

Audit Energi pada Dua Produk Kaca Lembaran di sebuah Pabrik Kaca

Hariyo P. S. Pratomo^{1*}, Patrick H. Jonatan¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya 60236, Indonesia

*Penulis korespondensi; E-mail: hariyo_p@petra.ac.id

ABSTRAK

Industri pembuatan kaca tersusun atas empat bagian primer, yaitu: kaca lembaran, kaca khusus, kaca fiber, dan kaca *container*. Pabrik X merupakan sebuah perusahaan besar penghasil kaca lembaran yang menggunakan biaya-biaya energi yang tinggi dalam keseluruhan bagian dari produksinya. Kaca lembaran ini digunakan di otomotif maupun gedung dan perumahan. Perbaikan efisiensi energi di dalam proses produksi merupakan suatu pendekatan penting dalam rangka untuk menurunkan biaya-biaya produksi, yang mana perbaikan efisiensi ini banyak digunakan untuk audit energi di industri. Dalam studi ini, audit energi difokuskan pada konsumsi energi pada motor listrik, pompa, dan kompresor yang digunakan untuk mendukung proses produksi dua produk kaca lembaran di pabrik X, yaitu FL dan GEFL. Konsumsi energi dalam proses produksi kedua kaca lembaran tersebut diukur melalui perhitungan *Energy Efficiency Index* (EEI), dengan tujuan untuk melihat proses produksi yang mana yang mengkonsumsi energi yang tinggi. Selain itu, audit energi juga dilakukan untuk mengukur efisiensi energi pada motor listrik, pompa, dan kompresor. Ditunjukkan bahwa beberapa proses produksi perlu menghemat konsumsi energi secara efektif dan jadwal pengoperasian pompa untuk beberapa proses produksi kaca lembaran perlu diperhatikan.

Kata kunci: Audit energi, EEI, motor listrik, pompa, kompresor.

ABSTRACT

Glass industry is comprised of four primary segments, which are flat glass, specialty glass, fiber glass, and container glass. Company X is a renowned company producing flat glasses for which expend high energy costs in the entire part of their production. These flat glasses are used in automotive as well as in building and housing. Energy efficiency improvement in production process is an important approach in order to reduce production costs in which the efficiency improvement is widely used for energy audit in industry. In this study, the energy audit is focused on energy consumptions on electric motor, pump, and compressor utilized in the production processes of two variants of flat glass, i.e. FL and GEFL. The energy consumption in the production process of those two products were measured through the calculation of the Energy Efficiency Index (EEI), aiming at studying which production process consuming high energy. Besides, the energy audit was also carried out to measure energy efficiency on electric motor, pump, and compressor. It was shown that some production processes need to reduce energy consumption in cost-effective manner and the operating schedule of pump for some production processes of the flat glasses needs to consider.

Keywords: Energy audit, EEI, electric motor, pump, compressor.

PENDAHULUAN

Pertumbuhan yang cepat dari konsumsi energi telah menyebabkan perhatian yang meningkat dari para penentu kebijakan pada perbaikan efisiensi energi, terutama di sektor industri. Efisiensi energi merupakan salah satu dari berbagai solusi yang hampir tidak bisa dihindarkan untuk mendatangkan konsumsi energi yang rendah dalam proses produksi

[Barkhordar et al 2018]. Bahkan sebelum studi dari Barkhordar et al 2018, *International Energy Agency* sampai menegaskan bahwa efisiensi energi ialah “bahan bakar” utama untuk dunia [*International Energy Agency* 2015]. Lebih jauh, studi dari Hrovatin et al. (2016) menggaris bawahi bahwa memperbaiki efisiensi energi secara signifikan telah mampu menciptakan penghematan energi secara global dan selain dapat mengurangi konsumsi energi yang

tinggi, perbaikan efisiensi energi (*energy efficiency improvement*) juga banyak bermanfaat terhadap isu lingkungan.

Pabrik X merupakan salah satu pabrik kaca terkemuka di Indonesia. Bagian utama dari proses produksi di pabrik X ialah *furnace* yang mana bagian ini memberikan konsumsi energi yang tinggi. Bagian utama tersebut memiliki 2 jalur *furnace* dengan rata-rata konsumsi kebutuhan aliran *supply* sebesar 3880.3 m³/jam dan 3985.1 m³/jam untuk *furnace* pertama dan *furnace* kedua, secara berurutan. Konsumsi energi yang tinggi di pabrik X ini menjadi *stimulus* untuk dilakukannya audit energi. Lebih jauh, rekomendasi dari hasil audit energi ini bila diterapkan juga bisa berdampak juga pada peningkatan daya saing perusahaan, selain penurunan biaya pengeluaran produksi produk.

Audit energi di pabrik X difokuskan pada konsumsi energi pada motor listrik, pompa, dan kompresor dalam proses produksi dua kaca lembaran, yaitu kaca lembaran FL dan GEFL. Kedua varian kaca lembaran ini digunakan di gedung dan perumahan maupun otomotif. Selanjutnya, pengukuran konsumsi energi dalam proses produksi untuk kedua kaca lembaran tersebut dilakukan melalui perhitungan *Energy Efficiency Index* (EEI). Hal ini bertujuan untuk melihat bagian proses produksi yang manakah yang mengkonsumsi energi yang tinggi. Pada akhirnya, hal ini bertujuan untuk mengetahui potensi penghematan energi yang dapat diterapkan untuk proses produksi kaca lembaran di pabrik X. Memperhatikan pentingnya efisiensi energi di industri sebagaimana dijelaskan oleh Hrovatin et al. (2016) dan Barkhordar et al (2018), audit energi yang dilakukan juga meliputi pengukuran efisiensi energi dari motor listrik, pompa, dan kompresor.

Secara prinsip, pentingnya EEI di dalam audit energi salah satunya dijelaskan oleh Andersson et al. (2018). Studi ini mengusulkan formulasi EEI untuk proses produksi di industri. Pentingnya EEI juga dijelaskan oleh Rietbergen and Blok (2010) bahwa ketika suatu sistem yang terdiri dari serangkaian proses produksi dikaji maka nilai dari setiap proses bisa dinyatakan dalam suatu nilai EEI yang selanjutnya dapat menghasilkan EEI dari serangkaian proses produksi secara keseluruhan. Terlepas dari itu, Rietbergen and Blok (2010) juga memperkenalkan suatu istilah *Specific Energy Use* (SEC) atau juga dikenal sebagai Konsumsi Energi Spesifik (KES). Secara prinsip, SEC merupakan cara yang mendasar untuk menentukan performa energi dari suatu bagian proses produksi dan dapat juga digunakan sebagai ukuran dari efisiensi energi untuk satu proses secara individu [Rietbergen and Blok 2010].

METODE

Studi ini meliputi tahapan inisiasi dan pelaksanaan. Tahap inisiasi berfokus pada penentuan produk kaca lembaran yang dijadikan sebagai objek

penelitian di pabrik X. Penentuan produk kaca lembaran ini berdasarkan produk kaca yang paling banyak diproduksi selama Februari sampai dengan Maret 2021. Tahap pelaksanaan meliputi pengukuran SEC atau KES, perhitungan EEI, dan pengukuran efisiensi energi pada serangkaian peralatan teknik yang digunakan untuk mendukung proses produksi kedua varian kaca lembaran, yaitu FL dan GEFL.

Sebagai tahap pertama, nilai KES dihitung berdasarkan konsep yang dijelaskan oleh Rietbergen and Blok (2010). KES ini dihitung untuk mencari *line* produksi yang akan diberlakukan audit energi. Setelah nilai KES didapatkan, tahapan berikutnya ialah pemilihan produk kaca lembaran yang akan dikaji. Setelah melakukan pemilihan produk kaca, pengukuran konsumsi energi berbasis EEI dilakukan. Secara prinsip, EEI didefinisikan sebagai rasio dari konsumsi aktual energi dari sektor tertentu terhadap volume produksi dari produk tertentu dan *Best Practice Technologies* (BPT) yang dinyatakan sebagai konsumsi energi untuk memproduksi produk tertentu. Data yang diambil ialah data penggunaan energi yang digunakan pada proses produksi kaca yang dinyatakan dengan konsumsi energi pada pompa dan kompresor, dan data konsumsi energi listrik pada proses produksi kaca di pabrik X. Metode pengukuran yang digunakan untuk mendapatkan efisiensi energi pada pompa meliputi *Traditional Method* dan *Thermodynamic Method*, sebagaimana dijelaskan oleh *Robertson Technology*. Untuk kompresor, metode pengukuran untuk mendapatkan efisiensi energi menggunakan formulasi yang dijelaskan oleh Hsieh et al. (2011).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan KES dilakukan dengan menggunakan persamaan (1), sebagaimana berikut ini. Hasil dari nilai KES ini selanjutnya digunakan untuk menentukan *production line* yang perlu dilakukan audit energi.

$$KES = \frac{\text{konsumsi energi}}{\text{volume produksi}} \quad (1)$$

Nilai KES dari *production line* A1 dan A2 didapatkan berdasarkan konsumsi energi pada setiap *production line* A1 dan A2 di periode 2018 sampai dengan 2019 dan berdasarkan jumlah total produksi (*pull production*) pada *production line* A1 dan A2 di periode 2018 sampai dengan 2019. Dari hasil perhitungan, nilai KES dari *production line* A1 secara berurutan ialah 349.62 kJ/kg dan 349.24 kJ/kg untuk 2018 dan 2019. Sementara itu, nilai KES dari *production line* A2 di 2018 dan 2019 secara berurutan ialah 445.765 kJ/kg dan 445.339 kJ/kg. Terlihat bahwa nilai KES dari *production line* A2 lebih besar daripada nilai KES dari *production line* A1. Oleh karena itu, *production line* A2 dipilih untuk dilakukan audit energi.

Selanjutnya, perhitungan nilai EEI dilakukan untuk produk kaca lembaran FL dan GEFL. Perhitungan nilai EEI ini memerlukan serangkaian data dari *pull production*, besaran konsumsi listrik dari setiap produksi yang disyaratkan untuk memproduksi kedua produk kaca lembaran tersebut, dan besaran konsumsi listrik dari pompa dan kompresor yang dipergunakan dalam proses produksi kaca lembaran FL dan GEFL. Rangkaian data tersebut diambil dari periode Februari sampai dengan Maret 2021. Seluruh data di dalam periode tersebut adalah untuk menyediakan informasi terbaru yang mencerminkan kondisi riil di lapangan. Perhitungan nilai EEI diformulasikan sebagaimana dalam persamaan (2) berikut ini.

$$EEI_{j,x} = \frac{TFEU_{j,x}}{\sum_{i=1}^n P_{i,j} \times BPT_{i,x}} \quad (2)$$

Dalam persamaan (2) tersebut, TFEU ialah penggunaan energi yang digunakan pada sektor produksi kaca x (Joules/tahun). P ialah volume produksi dari produk kaca ke-i pada divisi j (ton/tahun) dan BPT ialah *Best Practice Technology* untuk proses produksi produk kaca ke-i (Joules/ton). Selanjutnya, n ialah jumlah produk kaca yang dianalisa, j ialah pabrik atau perusahaan, x ialah divisi di dalam pabrik (misal, divisi *flat glass*), dan i ialah proses produksi (step) ke-i.

Hasil perhitungan EEI dari produk kaca lembaran FL dan GEFL menurut persamaan (2) ditabelkan dalam Tabel 1 dan Tabel 2, secara berurutan. Kedua tabel tersebut menjelaskan rangkain proses produksi dari kedua produk kaca lembaran beserta Best Practice Technologies (BPT) yang dinyatakan dalam satuan kWh dan Joules/ton. Untuk kedua produk kaca lembaran tersebut, terlihat bahwa nilai EEI terbesar ialah untuk proses produksi *batch mixing*.

Perhitungan efisiensi energi dari kompresor membutuhkan data *flow rate* selama proses produksi. Dengan menggunakan *volumetric method* sebagaimana dijelaskan oleh Hsieh et al. (2011), *volumetric efficiency* h_{vol} dinyatakan menurut persamaan (3). Dalam persamaan (3), laju aliran volumetrik ideal q_{vt} dapat dicari dengan menggunakan persamaan (4).

$$\eta_{vol} = \frac{q_v}{q_{vt}} \quad (3)$$

$$q_{vt} = C_\varphi C_A \omega \psi D^3 \quad (4)$$

Dalam persamaan (3) di atas, q_v ialah laju aliran volumetrik aktual (m^3/s). Selanjutnya, sebagaimana dalam persamaan (4) C_φ ialah *coefficient of the twist angle* dan C_A ialah *coefficient of the usage area*. Lebih jauh, ω ialah *rotational speed* (degree/s), ψ ialah *aspect ratio*, dan D ialah diameter dari *male screw compressor* (m). Pabrik X menggunakan *screw compressor* untuk menunjang proses produksi kaca lembaran.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa rerata dari *volumetric efficiency* h_{vol} dari kompresor ketika digunakan pada saat proses produksi kaca lembaran FL pada Februari 2021 ialah 90.27%. Sementara itu, rerata dari *volumetric efficiency* h_{vol} dari kompresor untuk proses produksi kaca lembaran FL pada Maret 2021 ialah 93.58%. Sebagai perbandingan, rerata dari *volumetric efficiency* h_{vol} dari kompresor untuk proses produksi kaca lembaran GEFL pada Februari 2021 ialah 90.63%.

Perhitungan efisiensi energi pada motor listrik mensyaratkan pengukuran rata-rata konsumsi listrik dari pompa pada saat kondisi riil atau sedang diproduksi. Perhitungan efisiensi energi motor listrik pada pompa diambil dari data produksi produk kaca lembaran FL dan GEFL selama periode Februari sampai dengan Maret 2021. Perhitungan efisiensi energi motor listrik dari pompa memerlukan daya motor listrik. Daya motor listrik dihitung berdasarkan persamaan (5) sementara efisiensi energi dari motor listrik dihitung menurut persamaan (6).

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

$$\eta = \frac{0.7457 \cdot H_p \cdot load}{P_i} \quad (6)$$

Dalam kedua persamaan di atas, V ialah voltase dari motor listrik, I ialah arus listrik dari motor listrik, $\cos \varphi$ ialah faktor daya, η ialah efisiensi dari motor listrik, H_p ialah daya pada motor listrik, *load* ialah beban pada motor listrik, dan P_i ialah *power input*. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa

Tabel 1. Nilai EEI dari produk kaca lembaran FL

Nilai	Melting	Metal Bath and Lehr	Cutting 1	Cutting 2	Batch Mixing	Stopsol CVD
BPT (kWh)	224298	475604	132693	46023	32327	242186
BPT (Joules/ton)	642302511.4	672168392	329352919.1	1376666682.5	107374810.5	571518316.8
EEI	0.69	0.67	1.36	3.25	4.17	0.78

Tabel 2. Nilai EEI dari produk kaca lembaran GEFL

Nilai	Melting	Metal Bath and Lehr	Cutting 1	Cutting 2	Batch Mixing	Stopsol CVD
BPT (kWh)	130041	237138	78325	28714	21481	115144
BPT (Joules/ton)	611758805.9	604830038.4	341205640.9	148868048.2	120825995.8	483952036.8
EEI	0.61	0.62	1.102	2.53	3.11	0.78

efisiensi energi rata-rata dari produksi kaca lembaran FL dan GEFL ialah 76.32%, 73.82%, 83.32% untuk motor listrik 1, motor listrik 2, dan motor listrik 3; secara berurutan.

Perhitungan efisiensi energi dari pompa dilakukan dengan menggunakan *thermodynamic method*, sebagaimana dijelaskan oleh *Robertson Technology*. Data-data yang diperlukan meliputi tekanan dan temperatur di *suction* dan *discharge*. Secara matematis, *thermodynamic method* dinyatakan menurut persamaan (7):

$$\eta_p = \frac{E_H}{E_M} \quad (7)$$

dimana E_H ialah energi hidrolis per satuan massa fluida dan E_M ialah *mechanical energy* per satuan massa. Selanjutnya, E_H dan E_M didefinisikan menurut persamaan (8) dan persamaan (9).

$$E_H = \frac{dP}{\rho} \quad (8)$$

$$E_M = a \cdot dP + C_p \cdot dT \quad (9)$$

Dalam kedua persamaan di atas, dP ialah perbedaan tekanan di *suction* dan *discharge* (Pa) sementara dT ialah perbedaan temperatur di *suction* dan *discharge* (K). Kemudian, C_p ialah kapasitas *specific heat* pada saat tekanan konstan atau perubahan entalpi dengan temperatur pada saat tekanan konstan ($J/kg^\circ C$), a ialah koefisien *isothermal* atau perubahan entalpi dengan tekanan pada saat temperatur konstan ($\times 10^{-3} m^3/kg$), dan ρ ialah densitas fluida (kg/m^3). Dengan menggunakan persamaan (7) – (9), ditunjukkan bahwa efisiensi energi dari pompa 1 dan pompa 2 secara berurutan sebesar 23.94% dan 22.99%. Kedua nilai ini bisa diperbaiki dengan mempertimbangkan jadwal pengoperasian dari kedua pompa tersebut untuk menunjang proses produksi kaca lembaran. Selain itu, motor listrik yang digunakan sebagai *driver* pompa bisa dipertimbangkan untuk menggunakan motor listrik yang menggunakan *variable speed driver* (VSD) untuk menghemat konsumsi energi.

KESIMPULAN

Audit energi di pabrik X yang telah dilakukan berfokus pada konsumsi energi pada motor listrik, pompa, dan kompresor yang digunakan untuk mendukung proses produksi dua produk kaca lembaran di pabrik X, yaitu FL dan GEFL. Studi ini telah mengukur konsumsi energi dalam proses produksi kedua kaca lembaran tersebut dengan menggunakan *Energy Efficiency Index* (EEI). Hasil studi berhasil menunjukkan proses produksi mana yang mengkonsumsi energi yang tinggi yang ditunjukkan oleh nilai EEI. Terlihat bahwa nilai EEI

dari produk kaca lembaran FL adalah lebih baik daripada nilai EEI dari produk kaca lembaran GEFL. Lebih jauh, proses produksi *Melting* dan *Metal Bath and Lehr* menghasilkan nilai EEI yang paling rendah bila dibandingkan dengan proses-proses produksi lainnya untuk kedua produk kaca lembaran tersebut. Hal ini menunjukkan potensi penghematan energi untuk proses-proses produksi lainnya. Selain itu, audit energi juga dilakukan untuk mengukur efisiensi energi pada motor listrik, pompa, dan kompresor. Sebagai kesimpulan, beberapa proses produksi perlu menghemat konsumsi energi secara efektif dan jadwal pengoperasian pompa untuk beberapa proses produksi kaca lembaran perlu diperhatikan untuk menghemat konsumsi energi listrik. Untuk studi lanjutan, audit energi bisa dikembangkan untuk serangkaian produk-produk dari pabrik X untuk mengkaji produk yang mana yang memiliki konsumsi energi paling tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Andersson, E., Arfwidson, O., Thollander, P., 2018, "Benchmarking energy performance of industrial small and medium-sized enterprises using an energy efficiency index: results based on an energy audit policy program", *Journal of Cleaner Production*, 182, pp. 883-895.
- [2] Barkhordar, Z. A., Fakouriyani, S., Sheykha, S., 2018, "The role of energy subsidy reform in energy efficiency enhancement: Lessons learnt and future potential for Iranian industries", *Journal of Cleaner Production*, 197, 1, pp. 542-550.
- [3] Hrovatin, N., Dol, N., Zori, J., 2016, "Factors impacting investments in energy efficiency and clean technologies: empirical evidence from Slovenian manufacturing firms", *Journal of Cleaner Production*, 127, pp. 475-486.
- [4] Hsieh, S., Shih, Y., Hsieh, W., Lin, F., Tsai, M., 2011, "Performance analysis of screw compressors – numerical simulation and experimental verification", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 226, 4, pp. 968-980
- [5] IEA, I., 2015, *Energy efficiency market report*. Paris: International Energy Agency.
- [6] Rietbergen, M. G., Blok, K., 2010, "Setting SMART targets for industrial energy use and industrial energy efficiency", *Energy Policy*, 38, pp. 4339-4354.
- [7] Robertson Technology, *Pump performance monitoring and testing—Condition Monitoring—Predictive maintenance*.