisiensi maksimum, dengan *losses* mekanis dan *losses aerodinamis* yang paling rendah. Analisis BEP pada penelitian ini menggunakan pendekatan umum untuk fan industri, yaitu BEP berada pada 70–85% kapasitas aliran desain, Parameter ini dinyatakan pada Persamaan (6) (Novara & McNabola, 2018).

$$\text{Jarak dari BEP} = \frac{Q_{\text{aktual}} - Q_{\text{BEP}}}{Q_{\text{BEP}}} \quad (6)$$

Keterangan:

Q<sub>aktual</sub> = laju aliran volumetrik aktual (m<sup>3</sup>/s).

Q<sub>RFP</sub> = laju aliran volumetrik pada kondisi *Best Efficiency Point* (m<sup>3</sup>/s).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Deskripsi Umum Kondisi Operasi Booster Fan

Selama hasil periode pengamatan, *Booster fan* beroperasi dengan karakteristik tekanan *inlet-outlet*, kecepatan putaran *impeller*, dan daya listrik yang bervariasi mengikuti beban proses. Setelah hasil pengamatan terdapat hari dengan jam operasi pendek, hari tanpa produksi, serta beberapa data anomali mengakibatkan fluktuasi daya atau ketidakstabilan tekanan.

### 3.2. Spesifikasi Booster Fan

Spesifikasi *booster fan* yang digunakan ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2: Spesifikasi *Booster fan*

Parameter	Spesifikasi
Tipe Fan	FLS Medium-Pressure Fan – Seri MT 100–400
Jenis Impeller	Bilah tipe <i>S-shaped</i> (S-blades)
Flow Rate Maksimum	Hingga 250 m <sup>3</sup> /s
Tekanan Operasi Maksimum	Hingga 9000 Pa
Temperatur Operasi Maksimum	Hingga 400°C
Ukuran Fan yang Tersedia	Diameter 50–400 cm
Efisiensi Desain	> 75%
Tipe Suction	<i>Single-suction</i>
Kecepatan Putar (RPM Nominal)	± 495 rpm (berdasarkan data lapangan pabrik)
Desain Rotor	<i>Vibration-free balanced rotor</i>

### 3.3. Validasi Data dan Analisis Statistik

Analisis statistik terhadap data parameter operasi mill fan selama periode pengamatan menunjukkan bahwa sistem beroperasi secara relatif stabil. Parameter yang dianalisis meliputi tekanan masuk mill, tekanan keluar *filter*, daya dan kecepatan *booster fan*, serta total muatan silo harian (*Silo Cday*).

**Tabel 3:** Hasil Statistik Parameter Operasi *Mill Fan* (XLminer Toolpak)

Parameter	Nilai
Jumlah Data (n)	346
Rata-rata <i>Mill Inlet Pressure</i>	397,83 Pa
Simpangan Baku <i>Mill Inlet Pressure</i>	22,6 Pa
Rentang <i>Mill Inlet Pressure</i>	250 – 490 Pa
Rata-rata <i>Filter Outlet Pressure</i>	235,35 Pa
Simpangan Baku <i>Filter Outlet Pressure</i>	52,5 Pa
Rata-rata <i>Booster fan Power</i>	26,57 kW
Simpangan Baku <i>Booster fan Power</i>	37,55 kW
Rata-rata <i>Booster fan Speed</i>	121,43 rpm
Simpangan Baku <i>Booster fan Speed</i>	115,38 rpm
Rata-rata Silo CDay	2302,670665 ton/hari
Simpangan Baku Silo CDay	1449,290555 ton/hari
Confidence Interval (95%)	± nilai CI

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 3, tekanan masuk mill memiliki nilai rata-rata 397,83 dengan simpangan baku 22,60 Pa, sedangkan tekanan keluar *filter* memiliki nilai rata-rata 235,35 Pa dengan simpangan baku 52,50 Pa. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa variasi tekanan masih berada dalam batas operasional yang wajar dan mencerminkan kondisi aliran udara yang stabil selama pengoperasian. Parameter daya *booster fan* memiliki nilai rata-rata sebesar 26,57 kW dengan simpangan baku 37,55 kW, menunjukkan adanya fluktuasi daya yang cukup besar. Namun demikian, nilai ini masih dapat diterima mengingat perubahan beban operasi fan akibat variasi tekanan dan aliran material. Sementara itu, kecepatan *booster fan* memiliki nilai rata-rata 121,43 rpm dengan simpangan baku 115,38 rpm, yang menunjukkan adanya penyesuaian kecepatan fan terhadap kondisi operasional sistem.

### 3.4. Analisis Performa Operasional

#### 3.4.1. Analisis Efisiensi Kinerja Booster Fan

Booster fan merupakan bagian dari *turbomachinery* yang berfungsi mentransfer energi mekanis dari *impeller* ke fluida kerja melalui mekanisme pertukaran momentum. Kinerja *turbomachinery* jenis fan sangat dipengaruhi oleh karakteristik aliran, sudut masuk fluida ke *impeller*, kecepatan putar, serta posisi titik operasi terhadap kurva karakteristik fan. Oleh karena itu, analisis unjuk kerja *booster fan* dilakukan dengan mempertimbangkan parameter tekanan, laju aliran, dan konsumsi energi listrik untuk mengevaluasi kondisi operasi aktual. Karena daya yang tersedia merupakan daya listrik motor, maka dilakukan koreksi efisiensi motor untuk memperoleh daya poros fan. Dalam penelitian ini, efisiensi motor diasumsikan sebesar 95% berdasarkan standar motor industri.

Periode pengambilan data: 01 Juni 2025

(Data diambil dari CCR pada saat *Mill Fan* beroperasi dalam kondisi stabil)

*Flow Rate Fan* = 117,885

*Power Motor* = 70 kW = 70.000 W

Efisiensi motor diasumsikan = 0,95

$\Delta P$  = 245,9230769 Pa, Ketetapan = 0,001

Maka, Efisiensi alat *Mill Fan* secara desain sebesar =

$$P_{\text{Shaft}} = \eta_{\text{Shaft}} \times P_{\text{Listrik}}$$

$$P_{\text{Shaft}} = 0,95 \times 70.000 \text{ W}$$

$$P_{\text{Shaft}} = 67.040 \text{ W}$$

$$P_{\text{fluida}} = Q \times \Delta P$$

$$P_{\text{fluida}} = 117,885 \text{ m}^3/\text{s} \times 245,9230769 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{fluida}} = 28.990,64 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{fluida}}}{P_{\text{Shaft}}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{28.990,64}{67.040} \times 100\%$$

$$\eta = 43,24\%$$

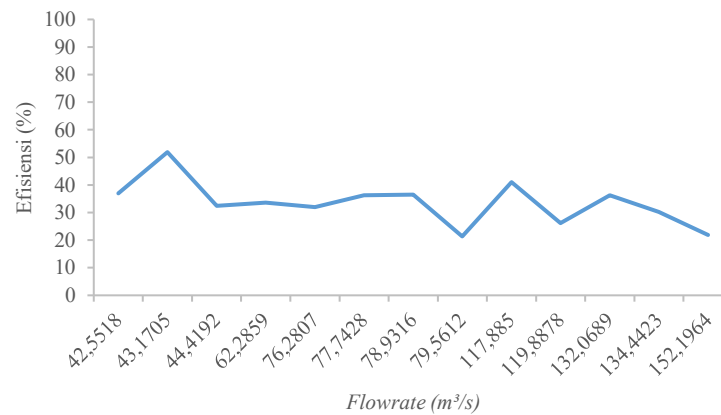
Setelah dilakukan perhitungan secara aktual maka didapatkan hasil seperti pada tabel 4.

**Tabel 4:** Hasil Perhitungan Efisiensi

Tanggal	Efisiensi (%)
01/06/2025	43,24377423
05/06/2025	22,46945809
06/06/2025	33,62647034
10/06/2025	23,03670598
13/06/2025	38,17021526
14/06/2025	38,96151161
22/06/2025	27,59833075
25/06/2025	35,42235121
26/06/2025	33,8883361
27/06/2025	54,63719211
28/06/2025	31,83602352
29/06/2025	38,38296093
30/06/2025	38,16086386
Rata-Rata	34,68253498 %

**3.4.2 Analisis Kapasitas Aliran (Flowrate) dan Pengaruhnya Terhadap Efisiensi.**

Untuk memahami hubungan antara kapasitas aliran udara dan performa *booster fan*, dilakukan analisis data *flowrate* terhadap efisiensi selama periode operasi. Gambar 3 menunjukkan grafik yang membandingkan nilai *flowrate* aktual dengan efisiensi fan. Berdasarkan hasil analisis yang dirangkum pada Tabel 5 dan Tabel 6, hubungan antara kapasitas aliran udara (*flowrate*) dan efisiensi fan dapat divisualisasikan melalui grafik pada Gambar 3.



**Gambar 3:** Grafik *Flowrate* vs Efisiensi

**Tabel 5:** Ringkasan Statistik Regresi Linear *Flowrate* terhadap Efisiensi

Parameter	Nilai
Jumlah Data (n)	346
Multiple R	0,0553
R Square (R <sup>2</sup> )	0,00306
Adjusted R <sup>2</sup>	0,00016
Standard Error	58,2704
F-statistic	1,055
Significance F (p-value)	1,055

**Tabel 6:** Koefisien Regresi Linear *Flowrate* terhadap Efisiensi

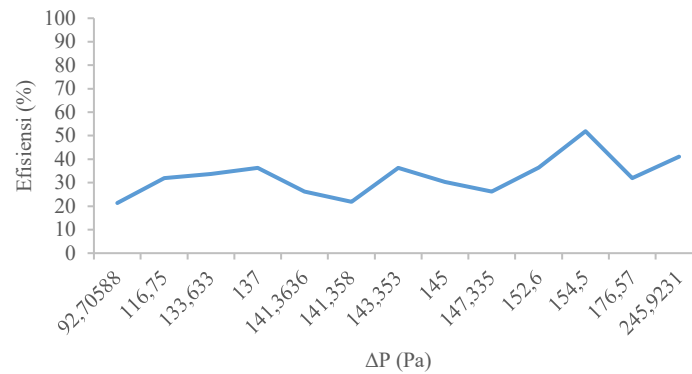
No	Variabel	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients
		B	Std. Error	Beta
1	(Constant)	55,556	6,433	-
2	<i>Flowrate (Q)</i>	0,00158	0,00154	0,055

Berdasarkan Gambar 3, terlihat bahwa perubahan *flowrate* tidak menunjukkan pola hubungan yang jelas terhadap efisiensi *Booster Fan*. Peningkatan kapasitas aliran tidak selalu diikuti oleh kenaikan efisiensi, dan pada beberapa kondisi efisiensi justru menurun meskipun *flowrate* meningkat. Pola ini menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel tidak bersifat linear secara konsisten.

Untuk memperkuat analisis visual tersebut, dilakukan uji regresi linier menggunakan data operasional per jam ( $n = 346$ ). Hasil regresi menunjukkan nilai koefisien korelasi ( $R$ ) sebesar 0,055 dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,003 dengan  $p$ -value sebesar 0,305 ( $> 0,05$ ), yang berarti secara statistik *flowrate* tidak berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pada tingkat kepercayaan 95%. Dengan demikian, efisiensi *Booster Fan* tidak dipengaruhi secara langsung oleh variasi kapasitas aliran, melainkan kemungkinan lebih disebabkan oleh faktor lain seperti kerugian tekanan pada sistem ducting, kondisi *impeller*, pengaturan damper, atau operasi yang tidak berada pada titik *Best Efficiency Point* (BEP) (Xiong dkk., 2024).

### 3.4.3. Analisis Tekanan Inlet–Outlet dan Pressure Rise ( $\Delta P$ )

Pada tahap ini dilakukan analisis hubungan antara selisih tekanan ( $\Delta P$ ) yang dihasilkan *Booster fan* dengan efisiensi fan. Nilai ( $\Delta P$ ) merupakan indikator performa fan dalam menghasilkan energi fluida, sehingga akan berpengaruh terhadap efisiensi aktual. Terdapat berupa grafik yang membandingkan nilai ( $\Delta P$ ) aktual dengan efisiensi fan. Berdasarkan hasil analisis yang dirangkum pada Tabel 7 dan Tabel 8, hubungan antara selisih tekanan ( $\Delta P$ ) dan efisiensi fan dapat divisualisasikan melalui grafik berikut.

**Gambar 4:** Grafik Pressure vs Efisiensi**Tabel 7:** Ringkasan Statistik Regresi Linear *Pressure Rise* ( $\Delta P$ ) terhadap Efisiensi

Parameter	Nilai
Jumlah Data ( $n$ )	346
Multiple R	0,1309
R Square ( $R^2$ )	0,01714
Adjusted R <sup>2</sup>	0,01429
Standard Error	2029,8
F-statistic	6,01609
Significance F (p-value)	0,01467

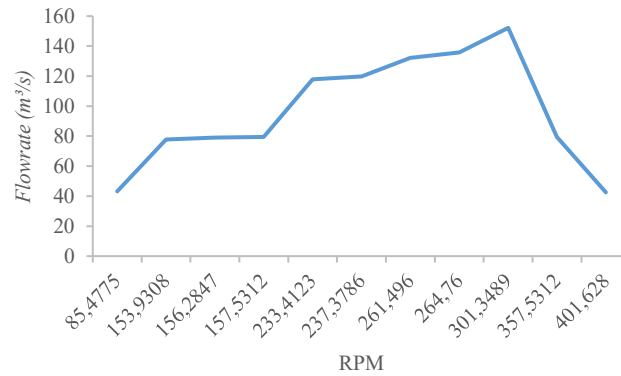
**Tabel 8:** Koefisien Regresi Linear *Pressure Rise* ( $\Delta P$ ) terhadap Efisiensi

No	Variabel	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients
		B	Std. Error	Beta
1	(Constant)	725,977	1193,32	-
2	<i>Pressure (<math>\Delta P</math>)</i>	4,60506	1,87749	0,131

Berdasarkan Gambar 4, terlihat adanya kecenderungan bahwa peningkatan *pressure rise* ( $\Delta P$ ) diikuti oleh peningkatan efisiensi, meskipun pola hubungan yang terbentuk tidak terlalu kuat. Hasil regresi menunjukkan nilai koefisien korelasi ( $R$ ) sebesar 0,131 dan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,017 dengan  $p$ -value sebesar 0,01467 ( $< 0,05$ ). Nilai  $p$ -value yang lebih kecil dari 0,05 menunjukkan bahwa secara statistik  $\Delta P$  berpengaruh signifikan terhadap efisiensi pada tingkat kepercayaan 95%. Namun, nilai  $R^2$  yang relatif kecil (1,7%) menunjukkan bahwa kontribusi tekanan terhadap perubahan efisiensi masih rendah. Dengan demikian, *pressure rise* memiliki pengaruh terhadap efisiensi *Booster Fan*, tetapi bukan merupakan faktor dominan dalam menentukan kinerja sistem secara keseluruhan.

3.4.4. Analisis Hubungan Kecepatan Putar (RPM) terhadap Kapasitas Aliran (Flowrate) Booster Fan

Kecepatan putar poros (RPM) merupakan salah satu parameter utama yang menentukan kapasitas aliran (*flowrate*) pada *Booster Fan*. Secara teori, berdasarkan hukum kesebangun (*Fan Laws*), kapasitas aliran berbanding lurus dengan kecepatan putar, sehingga peningkatan RPM seharusnya diikuti oleh peningkatan *flowrate*. Dalam penelitian ini, hubungan antara RPM dan *flowrate* dianalisis berdasarkan data operasional yang diperoleh dari *Central Control Room* (CCR). Hasil analisis ini disajikan dalam bentuk grafik hubungan antara RPM dan *flowrate*, yang menjadi dasar untuk mengevaluasi kondisi kerja *Booster Fan* secara mekanis dan menentukan tingkat kesesuaiannya terhadap prinsip *Fan Laws*. Berdasarkan hasil analisis yang dirangkum pada Tabel 9 dan Tabel 10, hubungan antara kecepatan putar (RPM) dan kapasitas aliran (*flowrate*) dapat divisualisasikan melalui grafik berikut.



Gambar 5: Grafik RPM vs Flowrate

Tabel 9: Ringkasan Statistik Regresi Linear RPM terhadap Flowrate

Parameter	Nilai
Jumlah Data (n)	346
Multiple R	1,000
R Square (R <sup>2</sup> )	1,000
Adjusted R <sup>2</sup>	1,000
Standard Error	2,57E-13
F-statistic	1,8E+31
Significance F (p-value)	0,000

Tabel 10: Koefisien Regresi RPM terhadap Flowrate

No	Variabel	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients
		B	Std. Error	Beta
1	(Constant)	4,26E-13	2E-14	-
2	Flowrate	0,50505	1,2E-16	1,000

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa peningkatan kecepatan putar (RPM) diikuti oleh peningkatan kapasitas aliran (*flowrate*), menunjukkan adanya hubungan linier yang kuat antara kedua variabel. Hasil regresi linier dengan 346 data operasional menunjukkan nilai koefisien korelasi (R) dan koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) sebesar 1,000 dengan p-value sebesar 0,000 (< 0,05), yang berarti hubungan tersebut signifikan secara statistik. Koefisien regresi sebesar 0,505 menunjukkan bahwa setiap peningkatan 1 rpm akan meningkatkan *flowrate* sebesar 0,505 m<sup>3</sup>/s. Hasil ini konsisten dengan teori *Fan Laws* yang menyatakan bahwa kapasitas aliran berbanding lurus dengan kecepatan putar fan. Meskipun hubungan antara RPM dan *flowrate* mengikuti *fan laws*, performa aktual fan juga dipengaruhi oleh optimasi desain aerodinamis sistem (Kim dkk., 2023).

3.4.5. Analisis Konsumsi Energi Spesifik (SEC)

Untuk memahami lebih lanjut perilaku kerja *Booster fan*, dilakukan analisis konsumsi energi spesifik (*Specific Energy Consumption/SEC*) digunakan untuk menilai seberapa efisien energi listrik yang digunakan dalam mendukung proses produksi, dan merupakan indikator utama dalam evaluasi efisiensi energi pada industri semen (Madlool dkk., 2013). SEC dihitung dengan membandingkan total energi listrik harian (kWh) terhadap produksi yang dihasilkan pada hari yang sama (Silo Cday). Nilai SEC yang tinggi menunjukkan fan mengonsumsi energi lebih besar untuk menghasilkan produksi yang relatif rendah, sebaliknya nilai SEC yang rendah menandakan konsumsi energi lebih efisien. Data hasil perhitungan konsumsi energi spesifik (*Specific Energy Consumption/SEC*) selama periode pengamatan disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11: Konsumsi Energi Spesifik (SEC)

Tanggal	Booster fan, power	Total Silo CDay	SEC harian
	kWh total per hari	total per hari	
01/06/2025	878,4	20111,92	0,043675591
05/06/2025	672,7	45048,1	0,014932927
06/06/2025	1939,3	15918,02	0,121830479
10/06/2025	672,7	48444,42	0,013886016
13/06/2025	874,8	68837,82	0,012708131
14/06/2025	332,2	72819,26	0,00456198
22/06/2025	1424,1	68206,42	0,020879266
25/06/2025	183,3	12770,27	0,014353651
26/06/2025	67,8	7376,43	0,009191438
27/06/2025	20,7	4613,48	0,004486852
28/06/2025	1514,2	56298,05	0,026896136
29/06/2025	218	21187,03	0,010289314
30/06/2025	297,3	6501,82	0,045725658
Nilai SEC paling rendah		0,004486852 kWh/ton	
Nilai SEC paling tinggi		0,121830479 kWh/ton	
Rata-rata SEC		0,026416726 kWh/ton	

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 11, nilai SEC harian Booster Fan berada pada rentang 0,00449 kWh/ton hingga 0,12183 kWh/ton, dengan nilai rata-rata sebesar 0,02642 kWh/ton. Nilai ini menunjukkan bahwa konsumsi energi spesifik *Booster Fan* relatif kecil dibandingkan total produksi harian, yang mengindikasikan bahwa kontribusi energi fan terhadap proses produksi tidak dominan. Terlihat bahwa nilai SEC cenderung meningkat pada saat produksi harian menurun. Hal ini terjadi karena energi listrik yang digunakan fan relatif stabil mengikuti beban operasi, sedangkan jumlah material yang diproses berkurang, sehingga rasio energi per ton menjadi lebih besar. Sebaliknya, ketika produksi meningkat, nilai SEC cenderung menurun karena energi yang digunakan tersebar pada jumlah produksi yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi energi sangat dipengaruhi oleh kondisi operasional sistem, dimana optimasi pemanfaatan energi dapat menurunkan konsumsi energi spesifik secara keseluruhan (Turakulov dkk., 2024).

#### 3.4.5. Analisis Indikasi Kehilangan Energi (Energy Losses)

Berdasarkan hasil analisis efisiensi dan konsumsi energi spesifik (SEC), *Booster fan* menunjukkan kecenderungan bekerja jauh di bawah kondisi optimalnya. Meskipun fan tetap berfungsi normal, perbedaan antara kapasitas aliran aktual dengan desain, variasi tekanan, serta efisiensi yang lebih rendah dari perkiraan mengindikasikan adanya *losses* di sistem. Tabel 12 menyajikan deviasi kapasitas aliran aktual terhadap desain sebagai ukuran kuantitatif dari potensi kehilangan energi.

Tabel 12: Deviasi Flowrate

Tanggal	Flowrate	Flowrate_desain	Deviasi
	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> /s)	(%)
01/06/2025	117,8850039	250	52,85%
05/06/2025	79,56120024	250	68,18%
06/06/2025	76,28072391	250	69,49%
10/06/2025	152,1964381	250	39,12%
13/06/2025	77,74284512	250	68,90%
14/06/2025	42,45517677	250	83,02%
22/06/2025	119,8872819	250	52,05%
25/06/2025	62,28585859	250	75,09%
26/06/2025	44,41919192	250	82,23%
27/06/2025	43,17045455	250	82,73%
28/06/2025	135,8417508	250	45,66%
29/06/2025	78,93164983	250	68,43%
30/06/2025	132,0686869	250	47,17%

Dari hasil perhitungan persentase deviasi *flowrate* terhadap desain, terlihat bahwa kapastias aliran *Booster Fan* mengalami penurunan yang sangat signifikan. Deviasi terendah sebesar 39,12%, sedangkan deviasi tertinggi mencapai 83,02% dari kapasitas desain. Meskipun nilai *flowrate* (250 m<sup>3</sup>/s) dan mengikuti kebutuhan proses, hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa kondisi ketika *flowrate*

berada pada kisaran tertinggi ( $\pm 150 \text{ m}^3/\text{s}$ ), nilai efisiensi tetap berada jauh di bawah zona optimal. Kondisi tersebut mengindikasikan adanya kehilangan energi (*energi losses*) di dalam sistem, yang berpotensi berasal dari beberapa faktor mekanis, antara lain hambatan aliran pada *ducting*, kebocoran udara yang menyebabkan aliran tidak berjalan secara optimal (Demir dkk., 2025).

### 3.4.5. 1 Klasifikasi Aerodynamic Losses

Berdasarkan deviasi kapasitas aliran aktual terhadap kapasitas desain yang mencapai 39% hingga 83%, dapat diindikasikan adanya peningkatan kerugian aerodinamis (*aerodynamic losses*) dalam sistem *Booster Fan*. Secara teoritis, *losses* pada sistem fan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis sebagai berikut:

#### 1. Inlet Loss

Pada Tabel 12 terlihat bahwa pada tanggal 14/06/2025 *flowrate* hanya sebesar  $42,45 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan deviasi mencapai 83,02% dari kapasitas desain. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas aliran aktual sangat jauh dari spesifikasi fan ( $250 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Meskipun RPM masih beroperasi (84 rpm pada tanggal tersebut), aliran yang masuk ke *impeller* kemungkinan tidak terdistribusi secara optimal. *Inlet loss* akibat turbulensi atau gangguan aliran sebelum *impeller* dapat menyebabkan kapasitas aktual menurun drastis tanpa perubahan signifikan pada kecepatan putar (Demir dkk., 2025).

#### 2. Blade Profile Loss

Efisiensi rata-rata fan hanya sebesar 34,68%, jauh di bawah efisiensi desain ( $>75\%$ ). Pada beberapa kondisi seperti 05/06/2025 dan 10/06/2025, efisiensi berada pada kisaran 22–23%, meskipun fan tetap beroperasi normal. Karena hasil regresi menunjukkan *flowrate* tidak berpengaruh signifikan terhadap efisiensi ( $R^2 = 0,003$ ), maka penurunan efisiensi tidak semata-mata akibat perubahan debit. Hal ini mengindikasikan adanya kerugian internal pada *impeller*, seperti peningkatan gesekan dan separasi aliran pada *blade*, yang dapat dikategorikan sebagai *blade profile loss*. Dalam lingkungan industri semen, *fouling* akibat partikel debu sangat mungkin meningkatkan *roughness* permukaan sudu (Lei dkk., 2024).

#### 3. Tip Clearance Loss

Pada tanggal 27/06/2025, *flowrate* hanya  $43,17 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan  $\Delta P$  sebesar 154,5 Pa dan daya 12,85 kW. Meskipun tekanan masih relatif tinggi, kapasitas aliran tetap rendah. Kondisi ini menunjukkan kemungkinan adanya kebocoran internal antara sisi tekanan tinggi dan sisi tekanan rendah di dalam fan, yang mengurangi tekanan efektif. Fenomena ini konsisten dengan karakteristik *tip clearance loss*, di mana sebagian energi tekanan tidak dikonversi menjadi aliran efektif.

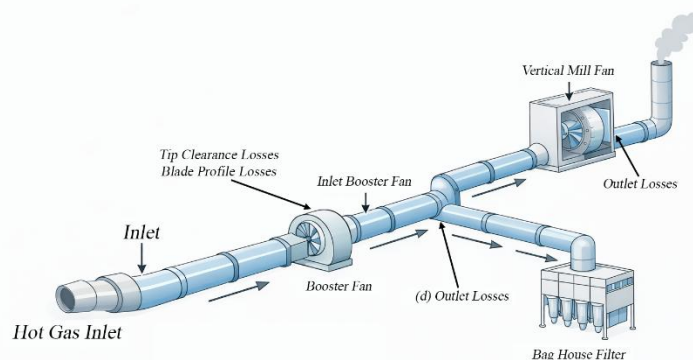
#### 4. Outlet Loss

Hasil regresi menunjukkan bahwa  $\Delta P$  berpengaruh signifikan terhadap efisiensi ( $p = 0,01467$ ), meskipun kontribusinya kecil ( $R^2 = 0,017$ ). Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tekanan sistem mempengaruhi efisiensi lebih besar dibandingkan perubahan *flowrate*. Kondisi ini mengindikasikan adanya peningkatan total *pressure drop* setelah *impeller*, yang dapat berasal dari turbulensi dan ekspansi aliran pada sisi keluar fan menuju sistem *ducting*. *Outlet loss* menyebabkan sebagian energi kinetik tidak dimanfaatkan secara optimal.

#### 5. System/Ducting Loss

Deviasi *flowrate* yang konsisten tinggi (sebagian besar di atas 50%) menunjukkan bahwa sistem memiliki tahanan yang lebih besar dibanding kondisi desain. Pada tanggal 26/06/2025 dan 27/06/2025, *flowrate* berada di bawah  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  dengan deviasi di atas 82%, yang menunjukkan pergeseran titik operasi jauh ke kiri kurva fan. Selain itu, SEC meningkat pada saat produksi rendah, yang menunjukkan bahwa energi listrik tetap dikonsumsi meskipun aliran tidak optimal. Hal ini memperkuat indikasi adanya *system/ducting loss* sebagai faktor dominan dalam penurunan kinerja fan.

Untuk memperjelas jalur aliran gas panas serta lokasi potensi kerugian aerodinamis dalam sistem, ditampilkan diagram sistem *ducting* *Booster Fan* pada Gambar 6.



**Gambar 6:** Skema sistem aliran gas panas pada unit *Booster Fan*

Gambar 6 menunjukkan skema sistem aliran gas panas pada unit *Booster Fan*. Gas panas masuk melalui *hot gas inlet* menuju *Booster Fan* melalui *ducting inlet*, kemudian didistribusikan ke beberapa jalur, yaitu *Vertical Mill Fan*, *Bag House Filter*. Sepanjang jalur aliran tersebut terjadi berbagai potensi kerugian tekanan, seperti *inlet loss* pada sisi masuk fan, *blade profile* dan *tip clearance loss* di dalam

*impeller*, *outlet loss* pada sisi keluar fan, serta *system/ducting loss* akibat gesekan, belokan, dan hambatan sepanjang *ducting*. Kombinasi kerugian tersebut berkontribusi terhadap penurunan performa aktual *Booster Fan* dibandingkan kondisi desain. Hal ini memperkuat indikasi adanya *system ducting loss* sebagai faktor dominan dalam kinerja fan, dimana hambatan aliran pada *ducting*, khususnya pada bagian belokan saluran, dapat meningkatkan *pressure drop* dan menyebabkan kehilangan energi dalam sistem (Premjiyani dkk., 2025).

### 3.5. Analisis Ketidakpastian Pengukuran (*Uncertainty Analysis*)

Data penelitian diperoleh dari sistem *Central Control Room (CCR)*, sehingga hasil perhitungan bergantung pada akurasi instrumen tekanan ( $\Delta P$ ), daya listrik (kW), dan kecepatan putar (RPM). Setiap instrumen industri memiliki batas toleransi pengukuran sesuai spesifikasi pabrikan, yang berpotensi mempengaruhi hasil perhitungan daya fluida dan efisiensi fan melalui propagasi kesalahan parameter. Namun, mengingat deviasi performa yang diperoleh dalam penelitian ini relatif besar, seperti deviasi *flowrate* hingga lebih dari 80% dari kapasitas desain serta perbedaan signifikan efisiensi aktual terhadap kondisi desain, maka pengaruh ketidakpastian instrumen diperkirakan tidak mengubah kecenderungan utama hasil analisis. Dengan demikian, tren performa yang diperoleh tetap dapat merepresentasikan kondisi operasional *Booster Fan* secara umum.

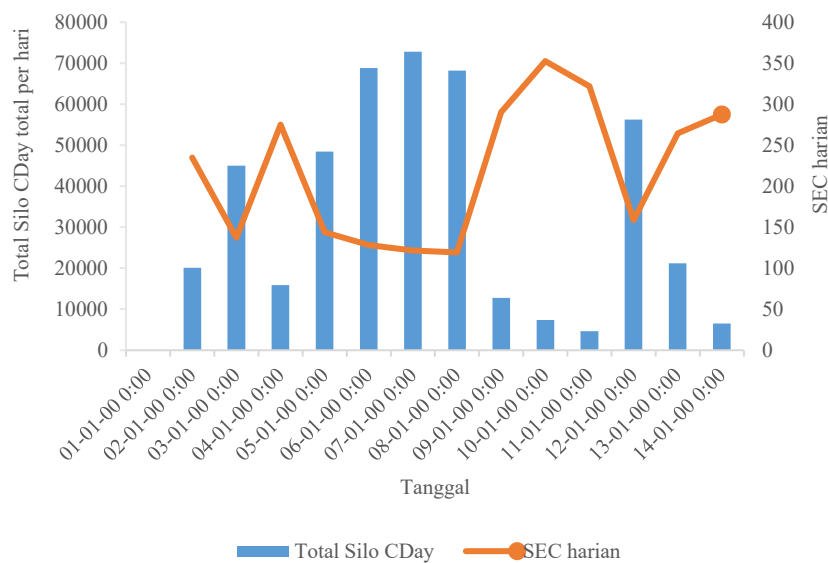
### 3.6. Rekomendasi Teknis

#### 3.6.1 Optimasi Titik Operasi Fan

Hasil analisis menunjukkan bahwa *Booster fan* bekerja pada kapasitas aliran yang jauh di bawah kondisi desain, yaitu pada rentang 44–152 m<sup>3</sup>/s dibandingkan *flowrate* desain sebesar 250 m<sup>3</sup>/s. Kondisi ini mengindikasikan bahwa fan tidak beroperasi pada daerah *Best Efficiency Point (BEP)*. Oleh karena itu, disarankan dilakukan evaluasi kembali pengaturan sistem aliran udara, seperti bukaan damper dan strategi pengoperasian fan, agar titik operasi fan dapat mendekati kondisi desain sehingga efisiensi energi meningkat dan *losses* berkurang.

#### 3.6.2 Pemantauan Konsumsi Energi Spesifik (*SEC*)

Nilai *SEC* yang relatif tinggi pada kondisi produksi rendah menunjukkan bahwa konsumsi energi *Booster fan* belum sebanding dengan beban produksi. Oleh sebab itu, *SEC* disarankan digunakan sebagai indikator kinerja operasional harian untuk memantau efisiensi sistem. Dengan pemantauan ini, operator dapat mengidentifikasi kondisi operasi yang tidak efisien dan melakukan penyesuaian operasional lebih awal (Muktar & Pratoto, 2023).



Gambar 7: Konsumsi Energi Spesifik

#### 3.6.3. Peningkatan Strategi Pengendalian Operasi

Untuk meningkatkan fleksibilitas pengoperasian terhadap variasi beban produksi, direkomendasikan evaluasi penggunaan sistem pengendalian kecepatan fan, seperti *Variable Frequency Drive (VFD)*, atau optimalisasi logika kontrol yang ada. Pengendalian yang lebih adaptif dapat mengurangi konsumsi energi berlebih saat beban rendah serta menjaga stabilitas tekanan dan aliran udara selama operasi.

### 3.6.4. Evaluasi Indikasi Kehilangan Energi (Energy Losses)

Penyimpangan *flowrate* aktual terhadap kondisi desain serta rendahnya efisiensi pada beberapa kondisi operasi mengindikasikan adanya peningkatan kehilangan energi dalam sistem. Oleh karena itu, disarankan dilakukan inspeksi berkala pada sistem *ducting*, *seal*, dan *impeller* untuk mengurangi potensi *false air*, kebocoran, serta *fouling* yang dapat meningkatkan losses aerodinamis dan menurunkan kinerja fan. Indikasi ini diperkuat oleh nilai *flowrate* aktual yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan *flowrate* desain serta efisiensi fan yang tidak sebanding dengan daya listrik yang digunakan.

## 4. KESIMPULAN

Kinerja *booster fan* secara umum belum beroperasi pada kondisi optimal, yang ditunjukkan oleh nilai efisiensi yang relatif rendah dan fluktuatif dibandingkan dengan kondisi desain. Hal ini mengindikasikan bahwa energi listrik yang dikonsumsi belum sepenuhnya dikonversi secara efektif menjadi energi aliran fluida. Nilai *Specific Energy Consumption* (SEC) cenderung meningkat pada kondisi beban parsial, yang menunjukkan bahwa sistem *booster fan* belum sepenuhnya menyesuaikan konsumsi energi terhadap variasi kebutuhan aliran, sehingga konsumsi energi spesifik menjadi relatif lebih tinggi. Indikasi kehilangan energi (*energy losses*) teridentifikasi melalui deviasi *flowrate* terhadap kondisi desain, rendahnya efisiensi pada tekanan operasi tertentu, serta meningkatnya nilai SEC. Kehilangan energi ini bersifat indikatif dan disimpulkan berdasarkan analisis data operasional tanpa pengukuran langsung. Keterbatasan penelitian ini terletak pada sumber data yang hanya berasal dari sistem CCR, tanpa pengukuran langsung terhadap kondisi fisik peralatan maupun parameter lingkungan. Oleh karena itu, penelitian di masa mendatang disarankan untuk melakukan pengukuran lapangan atau penerapan sistem pemantauan kondisi (*condition monitoring*) yang lebih komprehensif.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Semen Padang yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas sehingga kegiatan Kerja Praktek dapat terlaksana dengan baik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Arief Rahman Dasril, S.T., M.M. selaku Kepala Seksi Pemeliharaan Mesin Finish Mill IV-VI, Bapak Apri Kurniawan selaku pembimbing lapangan, serta seluruh staf dan karyawan di Unit Finish Mill Indarung VI PT Semen Padang yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan bantuan selama pelaksanaan Kerja Praktek.

## KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dalam bentuk apapun, baik finansial maupun hubungan pribadi, yang dapat mempengaruhi pelaksanaan penelitian, analisis data, serta penyusunan artikel ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook: HVAC Systems And Equipment*.
- Çengel, & Cimbala. (2014). *Fluidmechanicsfundamentalsandapplications*.
- Corry, B. (2017). *Fans And Ventilation: A Practical Guide*. Mcgraw-Hill.
- Demir, F., Özer, S., Demir, U., Körükçü, K., Oduncu, H., & Ekin, M. Ş. (2025). Design Optimization And Field Validation Of Industrial Fans With CFD For Cement Production: Performance, Energy Savings, And Environmental Benefits. *Sustainability (Switzerland)*, 17(22).
- Hidayat, M. T., Anugrah, R., & Safaruddin, S. (2022). Menghitung Efisiensi Mill Fan Yang Terdapat Di Pabrik Baturaja Ii Pt Semen Baturaja (Persero) Tbk. Pada Proses Cement Mill Yang Ditinjau Dari Pemakaian Arus Listrik. *Jurnal Multidisipliner Bharasumba*, 1(04), 489–497.
- IEA. (2014). *Energy Efficiency Indicators: Fundamentals on Statistics*.
- Kim, J. T., Yang, J. S., Kallath, H., & Min, J. K. (2023). Multi-Stage Optimization Of Centrifugal Fan And Casing With Preliminary Design And Mesh Morphing Method. *Journal Of Mechanical Science And Technology*, 37(8), 4065–4080.
- Lei, J. (雷健), Cui, Q. (崔琴), & Qin, G. (秦国良). (2024). Performance Improvement Of Multi-Blade Centrifugal Fan Based On Impeller Outlet Flow Control. *Physics Of Fluids*, 36(9), 095181.
- Madlool, N. A., Saidur, R., Rahim, N. A., & Kamalisarvestani, M. (2013). An Overview Of Energy Savings Measures For Cement Industries. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 19, 18–29.
- Mukhtar, R., & Pratoto, A. (2023). Reduction Of Specific Energy Consumption (SEC) In Cement Factories Through FMEA And Energy Management. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 19(1), 43.
- Novara, D., & McNabola, A. (2018). A Model For The Extrapolation Of The Characteristic Curves Of Pumps As Turbines From A Datum Best Efficiency Point. *Energy Conversion And Management*, 174, 1–7.
- Pranolo, S. H., Muzayanha, S. U., Yudha, C. S., Hasanah, L. M., & Shohih, E. N. (2018). *Kajian Konsumsi Energi Spesifik Sektor Industri Kimia Di Indonesia Sebagai Acuan Efisiensi Energi*.
- Prenjiyani, H., Dwivedi, A., & Rana, H. (2025). Modeling And Analysis Of Pressure Drop In Flue Gas Duct Path Using Computational Fluid Dynamics. *International Journal Of Advanced Research*, 13(04), 845–854.

- Ragauskas, P., Tetsmann, I., & Jasevičius, R. (2024). The Optimization Of The Geometry Of The Centrifugal Fan At Different Design Points. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(8).
- Turakulov, Z., Kamolov, A., Norkobilov, A., Variny, M., & Fallanza, M. (2024). Enhancing Sustainability And Energy Savings In Cement Production Via Waste Heat Recovery. *Engineering Proceedings*, 67(1).
- Xiong, J., Guo, P., & Li, J. (2024). Multi-Objective Multi-Variable Large-Size Fan Aerodynamic Optimization By Using Multi-Model Ensemble Optimization Algorithm. *Journal Of Thermal Science*, 33(3), 914–930.
- Young, munson, okiishi, & huebsch. (2010). *A Brief Introduction to Fluid Mechanics*.