

BABI

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Konservasi terkait keterbatasan energi yang terjadi di Indonesia menunjukkan tingkat konsumsi energi yang terus meningkat dan tidak sebanding dengan sumber ketersediaan energi yang ada. Setiap perusahaan industri di seluruh dunia mewajibkan untuk selalu dapat meningkatkan optimalisasi dan melakukan efisiensi penggunaan energi dalam proses produksinya (Zen & Naimah, 2022). Selain percepatan industrialisasi dan perkembangan teknologi serta pertumbuhan ekonomi dan pertumbuhan penduduk, merupakan faktor terpenting penyebab meningkat tingginya permintaan energi. Untuk memenuhi kebutuhan energi ini banyak perusahaan industri telah berinvestasi dalam mencari energi alternatif yang lebih ramah lingkungan (Ishaq & Dincer, 2024).

Pengaruh lingkungan terhadap pemakaian dan penggunaan energi telah menghasilkan solusi berkelanjutan terhadap permasalahan besar generasi kita, seperti kemiskinan dan kekurangan bahan bakar serta pemanasan global (Bonneuil et al., 2021). Dalam beberapa dekade terakhir, kesadaran global terhadap perubahan iklim telah mendorong pesatnya perkembangan teknologi energi terbarukan untuk mengatasi masalah tersebut (Sebestyén, 2021).

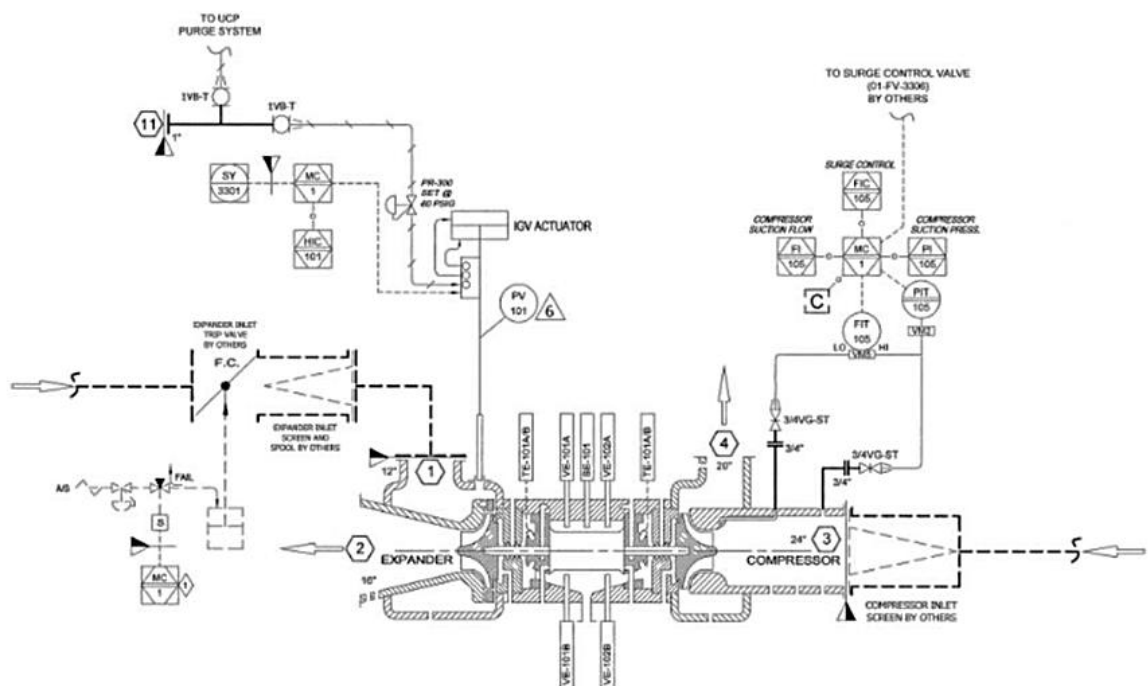
Perusahaan dan instansi pemerintah diwajibkan untuk menerapkan sistem manajemen energi untuk mengoptimalkan penggunaan energi, serta menetapkan standar efisiensi untuk berbagai peralatan yang menggunakan energi (Peraturan Pemerintah Nomor 33, 2023), menurut *Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia* bahwa untuk melaksanakan penerapan konversi energi melalui efisiensi konsumsi penggunaan energi pada peralatan pemanfaatan energi, perlu mengatur penerapan standar kinerja energi minimum untuk peralatan pemanfaatan energi yang diperdagangkan di wilayah Negara Kesatuan Republik

Indonesia secara lebih komprehensif (Peraturan Pemerintah Nomor 14, 2021). Tujuan konservasi energi melalui upaya sistematis, terencana dan terpadu adalah melestarikan sumber daya energi dalam negeri (diversifikasi energi) dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya energi (efisiensi energi) (Peraturan Pemerintah Nomor 79, 2014) yang mana konservasi energi dilakukan pada seluruh tahap pengolahan energi, meliputi penyediaan energi, Pengusahaan energi, pemanfaatan energi dan konservasi sumber daya energi. Pengembangan dan implementasi *advanced energy* teknologi guna mengatasi tantangan global energi bersih, perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan.

Indonesia telah menargetkan porsi energi terbarukan di bauran energi primer nasional sebesar 23% di tahun 2025 dan 31% di tahun 2050, serta menargetkan 17% penghematan energi di tahun 2025. Di antara berbagai hal yang melandasi penetapan target tersebut adalah komitmen negara untuk mengurangi emisi karbon dan kebutuhan untuk beralih menuju *Green and Clean Energy* yang sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) No. 7 “Energi Bersih dan Terjangkau” (Pencapaian Pelaksanaan TPB/SDGs Indonesia, 2020). Kontribusi Pertamina dalam konservasi energi terjadi di semua lini salah satu dari lima pilar prioritas strategis perusahaan yaitu melakukan efisiensi biaya operasional melalui strategi operasional, baik di tingkat *holding* dan *subholding* realisasi program efisiensi biaya di Pertamina Group telah mencapai USD 535,56 juta atau sekitar Rp7,83 triliun yang terus diterapkan dalam seluruh lini bisnis Pertamina (Strengthening Commitment Securing Energy, 2018).

Konsumsi pemakaian gas LPG di Indonesia yang meningkat naik menyentuh angka 8,71 juta Ton, naik 44,66% pada 2012-2023, sedangkan untuk import gas LPG naik menjadi 168,48% pada tahun 2012-2023 (Laporan Tahunan Capaian Program Dan Kegiatan, 2019). Selain itu terjadi penurunan nominasi kontrak supply gas melalui PJBG (Perjanjian Jual Beli Gas) 2013 sebesar 250 MMSCFD dengan PHR (Pertamina Hulu Rokan) menjadi 208 MMSCFD di tahun 2024 (Bisnis Overview PT Pertamina Gas, 2024).

Bagian penting dari sistem operasi produksi adalah *Turboexpander-compressor* kinerjanya mempunyai dampak signifikan terhadap efisiensi sistem secara keseluruhan. Efisiensi turbin merupakan bagian parameter terpenting dari efisiensi sistem, karena turbin-kompresor merupakan perangkat yang mengkonsumsi banyak daya, peningkatan efisiensi turbin secara moderat akan menyebabkan peningkatan efisiensi sistem yang signifikan (Kumar et al., 2019), berikut sistem kerja dan parameter penting dalam sebuah Turboexpander compressor yang ditunjukkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Proses Turboexpander Kompresor

Extraction Plant merupakan perusahaan pengelola gas bumi di Sumatera Selatan yang memiliki kandungan C3++ menjadi produk LPG (NGL). PT. Pertasamtan Gas memiliki dua plant yaitu *Extraction Plant* yang berada di prabumulih dan *Fractionation plant* yang berada di sungai gerong, palembang. Untuk *Extraction Plant* produk yang dihasilkan adalah NGL. Sedangkan *residue* yang dihasilkan adalah *lean gas* yang akan dikirim ke cambai dan pagardewa, dan produk NGL akan di kirim ke *Fractionation Plant* untuk di proses lagi menjadi LPG.

Salah satu *equipment* penting yang digunakan pada *Extraction Plant* adalah Turboexpander. Expander merupakan suatu alat mekanik yang berfungsi untuk menurunkan tekanan dari gas yang diekspansi untuk proses pendinginan. Ada beberapa aplikasi expander pada industri, yaitu salah satunya adalah *expander-compresor* seperti yang digunakan pada *Extraction Plant*. Turboexpander merupakan sebuah mesin berputar yang digunakan dalam aplikasi *cryogenic* seperti proses gas alam, proses petrokimia dan pemisahan udara. Tenaga yang dipindahkan oleh Turboexpander dari proses alir sebagian besarnya di transfer ke proses alir compressor. Sehingga Turboexpander bisa menghasilkan proses pendinginan yang dibutuhkan dalam proses gas *cryogenic* lalu pada saat itu juga mengembalikan tenaga tersebut untuk digunakan dalam proses lain. Aplikasi Turboexpander inilah yang digunakan pada *Extraction Plant*. Turboexpander merupakan bagian terpenting dalam *cryogenic* sistem. Dengan menggunakan Turboexpander, *recovery* terhadap gas mampu mencapai 95%. Dengan *recovery* yang baik, maka semakin banyak pula produk yang mampu dihasilkan. Disini terlihat pentingnya fungsi dari Turboexpander pada *cryogenic* sistem. Berdasarkan desain untuk kemampuan performance efisiensi isentropik pada Turboexpander mencapai 88.0% pada kondisi speed 16.500 RPM dengan nilai mass flow rate sebesar 475,470 lb/hr (Turbo Expander 735, Installation, Operation and Maintenance, 2011)

Salah satu studi terhadap Turboexpander-compressor menunjukkan efisien pada proses pencairan hidrogen yang merupakan bagian penting untuk penyimpanan skala besar dan transportasi hidrogen jarak jauh. Dalam penelitian ini, model gabungan diusulkan untuk memprediksi kinerja dan proses pendinginan Turbo-expander *helium* dengan *blower* rem, dan eksperimen validasi dilakukan pada Turbo-expander *helium* dari pencairan hidrogen 2 t/d. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa rasio karakteristik expander bervariasi secara signifikan selama proses pendinginan yang menyebabkan deviasi yang besar dari efisiensi optimal (Zhou et al., 2022). Selain itu pengaruh *fluida* kerja terhadap parameter Turboexpander dalam penentuan ekspresi sederhana dan rasio efisiensi energi

sistem konservasi pada sistem produksi merupakan hal yang signifikan (Briola et al., 2019), Kecepatan putaran turbin juga mempengaruhi suhu dan entalpi. Semakin cepat putaran maka kerja semakin besar dan efisiensi sentrotropik meningkat (Kumar et al., 2019), Proses optimalisasi untuk mendapatkan etana maksimal terhadap tekanan demethanizer pada proses *cold residue recovery* (CRR) dan *supercooled gas* (GSP) dibandingkan dengan proses Turboexpansion konvensional (Kherbeck & Chebbi, 2015).

Koefisien isentropik diusulkan untuk mengevaluasi peningkatan kinerja keseluruhan dari *Turboexpander-Compressor bootstrap* terbalik. Penggunaan kompresor *reverse-bootstrap* pada Turboexpander asli dapat meningkatkan koefisien isentropik sebesar 12% dibandingkan dengan Turboexpander pengereman tradisional dalam kondisi desain. *Codesign* dari Turboexpander dan kompresor koaksial dapat meningkatkan karakteristik kopling dan selanjutnya meningkatkan koefisien isentropik sebesar 7,1% di bawah kondisi desain, yang menunjukkan peningkatan daya pendinginan sebesar 8,1% dan pengurangan daya pemanasan yang dibutuhkan sebesar 1,7%. Hasil dan analisis menunjukkan bahwa *TEC bootstrap* terbalik yang diusulkan dengan metode *codesign* adalah cara yang efektif untuk pemulihan energi dalam sistem pendingin kecil (Meng et al., 2023).

Peningkatan dan optimasi kinerja untuk pembangkit siklus brayton terutama mencakup dua aspek: satu menyangkut parameter siklus termodinamika, yang lain menyangkut parameter komponen. Sebagai salah satu aspek dari optimasi pembangkit listrik, optimasi parameter merupakan praktik desain yang penting untuk peningkatan kinerja tahap kompresor aliran aksial (AFCS)(Ghanbari et al., 2023).

Evaluasi pengendalian pada penelitian ini digunakan untuk membantu optimalisasi proses terhadap penurunan sumber gas (*flow rate*) yang semakin terbatas pada proses industri (industri gas, industri kimia, industri energi) yang menggunakan Turboexpander-compressor sebagai proses ekspansi dan kompresi gas. Penerapan analisa evaluasi pengendali pada Industri gas LPG menggunakan NGL gas sebagai strategi optimalisasi proses industri dampak dari penurunan

kapasitas pasok sumber gas, dimana kondisi ketersediaan sumber gas saat ini yang semakin sedikit. Pada penelitian sistem pengendali Turboexpander-kompresor melakukan analisa *volumetric flow rate* (Q_p) dari beberapa parameter instrument berupa *Inlet Pressure* (P_1) dan *flow element differential* (dP), *temperaturiInlet* (T) dan *compressibility* (Z) dan K-kostan pengendali (K) akan optimal jika hasil dari *volumetric flow rate Turboexpander-compressor* hasilnya akan sama atau mendekati nilai *volumetric flow rate* (Q) *gas lean* yang terproses.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi optimalisasi berupa efisiensi energi pada *Turboexpander* sehingga dapat meningkatkan Produksi LPG, kondensate, dengan cara optimalisasi *flow rate* dari *Turboexpander* melalui evaluasi pemodelan variasi volumetrik *Turbo-expander* pada kondisi *flow rate* gas yang menurun.

1.2 Permasalahan

Berdasarkan latar belakang masalah uraian diatas, dapat dirumuskan penelitian ini berfokus pada pengembangan permasalahan sebagai berikut:

1. Mengetahui profil termodinamika desain pada sistem ekstraksi, bagaimana hasil perhitungan kapasitas panas senyawa serta nilai entalpi (ΔH) pada kondisi *inlet* dan *outlet* berdasarkan data desain awal.
2. Penyebab terjadinya penurunan efisiensi pada Turboexpander serta bagaimana pengaruh entalpi pada fase uap dan cair serta fluktuasi laju alir *feed gas* terhadap penurunan efisiensi termal *Turboexpander* pada data actual (Data 1-6).
3. Sejauh mana tingkat akurasi pemodelan simulasi digital dibandingkan data lapangan serta mengetahui nilai hasil validitas pemodelan menggunakan *Unisim Design* dalam memprediksi *flow rate* proses ekstraksi dibandingkan dengan data aktual hasil observasi operasional.
4. Memperoleh parameter pengendali yang paling efektif pada variasi simulasi kinerja alat antara penggunaan konstanta pengendali (K -faktor), variasi tekanan (psig), dan *differential pressure* (psid),

yang memberikan hasil simulasi paling akurat dan stabil dalam merepresentasikan karakteristik proses *Turboexpander*.

5. Bagaimana optimalisasi konstanta pengendali dapat meningkatkan performa sistem, serta sejauh mana peningkatan nilai konstanta pengendali dapat mengoptimalkan laju alir (*flow rate*) dan efisiensi *Turboexpander*, khususnya pada kondisi aliran gas rendah.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah yang telah diuraikan, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Melakukan evaluasi Parameter Termodinamika Desain *Turboexpander* dengan menghitung nilai kapasitas panas senyawa (fase uap dan cair) serta melakukan analisa nilai entalpi ΔH pada kondisi inlet dan outlet sesuai spesifikasi desain awal peralatan.
2. Menganalisis penurunan efisiensi *thermal* dengan mengidentifikasi pengaruh perubahan entalpi actual (H) dan laju alir feed (*flow rate*) gas terhadap fluktuasi efisiensi operasional *Turboexpander* berdasarkan enam data (Data 1-6) produksi yang berbeda.
3. Analisa proses validasi model simulasi digital dengan pembuktian tingkat akurasi menggunakan pemodelan simulasi Unisim Design serta membandingkan nilai *flow rate* hasil simulasi terhadap data observasi lapangan (Data 1-6) untuk mendapatkan nilai koefisien determinasi (konstanta pengendali) *Turboexpander* yang optimal.
4. Menentukan metode pengendali paling efektif dengan membandingkan beberapa variasi parameter kendali, termasuk konstanta pengendali (K-faktor), differential pressure (psid), dan tekanan (psig) untuk menemukan metode simulasi paling stabil dan akurat dalam optimalisasi sistem *Turboexpander*.
5. Mengetahui optimalisasi kinerja operasional dengan menganalisis dampak penyesuaian nilai konstanta pengendali (K-faktor) terhadap peningkatan *flow rate* (*flow rate*) dan efisiensi *thermal* *Turboexpander*, khususnya pada

kondisi *flow rate* semakin merendah sebagai strategi optimalisasi pengelolaan gas menggunakan sistem Turboexpander.

1.4 Manfaat Penelitian

Dari hasil penelitian nantinya diharapkan dapat digunakan untuk kalangan akademis, professional, masyarakat umum, maupun pembuatan kewajiban, yang mana manfaatnya antara lain:

1. Bagi kalangan akademisi, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya pengetahuan mengenai cara menghitung analisa energi melalui perhitungan kapasitas panas perubahan entalpi ΔH dan mengetahui besarnya efisiensi pada sistem *Turboexpander* pada sistem ekstraksi plant Gas yang kompleks.
2. Sebagai efisiensi pemeliharaan dan monitoring dengan memberikan pemahaman mendalam mengenai faktor penyebab penurunan efisiensi termal, seperti penurunan entalpi uap dan cair, sehingga sistem operasional dapat melakukan langkah preventif yang lebih tepat.
3. Memperoleh standar validasi operasional dengan menyediakan pemodel simulasi Unisim Design dengan hasil yang akurat (selisih $<2\%$) sebagai *baseline* atau standar rujukan untuk memvalidasi data lapangan secara *real-time*.
4. Penetapan metode pengendalian terbaik dalam memilih parameter kendali yang paling stabil dan konsisten, yaitu melalui variasi penggunaan konstanta pengendali (K-faktor), differential pressure (psid), dan tekanan (psig) untuk mendapatkan nilai akurasi lebih baik.
5. Bagi pembuatan kebijakan, dalam hal ini perusahaan dari hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam perancangan dan pelaksanaan operasional guna mendukung pengembangan EBT dalam optimalisasi dan efisiensi energi.

1.5 Orisinalitas Penelitian

Beberapa penelitian yang berkaitan dengan efisiensi dan dan penghematan energi pada unit Turboexpander, telah banyak dilakukan. Ringkasan penelitian sebelumnya dapat dilihat dalam tabel berikut.

No	Penelitian (Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
1	Kaimiao Zhou (2022)	<i>Efficiency control of the cooling-down process of a cryogenic helium turbo-expander for a 2 t/d hydrogen liquefier</i>	Percobaan pemodelan merupakan penggabungan expander dengan sistem blower.	Penelitian dilakukan pada Turboexpander proses helium kriogenik bukan pada NGL kriogenik sistem
			Efisiensi isotropik Turboexpander berasal dari proses optimalisasi plant	Menggunakan variable efisiensi isotropik dihasilkan turbo-expander dapat mencapai 78,83%, sedangkan penulis menggunakan metode efisiensi <i>thermal</i>
2	Briola (2019)	<i>Working fluid selection and extensive sensitivity analysis for the thermodynamic optimization of a novel trigeneration cycle with twophase expanders and compressor</i>	Investigasi ekstensif terhadap siklus trigenerasi termodinamika baru, yang beroperasi dengan dua fase (gas dan liquid) dengan menggunakan empat spesies kimia berbeda	Perbedaanya terdapat pada perhitungan metode siklus termodinamika generik dengan menggunakan perangkat lunak aspen data base 9.0, sedangkan penulis menggunakan Unisim Pro
3	Kumar (2019)	<i>Numerical and experimental investigation to visualize the fluid flow and thermal</i>	Melakukan perhitungan kerugian desain dan variabel desain non dimensi terhadap efisiensi statik turbine	Penelitian menggunakan metedologi berbeda desain sistematis antara turbine radial-nozzle optimal variable dan

No	Penelitian (Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
		<i>characteristics of a cryogenic turboexpander</i>	Melakukan perhitungan optimalisasi variabel non dimensi	desain non-dimensi melalui metode kecerdasan buatan (ANN dan ANFIS) berbeda dengan penulis memanfaatkan optimalisasi konsatanta pengendali pada anti surge valve variabel, menggunakan simulasi unisim pro
4	Kherbeck (2015)	<i>Optimizing ethane recovery in turboexpander processes</i>	Optimalisasi perolehan etana menggunakan proses CRR	Lingkup yang berbeda menggunakan proses CRR direduksi menjadi GSP menggunakan metode hardware berupa penambahan peralatan separator dingin kedua kemudian membandingkannya, penulis menggunakan sistem analisa software unisim pro
5	Meng (2023)	<i>Performance optimization of turboexpander-compressors for energy recovery in small air-separation plants</i>	Meningkatkan koefisien isentropik sebesar 12% skema <i>reverse-bootstrap Turboexpander-compressor</i> (TEC) pada pabrik proses pemisahan udara	Fokus koefisien isentropic pada metode menggunakan pengereman tradisional dengan skema <i>reverse-bootstrap Turboexpander-compressor</i> (TEC)
6	Ghanbari (2023)	<i>Development of a mathematical model to simulate a natural gas</i>	Pembatasan konsumsi energi pada sistem kompresi dalam industri petrokimia yang menunjukkan	Penelitian dilakukan area industri petrokimia mensimulasikan kompresor dua langkah, menggunakan kontrol antisurge. Sedangkan

No	Penelitian (Tahun)	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
		<i>compression system and its anti-surge control to improve performance: A case study to reduce the energy consumption, and the environmental impact</i>	potensi penghematan energi dan serta perbaikan lingkungan	penulis melakukan penelitian pada Gas industri menggunakan Turboexpander
			Pengurangan emisi CO ₂ sekitar 15,8%, serta konsumsi daya yang diperlukan untuk menjalankan turbin dapat dikurangi hingga 1,8 MW	Simulasi numerik mempelajari perilaku lonjakan, sistem kontrol efek yang disengaja dari keterbukaan katup, berbeda dengan penulis mensimulasikan variasi variabel yang tepat untuk mendapatkan optimalisasi laju alir

Optimalisasi efisiensi dan penghematan energi pada unit Turboexpander pada ekstraksi area dilakukan perhitungan melalui efisiensi *thermal* fasilitas yang sangat penting dimana η berdasarkan konsep dasar efisiensi *thermal* (Cengel et al., 2012), dapat didefinisikan sebagai

$$\eta = \frac{\Delta H_{actual}}{\Delta H_{desain}} \quad (1.1)$$

Perhitungan efisiensi yang digunakan adalah efisiensi *thermal* bukan menggunakan efisiensi termodinamika