

Analisis Pengukuran dan Verifikasi Kinerja Penghematan Energi Motor *Fan Dust Collector* Menggunakan VFD dengan Perangkat Lunak *RETScreen Expert*

Sarwo Turinno^{1✉}, Mochammad Facta², Cahyadi³

^{1,2} Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

³ Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN), Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diserahkan : 04-06-2024

Direvisi : 06-06-2024

Diterima : 12-06-2024

Kata Kunci:

Dust Collector, Energi Dasar, Penghematan Energi, Pengukuran dan Verifikasi, Motor Fan, VFD

Keywords :

Dust Collector, Energy Baseline, Energy Saving, Measuremen & Verification, Motor Fan, VFD

Corresponding Author :

Sarwo Turinno

Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia

Jl. Imam Bardjo, SH No. 5, Pleburan, Semarang

Email: sarwoturinno@students.undip.ac.id

ABSTRAK

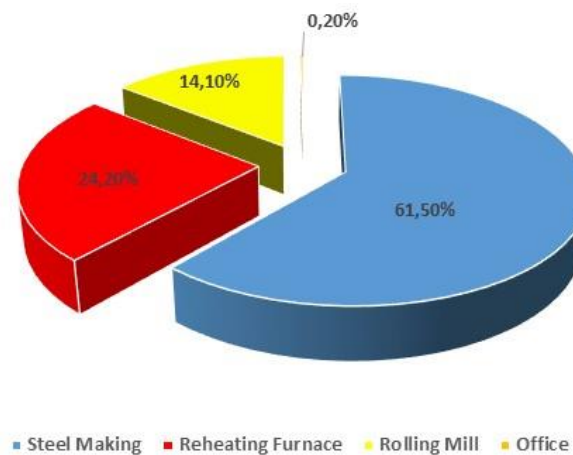
Dalam penggunaan energi di Industri, minimnya perhatian terhadap penggunaan energi dalam memenuhi kebutuhan beban masih menjadi hal yang banyak ditemukan. Salah satu contohnya adalah pengoperasian motor *fan dust collector* pada industri baja dengan kapasitas maksimal secara terus menerus pada beban proses yang bervariasi, sehingga perlu dilakukan langkah efisiensi energi. *Variable Frequency Drive* (VFD) digunakan untuk mengatur kecepatan putar motor sesuai kebutuhan beban dan menjadi solusi untuk menghasilkan penghematan energi. Penelitian ini akan mengevaluasi kinerja penghematan energi dari implementasi pemasangan VFD melalui pengukuran dan verifikasi (M&V) dengan menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert*. Dari hasil analisis rata-rata konsumsi energi harian sebelum pemasangan VFD sebesar 24.686 kWh/hari dengan konsumsi energi dalam satu tahun sebesar 5.924.658 kWh/tahun. Setelah pemasangan VFD, rata-rata konsumsi energi perhari menjadi sebesar 18.018 kWh/hari dengan konsumsi energi dalam satu tahun sebesar 4.324.240 kWh/tahun. Dengan persamaan energy baseline, penghematan energi yang dihasilkan dalam satu tahun sebesar 954.747 kWh/tahun.

ABSTRACT

In the use of energy in industry, the lack of attention to energy use in meeting load requirements is still a common thing to find. One example is the operation of a dust collector fan motor in the steel industry with maximum capacity continuously at varying process loads, so energy efficiency measures need to be taken. The installation of a Variable Frequency Drive (VFD) to adjust the motor rotational speed according to load requirements is a solution to generate energy savings. Variable Frequency Drives (VFDs) are used to adjust the rotational speed of motors according to load requirements and are a solution to generate energy savings. This research will evaluate the energy saving performance of the VFD installation implementation through measurement and verification (M&V) using RETScreen Expert software. From the analysis, the average daily energy consumption before the installation of VFDs was 24,686 kWh/day with energy consumption in one year of 5,924,658 kWh/year. After the installation of the VFD, the average daily energy consumption was 18,018 kWh/day with energy consumption in one year of 4,324,240 kWh/year. With the energy baseline equation, the energy savings generated in one year amounted to 954,747 kWh/year.

PENDAHULUAN

Pabrik Baja merupakan salah satu industri pendukung sektor konstruksi yang padat energi, dimana industri ini termasuk dalam kategori industri pengguna energi diatas 6000 TOE (*Ton of Oil Equivalent*) (Kemenperin, 2014). Proses pada industri baja terdiri dari proses peleburan, proses pembentukan dan pemanasan dan proses akhir (*Finishing*) (Backman et al., 2019; Khunte, 2018; Mondol, 2016). Dari ketiga proses diatas, proses peleburan merupakan proses yang mengkonsumsi energi paling besar, hal ini berdasarkan data dari Kementerian Perindustrian, seperti yang terlihat pada Gambar 1 (Kemenperin, 2014).



Gambar 1. Distribusi Pemakaian Energi di Industri Baja

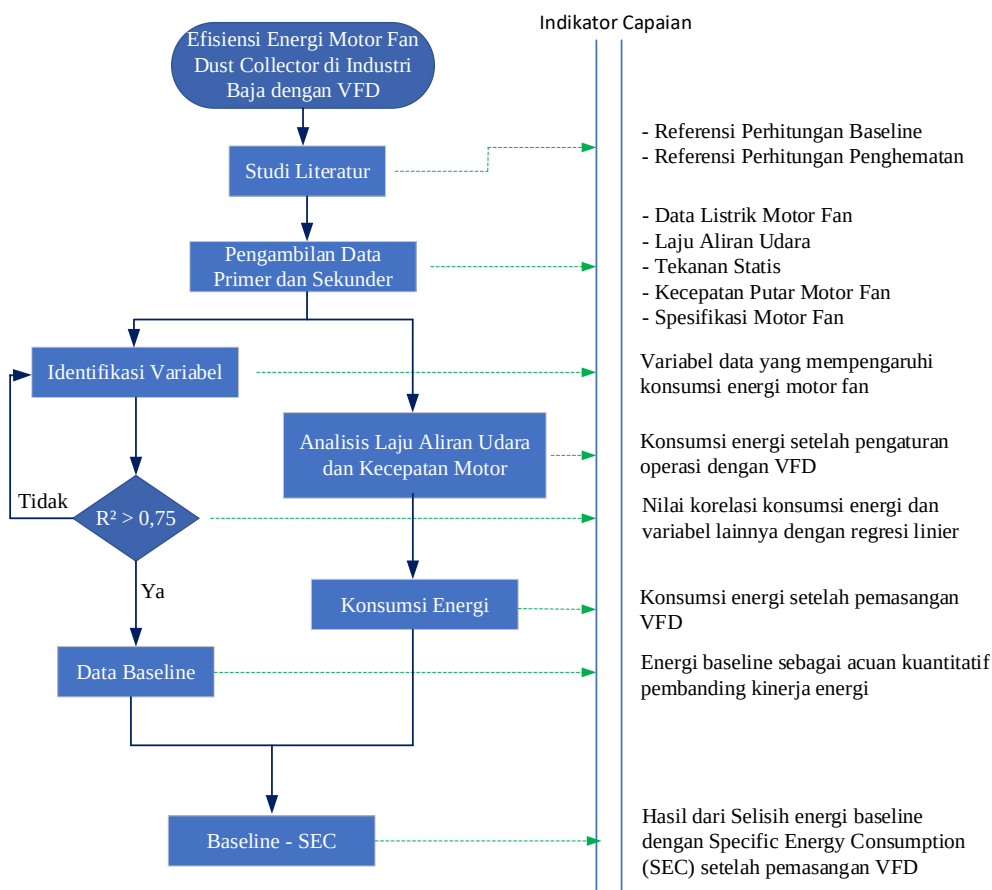
Permasalahan polusi debu pada industri baja adalah sumber utama emisi pencemaran udara. Sumber utama emisi tersebut sekitar 70% dari jumlah debu yang dihasilkan dari proses peleburan dan sisanya dihasilkan dari proses pembentukan besi baja dan finishing (Al-Zboon & Forton, 2019; Jeong & Ra, 2022; Li et al., 2022; Magzoub et al., 2020), (Sun et al., 2019). Masalah polusi pada industri baja menjadi perhatian khusus sehingga alat yang digunakan untuk menangkap dan membuang debu dioperasikan setiap hari (Ho et al., 2021). *Dust collector* berfungsi untuk membuang dan memfilter debu, gas dan asap hasil peleburan pada industri baja sehingga udara yang keluar dari cerobong sudah merupakan udara yang tidak membahayakan bagi pekerja dan masyarakat sekitarnya (Alieva & Olimova, 2023; Bhuiyan, 2020; Zhong & Xiao, 2022) dan salah satu peralatan listrik yang mengkonsumsi energi cukup besar pada *dust collector* adalah motor *fan dust collector* (Budiman, 2018). Banyak industri yang tidak memperhatikan kebutuhan beban aktualnya sehingga peralatan tersebut bekerja dengan kapasitas maksimal tanpa memperhatikan kondisi operasi beban yang bervariasi (Beaulac et al., 2022). Ada tiga jenis *dust collector* yang digunakan pada industri baja, diantaranya, *Ventury Scrubber* (VS), *Electrostatic Precipitator* (ESP) dan *Bag Filter* (BF) (Fesharaki, 2013).

Dalam satu siklus proses peleburan terdapat dua kondisi operasi, yaitu saat kondisi peleburan dan kondisi *idle* untuk menuangkan baja cair hasil peleburan tersebut kedalam tungku *Ladle Furnace* (LF), kemudian proses akan berlanjut ke siklus yang sama setelah tungku peleburan yang kosong tadi diisi kembali dengan *raw material* yang baru atau dinamakan proses *charging* (Anisya et al., 2014). Selama proses tersebut Motor *Fan Dust Collector* tetap beroperasi secara penuh meskipun proses peleburan dalam kondisi *idle*. Kondisi ini menimbulkan pemakaian energi yang boros disebabkan motor *fan dust collector* tetap beroperasi penuh walaupun proses peleburan sedang dalam kondisi *idle*. Kondisi ini mengakibatkan terjadinya suplai udara yang lebih besar dari yang dibutuhkan. Sehingga perlu dilakukan pengurangan suplai udara dari motor *fan dust collector*. Mengurangi pemakaian *flow* udara dengan menyesuaikan pada nilai *static pressure* yang terjadi pada saat kondisi peleburan *idle* akan berdampak pada pengurangan beban yang bisa mengurangi konsumsi daya dari motor *fan* (Beaulac et al., 2021).

Pada penelitian ini akan diawali dengan pengukuran melalui perekaman data sebelum dan sesudah implementasi langkah-langkah efisiensi energi dengan memasang *Variable Frequency Drive* (VFD) yang akan menghasilkan profil daya listrik, *airflow rate* dan *static pressure* pada saat terjadi setiap siklus proses peleburan. Kemudian dilakukan perhitungan *baseline* energi dengan regresi linier menggunakan uji statistik untuk mencari variabel yang paling mempengaruhi konsumsi energi motor *fan* dengan mencari nilai korelasi yang paling besar dengan konsumsi energi motor *fan dust collector* dan memenuhi persyaratan IPMVP (*International Performance Measurement and Verification Protocol*) (Purba et al., 2022). Kemudian menghitung prediksi konsumsi energi menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert* setelah dilakukan perubahan *flow* udara motor *fan* dan berapa nilai penghematan yang didapatkan berdasarkan *airflow rate* yang keluar dari motor *fan* sesuai dengan yang dibutuhkan.

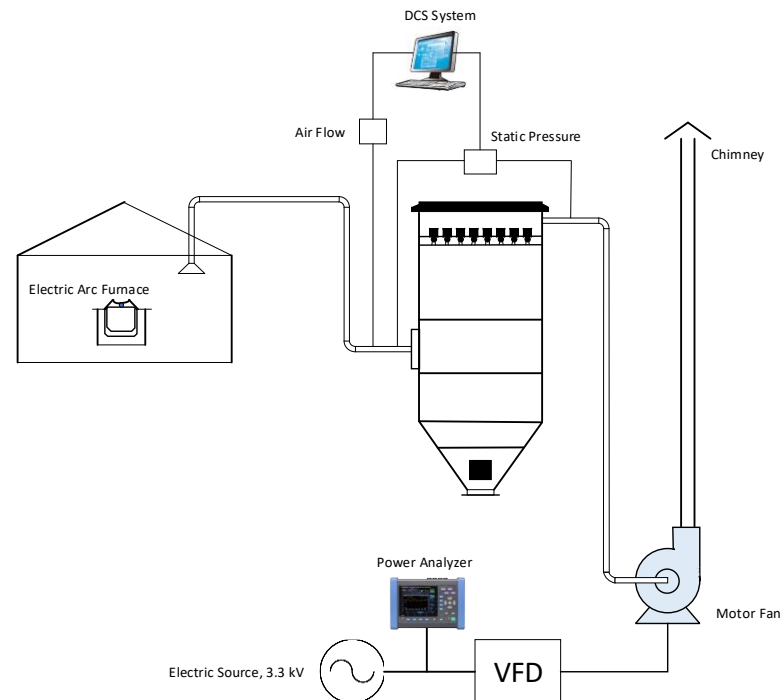
METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan perekaman data primer dari motor *fan dust collector*. Seperti yang tergambar dalam diagram alir berikut :



Gambar 2. Distribusi Pemakaian Energi di Industri Baja

Data parameter kelistrikan, laju aliran udara dan tekanan statis direkam dengan waktu yang bersamaan selama beberapa siklus peleburan (Desmira, 2020) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2. Titik Pemasangan Alat Ukur

Pengukuran kelistrikan dilakukan dengan Power Logger Hioki PW-3360-21 dengan spesifikasi seperti yang terdapat pada Tabel 1, yang dipasang pada panel distribusi utama 3,3 kV pada bagian *Potential Transformers* (PT) untuk mengukur tegangan dan *Current Transformers* (CT) untuk mengukur arus, sedangkan pengukuran tekanan statis dan laju aliran udara dilakukan dengan pemasangan sensor yang terletak pada sisi inlet dan outlet bag filter yang terhubung dengan *Distributed Control System* (DCS). Pengukuran dilakukan selama beberapa hari sebelum pemasangan VFD dan sesudah pemasangan VFD. Data yang dikumpulkan kemudian dilakukan pengecekan dan dimasukkan kedalam perangkat lunak *RETScreen Expert* untuk dilakukan analisis pembentukan korelasi antara konsumsi energi dengan variabel yang mempengaruhinya. Perangkat lunak *RETScreen Expert* adalah perangkat lunak sistem manajemen energi bersih untuk menganalisis kelayakan (penghematan energi, biaya, finansial dan pengurangan emisi) suatu proyek efisiensi energi, energi terbarukan dan kogenerasi (daya, pemanasan, pendinginan) serta menganalisis kinerja energi berkelanjutan.

Tabel 1. Spesifikasi Motor Fan Dust Collector

Parameter	Spesifikasi
Rpm	985
Daya	1.100 kW
Tegangan	3.300 Volt
Arus	235 A
Frekuensi	50 Hz
Kutub	6
Laju alir udara	620.000 m ³ /h

Dalam menghitung penghematan energi, yang penting untuk dicatat adalah selisih antara berapa banyak konsumsi energi dari motor *fan dust collector* setelah dilakukan langkah-langkah konservasi energi dan sebelum dilakukan langkah-langkah konservasi energi. Dimana data konsumsi energi sebelumnya dapat dilakukan dengan melakukan pengukuran dengan alat ukur, sedangkan data konsumsi energi setelahnya dapat diperoleh melalui prediksi dengan menghitung *energy baseline* dan juga melalui pengukuran setelah implementasi pemasangan VFD. *Energy*

baseline memiliki tujuan sebagai tolok ukur untuk perbandingan konsumsi energi kedepannya (Qaisar & Zhao, 2022).

Metode Baseline

Metode untuk menghitung energy baseline dengan menggunakan perangkat lunak RETScreen adalah dengan menggunakan regresi linier, dimana regresi linier adalah salah satu algoritma paling dasar namun *powerfull*. Pendekatan dengan regresi linier ini menciptakan model yang dapat digunakan untuk memprediksi atau memperkirakan penggunaan energi di masa depan. Ini mendefinisikan hubungan antara sebuah variabel tidak bebas (y) dan satu atau lebih variabel penjelasnya (variabel bebas) (x) (Yu, 2018). Berikut adalah contoh model regresi linier sederhana:

$$Y = \omega_0 + \omega_1 x \quad (1)$$

Dimana ω_0 adalah *intercept* sedangkan ω_1 adalah koefisien dari nilai x, dengan cara yang sama untuk menentukan regresi linier dengan multi variabel dapat ditulis dengan model sebagai berikut:

$$Y = \omega_0 x_0 + \omega_1 x_1 + \dots + \omega_m x_m = \sum_{i=0}^n \omega_i x_i \quad (2)$$

Pendekatan dengan regresi linier ini dengan mempertimbangkan berbagai variabel yang mempengaruhi konsumsi energi dari motor *fan dust collector*, seperti laju aliran udara, tekanan statis, dan waktu operasi peleburan adalah variabel-variabel yang bisa digunakan dalam perhitungan regresi linier nanti. Dalam menentukan nilai *intercept* (ω_0) dan koefisien dari nilai x (ω_1) langkah selanjutnya adalah menghitung nilai X^2 , Y^2 , XY dan jumlahkan masing (Utami et al., 2022)(Wiga Maulana Baihaqi, Melia Dianingrum, 2019), kemudian masukkan kedalam persamaan berikut :

$$\omega_0 = \frac{(\sum X^2)(\sum Y) - (\sum XY)(\sum X)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (3)$$

$$\omega_1 = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (4)$$

Dimana :

Y = variabel tidak bebas (konsumsi energi motor *fan dust collector*)

ω_0 = *intercept*

ω_1 = koefisien dari nilai X

X = variabel bebas

Fokus dari penelitian ini adalah dengan menggunakan perangkat lunak *RETScreen Expert* dalam melakukan analisis M&V dengan data konsumsi energi dan *airflow rate* sebelum dan sesudah melakukan langkah efisiensi energi dengan pemasangan VFD.

Measurement and Verification (M&V) Protocol

Menurut (Efficiency & Valuation Organization (EVO), 2005), “ M&V adalah proses perencanaan, pengukuran, pengumpulan dan analisis data untuk memverifikasi dan melaporkan penghematan energi yang merupakan hasil dari implementasi langkah efisiensi energi. Proses ini menampilkan metode baru untuk mempromosikan peningkatan penghematan energi dari semua jenis sumber energi dan pengurangan konsumsi energi pada level individual. Hal ini dikarenakan peningkatan efisiensi energi dapat mengurangi konsumsi energi dari berbagai sumber energi dan berdampak pada penurunan emisi gas rumah kaca. Tujuan dari M&V adalah untuk memaksimalkan tingkat penghematan energi, pengembangan proyek secara keseluruhan, penyelesaian proyek yang lebih cepat, meningkatkan kesadaran para pengguna energi tentang konservasi energi dan pentingnya pengurangan emisi (Efficiency & Valuation Organization

(EVO), 2005; IPMVP Committe, 2002). Protokol Pengukuran dan Verifikasi Kinerja Internasional (IPMVP) yang dibiayai oleh Organisasi Penilaian Efisiensi (EVO) adalah prosedur standar yang digunakan untuk menilai pengukuran dan verifikasi semua bentuk energi (Efficiency & Valuation Organization (EVO), 2005; Swords et al., 2008; Wang & Han, 2019). EVO adalah perusahaan swasta dan nirlaba yang berasal dari Amerika Serikat (AS) dan kemudian menyebar ke lebih dari empat puluh negara. Protokol ini menguraikan metode terbaik yang tersedia dalam membuktikan efisiensi energi dan air untuk memasukkan proyek-proyek yang menggunakan teknologi energi terbarukan (IPMVP Committe, 2002; Wang & Han, 2019). IPMVP juga menyediakan berbagai alternatif yang berbeda sejalan dengan M&V untuk memasukkan prediksi dan verifikasi penghematan energi dengan menggunakan alat pemodelan dan simulasi (Swords et al., 2008).

Penghematan energi hanya dapat dihitung dengan menyandingkan energi yang dikonsumsi sebelum dan sesudah pelaksanaan proyek. Hal ini dilakukan karena penghematan energi selama pelaksanaan proyek tidak dapat diukur secara langsung karena merupakan ketiadaan energi pembanding yang dikonsumsi (Efficiency & Valuation Organization (EVO), 2005). Penentuan penghematan energi membutuhkan pengukuran yang akurat dan metode yang dapat direplikasi, yang dikenal sebagai protokol pengukuran dan verifikasi. Hal ini memungkinkan setiap investor efisiensi energi untuk mengetahui durasi penghematan dan kuantitas energi yang dihemat (Wang & Han, 2019). Menurut IPMVP, metode M&V dibagi menjadi empat opsi berbeda (A sampai D). Opsi D menggunakan numerik metode analisis numerik untuk menentukan kinerja energi sebuah bangunan dengan mengevaluasi terlebih dahulu efek dari penerapan setiap langkah konservasi energi pada keseluruhan peralatan (Swords et al., 2008). Badan-badan energi seperti Natural Sumber Daya Alam Kanada (Natural Resources Canada, 2005) dan Departemen Energi Amerika Serikat (U.S & Department of Energy, 2006), menyediakan berbagai perangkat lunak energi yang mencakup perangkat lunak energi dan simulasi, (ii) perangkat lunak efisiensi energi untuk teknologi spesifik yang membantu meningkatkan efisiensi energi (Swords et al., 2008; Wu et al., 2012).

Untuk melaksanakan M&V, pemasangan dan pemeliharaan kalibrasi alat ukur, pengumpulan, dan analisis data, pengembangan metode perhitungan, dan hasil yang dapat dipertanggungjawabkan dan verifikasi laporan adalah bagian dari metode yang harus diikuti (Efficiency & Valuation Organization (EVO), 2005). Penerapan M&V yang baik mengharuskannya terintegrasi dengan baik ke dalam proses identifikasi, pengembangan, pengadaan, pemasangan, dan pengoperasian langkah-langkah konservasi energi; Namun, akan menjadi pilihan yang bijaksana untuk memeriksa bahwa peralatan yang dipasang dapat menghasilkan penghematan yang diharapkan. Verifikasi potensi untuk mencapai penghematan disebut sebagai verifikasi operasional, yang mungkin melibatkan inspeksi, uji coba peralatan, pengujian kinerja fungsional, dan atau tren data.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Pengukuran

Dari metode pengukuran yang dilakukan pada saat sebelum dan sesudah pemasangan VFD, maka didapatkan data yang akan digunakan untuk analisis lebih lanjut, seperti yang ditampilkan pada Tabel 2 dan Tabel 3

Tabel 2. Hasil Pengukuran pada Sistem *Dust Collector* Sebelum Pemasangan VFD

Siklus	Proses Peleburan	Tekanan Statis (kPa)	Laju Aliran Udara (m ³ /h)	Daya (kW)	Energi (kWh)
Siklus 1	<i>On</i>	1,6	401.308	847,4	804,5
	<i>Idle</i>	0,19	436.155	821,2	239,2
Siklus 2	<i>On</i>	1,58	408.387	852,6	732,7
	<i>Idle</i>	0,2	433.095	827,3	201,3
Siklus 3	<i>On</i>	1,63	398.191	856,8	753,3
	<i>Idle</i>	0,18	440.219	804,3	171,8
Siklus 4	<i>On</i>	1,53	394.613	846,9	671,5
	<i>Idle</i>	0,17	426.345	790,9	210,9
Siklus 5	<i>On</i>	1,51	391.966	845,8	738
	<i>Idle</i>	0,17	423.449	809,2	223,9
Siklus 6	<i>On</i>	1,59	390.440	872,6	775,6
	<i>Idle</i>	0,17	434.204	828,7	314,6
Siklus 7	<i>On</i>	1,55	395.442	853,2	702,3
	<i>Idle</i>	0,18	429.542	807,9	355,5
Siklus 8	<i>On</i>	1,44	377.497	869,9	636,1
	<i>Idle</i>	0,16	413.945	817,3	374,8
Siklus 9	<i>On</i>	1,63	395.445	866,4	1116,5
	<i>Idle</i>	0,17	440.208	814,3	263,1
Siklus 10	<i>On</i>	1,46	379.008	882	611,9
	<i>Idle</i>	0,16	416.852	795,4	336,2
Siklus 11	<i>On</i>	1,43	378.181	845,6	634,3
	<i>Idle</i>	0,16	411.470	796,3	297,1
Siklus 12	<i>On</i>	1,53	376.928	848,7	823,1
	<i>Idle</i>	0,16	426.195	791	232,1
Siklus 13	<i>On</i>	1,48	379.821	838,3	693,8
	<i>Idle</i>	0,28	419.093	785,9	257,4
Siklus 14	<i>On</i>	1,55	369.638	837	826,2
	<i>Idle</i>	0,16	429.492	792,5	229,6
Siklus 15	<i>On</i>	1,61	391.898	822,6	931,8
	<i>Idle</i>	0,17	437.403	784,7	315
Siklus 16	<i>On</i>	1,47	371.563	816,4	707,4
	<i>Idle</i>	0,16	418.176	778,5	255,9
Siklus 17	<i>On</i>	1,45	371.294	832,2	716,2
	<i>Idle</i>	0,15	414.966	797,2	243,6
Siklus 18	<i>On</i>	1,53	383.360	829,5	699,3
	<i>Idle</i>	0,16	426.047	805,2	245,6

Tabel 3. Hasil Pengukuran pada Sistem *Dust Collector* Setelah Pemasangan VFD

Siklus	Proses Peleburan	Tekanan Statis (kPa)	Laju Aliran Udara (m ³ /h)	Daya (kW)	Energi (kWh)
Siklus 1	<i>On</i>	1,53	426.189	783,0	965,7
	<i>Idle</i>	0,20	153.703	36,8	8,6
Siklus 2	<i>On</i>	1,53	426.107	779,3	753,3
	<i>Idle</i>	0,21	157.404	39,5	6,6
Siklus 3	<i>On</i>	1,50	422.017	758,9	758,9
	<i>Idle</i>	0,24	168.460	50,3	10,1
Siklus 4	<i>On</i>	1,49	421.150	752,9	715,3
	<i>Idle</i>	0,23	162.868	45,5	7,6
Siklus 5	<i>On</i>	1,48	419.249	744,3	756,7
	<i>Idle</i>	0,19	150.941	34,5	5,8
Siklus 6	<i>On</i>	1,54	427.097	784,5	640,7
	<i>Idle</i>	0,30	186.129	67,4	18,0
Siklus 7	<i>On</i>	1,46	415.578	726,8	690,4
	<i>Idle</i>	0,20	153.875	36,6	9,2
Siklus 8	<i>On</i>	1,51	423.543	768,5	678,9
	<i>Idle</i>	0,20	152.421	35,5	8,3
Siklus 9	<i>On</i>	1,46	416.560	730,2	657,2
	<i>Idle</i>	0,20	152.781	36,0	7,8
Siklus 10	<i>On</i>	1,48	419.560	744,9	806,9
	<i>Idle</i>	0,20	153.923	37,0	8,6
Siklus 11	<i>On</i>	1,48	419.700	745,5	770,4
	<i>Idle</i>	0,19	150.401	34,1	9,7
Siklus 12	<i>On</i>	1,46	416.307	728,3	801,1
	<i>Idle</i>	0,20	153.855	36,8	11,7
Siklus 13	<i>On</i>	1,46	416.534	729,0	656,1
	<i>Idle</i>	0,19	150.496	34,2	8,0
Siklus 14	<i>On</i>	1,48	418.788	741,3	691,9
	<i>Idle</i>	0,20	152.709	35,8	9,5
Siklus 15	<i>On</i>	1,49	420.956	752,5	739,9
	<i>Idle</i>	0,22	162.889	44,0	9,5
Siklus 16	<i>On</i>	1,49	420.979	751,5	701,4
	<i>Idle</i>	0,20	153.831	36,5	9,1
Siklus 17	<i>On</i>	1,47	417.767	736,1	723,9
	<i>Idle</i>	0,20	155.934	38,0	10,8
Siklus 18	<i>On</i>	1,56	429.744	800,0	853,3
	<i>Idle</i>	0,22	160.523	42,3	11,3

Terdapat 18 siklus dalam satu batch proses peleburan, dimana dalam satu siklus terdapat dua kondisi operasi yaitu *on* dan *idle*. Kondisi *idle* pada Tabel 3 adalah kondisi dimana VFD bekerja menurunkan kecepatan motor sehingga laju aliran udara berkurang sesuai kebutuhan, perubahan ini juga mengakibatkan konsumsi daya dan energi juga berkurang dibandingkan sebelum pemasangan VFD seperti yang ditampilkan pada Tabel 2.

Penentuan *Energy Baseline*

Berdasarkan data yang diperoleh dari hasil pengukuran pada Tabel 2, maka dapat ditentukan variabel-variabel mana yang memiliki korelasi paling baik dengan konsumsi energi motor *fan dust collector*. *Baseline* energi dari motor *fan dust collector* bertujuan untuk menjadi acuan pembandingan dalam menghitung penghematan energi setelah dilakukan implementasi penghematan energi. Perhitungan *baseline* energi dilakukan dari data konsumsi energi listrik dan data variabel yang mempengaruhinya. Kemudian data tersebut dimasukkan dan dianalisis dengan

perangkat lunak *RETScreen Expert* menggunakan metode regresi linier seperti yang ditunjukkan pada gambar 3. Variabel yang dapat dijadikan sebagai baseline energi adalah yang memenuhi persyaratan IPMVP (*International Performance Measurement and Verification Protocol*) melalui uji statistik. Pada motor *fan dust collector* ini, variabel yang mempengaruhi konsumsi energi ditentukan dari hasil perhitungan regresi linier.

Period	Begin	End	Duration Days	Electricity kWh	Volume Airflow rate m³/h
1	2023-09-08	2023-09-08	1	25.049	518.778
2	2023-09-09	2023-09-09	1	22.416	489.016
3	2023-09-10	2023-09-10	1	22.302	453.753
4	2023-09-11	2023-09-11	1	21.178	435.959
5	2023-09-12	2023-09-12	1	23.086	472.747
6	2023-09-13	2023-09-13	1	26.165	538.092
7	2023-09-14	2023-09-14	1	25.387	529.420
8	2023-09-15	2023-09-15	1	24.862	495.779
9	2023-09-16	2023-09-16	1	33.110	673.996
10	2023-09-17	2023-09-17	1	22.754	464.892
11	2023-09-18	2023-09-18	1	22.354	453.972
12	2023-09-19	2023-09-19	1	25.325	504.787
13	2023-09-20	2023-09-20	1	22.829	462.546
14	2023-09-21	2023-09-21	1	25.539	498.486
15	2023-09-22	2023-09-22	1	29.923	612.581
16	2023-09-23	2023-09-23	1	23.119	461.413
17	2023-09-24	2023-09-24	1	23.035	459.362
18	2023-09-25	2023-09-25	1	22.678	460.771
19	2023-09-26	2023-09-26	1	28.217	636.543
20	2023-09-27	2023-09-27	1	23.777	506.850
21	2023-09-28	2023-09-28	1	22.301	472.588
22	2023-09-29	2023-09-29	1	26.710	576.275
23	2023-09-30	2023-09-30	1	25.565	570.135
24	2023-10-01	2023-10-01	1	0	0
25	2023-10-02	2023-10-02	1	0	0
26	2023-10-03	2023-10-03	1	0	0
27	2023-10-04	2023-10-04	1	0	0
28	2023-10-05	2023-10-05	1	0	0
29	2023-10-06	2023-10-06	1	0	0
30	2023-10-07	2023-10-07	1	0	0
31	2023-10-08	2023-10-08	1	23.382	561.497
32	2023-10-09	2023-10-09	1	18.237	438.137
33	2023-10-10	2023-10-10	1	18.455	455.709
34	2023-10-11	2023-10-11	1	17.349	477.238

Gambar 3. Data input pada perangkat lunak RETScreen Expert

Dari hasil analisis data yang sudah dimasukkan kedalam perangkat lunak RETScreen Expert, persamaan *energy baseline* dengan faktor yang mempengaruhi konsumsi energi adalah volume *airflow rate* adalah sebagai berikut :

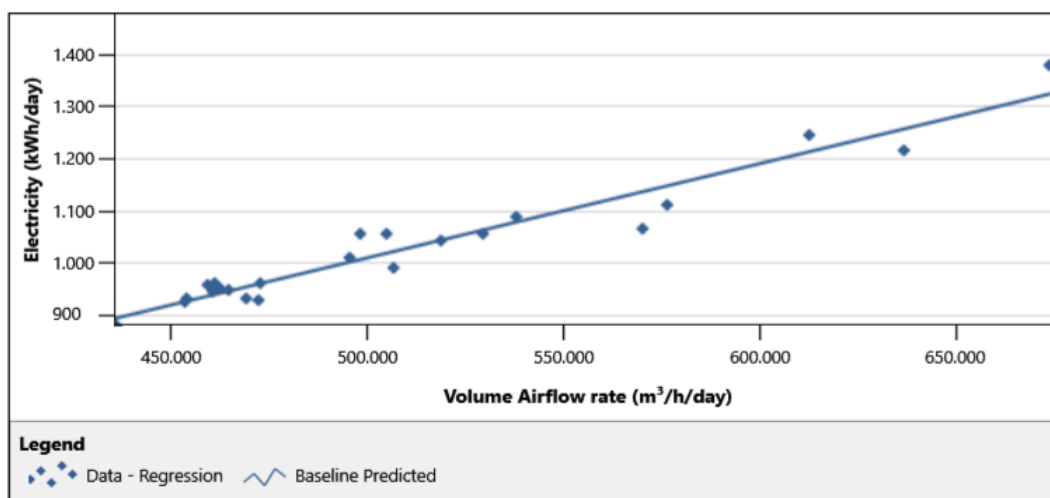
$$Y = 0,0433 * X + 2.590,3 \quad (5)$$

Keterangan :

Y: *Dependent Variable*, Energi Listrik (kWh)

X: *Independent Variable*, Volume Airflow rate (m³/h)

Grafik regresi linier yang menggambarkan hubungan antara konsumsi energi dan volume *airflow rate* motor *fan dust collector* dapat dilihat pada Gambar 4. Beberapa parameter selain nilai R² yang menjadi prasyarat IPMVP dalam penentuan *energy baseline* dapat dilihat pada Tabel 2.

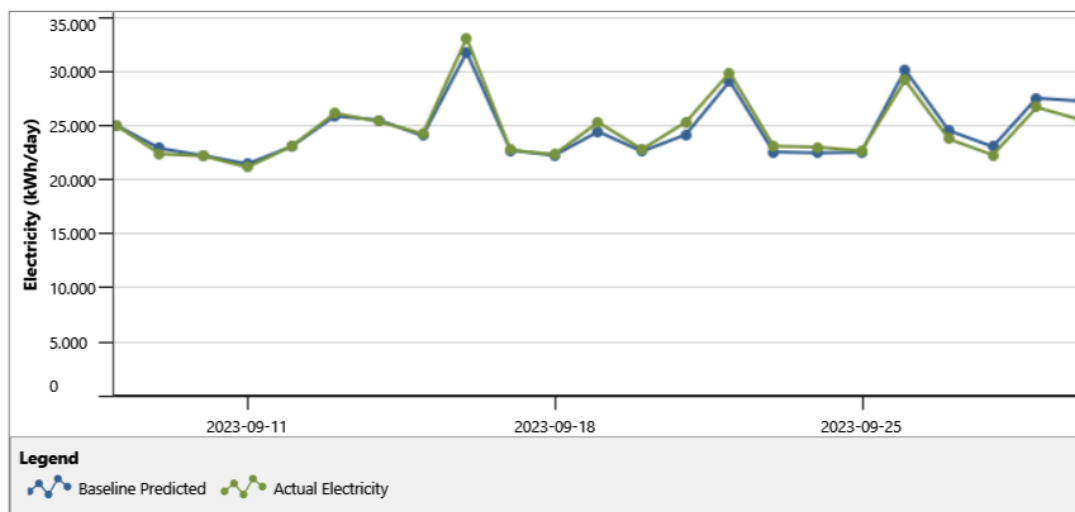


Gambar 4. Grafik Regresi linier Konsumsi Energi dan Volume Airflow rate

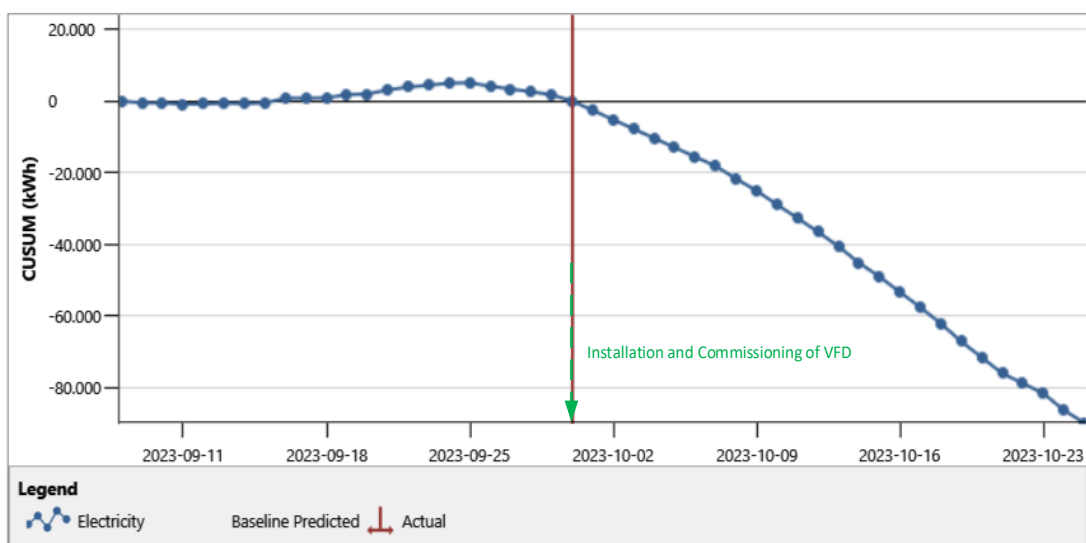
Tabel 2. Model Summary Energy Baseline

Model Summary	Baseline	Status	IPMVP
Intercept <i>t stat</i>	2,06	Pass	T. stats > 2
Slope <i>t stat</i>	17,78	Pass	T. stats > 2
R^2	0,93	Pass	$R^2 > 0,75$
Cvrmse	0,03	Pass	Cvrmse < 0,2

Hasil uji pemodelan *energy baseline* pada Gambar 4 dan Tabel 2 menunjukkan semua parameter sudah memenuhi persyaratan IPMVP. Sehingga model persamaan ini memenuhi persyaratan untuk bisa digunakan sebagai *energy baseline*. Selain itu, grafik garis pada Gambar 5. Menunjukkan prediksi *baseline* konsumsi energi listrik dengan menggunakan persamaan regresi (9) sesuai dengan konsumsi energi aktual jika dibandingkan secara bersamaan.

Gambar 5. Grafik garis yang menunjukkan prediksi *baseline* terhadap konsumsi energi aktual

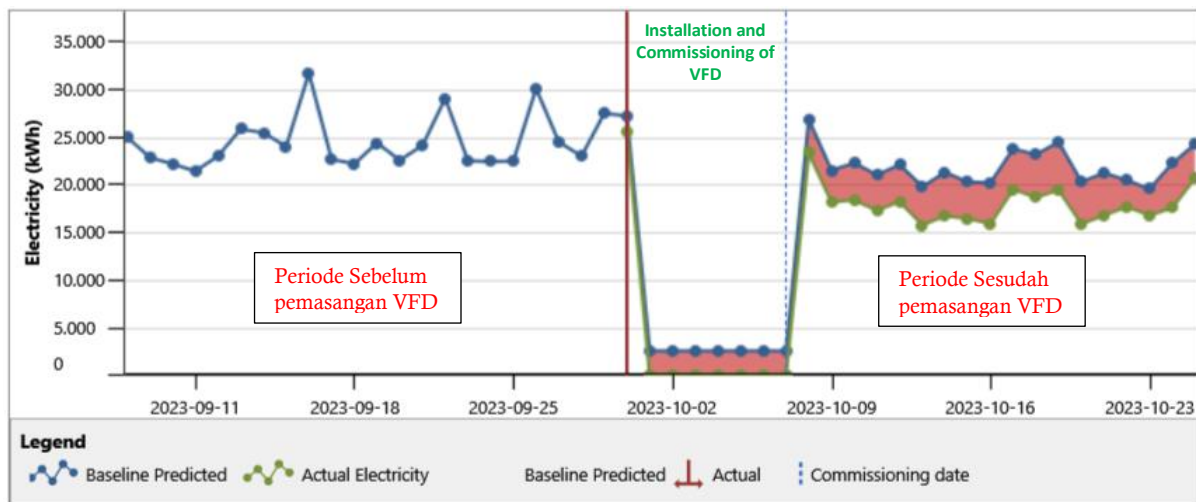
Nilai R^2 dari persamaan regresi *baseline* energi adalah 0,93 yang merupakan periode sebelum dilakukan implementasi pemasangan VFD. CUSUM (*Cumulative SUM*) digunakan untuk membandingkan konsumsi energi periode berikutnya dengan prediksi konsumsi energi, yang menunjukkan bahwa terdapat akumulasi pengurangan konsumsi energi dari motor *fan dust collector* sejak dilakukan pemasangan VFD seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Berikut:



Gambar 6. Grafik CUSUM penghematan energi setelah pemasangan VFD

Selisih antara konsumsi energi aktual dan prediksi konsumsi energi telah dihitung pada setiap periode harian kemudian menambahkannya. Total CUSUM dari semua selisih penggunaan energi disebut juga total kumulatif penghematan energi. Hal ini menggambarkan akumulasi penurunan konsumsi energi ketika dibandingkan dengan *baseline*. Nilai CUSUM dimulai di angka 0 berada pada periode pemasangan dan komisioning dari VFD. Ini adalah hasil dari persamaan *baseline* (18) untuk membuat prediksi penggunaan energi aktual untuk mendapatkan kinerja energi yang lebih baik dari prediksi *baseline*. *Measurement and Verivication* (M&V) menjadi prasyarat untuk mengukur kinerja energi dari setiap proyek efisiensi energi. Penghematan energi dari pemasangan VFD dapat dihitung setelah periode *baseline* teridentifikasi untuk menentukan persamaan regresi linier antara energi yang dikonsumsi dan faktor yang mempengaruhinya. Persamaan (18) tersebut kemudian digunakan untuk menghitung prediksi konsumsi energi dan membandingkannya dengan konsumsi energi aktual setelah dilakukan implementasi pemasangan VFD.

Perbedaan antara prediksi konsumsi energi dan konsumsi energi aktual menjadi nilai penghematan energi yang didapatkan, seperti yang ditunjukkan grafik M&V *RETScrenn* pada gambar 7 berikut.



Gambar 7. Grafik M&V *RETScreen Expert* yang menunjukkan penghematan energi setelah implementasi pemasangan VFD

Gambar 7 diatas pada bagian pertama (sebelum garis merah tegak lurus) menunjukkan konsumsi energi pada periode sebelum dilakukan implementasi pemasangan VFD, sedangkan bagian berikutnya menunjukkan kombinasi antara konsumsi energi prediksi dan konsumsi energi aktual setelah dilakukan implementasi pemasangan VFD, dimana konsumsi energi aktual (garis warna hijau) menunjukkan lebih rendah dibandingkan konsumsi energi prediksi. Pada Gambar 7, gambar berwarna merah yang terletak diantara garis biru dan hijau merupakan nilai penghematan energi yang dihasilkan dari selisih antara konsumsi energi prediksi (garis warna biru) dan konsumsi energi aktual (garis warna hijau). Nilai penghematan energi dalam beberapa hari setelah pemasangan VFD dapat dilihat pada Tabel 3 berikut:

Tabel 4. CUSUM Penghematan energi harian setelah pemasangan VFD

Tanggal	Penghematan Energi (kWh)	CUSUM (kWh)
08/10/2023	3.537	3.537
09/10/2023	3.338	6.875
10/10/2023	3.881	10.756
11/10/2023	3.754	14.510
12/10/2023	3.850	18.360
13/10/2023	4.046	22.406
14/10/2023	4.574	26.980
15/10/2023	3.851	30.831
16/10/2023	4.310	35.141
17/10/2023	4.267	39.408
18/10/2023	4.507	43.915
19/10/2023	5.037	48.952
20/10/2023	4.417	53.369
21/10/2023	4.457	57.826
22/10/2023	2.768	60.594
23/10/2023	2.781	63.375
24/10/2023	4.674	68.049
25/10/2023	3.557	71.606

Dari hasil pengukuran selama 18 hari nilai CUSUM penghematan energi yang didapatkan pada Tabel 3 sebesar 71.606 kWh dan penghematan energi rata-rata perhari sebesar 3.978 kWh. Dengan waktu operasi kerja dari motor fan dust collector selama 240 hari, maka penghematan energi yang didapatkan selama satu tahun adalah sebesar 954.733 kWh

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Dari hasil analisis data pengukuran sebelum pemasangan VFD, didapatkan persamaan baseline $Y = 0,0433 * X + 2.590,3$, dimana dengan persamaan tersebut didapatkan data prediksi konsumsi energi rata-rata pertahun setelah pengaturan laju aliran udara sebesar 5.278.793 kWh/tahun. Sedangkan dari data aktual pengukuran setelah pengaturan laju aliran udara dengan VFD didapatkan konsumsi energi rata-rata pertahun sebesar 4.324.240 kWh/tahun. Sehingga penghematan energi yang didapatkan dari selisih antara prediksi konsumsi energi menggunakan persamaan baseline dengan konsumsi energi aktual dalam satu tahun adalah sebesar 954.733 kWh/tahun. Persamaan baseline ini digunakan untuk terus memonitoring hasil penghematan energi yang didapatkan dan untuk memastikan penghematan energi tersebut benar terjadi.

Saran

Untuk mencapai kinerja energi yang optimal, monitoring merupakan aspek yang paling penting, terpasangnya setiap alat ukur yang menjadi parameter perhitungan *energy baseline* dan penghematan energi menjadi suatu kewajiban. Pemeliharaan peralatan ukur untuk menjaga kevalidan sumber data juga menjadi hal yang penting.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih atas kontribusi semua rekan peneliti di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan dukungan Universitas Diponegoro atas terselenggaranya penelitian ini.

REFERENSI

- Al-Zboon, K. K., & Forton, O. T. (2019). Indoor Air Quality in Steel Making Industries. *Environmental Management and Sustainable Development*, 8(1), 147. <https://doi.org/10.5296/emsd.v8i1.14315>
- Alieva, R., & Olimova, N. (2023). Improving the efficiency of dust collectors and modernization of the aspiration system in cotton cleaning plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1142(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1142/1/012107>
- Anisya, L. N., Ashari, M. L., & Dermawan, D. (2014). *Pemanfaatan Limbah Padat Debu EAF Pada Perusahaan Peleburan Baja Sebagai Pengganti Semen Pada Campuran Beton*. 2581, 367–372.
- Backman, J., Kyllönen, V., & Helaakoski, H. (2019). Methods and tools of improving steel manufacturing processes: Current state and future methods. *IFAC-PapersOnLine*, 52(13), 1174–1179. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.355>
- Beaulac, P., Issa, M., Ilinca, A., & Brousseau, J. (2022). Parameters Affecting Dust Collector Efficiency for Pneumatic Conveying: A Review. In *Energies* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. <https://doi.org/10.3390/en15030916>
- Beaulac, P., Issa, M., Ilinca, A., Lepage, R., & Martini, F. (2021). Improving the Energy Efficiency of Cyclone Dust Collectors for Wood Product Factories. *Open Journal of Energy Efficiency*, 10(03), 97–119. <https://doi.org/10.4236/ojee.2021.103007>
- Bhuiyan, Z. (2020). Design analysis of Dust collection system. *Bulk Solids Storage and Handling*, January, 1–31.
- Budiman, W. N. R. A. (2018). *Perecanaan emisi PM 10 pada industri peleburan baja Cilegon - Banten*. 1–124.
- Desmira. (2020). Analisa Alur Tenaga Listrik Transformator Daya Electrical Arc Furnace (EAF) (Study Kasus: PT. Krakatau Steel). *Seminar Nasional Teknologi Informasi, Komunikasi Dan Industri (SNTIKI)*, 2579–5406.
- Efficiency, & Valuation Organization (EVO), (n.d.). (2005). *What is Measurement and Verification (M&V)*. <https://evo-world.org/en/%0Am-v/what-is-m-v>
- Fesharaki, P. J. (2013). Choice of Dust Collectors Based on Energy and Environmental Degradation in Steel Industries. In *International Journal of ISSI* (Vol. 10, Issue 1).
- Ho, C. L., Tang, Y. C., & Chiu, W. C. (2021). The optimal performance of the energy efficiency of a pulse dust collection system towards sustainability. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(22). <https://doi.org/10.3390/app112210941>
- IPMVP Committe. (2002). *International Performance Measurement & Verification Protocol*.
- Jeong, H., & Ra, K. (2022). Investigations of Metal Pollution in Road Dust of Steel Industrial Area and Application of Magnetic Separation. *Sustainability (Switzerland)*, 14(2), 1–12. <https://doi.org/10.3390/su14020919>
- Kemenperin. (2014). *Profil industri baja*. <http://www.kemenperin.go.id/download/7547/Profil-Industri-Baja>
- Khunte, M. (2018). Process Waste Generation and Utilization in Steel Industry. *International Journal of Industrial and Manufacturing Systems Engineering*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.11648/j.ijimse.20180301.11>
- Li, Y., Feng, H., Wang, J., She, X., Wang, G., Zuo, H., & Xue, Q. (2022). Current status of the technology for utilizing difficult-to-treat dust and sludge produced from the steel industry.

- Journal of Cleaner Production*, 367(March), 132909.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132909>
- Magzoub, M. I., Ibrahim, M. H., Nasser, M. S., El-Naas, M. H., & Amani, M. (2020). Utilization of steel-making dust in drilling fluids formulations. *Processes*, 8(5).
<https://doi.org/10.3390/PR8050538>
- Mondol, S. S. (2016). A Review of Steelmaking Technologies. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 5(2), 283–286. <https://doi.org/10.21275/v5i2.nov161103>
- Natural Resources Canada, (n.d.). (2005). *RETScreen*.
- Purba, E., Turinno, S., Kamil, B., Besar, B., Konversi, T., Pengkajian, B., Bppt, T., Kawasan, G., Serpong, P., & Selatan, T. (2022). *Pengukuran dan Verifikasi Kinerja Energi Gedung Pemerintah (Studi Kasus Gedung di DKI Jakarta)*. 21(1), 1–10.
- Qaisar, I., & Zhao, Q. (2022). Energy baseline prediction for buildings: A review. *Results in Control and Optimization*, 7(February), 100129. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2022.100129>
- Sun, W., Zhou, Y., Lv, J., & Wu, J. (2019). Assessment of multi-air emissions: Case of particulate matter (dust), SO₂, NO_x and CO₂ from iron and steel industry of China. *Journal of Cleaner Production*, 232, 350–358. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.400>
- Swords, B., Coyle, E., & Norton, B. (2008). An enterprise energy-information system. *Applied Energy*, 85(1), 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2007.06.009>
- U.S., & Department of Energy, (n.d.). (2006). *Energy Efficiency and Renewable Energy Software Tools*. <https://www.energy.gov/eere/%0Aamo/software-tools>
- Utami, Y., Vinsensia, D., & Nissa, A. (2022). *Forecasting the Sum of New College Students with Linear Regression Approach*. 14(1), 10–15.
- Wang, G., & Han, Z. (2019). Investigation of the accuracy of VFD analog output data and the energy performance of different voltage controls in a VFD-motor-belt-fan system. *Energy and Buildings*, 194, 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.008>
- Wiga Maulana Baihaqi, Melia Dianingrum, K. aswin N. ramadhan. (2019). Regresi linier sederhana untuk memprediksi kunjungan pasien di rumah sakit berdasarkan jenis layanan dan umur pasien. *Simetris*, 10(2), 671–680.
- Wu, B., Li, J., Liu, H., Zhang, Z., Zhou, Y., & Zhao, N. (2012). Energy information integration based on EMS in paper mill. *Applied Energy*, 93, 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.021>
- Yu, Y. (2018). *Research of a New Method for Solving Linear Regression*.
- Zhong, H., & Xiao, Y. (2022). A structure of movable dust collector on the principle of air amplification. *2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computer Applications, ICAICA 2022*, 730–734. <https://doi.org/10.1109/ICAICA54878.2022.9844586>