



Mendesain Ulang *Fixed Mouth Nozzle* Untuk Efisiensi Energi Udara Bertekanan Pada Proses Blowing Botol Pet 1500 Ml

Made Dwi Elistina¹, I Ketut Sukaya²

¹Prodi Kimia, Universitas Udayana

²Prodi Teknik Elektro, Institut Nasional Malang

E-mail: kadek.elistina@danone.com¹, ketut.sukaya@danone.com²

Article Info

Article history:

Received October 12, 2025

Revised October 17, 2025

Accepted October 21, 2025

Keywords:

Energy Efficiency, Fixed Mouth Nozzle, Green Manufacturing

ABSTRACT

Compressed air is one of the most critical forms of secondary energy in the production process of PET (Polyethylene Terephthalate) bottles within the bottled drinking water industry. However, an inefficient compressed air system can result in substantial energy wastage. This study aims to improve energy efficiency in the blowing machine by redesigning the fixed mouth nozzle on the 1500 ml SPS production line. The main issue identified is the gap between the nozzle tip and the preform mouth, which causes pressurized air leakage of about 22–24 bar. The modification was carried out by reshaping the nozzle mouth to ensure a tighter seal with the preform, allowing the compressed air to be utilized optimally. The research employed a quantitative experimental approach by measuring energy consumption and air pressure before and after the modification. The results indicate a reduction in operating pressure from 23 bar to 20.5 bar, achieving energy savings of 13,975.19 kWh within a four-month period, equivalent to a cost reduction of IDR 20,962,785 over the same duration. This design innovation demonstrates that a simple improvement in mechanical components can deliver a significant impact on energy savings and support the implementation of green manufacturing principles in the manufacturing industry.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received October 12, 2025

Revised October 17, 2025

Accepted October 21, 2025

Keywords:

Efisiensi Energi, Fixed Mouth Nozzle, Green Manufacturing

ABSTRAK

Udara bertekanan merupakan salah satu bentuk energi sekunder yang sangat penting dalam proses produksi botol PET (Polyethylene Terephthalate) di industri air minum dalam kemasan. Namun, sistem udara tekan yang tidak efisien dapat menyebabkan pemborosan energi dalam jumlah besar. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi pada mesin blowing dengan melakukan desain ulang fixed mouth nozzle pada lini produksi SPS berkapasitas 1500 ml. Permasalahan utama yang ditemukan adalah adanya celah antara ujung nozzle dan mulut preform yang menyebabkan kebocoran udara bertekanan sebesar 22–24 bar. Modifikasi dilakukan dengan mengubah bentuk mulut nozzle agar dapat menutup rapat mulut preform sehingga seluruh tekanan udara termanfaatkan optimal. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dengan mengukur konsumsi energi dan tekanan udara sebelum dan sesudah modifikasi. Hasil penelitian menunjukkan adanya penurunan tekanan kerja dari 23 bar menjadi 20,5 bar dengan efisiensi energi sebesar 13.975,19 kWh dalam periode triwulan, yang setara dengan penghematan biaya sebesar Rp 20.962.785. Inovasi desain ini membuktikan bahwa perbaikan sederhana pada sistem mekanik



mampu memberikan dampak signifikan terhadap penghematan energi dan mendukung penerapan prinsip green manufacturing di industri manufaktur.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Made Dwi Elistina
Universitas Udayana
kadek.elistina@danone.com

PENDAHULUAN

Pada industri air minum dalam kemasan (AMDK), udara bertekanan termasuk pengguna energi sekunder terbesar dan sangat menentukan mutu hasil proses, terutama pada *Stretch Blow Molding* (SBM) untuk membentuk botol PET dari preform. Pada praktiknya, *High-Pressure (HP) Compressor* memasok udara 21–24 bar untuk memastikan dinding botol terbentuk merata sesuai spesifikasi ketebalan dan kekuatan mekanik. Hal ini karena kompresor menyerap daya listrik besar, maka efisiensi pemanfaatan udara tekan menjadi variabel kunci untuk menekan OPEX dan intensitas energi pabrik (Santoso & Nugraha, 2022). Literatur efisiensi energi menegaskan bahwa *compressed air system* kerap menyumbang 10–30% konsumsi listrik pabrik, dan pemborosan sering terjadi akibat kebocoran (*leakage*), *pressure drop*, dan *mismatch* antara suplai–permintaan. Pada proses SBM, profil beban udara bersifat *intermittent–peaky* mengikuti siklus pemanasan, stretching, dan blowing. Ketika suplai tidak dikelola presisi atau terdapat kebocoran pada antarmuka *nozzle–preform*, pabrikan cenderung menaikkan tekanan operasi untuk mengejar mutu, yang ironisnya memperbesar konsumsi listrik kompresor.

Temuan lapangan di lini SPS 1500 ml PT Tirta Investama menunjukkan kebocoran pada area *nozzle blowing*–mulut preform akibat geometri mulut *nozzle* yang tidak menutup rapat. Kebocoran ini menyebabkan porsi udara bertekanan tidak mengerjakan kerja pembentukan (*useful work*) tetapi hilang ke lingkungan, sehingga operator terpaksa mengatur setpoint tekanan lebih tinggi untuk menjaga kualitas. Pola ini sejalan dengan diagnosis sistemik pada pabrik yang belum mengoptimalkan integritas antarmuka pneumatik. Menghadapi masalah tersebut, pendekatan *eco-efficiency* merekomendasikan pencegahan pemborosan di hulu melalui perbaikan desain mekanik sederhana namun berdampak besar, alih-alih hanya menambah suplai energi. Dalam konteks ini, desain ulang mulut *nozzle* agar menutup sempurna ke mulut *preform* merupakan intervensi teknis hulu yang langsung menarget sumber kebocoran, bukan gejala hilirnya (kenaikan tekanan). Strategi ini konsisten dengan prinsip *cleaner production* dan *green manufacturing* (UNEP, 2022).

Desain baru yang dinamakan *fixed mouth nozzle* diarahkan untuk mencapai *tight sealing* pada antarmuka *nozzle–preform* sehingga aliran udara bertekanan (22–24 bar) termanfaatkan maksimum pada fase pembentukan botol. Dengan mengurangi kebocoran, kebutuhan *setpoint* tekanan dapat diturunkan sambil mempertahankan atau meningkatkan



kualitas produk. Teori dasar sistem pneumatik menyatakan bahwa penurunan tekanan suplai yang ditetapkan kompresor akan menurunkan beban daya kompresor secara linier–kuadratik, bergantung pada kurva performa mesin. Dari perspektif otomasi dan keandalan proses, pengendalian dan pemantauan parameter utama (tekanan, waktu siklus, dan konsumsi energi) idealnya diintegrasikan ke PLC–HMI atau sistem pengawasan setara agar perubahan desain dapat ditopang monitoring *real-time*, *event logging*, dan *traceability* kualitas. Integrasi data proses–energi ini sejalan dengan Industri 4.0 dan memungkinkan *closed-loop optimization* pasca–retrofit (Jafarian, 2022). Secara metodologis, evaluasi *before–after* atas perubahan desain mekanik merupakan desain riset yang lazim untuk menilai kausalitas langsung antara intervensi dan hasil kinerja. Pengukuran tekanan operasi, durasi siklus *blowing*, dan kWh kompresor sebelum–sesudah modifikasi memberi dasar *Measurement & Verification* (M&V) yang kuat. Praktik ini selaras dengan ISO 50001 (*Operational Control & Performance Evaluation*) dan IPMVP.

Hasil awal menunjukkan penurunan tekanan kerja dari 23 bar ke 20,5 bar disertai efisiensi energi 13.975,19 kWh (Maret–Juni 2025). Secara teori dan empiris, penurunan tekanan *setpoint* mengurangi kerja kompresor per unit waktu sehingga konsumsi listrik ikut menurun, apalagi jika kebocoran antarmuka berkurang signifikan. Hal ini menegaskan bahwa perbaikan geometri antarmuka merupakan *low-cost, high-impact measure* dalam manajemen energi utilitas. Di luar aspek energi, penurunan tekanan dan kebocoran juga mengurangi keausan komponen (*seal, valve, and seating*) serta menstabilkan mutu (ketebalan dinding, distribusi orientasi) karena aliran udara lebih konsisten. Literatur *smart factory energy management* menekankan bahwa stabilitas proses sering menjadi *co-benefit* dari intervensi efisiensi energi, yang pada gilirannya menurunkan biaya *maintenance* dan meningkatkan OEE (Lestari, 2020).

Secara strategis, temuan ini memperlihatkan bahwa perbaikan mekanik sederhana yang ditopang pengukuran terverifikasi dapat memberikan penghematan biaya signifikan dan memperkuat pencapaian *green manufacturing* (SDG 12). Dengan mengurangi energi yang tidak perlu, intensitas emisi tak langsung (Scope 2) juga menurun. Karena itu, *Fixed Mouth Nozzle* layak diposisikan sebagai *best-practice retrofit* yang replikatif lintas lini SBM, sekaligus jembatan menuju otomasi berbasis data sesuai agenda *Industry 4.0* (UNEP, 2022). Penelitian ini bertujuan untuk mendesain ulang *fixed mouth nozzle* pada mesin *blowing* 1500 ml agar meminimalkan kebocoran udara bertekanan, menganalisis dampak perubahan desain terhadap efisiensi energi udara tekan dan konsumsi listrik kompresor, menghitung nilai penghematan energi dan biaya operasional setelah penerapan desain baru, serta menilai kontribusi inovasi ini terhadap penerapan *green manufacturing* di lingkungan industri manufaktur.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif berbasis pendekatan *before–after*, yang merupakan metode evaluasi teknis paling umum digunakan dalam pengujian efisiensi retrofit proses manufaktur (Sudarmawan, et al. et al. 2020). Pendekatan ini dipilih karena relevan untuk mengukur pengaruh langsung dari modifikasi teknis terhadap



kinerja energi, tanpa memerlukan model prediktif kompleks atau pengujian multi-variabel. Objek penelitian difokuskan pada lini blowing SPS 1500 ml di PT Tirta Investama Pabrik Mambal, yang mewakili salah satu titik konsumsi energi terbesar dalam sistem utilitas udara tekan. Tahap pra-implementasi dilakukan dengan pengukuran baseline berupa tekanan udara (bar), durasi siklus *blowing* (detik), dan konsumsi energi (kWh) dengan desain *nozzle* lama. Tahap ini bertujuan untuk memperoleh nilai acuan aktual, bukan asumsi, sejalan dengan pedoman International *Performance Measurement & Verification Protocol* (IPMVP Option B). Tahap berikutnya adalah modifikasi desain *nozzle* dengan memperkecil celah antara ujung *nozzle* dan mulut *preform*, agar udara tekan tidak bocor dan penetrasi udara lebih optimal. Pendekatan desain ulang seperti ini sesuai dengan prinsip *air loss elimination* yang sangat direkomendasikan dalam industri FMCG berbasis PET *blowing* (Nevills, 2025). Tahap implementasi dilakukan dengan memasang 12 unit *fixed mouth nozzle* yang telah dimodifikasi, kemudian dioperasikan selama empat bulan dengan kondisi nyata dalam jam operasional pabrik, bukan simulasi. Tahapan ini mengikuti karakteristik evaluasi berbasis *real industrial condition*, yang menjadi syarat utama agar penelitian layak diterapkan secara operasional (UNEP, 2022).

Setelah itu dilakukan pengumpulan data pasca-implementasi, masih menggunakan parameter yang sama: tekanan operasi, siklus *blowing*, dan konsumsi kWh aktual dari kompresor. Tahap terakhir adalah analisis efisiensi energi, dihitung dengan rumus perbandingan diferensial tekanan:

$$E = \frac{(P_1 - P_2) \times N \times t}{P_1}$$

Dengan menghasilkan nilai energi hemat (kWh) secara langsung. Rumus ini lazim digunakan dalam studi efisiensi energi berbasis tekanan pada sistem kompresor dan pneumatik. Nilai kWh kemudian dikonversi menjadi penghematan biaya listrik menggunakan tarif PLN industri (Rp 1.500/kWh). Setelah analisis kuantitatif, dilakukan juga analisis kualitatif deskriptif untuk menilai kontribusi inovasi terhadap optimasi operasi manufaktur, produksi bersih, dan kesiapan digital otomatisasi (UNEP, 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penurunan Tekanan dan Efisiensi Energi Pada *Fixed Mouth Nozzle*

Penurunan tekanan operasi dari 23 bar menjadi 20,5 bar setelah penerapan *fixed mouth nozzle* membuktikan adanya perbaikan signifikan pada kualitas penyegelan antara *nozzle* dan *preform*, yang berdampak langsung terhadap stabilitas sistem udara tekan (Nourin et al., 2022). Dalam sistem *pneumatic* industri, kebocoran pada titik *end-use* seperti antarmuka *nozzle-preform* sering menjadi penyebab utama pemborosan energi karena udara bertekanan terbuang tanpa memberikan kerja mekanik yang berguna (Çağman et al., 2022). Dengan menghilangkan celah kebocoran tersebut, tekanan operasional kini dapat diturunkan tanpa menurunkan kualitas pembentukan botol atau menambah siklus produksi (Wang, 2023). Literatur menyebutkan bahwa kebocoran pada jaringan udara tekan dapat menyumbang hingga 20–30%

dari total konsumsi energi kompresor jika tidak dikendalikan secara aktif (Hernández-Herrera et al., 2020). Efek dari pengurangan kebutuhan tekanan tidak hanya terlihat pada sisi konsumsi energi, tetapi juga menurunkan beban kerja kompresor secara keseluruhan karena semakin rendah tekanan kerja, semakin rendah pula energi spesifik yang dibutuhkan untuk memproduksi 1 m³ udara tekan (Nourin et al., 2022). Studi energi menyatakan bahwa setiap penurunan tekanan 1 bar dapat memberikan penghematan konsumsi energi sebesar 7–10% pada sistem udara tekan (Çağman et al., 2022).



Gambar 1. Mendesain Ulang *Fixed Mouth Nozzle* Untuk Efisiensi Energi Udara Bertekanan Pada Proses Blowing Botol Pet 1500 ML Di Industri Manufaktur

Berdasarkan hasil penelitian ini, penghematan sebesar 13.975,19 kWh selama empat bulan atau setara ± 42.000 kWh/tahun menunjukkan kontribusi signifikan terhadap efisiensi energi serta pengurangan biaya operasional industri (Nevills, 2025). Jika dikonversi ke dalam biaya energi listrik pada tarif industri, maka nilai tersebut memberikan dampak finansial langsung yang sangat relevan dan terukur, sejalan dengan prioritas global efisiensi energi berbasis pengendalian sistem kompresor udara (Gryboś et al., 2024). Hal ini menguatkan urgensi penerapan desain mekanik presisi pada titik pemakaian akhir dibanding hanya fokus pada kompresor sebagai sumber utama udara tekan. Selain manfaat energi, penurunan tekanan operasi juga berdampak positif terhadap umur peralatan. Nourin et al. (2022) menegaskan bahwa semakin tinggi tekanan kerja, semakin besar risiko keausan komponen kompresor, *valve*, dan *seal* yang beroperasi terus-menerus dalam kondisi termal-mekanik ekstrem. Dengan tekanan yang lebih rendah namun tetap stabil, intensitas stres mekanik berkurang dan umur mesin dapat diperpanjang secara signifikan. Faktor ini penting dalam mempertahankan keandalan jangka panjang sistem *blowing* di sektor minuman kemasan yang beroperasi dalam mode 24/7.

Dalam proses *stretch blow molding* botol PET, kestabilan profil tekanan udara berpengaruh langsung terhadap kualitas distribusi dinding botol, kekuatan tekanan internal, dan simetri hasil akhir (Kruszelnicka et al., 2018). Penelitian ini menunjukkan bahwa peningkatan kualitas *seal fixed mouth nozzle* tidak hanya berdampak pada penghematan energi, tetapi juga pada kestabilan proses pembentukan botol. Hal ini sejalan dengan hasil studi Wang (2023) yang menyatakan bahwa optimalisasi desain *nozzle* memperbaiki efisiensi transfer energi dan konsistensi aliran udara ke dalam preform. Dari sudut pandang optimasi desain, pendekatan



fixed mouth nozzle dalam penelitian ini sejalan dengan tren rekayasa modern yang mengutamakan *mechanical precision-based energy saving* dibanding solusi berbasis investasi perangkat tambahan (Bukhari et al., 2025). Simulasi berbasis CFD dalam literatur menunjukkan bahwa geometri *nozzle* sangat memengaruhi pola aliran, distribusi tekanan, serta potensi turbulensi yang menyebabkan rugi energi (Wang, 2023). Temuan penelitian ini membuka peluang untuk iterasi lanjutan berbasis CFD guna menemukan geometri *nozzle* yang optimal untuk tekanan kerja 18–21 bar yang umum di industri.

Novelty utama dari penelitian ini terletak pada fakta bahwa efisiensi energi sebesar ± 42 MWh/tahun berhasil dicapai hanya melalui rekayasa desain mekanik *low-cost* pada titik paling dekat dengan proses produksi, bukan melalui investasi besar pada kompresor atau sistem kontrol (Çağman et al., 2022). Pendekatan ini tergolong jarang dibahas secara eksplisit dalam literatur efisiensi udara tekan, yang umumnya hanya fokus pada audit di sisi kompresor (Gryboś et al., 2024). Dengan demikian, penelitian ini memperkuat bukti bahwa intervensi berbasis *end-use engineering* dapat menjadi solusi *high-impact* namun *low-cost* dalam strategi *green manufacturing modern*. Ke depan, integrasi *fixed mouth nozzle* ini layak distandarisasi di seluruh lini *blowing* produksi, didukung monitoring digital berbasis IoT serta validasi CFD untuk desain tahap lanjut (Nevills et al., 2025). Dengan pendekatan tersebut, tidak hanya efisiensi energi jangka panjang yang dipastikan, tetapi juga konsistensi kualitas dan integrasi terhadap roadmap industri menuju *smart factory* dan *net zero emission* (Gryboś et al., 2024).

Dampak Ekonomi Dalam Mendesain Ulang *Fixed Mouth Nozzle*

Berdasarkan tarif listrik industri sebesar Rp 1.500/kWh, efisiensi energi sebesar 13.975,19 kWh selama empat bulan menghasilkan penghematan biaya operasional sebesar Rp 20.962.785. Angka ini sejalan dengan prinsip bahwa pengurangan tekanan bahkan hanya 1 bar dapat memberikan penghematan energi kompresor sebesar 7–10% (Tono, 2000). Dalam konteks industri dengan pola operasi 24 jam per hari, kontribusi penghematan tersebut bersifat langsung dan berulang, bukan bersifat temporer atau situasional (Prabowo & Nugraha, 2021). Jika diakumulasikan selama satu tahun, besaran penghematan mencapai Rp 62.888.355, yang menegaskan bahwa efisiensi energi dari sistem udara tekan memiliki dampak finansial jangka panjang yang sangat signifikan. Hal ini memberikan nilai tambah yang jauh lebih tinggi dibanding sekadar efisiensi teknis tanpa orientasi ekonomi (Wibowo & Suryanto, 2022). Dengan demikian, strategi konservasi energi pada titik *end-use* layak diposisikan sebagai instrumen *direct cost reduction*, bukan hanya sebagai proyek *sustainability* simbolis.

Biaya investasi pembuatan 12 set *fixed mouth nozzle* relatif rendah karena hanya melibatkan modifikasi mekanik presisi lokal tanpa membutuhkan komponen elektronik, sistem kontrol, atau perubahan pada kompresor utama (Putra et al., 2023). Model investasi seperti ini termasuk dalam kategori *low-capex, high-impact*, yang dinilai ideal oleh banyak perusahaan manufaktur karena memiliki risiko finansial minimal (Sudarmawan & Utami, 2020). Strategi ini jauh lebih *feasible* dibanding penggantian kompresor dengan model baru berteknologi efisiensi tinggi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai *payback period* tercapai dalam waktu kurang dari tiga bulan, menjadikannya salah satu bentuk intervensi efisiensi energi dengan tingkat pengembalian investasi tercepat (Putra et al., 2023). Dalam literatur manajemen energi industri, *payback* di bawah satu tahun dikategorikan “*highly attractive*”, dan di bawah enam



bulan dianggap masuk kategori “*immediate approval*” secara finansial (Kusuma & Wijaya, 2018). Pencapaian kurang dari tiga bulan seperti pada penelitian ini bahkan dikategorikan “*no-risk investment*”. Dari perspektif kebijakan perusahaan, model investasi efisiensi seperti ini mendukung penerapan *energy efficiency first principle* yang kini menjadi standar global dalam roadmap industri rendah karbon (Yunus & Abdullah, 2021). Selain itu, struktur penghematan yang langsung muncul dalam bentuk pengurangan tagihan listrik membuat proyek ini sangat mudah diterima departemen keuangan dibanding inovasi teknologi yang berdampak tidak langsung (Saputra & Hidayat, 2019). Dengan kata lain, strategi ini bukan hanya layak teknis, tetapi juga strategis dari sudut pandang direktorat keuangan.

Intervensi berbasis desain ulang komponen mekanis seperti *nozzle* umumnya jauh lebih adaptif dan murah dibanding pendekatan digital atau penggantian aset utama seperti kompresor (Raharjo, 2022). Oleh karena itu, pendekatan ini sangat relevan diterapkan pada industri yang membutuhkan efisiensi cepat namun memiliki keterbatasan modal investasi (Setiawan & Hadi, 2021). Ini sejalan dengan tren global efisiensi berbasis *end-use engineering* daripada *upstream optimization* (Lestari, 2020). Lebih jauh, pendekatan *local innovation* berbasis perancangan ulang *nozzle* ini membuka peluang untuk dikembangkan sebagai proyek *scaling* lintas pabrik melalui standarisasi teknis (Putra et al., 2023). Implementasi massal seperti ini akan memberikan efek multiplier sekaligus mempercepat pencapaian target efisiensi energi korporat secara agregat (Wulandari & Prakoso, 2020). Dengan adanya bukti empiris nilai *payback* yang sangat cepat, proses adopsi dan duplikasi pada unit produksi lain dapat dilakukan tanpa resistensi manajerial yang signifikan. Dengan demikian, keunggulan utama dari proyek ini tidak hanya terletak pada keberhasilan menurunkan konsumsi energi, tetapi juga pada kombinasi kepastian dampak finansial, kecepatan pengembalian modal, dan minimnya risiko kegagalan investasi. Hal ini menjadikannya contoh ideal dari inovasi teknis berbiaya rendah yang sejalan dengan prinsip green manufacturing sekaligus *financial optimization* (Tono, 2000; Putra et al., 2023).

Kontribusi Inovasi Ini Terhadap Penerapan Green Manufacturing

Penerapan desain *fixed mouth nozzle* tidak hanya menghasilkan efisiensi energi, tetapi juga berdampak positif pada stabilitas kualitas produksi. Tekanan udara yang lebih stabil menghasilkan distribusi udara yang merata ke dalam *preform* sehingga proses pemuaian berlangsung lebih seragam dan menghasilkan ketebalan dinding botol yang lebih konsisten (Kruszelnicka et al., 2018). Stabilitas aliran tekanan merupakan salah satu faktor paling krusial dalam proses *stretch blow molding* karena fluktuasi tekanan dapat menyebabkan cacat dimensi dan distribusi material yang tidak merata. Keberhasilan inovasi ini juga ditunjukkan oleh fakta bahwa tidak terjadi penurunan kapasitas produksi meskipun tekanan diturunkan dari 23 bar menjadi 20,5 bar. Kondisi ini mendukung temuan Tono (2000) yang menyatakan bahwa efisiensi udara tekan tidak selalu memerlukan peningkatan tekanan, melainkan optimalisasi desain antarmuka agar tekanan yang ada digunakan secara efektif tanpa kebocoran. Dengan demikian, pendekatan yang diterapkan dalam studi ini tergolong sebagai efisiensi berbasis performa, bukan sekadar efisiensi berbasis pengurangan konsumsi. Selain itu, penurunan tekanan kerja turut memperpanjang umur pakai komponen pneumatik seperti *seal*, *valve*, dan *orifice* karena beban mekanis dan termal yang diterima menjadi lebih rendah (Nourin



et al., 2022). Penelitian Raharjo (2022) menunjukkan bahwa menurunkan tekanan kerja sebesar 2–3 bar dapat memperpanjang umur komponen hingga 15–20% tanpa mengganggu kestabilan proses. Dengan demikian, inovasi mekanik sederhana ini berdampak langsung pada aspek *reliability engineering* dan *maintenance cost reduction*. Dari perspektif lingkungan, penghematan energi sebesar 13.975,19 kWh dalam empat bulan atau sekitar 42.000 kWh per tahun setara dengan penurunan emisi CO₂ sebesar 9,5 ton per tahun, berdasarkan faktor emisi PLN yaitu 0,68 kg CO₂/kWh. Pengurangan emisi berbasis efisiensi energi dinilai sebagai strategi paling efektif dan ekonomis dalam roadmap transisi energi industri menuju *net-zero emission* (Yunus & Abdullah, 2021). Inovasi ini secara langsung mendukung target *carbon reduction* tanpa membutuhkan *offset* atau kompensasi karbon tambahan.

Penerapan teknologi ini sepenuhnya sejalan dengan prinsip *green manufacturing*, yang menekankan pada pengurangan konsumsi energi dan minimisasi jejak lingkungan dari aktivitas produksi (Hartono, 2019). Lebih spesifik, pendekatan ini termasuk dalam kategori *cleaner production*, yaitu upaya mencegah pemborosan sejak sumbernya, bukan sekadar mengelola limbah atau emisi setelah terbentuk (Lestari, 2020). Dengan demikian, pendekatan ini bersifat preventif, bukan kuratif atau kompensatif. Keunggulan lain dari pendekatan ini adalah bahwa inovasi dilakukan tanpa perlu mengintegrasikan sistem kontrol digital atau otomasi kompleks, berbeda dari kebanyakan solusi efisiensi industri modern yang mengandalkan investasi sensor IoT dan *AI-based control system* (Nevills et al., 2025). Hal ini memperkuat argumen Saputra & Hidayat (2019) yang menyatakan bahwa intervensi mekanik presisi pada titik *end-use* sering kali lebih *cost-effective* dan cepat menghasilkan dampak dibanding otomatisasi berbasis *software*. Keterulangan inovasi ini juga menjadi nilai strategisnya. Dengan hanya melakukan replikasi desain yang sama pada lini *blowing* serupa, manfaat efisiensi energi dan stabilitas kualitas dapat langsung diperoleh tanpa perlu riset ulang yang memakan waktu (Putra et al., 2023). Menurut Wulandari & Prakoso (2020), inovasi yang mudah direplikasi lintas pabrik memiliki nilai strategis yang jauh lebih tinggi dibanding inovasi yang hanya efektif pada satu lokasi saja. Dengan demikian, seluruh manfaat tersebut, dimulai dari efisiensi energi, stabilitas kualitas produk, perpanjangan umur mesin, hingga pengurangan emisi karbon maka inovasi *fixed mouth nozzle* ini tidak hanya relevan secara teknis, tetapi juga strategis dalam konteks transformasi industri menuju *green productivity* dan *low-carbon manufacturing*. Kombinasi antara biaya rendah, dampak tinggi, dan keberlanjutan menjadikan model inovasi ini ideal sebagai bagian dari roadmap *green manufacturing* nasional dan global (Tono, 2000; Yunus & Abdullah, 2021).

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa desain ulang *fixed mouth nozzle* pada mesin *blowing* 1500 ml berhasil memberikan penyegelan sempurna pada mulut preform sehingga menghilangkan kebocoran udara dan memungkinkan penurunan tekanan operasi dari 23 bar menjadi 20,5 bar. Hasil ini menghasilkan efisiensi energi sebesar 13.975,19 kWh selama empat bulan atau sekitar 42.000 kWh per tahun, dengan penghematan biaya operasional mencapai Rp 20.962.785 per empat bulan. Inovasi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi energi udara tekan dan menurunkan beban konsumsi listrik kompresor, tetapi juga



berkontribusi pada perpanjangan umur mesin serta penurunan emisi karbon yang signifikan. Keunggulan utama (*novelty*) dari penelitian ini adalah bahwa modifikasi mekanik sederhana yang diterapkan mampu memberikan dampak nyata dan terukur terhadap penghematan energi dan biaya, sekaligus membuktikan bahwa pendekatan rekayasa yang *low-cost* namun tepat guna dapat secara efektif mendukung implementasi *green manufacturing* dan prinsip energi berkelanjutan dalam industri manufaktur modern.

Saran

Berikut tiga saran yang disusun lebih ilmiah dan selaras dengan konsep penelitian serta arah pengembangan *green manufacturing* dan efisiensi energi:

1. Perlu dilakukan standarisasi dan integrasi desain *fixed mouth nozzle* sebagai *best practice* di seluruh lini produksi *blowing* agar dampak efisiensi energi dan pengurangan kebocoran udara dapat dioptimalkan secara konsisten di skala industri, sekaligus membuka peluang replikasi lintas pabrik dalam satu grup manufaktur.
2. Disarankan implementasi sistem *digital monitoring* berbasis IoT untuk pemantauan *real-time* konsumsi udara tekan dan *energy dashboard analytics*, sehingga perusahaan dapat melakukan evaluasi kinerja secara kuantitatif, mendeteksi potensi kebocoran lebih dini, dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data (*data-driven energy management*).
3. Pengembangan riset lanjutan dapat difokuskan pada optimasi bentuk dan struktur *nozzle* menggunakan pendekatan simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*) dan teknologi *AI-assisted design*, guna memperoleh geometri paling efisien yang tidak hanya menurunkan tekanan operasi, tetapi juga meningkatkan stabilitas proses *blowing* tanpa mengorbankan kualitas produk akhir.

DAFTAR PUSTAKA

- Bukhari, S. M. A., et al. (2025). CFD-based design optimization of convergent-divergent nozzles. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 19(1), 55–63.
- Çağman, S., et al. (2022). Energy-saving potential and carbon emissions of compressed air systems based on in-situ audits. *Journal of Cleaner Production*, 359, 132456.
- Gryboś, D. (2024). A review of energy overconsumption reduction methods in CAS. *Energies*, 17(5), 2451.
- Hartono, S. (2019). Analisis konservasi energi pada sistem udara tekan industri manufaktur. *Jurnal Teknologi dan Energi*, 14(2), 87–95.
- Hernández-Herrera, H., et al. (2020). Energy savings measures in compressed air systems. *Journal of Cleaner Production*, 276, 123–131.
- Jafarian, A. (2022). Developing a method to calculate leaks in a compressed air system using time-series pressure data. *Technical Report*, Indiana University Repository.



- Kruszelnicka, W., Słomion, P., & Rogalinski, M. (2018). The blowing process of PET bottles. *Machines. Technologies. Materials*, 12(6), 10–13.
- Kusuma, R., & Wijaya, D. (2018). Analisis kelayakan investasi pada proyek efisiensi energi berbasis pengurangan konsumsi listrik. *Jurnal Sistem Industri*, 6(1), 22–30.
- Lestari, A. (2020). Cleaner production sebagai strategi pengurangan limbah dan energi dalam industri manufaktur. *Jurnal Keteknikan dan Energi*, 9(3), 55–64.
- Nevills, M. (2025). Comparison of compressed air flow monitoring and digital optimization technologies in manufacturing industries. *Advances in Environmental and Engineering Research*, 3(1), 45–59.
- Nourin, F. N., Huda, M., & Rahman, A. (2022). Energy, exergy, and emission analysis on industrial air compressors. *ASME Journal of Energy Resources Technology*, 144(8), 082301.
- Prabowo, F., & Nugraha, A. (2021). Optimasi tekanan pada sistem pneumatic untuk efisiensi energi di lini produksi FMCG. *Jurnal Riset Rekayasa*, 5(2), 101–110.
- Putra, I. M., & Nugroho, T. (2023). Mechanical design modification for energy efficiency in compressed air systems. *Journal of Sustainable Mechanical Engineering*, 9(2), 87–95.
- Raharjo, M. (2022). Pendekatan redesign mekanik sebagai strategi konservasi energi industri tanpa investasi besar. *Jurnal Rekayasa Sistem*, 8(4), 44–52.
- Santoso, H., & Nugraha, R. (2022). Energy optimization in PET blowing process through pressure control and nozzle design. *Journal of Industrial Energy Efficiency*, 10(1), 45–53.
- Saputra, D., & Hidayat, M. (2019). Pengaruh efisiensi energi terhadap keputusan investasi dan struktur biaya operasional. *Jurnal Ekonomi dan Kebijakan Industri*, 11(1), 65–73.
- Setiawan, R., & Hadi, P. (2021). Studi penerapan redesign komponen untuk efisiensi biaya energi dalam produksi skala massal. *Jurnal Teknologi Industri*, 18(2), 91–100.
- Sudarmawan, A., & Utami, L. (2020). Evaluasi efektivitas teknologi low-capex dalam efisiensi energi industri manufaktur. *Jurnal Teknik Mesin*, 13(1), 77–84.
- Tono, B. (2000). Teknik efisiensi energi pada sistem kompresor industri. *Jurnal Energi dan Teknologi Industri*, 4(1), 11–18.
- UNEP. (2022). *Sustainable energy and green manufacturing report*. United Nations Environment Programme.
- Wang, P. (2023). Pneumatic rotary nozzle structure optimization and analysis based on CFD. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(4), 1–11.



Wibowo, A., & Suryanto, L. (2022). Efisiensi energi sebagai strategi fundamental dalam pengurangan biaya produksi. *Jurnal Manufaktur dan Teknologi*, 7(3), 49–57.

Wulandari, R., & Prakoso, A. (2020). Strategi adopsi penghematan energi lintas pabrik berbasis replikasi desain lokal. *Jurnal Manajemen Operasi*, 10(2), 73–84.

Yunus, R., & Abdullah, S. (2021). Energy efficiency first principle dalam roadmap industri rendah karbon di Asia Tenggara. *Jurnal Kebijakan Energi Nasional*, 5(1), 25–37.