

Analisis Sensitivitas Termodinamika *Direct-inject Steam–Gas Screw Expander* untuk Pemulihan Daya dari Turbin Tekanan Balik PLTP

Ghiffari Awliya Muhammad Ashfania^{a,*}, Tarwaji Warsokusumo^b, Sentot Novianto^a, Supriyadi^a,
Sofia Debi Puspa^a, Larasati Rizky Putri^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Trisakti
Jl Kiai Tapa no 1 Jakarta 11440

^bDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi, Institut Teknologi Perusahaan Listrik Negara
Jl. Duri Cengkareng Raya Jakarta 11750

*E-mail: ghiffari.awliya@trisakti.ac.id

Abstract

Residual energy recovery from the exhaust of a back pressure turbine in geothermal power plants offers an opportunity to improve overall power generation performance. However, the exhaust stream is commonly available at low pressure and may contain wet steam and non-condensable gases (NCG), making direct expansion to atmospheric pressure ineffective for additional power generation. A *steam screw expander* is a potential technology for low-pressure wet-steam applications, yet studies on direct-inject steam–gas expansion from geothermal back pressure turbine exhaust integrated with an air-cooled condenser (ACC), NCG *extraction system*, and *reinjection pump* remain limited. This study presents a preliminary thermodynamic and sensitivity analysis of a *direct-inject steam–gas screw expander* system for power recovery from geothermal turbine exhaust. The model was developed using Engineering Equation Solver (EES) and included a moisture separator, isentropic expansion with assumed expander efficiency, ACC fan power, NCG *extraction* power, and *reinjection pump* power. The investigated case used a wet steam exhaust flow rate of 34 ton/h, initial steam quality of 0.90, inlet temperature of 98.7°C, inlet pressure of 0.98 bar absolute, and NCG flow rate of 1,074 kg/h. With a separator efficiency of 90%, the steam quality at the expander inlet increased to approximately 0.989. The base case at condenser pressure of 0.20 bar and expander efficiency of 0.70 produced a net power output of 1.162 MW. Combined scenarios yielded net power outputs ranging from 0.623 to 1.923 MW. The most influential parameters were condenser pressure, expander efficiency, and ACC fan design. The results indicate that the proposed system is feasible for further investigation, although its performance strongly depends on ACC vacuum capability, NCG *extraction*, wet-steam handling, and expander design.

Keywords: geothermal power plant; screw expander; wet steam; air-cooled condenser

Abstrak

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) masih memiliki potensi pemanfaatan energi sisa pada aliran exhaust Back Pressure Turbine, khususnya ketika laju massa fluida masih besar meskipun berada pada tekanan rendah. Pada kondisi yang dikaji, fluida exhaust memiliki tekanan 0,98 bar absolut, temperatur 98,7°C, kualitas uap awal 90%, laju wet steam exhaust 34 ton/jam, serta gas non-condensable gas (NCG) sebesar 1.074 kg/jam. Karena tekanan exhaust mendekati tekanan atmosfer, ekspansi langsung ke atmosfer tidak dapat menghasilkan daya yang signifikan, sehingga diperlukan tekanan outlet vakum melalui sistem kondensor. Pemanfaatan *direct-inject steam–gas screw expander* berpotensi diterapkan pada kondisi low-pressure wet steam, namun kajian yang mempertimbangkan air-cooled condenser (ACC), NCG *extraction*, pompa *reinjection*, dan analisis sensitivitas parameter operasi masih terbatas. Penelitian ini bertujuan menghitung potensi daya bersih dan mengevaluasi sensitivitas parameter operasi sistem *direct-inject steam–gas screw expander* untuk pemulihan daya dari turbin tekanan balik PLTP. Metode yang digunakan adalah pemodelan termodinamika berbasis *Engineering Equation Solver* (EES), meliputi neraca massa separator, ekspansi uap, perhitungan daya fan ACC, daya NCG *extraction*, dan daya pompa *reinjection*. Hasil menunjukkan bahwa separator dengan efisiensi 90% meningkatkan kualitas uap masuk expander menjadi sekitar 98,9%. Pada base case dengan tekanan kondensor 0,20 bar dan efisiensi *expander* 70%, diperoleh daya bersih sebesar 1,162 MW. Skenario gabungan menghasilkan daya bersih dalam rentang 0,623–1,923 MW. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem berpotensi meningkatkan daya tambahan PLTP, tetapi kinerjanya sangat dipengaruhi oleh tekanan kondensor, efisiensi *expander*, desain ACC, pengelolaan NCG, dan karakteristik wet steam.

Kata kunci: PLTP; screw expander; wet steam; air-cooled condenser

1. Pendahuluan

Perubahan lanskap energi global dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa isu energi kini berkaitan erat dengan ketahanan nasional, keterjangkauan energi, dan keberlanjutan, tidak hanya aspek keekonomian. Keamanan energi telah menjadi bagian integral dari keamanan nasional. Di Indonesia, strategi energi tidak dapat bergantung pada satu jenis sumber energi saja, melainkan harus mengadopsi pendekatan *all of the above* yang mencakup minyak, gas, panas bumi, surya, hidro, nuklir, CCUS, hidrogen, serta sumber energi terbarukan lainnya.

Dalam konteks pendekatan tersebut, peningkatan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) menjadi sangat penting karena panas bumi merupakan sumber energi domestik yang stabil, rendah emisi, dan tidak bergantung pada rantai pasok bahan bakar impor. Selain pengembangan teknologi di lokasi baru, peningkatan efisiensi di fasilitas eksisting menjadi rekomendasi utama untuk memperoleh tambahan daya tanpa eksploitasi sumber daya baru secara besar-besaran [1], [2]. Salah satu pendekatan yang banyak dikaji dalam teknik energi adalah pemanfaatan energi sisa atau *waste heat recovery* untuk dikonversi menjadi daya tambahan [3], [4], [5]. Studi mengenai *waste heat recovery* menunjukkan bahwa energi panas buang dari proses industri maupun pembangkit dapat dimanfaatkan kembali melalui sistem seperti *Steam Rankine Cycle* (SRC), *Organic Rankine Cycle* (ORC), *Kalina cycle*, maupun teknologi *expander* untuk menghasilkan energi mekanik atau listrik [3], [4], [5]. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa ORC banyak digunakan untuk pemanfaatan panas tingkat rendah hingga menengah karena kemampuannya beroperasi pada temperatur sumber panas yang relatif rendah dan cocok untuk aplikasi skala kecil hingga menengah [2], [4], [5].

Dalam sistem pembangkit berbasis uap, salah satu sumber energi sisa yang relevan untuk dikaji adalah exhaust dari *back pressure turbine*. Secara umum, *back pressure turbine* menghasilkan uap keluaran pada tekanan tertentu yang masih dapat dimanfaatkan untuk proses termal atau dilepaskan ke sistem kondensasi. Berbagai studi terdahulu telah meneliti pemanfaatan *exhaust steam* dari *back-pressure steam turbine* melalui integrasi dengan ORC [1], [2]. Penelitian-penelitian tersebut mengusulkan sistem *cogeneration* yang menggabungkan *back-pressure steam turbine generating unit* dengan ORC untuk memanfaatkan panas uap sisa dari *exhaust steam* [1], [2]. Studi lain menunjukkan bahwa *steam condenser* pada pembangkit dapat digunakan sebagai evaporator untuk sistem ORC, termasuk pada konfigurasi ORC air-cooled guna mengatasi keterbatasan air pendingin [1], [6], [7]. Temuan-temuan ini mengindikasikan bahwa *exhaust steam* dari turbin bertekanan balik dapat menjadi sumber energi yang signifikan untuk pemulihan daya, terutama jika masih memiliki laju massa yang besar.

Pada kasus yang dikaji dalam penelitian ini, data yang digunakan merupakan data *waste heat* keluaran turbin tekanan balik pada PLTP Ulumbu yang memiliki laju *wet steam exhaust* sebesar 34 ton/jam, kualitas uap awal 90%, temperatur 98,7°C, tekanan 0,98 bar absolut, serta laju gas non-kondensabel atau *non-condensable gas* (NCG) sebesar 1.074 kg/jam. Data tersebut menunjukkan bahwa fluida exhaust masih membawa laju massa yang besar, tetapi tekanannya sudah sangat rendah dan mendekati tekanan atmosfer. Kondisi ini membuat ekspansi langsung ke atmosfer tidak layak untuk menghasilkan daya karena beda tekanan antara inlet dan outlet expander hampir tidak tersedia. Oleh karena itu, agar proses ekspansi menghasilkan kerja, tekanan outlet harus dibuat lebih rendah dari tekanan inlet melalui sistem kondensor vakum atau Air-Cooled Condenser (ACC) [1], [6]. Dengan demikian, pemulihan energi dari turbin tekanan balik PLTP tidak dapat dianalisis hanya dari sisi expander, tetapi harus dilihat sebagai sistem terintegrasi yang mencakup separator, expander, ACC, NCG *extraction*, dan pompa *reinjection* [1], [6], [8].

Teknologi expander yang dipilih dalam penelitian ini adalah *steam screw expander* dengan konsep *direct-inject steam-gas*. *Screw expander* merupakan mesin ekspansi volumetrik yang banyak dikaji untuk aplikasi pemulihan energi, ORC, sistem Rankine skala kecil, pemanfaatan panas buang industri, serta pemulihan energi tekanan [3], [4], [5], [9], [10]. *Screw expander* memiliki keunggulan pada operasi laju massa menengah ke bawah, toleransi terhadap kondisi fluktuatif, dan potensi operasi pada fluida dua fase atau *wet steam* [9], [10], [11], [12]. Penelitian tentang fasilitas prototipe *waste heat recovery* berbasis siklus Rankine dengan *twin-screw expander* menunjukkan bahwa konfigurasi ini relevan untuk pemulihan panas buang skala kecil-menengah [3]. Selain itu, kajian tentang *twin-screw expander* untuk *industrial waste heat recovery* menunjukkan bahwa mesin ini memiliki kemampuan adaptif terhadap fluktuasi kondisi operasi, sehingga berpotensi digunakan pada aplikasi *steam pipeline pressure energy recovery* dan pemanfaatan uap sisa industri [9], [10].

Meskipun demikian, penerapan *direct-inject steam-gas screw expander* pada turbin tekanan balik PLTP memiliki beberapa tantangan teknis. Pertama, fluida yang masuk tidak berupa uap kering sempurna, tetapi *wet steam* dengan kualitas awal sekitar 90%. Kandungan air dapat menyebabkan *liquid carry-over*, peningkatan rugi gesek, serta potensi keausan pada rotor dan *casing expander*. Oleh karena itu, separator diperlukan untuk meningkatkan kualitas uap sebelum fluida masuk *expander*. Kedua, keberadaan NCG dapat mengganggu performa kondensor karena gas tidak terkondensasi akan meningkatkan tekanan parsial di sisi kondensor dan mengurangi kemampuan sistem untuk mempertahankan vakum. Dengan demikian, daya untuk NCG *extraction* harus diperhitungkan sebagai beban *auxiliary*. Ketiga, ACC membutuhkan daya *fan* yang tidak kecil, terutama ketika tekanan kondensor diturunkan atau temperatur ambien meningkat. Keempat, kondensat atau fluida keluaran tetap perlu dikembalikan ke sistem *reinjection*, sehingga daya pompa *reinjection* juga memengaruhi daya bersih sistem.

Selain tantangan sistem, performa internal *expander* juga dipengaruhi oleh *clearance*, *leakage*, dan karakteristik aliran dua fase [10], [11], [12], [13], [14]. Kajian terbaru tentang *steam twin-screw expander* menunjukkan bahwa *clearance* dan kebocoran internal menjadi faktor penting dalam menentukan performa mesin pada aplikasi *industrial*

waste heat recovery. Studi lain tentang *two-phase flow characteristics and leakage in the shaft seal of steam screw expanders* menegaskan bahwa aliran dua fase dan kebocoran pada shaft seal perlu diperhatikan dalam desain *steam screw expander*. Hal ini relevan dengan penelitian ini karena fluida yang diekspansikan berupa campuran steam dan gas dengan kemungkinan adanya fraksi cairan setelah ekspansi.

Berdasarkan uraian tersebut, kajian *direct-inject steam-gas screw expander* sebagai teknologi tambahan pada turbin tekanan balik PLTP dengan mempertimbangkan separator, ACC, NCG extraction, reinjection pump, dan sensitivitas multi-parameter masih terbatas. Sebagian besar studi waste heat to energy menggunakan ORC atau SRC sebagai sistem pemulihan panas, sedangkan studi yang secara langsung memodelkan ekspansi *steam-gas* dari turbin tekanan balik PLTP pada tekanan rendah masih belum banyak ditemukan Gu[1], [2], [3], [4], [5]. Oleh karena itu, penelitian ini ditempatkan sebagai *preliminary thermodynamic and sensitivity analysis* untuk menilai potensi daya dan mengidentifikasi parameter operasi yang paling berpengaruh sebelum dilakukan desain rinci, analisis ekonomi, maupun validasi eksperimental.

Penelitian ini bertujuan untuk menghitung potensi daya gross dan daya net dari sistem *direct-inject steam-gas screw expander* yang memanfaatkan turbin tekanan balik PLTP. Selain itu, penelitian ini mengevaluasi pengaruh tekanan kondensor, efisiensi expander, kualitas uap awal, efisiensi separator, temperatur ambien, desain fan ACC, tekanan reinjection, serta skenario gabungan terhadap daya bersih sistem. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran awal mengenai potensi pemulihan daya tambahan pada PLTP eksisting, sekaligus menunjukkan parameter teknis yang perlu diprioritaskan dalam pengembangan sistem pemulihan energi berbasis *steam screw expander*.

2. Material dan Metode Penelitian

2.1. Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan data operasi exhaust Back Pressure Turbine pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) sebagai basis analisis termodinamika. Fluida kerja yang dianalisis berupa campuran wet steam dan gas non-kondensabel atau non-condensable gas (NCG). Data utama yang digunakan dalam pemodelan ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data operasi dan parameter dasar pemodelan

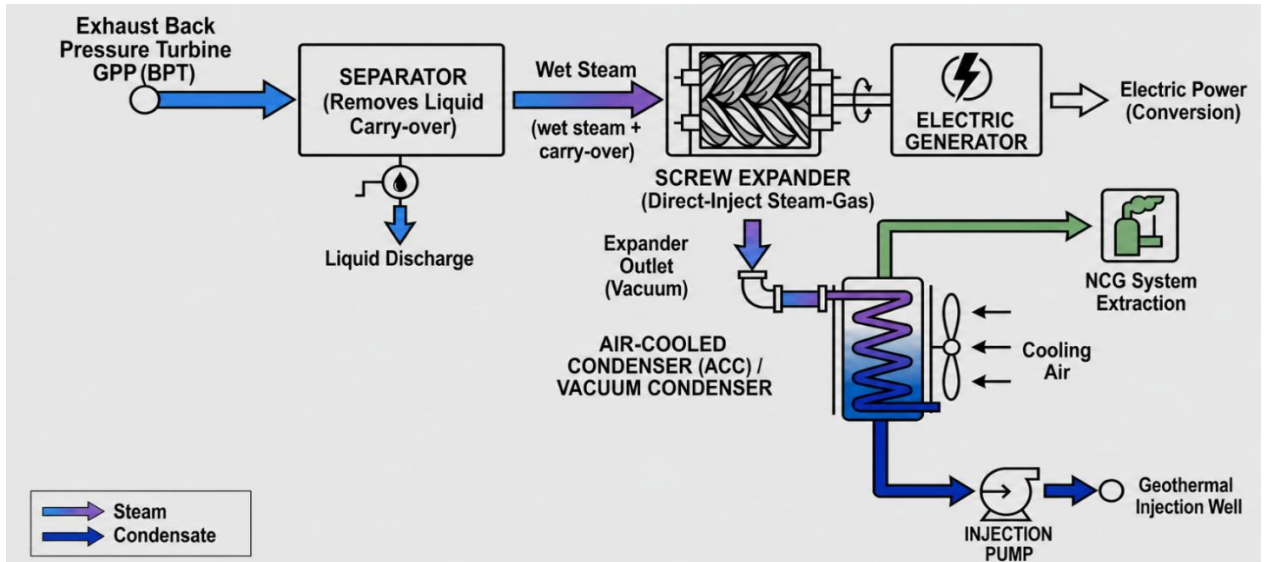
No.	Parameter	Simbol	Nilai
1.	Laju massa wet steam exhaust	$\dot{m}_{tot}$	34.000 kg/h
2.	Kualitas uap awal	x_0	0,90
3.	Temperatur exhaust	T_{in}	98,7°C
4.	Tekanan inlet	P_{in}	0,98 bar abs
5.	Laju massa gas/NCG	$\dot{m}_{gas}$	1.074 kg/h
6.	Temperatur ambien base case	T_{amb}	28°C
7.	Efisiensi separator	η_{sep}	0,90
8.	Efisiensi isentropik expander	η_{exp}	0,70
9.	Efisiensi generator	η_{gen}	0,94
10.	Pressure drop sisi udara ACC	ΔP_{air}	120 Pa
11.	Efisiensi fan	η_{fan}	0,57
12.	Tekanan reinjeksi	$\Delta P_{reinjection}$	20 bar
13.	Efisiensi pompa reinjeksi	η_{pump}	0,70
14.	Efisiensi kompresi NCG	η_{NCG}	0,70

Properti termodinamika uap air dihitung menggunakan perangkat lunak Engineering Equation Solver (EES). Fluida uap diasumsikan sebagai *saturated mixture* karena kondisi inlet berada sangat dekat dengan temperatur saturasi pada tekanan sekitar 0,98 bar absolut. Nilai entalpi, entropi, temperatur saturasi, entalpi cair jenuh, dan entalpi uap jenuh diperoleh dari fungsi properti EES. Kualitas uap *outlet expander* dihitung melalui interpolasi entalpi terhadap h_f dan h_{fg} .

2.2. Konfigurasi Sistem

Sistem yang dilakukan analisis merupakan konfigurasi pemulihan daya dari *exhaust back pressure turbine* PLTP menggunakan teknologi *direct-inject steam-gas screw expander* [1]. Aliran *wet steam exhaust* terlebih dahulu masuk ke separator untuk mengurangi *liquid carry-over* [11], [12]. Uap dengan fraksi cairan yang masih terbawa kemudian diekspansikan pada *screw expander*. Daya mekanik dari expander dikonversi menjadi daya listrik melalui generator.

Setelah keluar dari *expander*, fluida diarahkan menuju *air-cooled condenser* (ACC) dalam kondisi vakum untuk menurunkan tekanan *outlet expander* di bawah tekanan inlet [1], [6]. Kondisi vakum ini diperlukan karena tekanan *exhaust back pressure turbine* hanya sekitar 0,98 bar absolut, sehingga ekspansi ke atmosfer tidak memberikan beda tekanan yang cukup untuk menghasilkan daya. Gas yang tidak terkondensasi dikeluarkan melalui sistem NCG extraction. Kondensat kemudian dialirkan kembali menggunakan *reinjection pump*. Diagram alir sistem yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema sistem direct-inject steam-gas screw expander dari exhaust Back Pressure Turbine PLTP

2.3. Model Neraca Massa Separator

Teknologi separator digunakan untuk meningkatkan kualitas uap sebelum fluida masuk ke *screw expander*. Total aliran *wet steam exhaust* terdiri atas fraksi uap dan fraksi cair. Laju massa uap dihitung menggunakan:

$$\dot{m}_{vap} = x_0 \dot{m}_{tot} \quad (1)$$

Laju massa cairan awal dihitung dengan:

$$\dot{m}_{liq} = (1 - x_0) \dot{m}_{tot} \quad (2)$$

Sebagian cairan dipisahkan oleh separator, sedangkan sisanya terbawa sebagai *liquid carry-over*. Laju massa cairan yang masih terbawa menuju expander dihitung sebagai:

$$\dot{m}_{carry} = (1 - \eta_{sep}) \dot{m}_{liq} \quad (3)$$

Laju massa campuran air-uap yang masuk ke expander adalah:

$$\dot{m}_{exp} = \dot{m}_{vap} + \dot{m}_{carry} \quad (4)$$

Kualitas uap setelah separator dihitung sebagai:

$$x_{sep} = \frac{\dot{m}_{vap}}{\dot{m}_{liq} + \dot{m}_{carry}} \quad (5)$$

Pada *base case*, nilai laju *wet steam exhaust* keseluruhan sebesar 34.000 kg/jam dengan kualitas uap awal 0,90 menghasilkan laju massa uap sebesar 30.600 kg/jam dan liquid awal sebesar 3.400 kg/jam. Dengan efisiensi separator 90%, *liquid carry-over* menuju expander menjadi 340 kg/jam, sehingga kualitas uap setelah separator meningkat menjadi sekitar 0,989.

2.4. Model Ekspansi Steam-Gas Screw Expander

Model *expander* dikembangkan berdasarkan pendekatan ekspansi isentropik dengan efisiensi expander tertentu. Properti inlet dihitung sebagai *saturated mixture* pada tekanan inlet P_{in} . Entalpi dan entropi inlet campuran setelah separator dihitung dengan:

$$h_1 = x_{sep} h_g + (1 - x_{sep}) h_f \quad (6)$$

$$s_1 = x_{sep} s_g + (1 - x_{sep}) s_f \quad (7)$$

dengan h_f dan h_g merupakan entalpi pada kondisi *saturated liquid* dan *saturated vapor* pada tekanan inlet, sedangkan s_f dan s_g merupakan entropi pada kondisi *saturated liquid* dan *saturated vapor*. Untuk menghindari kesalahan perhitungan properti pada kondisi dua fase, entalpi outlet isentropik dihitung melalui interpolasi kualitas uap pada tekanan kondensor P_c . Kualitas uap isentropik outlet dihitung dengan:

$$x_{2s} = \frac{s_1 - s_{f,2}}{s_{fg,2}} \quad (8)$$

Entalpi outlet isentropik kemudian dihitung sebagai:

$$h_{2s} = h_{f,2} + x_{2s} h_{fg,2} \quad (9)$$

Entalpi outlet aktual expander dihitung menggunakan efisiensi isentropik *expander*:

$$h_2 = h_1 - \eta_{sep} (h_1 - h_{2s}) \quad (10)$$

Daya ekspansi steam dihitung dengan:

$$\dot{W}_{steam} = \dot{m}_{exp} (h_1 - h_2) \quad (11)$$

Kualitas uap aktual pada *outlet expander* dihitung dari interpolasi entalpi:

$$x_2 = \frac{(h_2 - h_{f,2})}{h_{fg,2}} \quad (12)$$

Selain kontribusi steam, gas/NCG juga dimodelkan secara sederhana sebagai gas ekuivalen yang ikut mengalami ekspansi. Kontribusi daya gas dihitung menggunakan pendekatan gas ideal dengan kalor jenis konstan. Namun, karena laju massa gas lebih kecil dibanding steam, kontribusi utama daya berasal dari steam. Daya shaft total dihitung sebagai:

$$\dot{W}_{shaft} = \dot{W}_{steam} + \dot{W}_{gas} \quad (13)$$

Daya listrik gross dihitung dengan:

$$\dot{W}_{gross} = \eta_{gen} \dot{W}_{shaft} \quad (13)$$

2.5. Model Air-Cooled Condenser

Air-cooled condenser digunakan untuk menurunkan tekanan *outlet expander* sehingga proses ekspansi dapat menghasilkan kerja. Beban panas yang harus dibuang oleh ACC dihitung dari selisih entalpi fluida outlet expander terhadap saturated liquid pada tekanan kondensor:

$$\dot{W}_{gross} = \eta_{gen} \dot{W}_{shaft} \quad (14)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian dibahas berdasarkan neraca massa separator, kinerja sistem pada kondisi dasar, sensitivitas setiap parameter operasi, dan kombinasi beberapa parameter dalam skenario konservatif hingga agresif [1], [9]. Indikator utama yang digunakan meliputi daya poros expander ($\dot{W}_{shaft}$), daya listrik gross ($\dot{W}_{gross}$), konsumsi daya *auxiliary* berupa daya fan ACC (P_{fan}), daya ekstraksi NCG ($Power_{NCG}$), daya pompa reinjeksi ($Power_{pump}$), serta daya listrik bersih (W_{net}). Kualitas uap outlet (x_2) digunakan untuk memperkirakan kandungan moisture setelah ekspansi, sedangkan beban panas digunakan untuk menilai kebutuhan sistem kondensasi. Kondisi yang meningkatkan *pressure ratio* dan daya *expander* dapat disertai peningkatan kandungan *moisture*, kebutuhan vakum, daya ekstraksi NCG, dan konsumsi daya fan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diposisikan sebagai *preliminary thermodynamic and sensitivity analysis* untuk mengidentifikasi potensi daya dan parameter kritis sebelum dilakukan desain detail, analisis ekonomi, serta validasi eksperimental.

3.1. Kesetimbangan Massa Separator

Separator digunakan untuk menurunkan kandungan fase cair sebelum campuran *steam-gas* memasuki *screw expander*. Pada kondisi awal, *total wet steam exhaust* sebesar 34.000 kg/jam atau 9,444 kg/s memiliki kualitas uap 0,90. Aliran tersebut terdiri atas uap sebesar 30.600 kg/jam dan fase cair sebesar 3.400 kg/jam. Hasil neraca massa separator pada kondisi base case disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Neraca massa separator kondisi base case

No.	Komponen	Nilai
1	Total wet steam exhaust	34.000 kg/jam
2	Kualitas uap awal, (x_0)	0,9
3	Laju massa uap	30.600 kg/jam
4	Laju massa cairan awal	3.400 kg/jam
5	Efisiensi separator, (η_{sep})	0,9
6	Cairan yang dipisahkan	3.060 kg/jam
7	Liquid carry-over	340 kg/jam
8	Laju massa masuk expander	30.940 kg/jam
9	Kualitas setelah separator, (x_{sep})	0,989

Efisiensi separator 90% menurunkan liquid carry-over dari 0,9444 kg/s menjadi 0,0944 kg/s. Kualitas fluida yang memasuki *expander* meningkat dari 0,90 menjadi 0,989, sehingga fraksi cairan masuk *expander* berkurang dari 10% menjadi sekitar 1,1%. Penurunan tersebut penting karena *screw expander* memang lebih toleran terhadap *wet steam* dibandingkan turbin konvensional, tetapi kandungan cairan yang terlalu tinggi tetap dapat meningkatkan rugi gesek, fluktuasi torsi, akumulasi cairan, serta beban hidraulik pada rotor dan *casing*.

Pemisahan cairan tidak secara langsung meningkatkan daya dalam jumlah besar. Pengurangan carry-over meningkatkan kualitas campuran, tetapi pada saat yang sama menurunkan laju massa total yang melewati expander. Oleh karena itu, manfaat separator pada konfigurasi ini lebih dominan terhadap reliabilitas daripada peningkatan daya. Separator yang efektif berpotensi mengurangi risiko keausan rotor, gangguan shaft seal, vibrasi, dan ketidakstabilan operasi akibat masuknya droplet dalam jumlah besar.

3.2. Kinerja Sistem pada Kondisi Base Case

Kondisi *base case* digunakan sebagai titik acuan untuk seluruh analisis sensitivitas. Parameter utamanya terdiri atas tekanan kondensor 0,20 bar abs, efisiensi expander 0,70, temperatur ambien 28°C, pressure drop ACC 120 Pa, efisiensi fan 0,57, dan *pressure difference* reinjeksi 20 bar. Hasil perhitungan kondisi dasar ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 3. Hasil perhitungan sistem pada kondisi base case

No.	Parameter	Nilai
1.	Tekanan kondensor (P_c)	0,20 bar abs
2.	Temperatur saturasi kondensor	60,06°C
3.	Laju massa masuk expander	8,594 kg/s
4.	Kualitas inlet setelah separator (x_{sep})	0,989
5.	Entalpi inlet (h_1)	2.649 kJ/kg
6.	Entropi inlet (s_1)	7,299 kJ/kg-K
7.	Entalpi outlet isentropik (h_{2s})	2.406 kJ/kg
8.	Entalpi outlet aktual (h_2)	2.479 kJ/kg
9.	Kualitas outlet isentropik (s_{2s})	0,914
10.	Kualitas outlet aktual (x_2)	0,945
11.	Daya ekspansi steam (W_{steam})	1,462 MW
12.	Daya ekspansi gas (W_{gas})	0,0238 MW
13.	Daya poros (W_{shaft})	1,486 MW
14.	Daya listrik gross (W_{gross})	1,397 MW
15.	Daya fan ACC (P_{fan})	0,1422 MW
16.	Daya ekstraksi NCG (P_{NCG})	0,0645 MW
17.	Daya pompa reinjeksi (P_{pump})	0,0282 MW
18.	Total daya auxiliary	0,2349 MW
19.	Beban panas ACC (Q_{ACC})	19,15 MWth
20.	Daya listrik bersih (W_{net})	1,162 MW

Kontribusi daya terbesar berasal dari ekspansi steam sebesar 1,462 MW, sedangkan kontribusi gas hanya 0,0238 MW. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan NCG lebih signifikan sebagai beban ekstraksi dibandingkan sebagai sumber kerja ekspansi. Setelah efisiensi generator 94% diperhitungkan, daya poros 1,486 MW menghasilkan daya listrik gross 1,397 MW. Total daya auxiliary mencapai 0,2349 MW atau sekitar 16,8% dari daya gross. Fan ACC merupakan auxiliary load terbesar, yaitu 0,1422 MW, diikuti NCG extraction sebesar 0,0645 MW dan pompa reinjeksi sebesar 0,0282 MW. Setelah seluruh konsumsi auxiliary dikurangkan, diperoleh daya bersih 1,162 MW.

Nilai x_2 sebesar 0,945 menunjukkan kandungan *moisture outlet* sekitar 5,5%. Kondisi ini masih perlu dievaluasi terhadap kemampuan aktual screw expander, terutama pengaruhnya terhadap clearance, sealing, pelumasan, korosi, dan erosi. Screw expander pada umumnya lebih sesuai untuk fluida dua fase daripada turbomachinery konvensional, tetapi performa aktualnya tetap dipengaruhi oleh rotor *profile*, internal *leakage*, shaft seal *leakage*, dan distribusi tekanan di dalam ruang kerja.

Beban panas ACC sebesar 19,15 MWth jauh lebih besar daripada daya listrik bersih yang diperoleh. Perbandingan ini menunjukkan bahwa keberhasilan sistem sangat ditentukan oleh kemampuan kondensor membuang panas pada tekanan rendah. Karena tekanan inlet hanya 0,98 bar abs, ekspansi tidak dapat menghasilkan kerja yang berarti apabila fluida dibuang langsung ke atmosfer. Sistem harus mempertahankan tekanan outlet di bawah tekanan inlet melalui ACC dan sistem vakum.

3.3. Sensitivitas Tekanan Kondensor

Tekanan kondensor menentukan *pressure ratio* dan penurunan entalpi yang tersedia pada expander. Dalam skenario ini, parameter lain dipertahankan pada kondisi base case. Hasil sensitivitas tekanan kondensor ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Pengaruh tekanan kondensor terhadap performa sistem

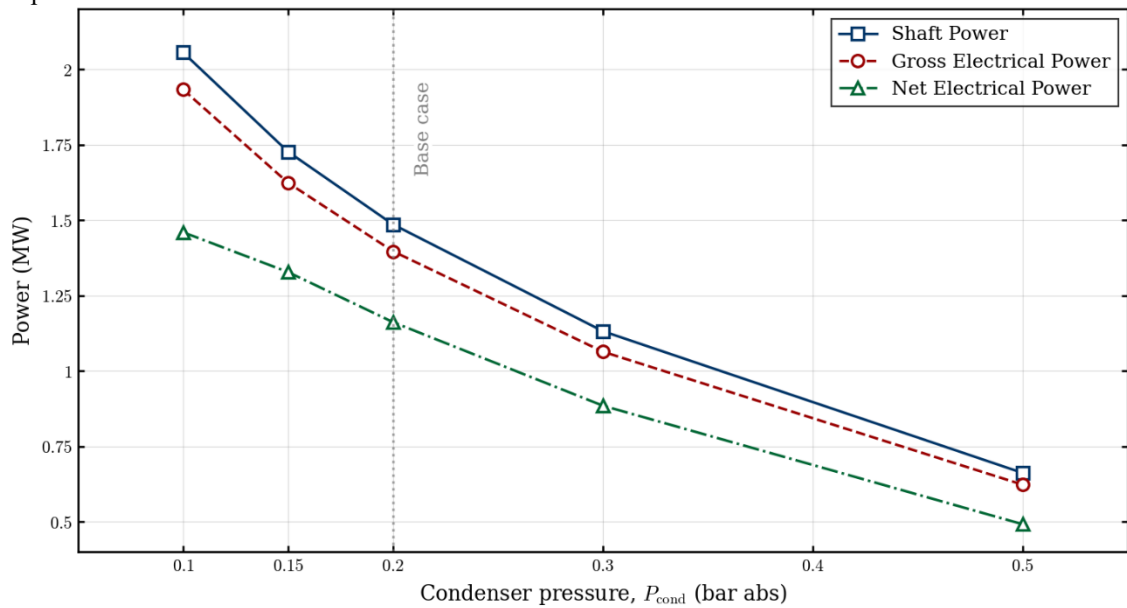
P_c bar _{abs}	T_{sat} °C	x_2	W_{shaft} MW	W_{gross} MW	P_{fan} MW	P_{NCG} MW	P_{pump} MW	Q_{ACC} MWth	W_{net} MW
0,50	81,32	0,9689	0,662	0,623	0,0757	0,0267	0,0282	19,19	0,492
0,30	69,09	0,9551	1,132	1,064	0,1035	0,0473	0,0282	19,17	0,885
0,20	60,06	0,9450	1,486	1,397	0,1422	0,0645	0,0282	19,15	1,162
0,15	53,97	0,9381	1,727	1,624	0,1902	0,0772	0,0282	19,13	1,328
0,10	45,81	0,9289	2,056	1,933	0,3480	0,0960	0,0282	19,10	1,460

Penurunan tekanan kondensor dari 0,50 menjadi 0,10 bar abs meningkatkan daya poros dari 0,662 menjadi 2,056 MW. Daya bersih meningkat dari 0,492 menjadi 1,460 MW, sehingga rentang pengaruh tekanan kondensor mencapai 0,968 MW. Peningkatan ini disebabkan oleh kenaikan *pressure ratio* dan penurunan entalpi yang lebih besar antara inlet dan outlet expander.

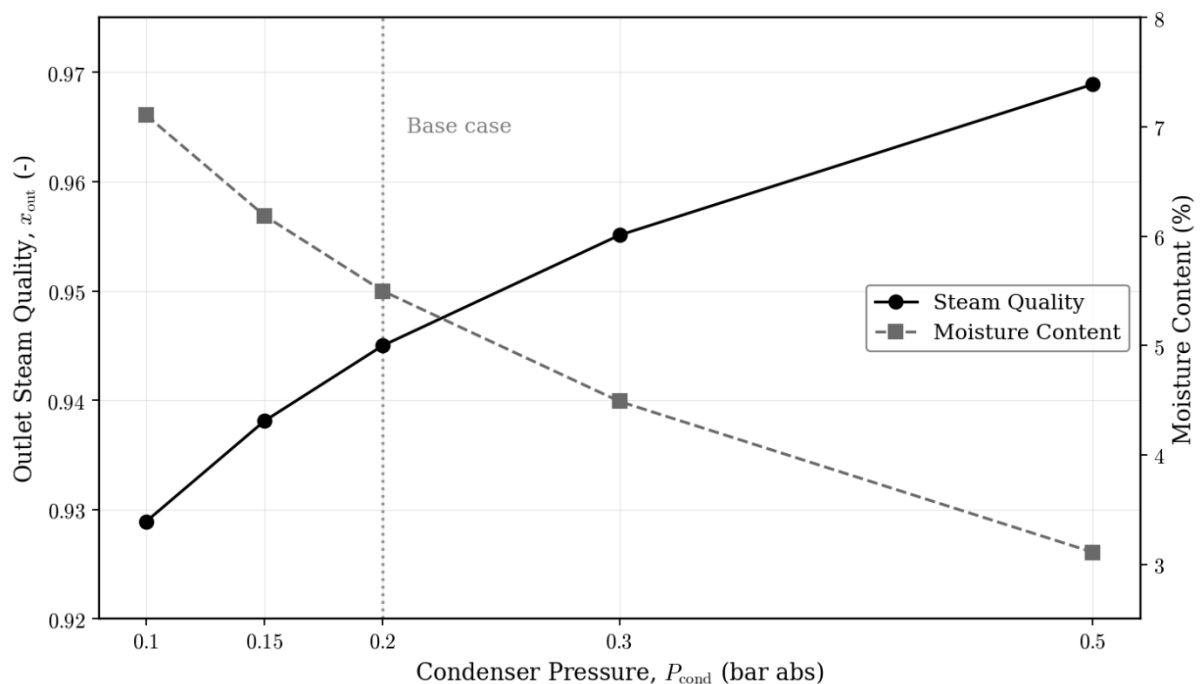
Namun, peningkatan daya *expander* diikuti oleh kenaikan konsumsi *auxiliary*. Pada 0,50 bar abs, daya fan hanya 0,0757 MW dan daya ekstraksi NCG 0,0267 MW. Ketika tekanan kondensor diturunkan menjadi 0,10 bar abs, daya fan meningkat menjadi 0,3480 MW dan daya ekstraksi NCG menjadi 0,0960 MW. Sistem vakum yang lebih dalam memerlukan aliran udara ACC yang lebih besar dan kerja kompresi NCG yang lebih tinggi.

Penurunan tekanan kondensor juga menurunkan kualitas uap outlet dari 0,9689 menjadi 0,9289. Dengan demikian, kandungan moisture meningkat dari sekitar 3,11% menjadi 7,11%. Kondisi tersebut dapat meningkatkan risiko *pressure ratio*, *leakage*, dan rugi mekanis di dalam *expander*. Beban panas ACC relatif konstan pada kisaran 19,10–19,19 MWth karena sebagian besar energi fluida tetap harus dibuang melalui kondensasi.

Hasil ini menunjukkan bahwa tekanan kondensor merupakan parameter paling dominan dalam penelitian. Rentang 0,20–0,30 bar abs dapat diposisikan sebagai rentang awal yang lebih moderat, sedangkan 0,10 bar abs merupakan kondisi agresif yang memerlukan ACC berukuran besar, sistem ekstraksi NCG yang kuat, sealing yang baik, dan verifikasi kemampuan *expander* menangani wet steam. Hubungan tekanan kondensor dengan daya dan kualitas outlet dapat disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Pengaruh tekanan kondensor terhadap daya poros expander, daya listrik gross, dan daya listrik net sistem



Gambar 3. Pengaruh tekanan kondensor terhadap kualitas uap dan kandungan moisture pada outlet steam screw expander

3.4. Sensitivitas Efisiensi Expander

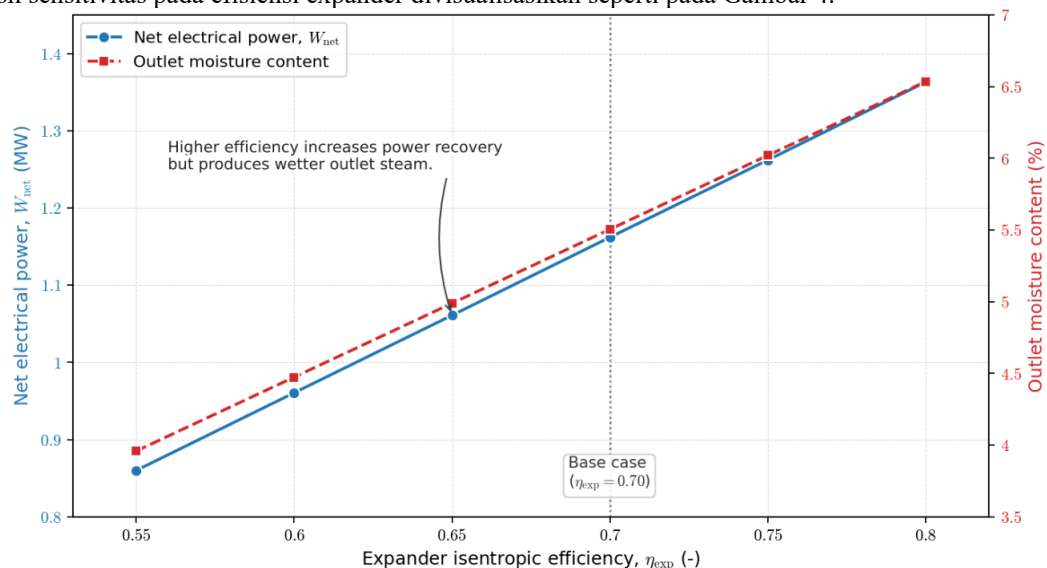
Efisiensi expander mewakili kemampuan mesin mengonversi penurunan entalpi isentropik menjadi kerja aktual. Parameter tersebut dipengaruhi oleh bentuk rotor, clearance, internal *leakage*, shaft seal *leakage*, gesekan, *pressure ratio*, dan kondisi partial load. Hasil sensitivitas efisiensi expander ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Pengaruh efisiensi expander terhadap performa sistem

η_{exp}	x_2	W_{steam} MW	Moisture outlet (%)	W_{gas} MW	W_{shaft} MW	W_{gross} MW	P_{fan} MW	P_{pump} MW	Q_{ACC} MWth	W_{net} MW
0,55	0,9604	1,149	3,959	0,01873	1,167	1,097	0,1445	0,02817	19,46	0,8601
0,60	0,9553	1,253	4,474	0,02044	1,273	1,197	0,1438	0,02817	19,36	0,9606
0,65	0,9501	1,357	4,989	0,02214	1,380	1,297	0,1430	0,02817	19,25	1,061
0,70	0,9450	1,462	5,505	0,02384	1,486	1,397	0,1422	0,02817	19,15	1,162
0,75	0,9398	1,566	6,020	0,02554	1,592	1,496	0,1414	0,02817	19,04	1,262
0,80	0,9346	1,671	6,535	0,02725	1,698	1,596	0,1407	0,02817	18,94	1,363

Daya bersih meningkat hampir linear dari 0,860 MW pada efisiensi 0,55 menjadi 1,363 MW pada efisiensi 0,80. Setiap kenaikan efisiensi sebesar 0,05 meningkatkan daya bersih sekitar 0,10 MW. Total rentang pengaruhnya mencapai 0,503 MW. Kenaikan efisiensi menyebabkan entalpi outlet aktual semakin rendah, sehingga penurunan entalpi yang diubah menjadi kerja semakin besar. Hal tersebut meningkatkan W_{steam} , W_{shaft} , dan W_{gross} . Pada saat yang sama, kualitas outlet turun dari 0,9604 menjadi 0,9346 karena lebih banyak energi diambil dari fluida. Moisture outlet meningkat dari sekitar 3,96% menjadi 6,54%.

Beban panas ACC sedikit menurun dari 19,46 menjadi 18,94 MWth karena sebagian energi fluida telah dikonversi menjadi kerja tambahan. Penurunan Q_{ACC} juga menyebabkan daya fan sedikit menurun. Daya NCG extraction dan pompa reinjeksi tetap masing-masing sebesar 0,0645 dan 0,0282 MW karena tekanan kondensor dan tekanan reinjeksi tidak berubah. Efisiensi dengan nilai 0,70 digunakan sebagai *base case* yang moderat. Nilai aktual perlu ditentukan berdasarkan desain rotor, celah radial dan aksial, kondisi *shaft seal*, kecepatan putar, rasio volume bawaan, serta kondisi wet steam aktual. Hasil sensitivitas pada efisiensi expander divisualisasikan seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengaruh efisiensi isentropik *steam screw expander* terhadap daya bersih dan kualitas uap outlet

3.5. Sensitivitas Kualitas Uap Awal

Kualitas uap awal menentukan proporsi uap dan cairan dalam total wet steam exhaust. Pada laju massa total yang sama, kenaikan kualitas uap meningkatkan massa uap aktual yang mampu memberikan kontribusi kerja lebih besar. Hasil sensitivitas kualitas uap awal ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Pengaruh kualitas uap awal terhadap performa sistem

x_0	x_{sep}	$\dot{m}_{exp}$ kg/s	x_2	W_{steam} MW	W_{shaft} MW	W_{gross} MW	P_{fan} MW	Q_{ACC} MWth	W_{net} MW
0,85	0,9827	8,169	0,9393	1,381	1,405	1,320	0,1344	18,09	1,093
0,88	0,9865	8,424	0,9428	1,429	1,453	1,366	0,1391	18,72	1,134
0,90	0,9890	8,594	0,9450	1,462	1,486	1,397	0,1422	19,15	1,162

x_0	x_{sep}	$\dot{m}_{exp}$ kg/s	x_2	W_{steam} MW	W_{shaft} MW	W_{gross} MW	P_{fan} MW	Q_{ACC} MWth	W_{net} MW
0,92	0,9914	8,764	0,9471	1,494	1,518	1,427	0,1453	19,57	1,189
0,95	0,9948	9,019	0,9501	1,543	1,567	1,473	0,1500	20,20	1,230
1,00	1,0000	9,444	0,9547	1,624	1,647	1,549	0,1579	21,26	1,298

Daya bersih meningkat dari 1,093 MW pada kualitas awal 0,85 menjadi 1,298 MW pada kualitas 1,00. Rentang pengaruhnya mencapai 0,205 MW. Peningkatan tersebut terjadi karena massa uap aktual dan massa yang masuk ke expander meningkat, sementara fraksi cairan yang harus dipisahkan berkurang.

Kualitas outlet meningkat dari 0,9393 menjadi 0,9547, sehingga kandungan moisture outlet turun dari 6,07% menjadi 4,53%. Kondisi inlet yang lebih kering dengan demikian memberikan dua manfaat, yaitu peningkatan daya dan penurunan kandungan cairan setelah ekspansi.

Kenaikan kualitas uap juga meningkatkan beban panas ACC dari 18,09 menjadi 21,26 MWth. Akibatnya, daya fan meningkat dari 0,1344 menjadi 0,1579 MW. Meskipun demikian, kenaikan daya gross lebih besar daripada kenaikan konsumsi fan sehingga daya bersih tetap meningkat. Hasil ini menunjukkan bahwa pengukuran kualitas uap aktual sangat penting karena ketidakpastian x_0 dapat memengaruhi prediksi daya, ukuran separator, dan beban kondensor.

3.6. Sensitivitas Efisiensi Separator

Efisiensi separator divariasikan untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap liquid carry-over, kualitas inlet dan outlet, serta daya bersih. Hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Pengaruh efisiensi separator terhadap kualitas fluida dan daya bersih

η_{sep}	x_{sep}	$\dot{m}_{carry}$ kg/s	$\dot{m}_{exp}$ kg/s	x_2	W_{shaft} MW	W_{gross} MW	P_{fan} MW	Q_{ACC} MWth	W_{net} MW
0,80	0,9783	0,1889	8,689	0,9354	1,486	1,397	0,1423	19,16	1,162
0,85	0,9836	0,1417	8,642	0,9402	1,486	1,397	0,1423	19,15	1,162
0,90	0,9890	0,0944	8,594	0,9450	1,486	1,397	0,1422	19,15	1,162
0,95	0,9945	0,0472	8,547	0,9498	1,485	1,396	0,1422	19,14	1,161
0,99	0,9989	0,0094	8,509	0,9537	1,485	1,396	0,1421	19,13	1,161

Daya bersih hampir tidak berubah dan berada pada kisaran 1,161–1,162 MW. Kenaikan efisiensi separator menurunkan massa cairan yang ikut masuk expander, tetapi juga menurunkan massa total fluida yang diekspansikan. Kedua pengaruh tersebut hampir saling mengimbangi sehingga perubahan daya sangat kecil.

Sebaliknya, pengaruhnya terhadap kondisi fluida cukup besar. Liquid carry-over turun dari 0,1889 menjadi 0,0094 kg/s atau sekitar 95%, sedangkan kualitas inlet meningkat dari 0,9783 menjadi 0,9989. Kualitas outlet juga naik dari 0,9354 menjadi 0,9537, sehingga *moisture outlet* turun dari 6,46% menjadi 4,63%.

Hasil tersebut memperkuat bahwa separator merupakan komponen reliabilitas. Efisiensi separator yang tinggi berpotensi mengurangi akumulasi cairan, torque fluctuation, beban pada bearing, gangguan sealing, vibrasi, serta kebutuhan pemeliharaan. Namun, peningkatan efisiensi separator tidak dapat diperlakukan sebagai strategi utama peningkatan daya.

3.7. Sensitivitas Temperatur Ambien ACC

Temperatur ambien memengaruhi beda temperatur efektif antara fluida yang dikondensasikan dan udara pendingin. Dalam skenario ini, tekanan kondensor dipertahankan pada 0,20 bar abs agar pengaruh temperatur *ambien* terhadap kebutuhan fan dapat diamati secara terpisah. Hasil sensitivitas ditampilkan pada Tabel 8.

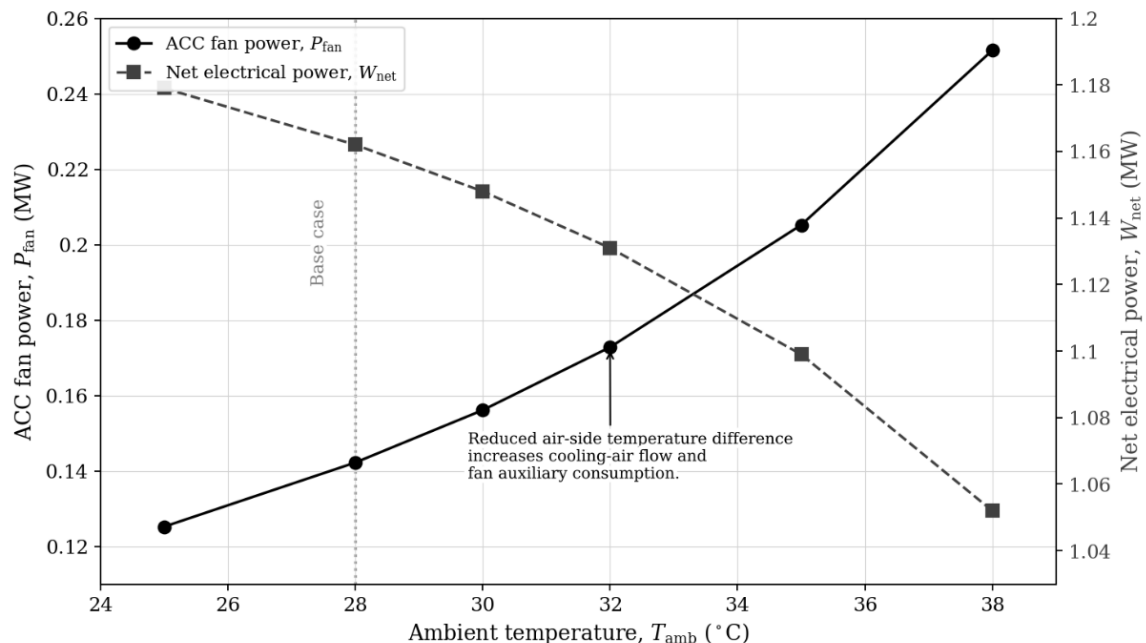
Tabel 8. Pengaruh temperatur ambien terhadap performa ACC dan daya bersih

T_{amb} °C	ΔT_{air} K	ρ_{air} kg/m ³	$\dot{m}_{air}$ kg/s	$\dot{V}_{air}$ m ³ /s	P_{fan} MW	Q_{ACC} MWth	W_{gross} MW	W_{net} MW
25	27,06	1,184	704,1	594,6	0,1252	19,15	1,397	1,179
28	24,06	1,172	791,9	675,5	0,1422	19,15	1,397	1,162
30	22,06	1,165	863,7	741,6	0,1561	19,15	1,397	1,148
32	20,06	1,157	949,8	821,0	0,1728	19,15	1,397	1,131
35	17,06	1,146	1.117	974,9	0,2052	19,15	1,397	1,099
38	14,06	1,135	1.355	1.194	0,2515	19,15	1,397	1,052

Kenaikan temperatur *ambien* dari 25°C menjadi 38°C menurunkan *driving temperature difference* dari 27,06 menjadi 14,06 K. Untuk membuang beban panas yang sama, laju massa udara meningkat dari 704,1 menjadi 1.355 kg/s dan laju volumetrik udara meningkat dari 594,6 menjadi 1.194 m³/s.

Konsekuensinya, daya *fan* naik dari 0,1252 menjadi 0,2515 MW, sedangkan daya bersih turun dari 1,179 menjadi 1,052 MW. Rentang pengaruh temperatur *ambien* mencapai 0,127 MW atau rata-rata sekitar 9,8 kW untuk setiap kenaikan 1°C pada rentang yang dianalisis.

Hasil tersebut masih bersifat konservatif terhadap penurunan performa nyata karena tekanan kondensor dipertahankan konstan. Pada ACC aktual, temperatur *ambien* yang lebih tinggi dapat menyebabkan tekanan kondensor meningkat apabila kapasitas *heat-transfer surface* dan *fan* telah mencapai batasnya. Kenaikan tekanan kondensor tersebut akan menurunkan daya *expander*, sehingga pengaruh temperatur *ambien* aktual dapat lebih besar daripada hasil model ini. Gambar 5 menunjukkan hasil sensitivitas temperatur *ambien* terhadap performa *Air-Cooled Condenser* (ACC), khususnya terhadap daya fan ACC dan daya listrik bersih sistem.



Gambar 5. Pengaruh temperatur ambien terhadap daya fan dan daya bersih

3.8. Sensitivitas Desain Fan ACC

Sensitivitas desain fan dievaluasi melalui kombinasi pressure drop sisi udara 80–250 Pa dan efisiensi fan 0,45–0,70. Karena laju volumetrik udara dipertahankan sebesar 675,5 m³/s, perubahan daya bersih terutama berasal dari perubahan daya fan. Hasilnya ditunjukkan pada Tabel 9.

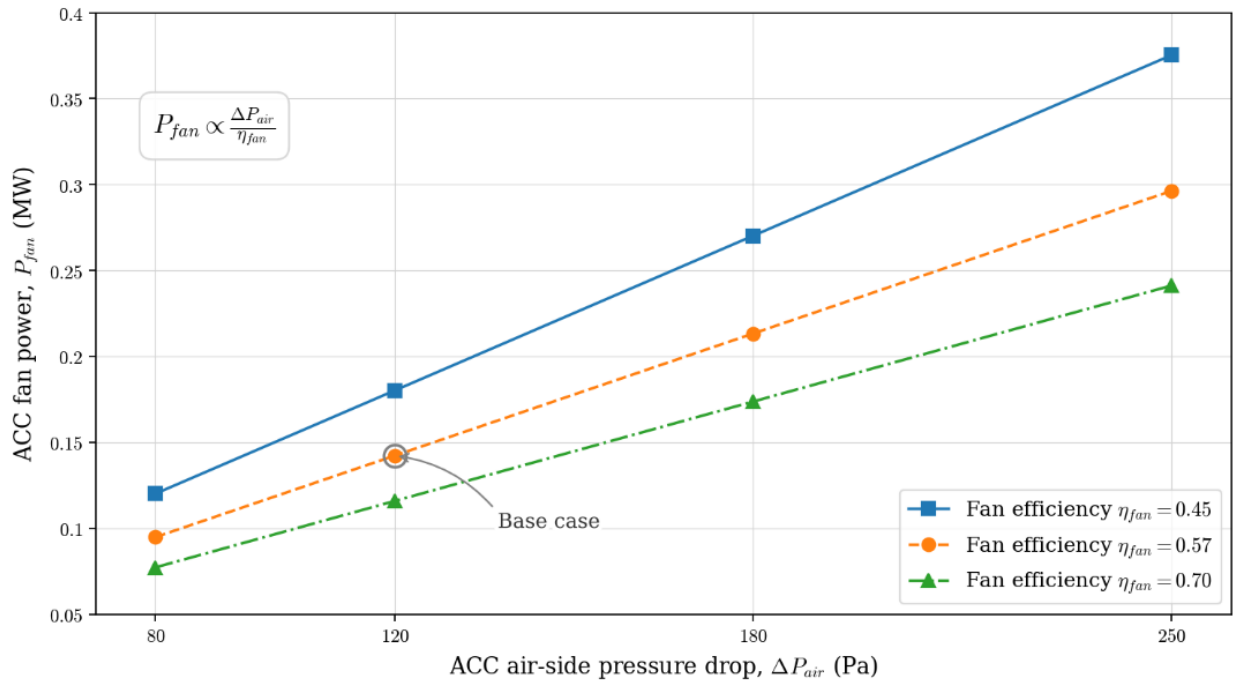
Tabel 9. Pengaruh pressure drop dan efisiensi fan ACC terhadap daya bersih

ΔP_{air} Pa	η_{fan} (K)	P_{fan} (MW)	W_{net} MW
80	0,45	0,1201	1,184
80	0,57	0,0948	1,209
80	0,70	0,0772	1,227
120	0,45	0,1801	1,124
120	0,57	0,1422	1,162
120	0,70	0,1158	1,188
180	0,45	0,2702	1,034
180	0,57	0,2133	1,091
180	0,70	0,1737	1,130
250	0,45	0,3753	0,929
250	0,57	0,2963	1,008
250	0,70	0,2412	1,063

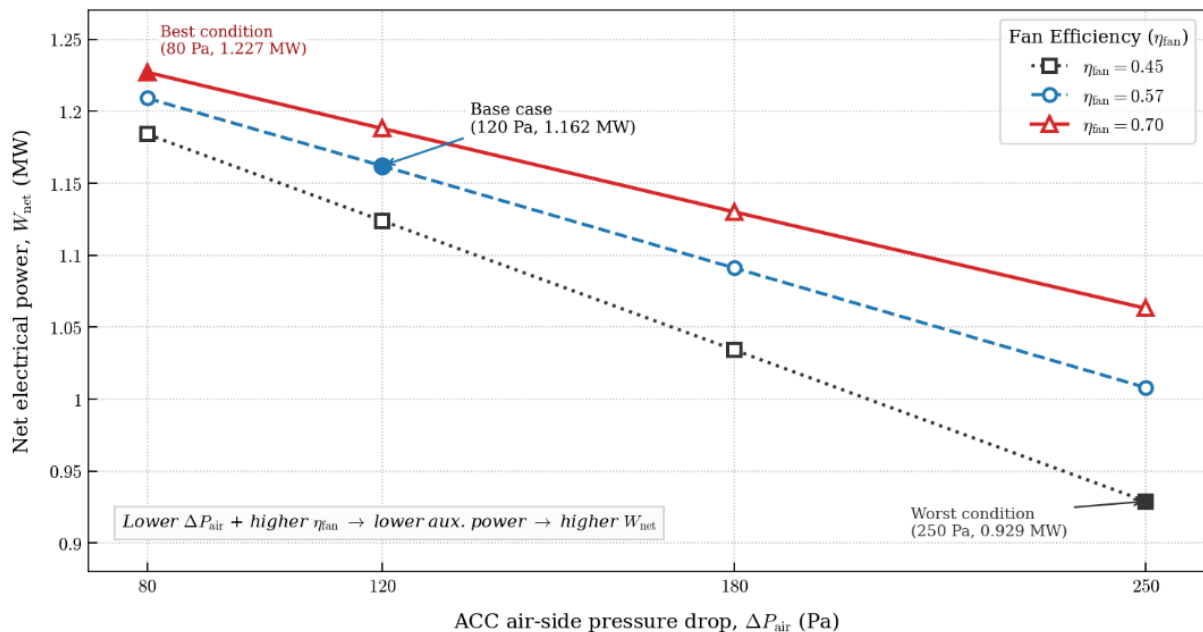
Kondisi terbaik diperoleh pada pressure drop 80 Pa dan efisiensi fan 0,70, dengan daya fan 0,0772 MW dan daya bersih 1,227 MW. Kondisi terburuk terjadi pada pressure drop 250 Pa dan efisiensi fan 0,45, dengan daya fan 0,3753 MW dan daya bersih 0,929 MW. Perbedaan daya bersih antara kedua kondisi mencapai 0,298 MW.

Daya fan berbanding lurus dengan pressure drop dan berbanding terbalik dengan efisiensi fan. Pada pressure drop 80 Pa, peningkatan efisiensi fan dari 0,45 menjadi 0,70 meningkatkan daya bersih sekitar 0,043 MW. Pada pressure drop 250 Pa, peningkatan yang sama menghasilkan kenaikan daya bersih sekitar 0,134 MW. Dengan demikian, manfaat penggunaan fan efisien menjadi semakin besar ketika pressure drop sistem tinggi.

Pressure drop ACC dipengaruhi oleh konfigurasi tube bundle, fin density, fouling, louver, ducting, dan kecepatan udara. Efisiensi total dipengaruhi oleh blade *profile*, blade pitch, motor, transmission losses, dan sistem kontrol. Oleh karena itu, optimasi ACC harus mempertimbangkan kompromi antara luas perpindahan panas, pressure drop, biaya investasi, dan konsumsi auxiliary. Sensitivitas pada pressure drop ACC dalam mempengaruhi nilai fan power dan daya bersih ditunjukkan pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Pengaruh pressure drop ACC terhadap daya fan



Gambar 7. Interaksi pressure drop dan efisiensi fan terhadap daya bersih

3.9. Sensitivitas Tekanan Reinjeksi

Pressure difference reinjeksi menentukan kerja pompa untuk mengembalikan kondensat ke sumur atau jaringan reinjeksi. Besaran tersebut dapat mencakup tekanan sumur, static head, rugi gesek pipa, valve, fitting, dan tekanan minimum agar fluida dapat masuk ke formasi. Hasil sensitivitasnya ditunjukkan pada Tabel 9.

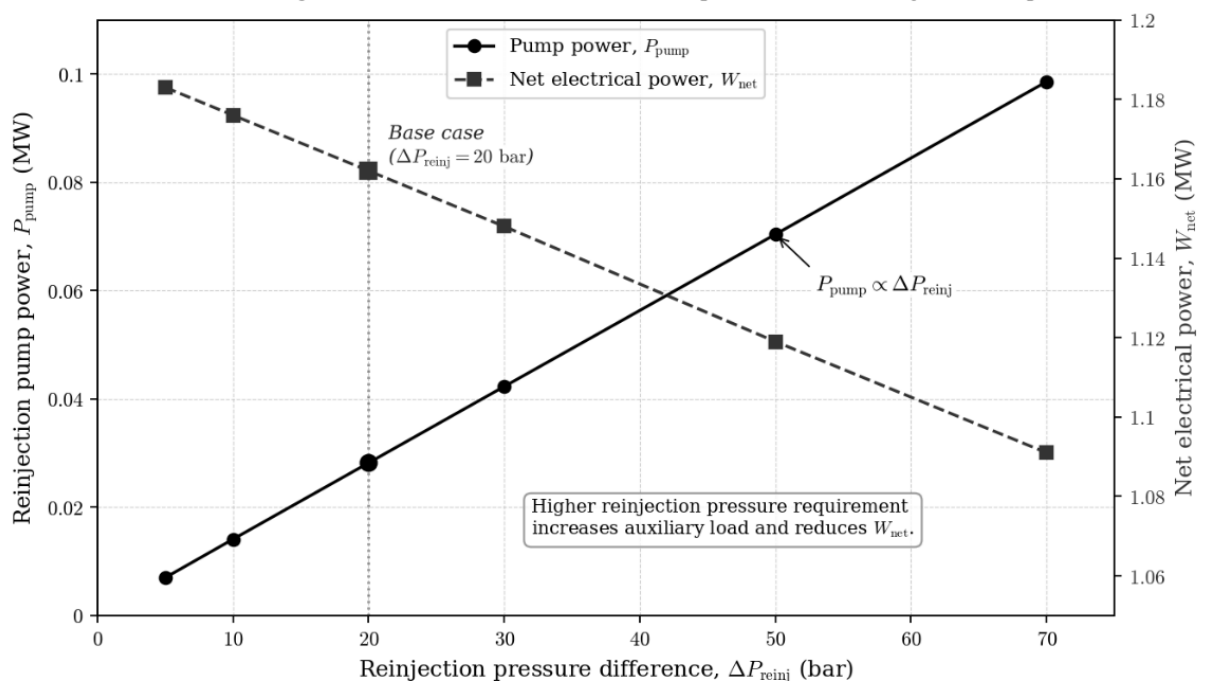
Tabel 10. Pengaruh tekanan reinjeksi terhadap daya pompa dan daya bersih

ΔP_{reinj} (bar)	P_{pump} (MW)	W_{net} MW
5	0,0070	1,183
10	0,0141	1,176
20	0,0282	1,162
30	0,0423	1,148
50	0,0704	1,119
70	0,0986	1,091

Daya pompa meningkat hampir linear dari 0,0070 MW pada 5 bar menjadi 0,0986 MW pada 70 bar. Akibatnya, daya bersih turun dari 1,183 menjadi 1,091 MW. Rentang pengaruh tekanan *reinjeksi* terhadap daya bersih mencapai 0,092 MW.

Pengaruh ini lebih kecil dibandingkan tekanan kondensor, efisiensi *expander*, desain *fan* ACC, kualitas uap, dan temperatur *ambient*. Meskipun demikian, daya pompa tetap perlu diperhitungkan karena karakteristik sumur reinjeksi dapat berubah terhadap waktu akibat *scaling*, perubahan *injectivity*, dan kenaikan rugi tekanan pada jaringan. Nilai aktual harus ditentukan dari data wellhead pressure, elevasi, konfigurasi pipa, dan karakteristik formasi.

Effect of Reinjection Pressure Difference on Pump Power and Net System Output

**Gambar 8.** Pengaruh *pressure difference* reinjeksi terhadap daya pompa dan daya bersih

3.10. Skenario Gabungan

Analisis satu parameter tidak sepenuhnya menggambarkan kondisi operasi karena parameter sistem dapat berubah secara bersamaan. Oleh karena itu, disusun skenario konservatif, moderat, optimis, dan agresif. Hasil skenario gabungan disajikan pada Tabel 10.

Tabel 11. Hasil skenario gabungan konservatif, moderat, optimis, dan agresif

Parameter	Konservatif	Moderat	Optimis	Agresif
P_c (bar _{abs})	0,30	0,20	0,15	0,10
η_{exp}	0,65	0,70	0,75	0,75
x_0	0,88	0,90	0,95	0,95
η_{sep}	0,85	0,90	0,99	0,99
T_{amb} (°C)	35	28	25	25
ΔP_{air} (Pa)	180	120	100	80
η_{fan}	0,50	0,57	0,65	0,70
ΔP_{reinj} (bar)	50	20	10	10
x_{sep}	0,9800	0,9890	0,9995	0,9995

Parameter	Konservatif	Moderat	Optimis	Agresif
x_2	0,9508	0,9450	0,9412	0,9307
W_{shaft} (MW)	1,028	1,486	1,951	2,322
W_{gross} (MW)	0,9665	1,397	1,834	2,183
P_{fan} (MW)	0,2256	0,1422	0,1236	0,1499
P_{NCG} (MW)	0,0473	0,0645	0,0772	0,0960
P_{pump} (MW)	0,0704	0,0282	0,0141	0,0141
Q_{ACC} (MWth)	18,83	19,15	20,04	19,98
W_{net} (MW)	0,623	1,162	1,619	1,923

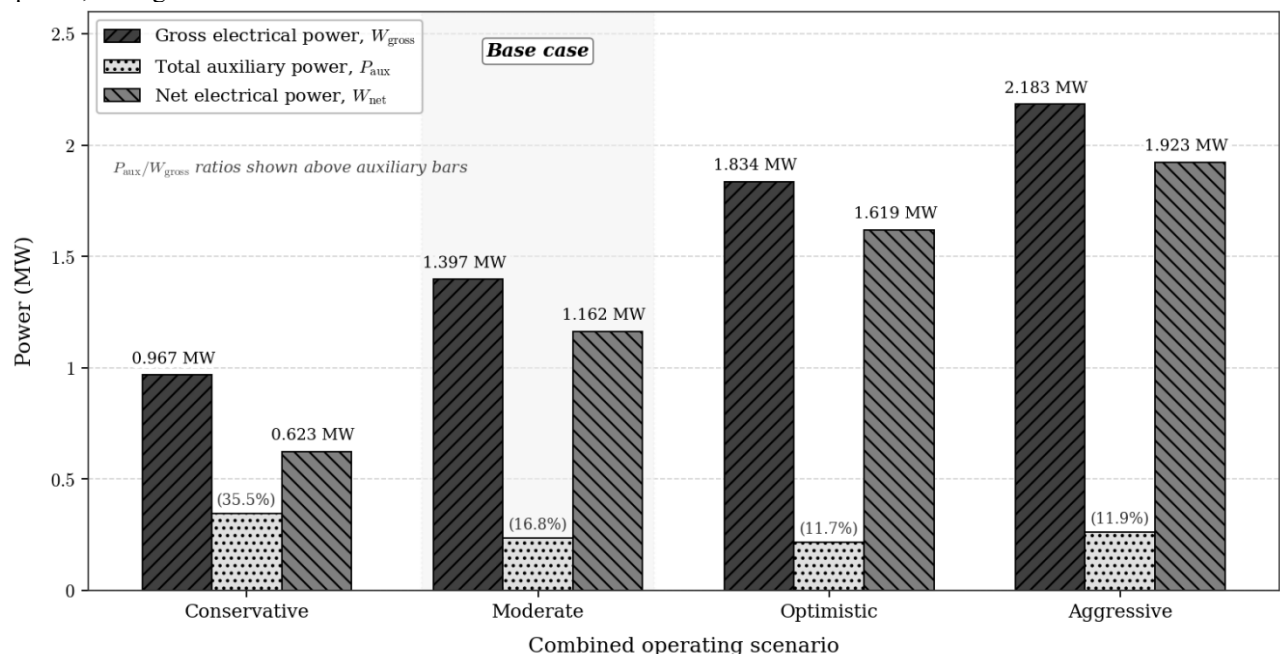
Skenario konservatif menghasilkan daya bersih 0,623 MW. Nilai tersebut dipengaruhi oleh tekanan kondensor yang relatif tinggi, efisiensi expander rendah, temperatur ambien tinggi, pressure drop ACC besar, efisiensi fan rendah, dan tekanan reinjeksi tinggi. Total auxiliary power mencapai sekitar 0,343 MW atau lebih dari sepertiga daya gross, dengan fan ACC sebagai komponen auxiliary terbesar.

Skenario moderat menghasilkan daya bersih 1,162 MW dan digunakan sebagai kondisi representatif penelitian. Parameter pada kondisi ini tidak menggambarkan kondisi maksimum, tetapi memberikan basis awal yang lebih seimbang antara tekanan kondensor, efisiensi expander, temperatur ambien, dan konsumsi auxiliary.

Skenario optimis menghasilkan daya bersih 1,619 MW. Tekanan kondensor 0,15 bar abs dan efisiensi expander 0,75 meningkatkan daya gross menjadi 1,834 MW, sedangkan desain ACC dan tekanan reinjeksi yang lebih baik menjaga total auxiliary power sekitar 0,215 MW. Kondisi ini dapat diposisikan sebagai *upper practical case*, tetapi masih memerlukan verifikasi ukuran ACC dan performa expander aktual.

Skenario agresif menghasilkan daya bersih tertinggi sebesar 1,923 MW. Namun, kondisi tersebut memerlukan tekanan kondensor 0,10 bar abs, pressure drop ACC 80 Pa, efisiensi fan 0,70, dan efisiensi expander 0,75. Kualitas outlet sebesar 0,9307 menunjukkan moisture sekitar 6,93%, sedangkan beda temperatur efektif udara hanya sekitar 12,81 K. Kondisi ini akan menuntut luas perpindahan panas yang besar, fan system yang efisien, sistem NCG extraction yang kuat, serta expander dengan clearance dan sealing yang sesuai.

Rentang daya bersih seluruh skenario gabungan adalah 0,623–1,923 MW, dengan selisih 1,300 MW antara kondisi konservatif dan agresif. Nilai tertinggi tidak dapat langsung dianggap sebagai kondisi optimum karena model belum memasukkan ukuran fisik ACC, biaya investasi, mechanical losses rinci, fouling, variasi NCG composition, kontrol operasi, serta *leakage* aktual. Gambar 9 menunjukkan perbandingan dari setiap skenario gabungan konservatif, moderat, optimis, dan agresif.



Gambar 9. Perbandingan daya gross, daya auxiliary, dan daya bersih pada skenario gabungan

3.11. Sintesis dan Peringkat Parameter Sensitivitas

Untuk mengidentifikasi faktor yang paling dominan, rentang perubahan daya bersih pada setiap analisis satu parameter dibandingkan. Hasil peringkat sensitivitas ditunjukkan pada Tabel 12.

Tabel 12. Peringkat pengaruh parameter terhadap daya bersih

Peringkat	Parameter	Rentang (W_{net}) (MW)	Perubahan (W_{net}) (MW)	Interpretasi
1	Tekanan kondensor	0,492–1,460	0,968	Menentukan <i>pressure ratio</i> dan enthalpy drop
2	Efisiensi expander	0,860–1,363	0,503	Menentukan kerja aktual dari potensi isentropik
3	Desain fan ACC	0,929–1,227	0,298	Fan merupakan auxiliary load terbesar
4	Kualitas uap awal	1,093–1,298	0,205	Memengaruhi massa uap, daya, dan moisture
5	Temperatur ambien	1,052–1,179	0,127	Memengaruhi driving temperature difference dan fan power
6	Tekanan reinjeksi	1,091–1,183	0,092	Memengaruhi daya pompa secara linear
7	Efisiensi separator	1,161–1,162	$\pm 0,001$	Pengaruh energi kecil, tetapi kritis bagi reliabilitas

Tekanan kondensor menempati peringkat pertama karena secara langsung menentukan *pressure ratio* dan penurunan entalpi pada expander. Namun, penurunan tekanan kondensor juga meningkatkan kebutuhan fan, ekstraksi NCG, dan moisture outlet. Oleh karena itu, tekanan kondensor harus ditentukan melalui optimasi sistem, bukan hanya berdasarkan target daya maksimum.

Efisiensi expander menempati peringkat kedua. Parameter ini sangat dipengaruhi oleh clearance, rotor *profile*, *leakage*, shaft seal, kecepatan putar, dan kondisi partial load. Desain fan ACC berada pada peringkat ketiga karena fan merupakan auxiliary load terbesar pada base case. Hasil ini menunjukkan bahwa desain expander dan kondensor perlu dilakukan secara terintegrasi.

Kualitas uap awal dan temperatur ambien memberikan pengaruh menengah. Kualitas uap menentukan massa uap yang tersedia untuk ekspansi, sedangkan temperatur ambien menentukan kebutuhan aliran udara ACC. Tekanan reinjeksi memberikan pengaruh lebih kecil pada rentang yang dianalisis, tetapi tetap relevan untuk sumur dengan pressure requirement tinggi. Efisiensi separator tidak dominan terhadap daya, namun sangat penting dalam pengendalian liquid carry-over dan keandalan expander.

Peringkat tersebut bergantung pada rentang parameter yang digunakan dan tidak dapat dianggap sebagai koefisien sensitivitas universal. Namun, hasil ini memberikan prioritas awal pengembangan, yaitu penentuan tekanan kondensor yang realistis, pemilihan screw expander dengan efisiensi dan sealing yang baik, optimasi ACC, karakterisasi NCG, validasi kualitas uap, serta evaluasi sistem reinjeksi.

Secara keseluruhan, sistem direct-inject steam–gas screw expander menunjukkan potensi daya bersih 0,623–1,923 MW pada skenario gabungan, dengan kondisi base case sebesar 1,162 MW. Tekanan kondensor, efisiensi expander, dan desain fan ACC merupakan faktor utama yang menentukan daya bersih. Meskipun tekanan kondensor yang lebih rendah meningkatkan daya, peningkatan tersebut disertai kebutuhan vakum yang lebih tinggi, konsumsi auxiliary lebih besar, serta penurunan kualitas uap outlet. Dengan demikian, penentuan kondisi operasi perlu mempertimbangkan tidak hanya daya maksimum, tetapi juga kemampuan ACC, ekstraksi NCG, reliabilitas wet-steam expander, dan kelayakan teknis-ekonomi.

4. Kesimpulan

Hasil *preliminary thermodynamic and sensitivity analysis* menunjukkan bahwa sistem *direct-inject steam–gas screw expander* berpotensi dimanfaatkan untuk pemulihan daya dari *exhaust Back Pressure Turbine* PLTP. Pada kondisi dasar, separator dengan efisiensi 90% meningkatkan kualitas fluida masuk expander dari 0,90 menjadi 0,989, sehingga *liquid carry-over* dapat dikurangi secara signifikan. Dengan tekanan kondensor 0,20 bar abs dan efisiensi expander 0,70, sistem menghasilkan daya listrik bersih sebesar 1,162 MW. Variasi tekanan kondensor menghasilkan daya bersih sebesar 0,492–1,460 MW, sedangkan variasi efisiensi expander menghasilkan daya bersih sebesar 0,860–1,363 MW. Pada skenario gabungan konservatif, moderat, optimis, dan agresif, potensi daya bersih berada pada rentang 0,623–1,923 MW. Tekanan kondensor merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap daya bersih, diikuti oleh efisiensi expander dan desain fan *air-cooled condenser*. Meskipun tekanan kondensor yang lebih rendah meningkatkan *pressure ratio* dan daya expander, kondisi tersebut juga meningkatkan kebutuhan vakum, konsumsi daya fan dan ekstraksi NCG, serta kandungan *moisture* pada outlet expander.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem ini layak dikaji lebih lanjut sebagai alternatif *power recovery* tambahan pada PLTP, tetapi belum dapat diperlakukan sebagai desain final atau dasar penilaian kelayakan komersial. Pengembangan berikutnya perlu mencakup validasi menggunakan laju aliran dan komposisi NCG aktual, perancangan ACC secara rinci berdasarkan kondisi lingkungan dan karakteristik perpindahan panas, serta pemodelan *clearance*, *internal leakage*, dan *shaft-seal leakage* pada screw expander. Analisis teknis juga perlu dilengkapi dengan perhitungan

kerugian mekanis, analisis ekonomi, evaluasi keandalan, dan pengujian eksperimental agar potensi daya, kondisi operasi, serta kelayakan penerapan sistem dapat dinilai secara lebih akurat.

Daftar Pustaka

- [1] K. Khasani, G. A. M. Ashfania, V. A. Brilian, R. Hosnan, L. R. Siregar, and T. Warsokusumo, "Techno-economic analysis of an add-on geothermal power plant to utilise exhaust geothermal steam from a back-pressure turbine: A case study in Ulumbu geothermal field, Indonesia," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 44, no. 1, p. 2515443, 2025, doi: 10.1080/14786451.2025.2515443.
- [2] F. Tanbar *et al.*, "Techno-economic studies of low GWP-organic Rankine cycle for low-level geothermal waste heat utilization in remote island of Indonesia," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 65, p. 105385, 2025, doi: 10.1016/j.csite.2024.105385.
- [3] G. Guerron, J. F. Nicolalde, J. Martínez-Gómez, and P. Dávila, "Implementation of a waste heat recovery prototype facility based on the Rankine cycle with a twin-screw expander," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 257, p. 124233, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124233.
- [4] A. M. Pantaleo *et al.*, "Thermoeconomic optimisation of small-scale organic Rankine cycle systems based on screw vs. piston expander maps in waste heat recovery applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 200, p. 112053, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112053.
- [5] X. Zhang and Z. Li, "Performance of Kalina cycle with single-screw expander for low-temperature geothermal energy utilization," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 210, p. 118364, 2022, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118364.
- [6] K. Braimakis *et al.*, "A general framework for part-load optimization of air-cooled ORCs with screw expanders," *Energy*, vol. 332, p. 137061, 2025, doi: 10.1016/j.energy.2025.137061.
- [7] M. Usman, M. Imran, Y. Yang, D. H. Lee, and B.-S. Park, "Thermo-economic comparison of air-cooled and cooling tower based Organic Rankine Cycle (ORC) with R245fa and R1233zd(E) as candidate working fluids for different geographical climate conditions," *Energy*, vol. 123, pp. 353–366, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.01.134.
- [8] C. M. Sufyana, F. T. Akbar, and W. Srigutomo, "Thermal modeling and simulation of a single-flash geothermal power plant involving non-condensable gas: A case study of Kamojang geothermal field in Garut, West Java, Indonesia," *Geothermal Energy*, vol. 11, p. 6, 2023, doi: 10.1186/s40517-023-00249-3.
- [9] Y. Tian, Z. Xing, Z. He, and H. Wu, "Modeling and performance analysis of twin-screw steam expander under fluctuating operating conditions in steam pipeline pressure energy recovery applications," *Energy*, vol. 141, pp. 692–701, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.09.128.
- [10] Z. Zhao, J. Zhang, G. Wang, H. Yuan, and Y. Tian, "Research and clearance analysis on of steam twin-screw expander employed in industrial waste heat recovery," *Energy*, vol. 312, p. 133439, 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.133439.
- [11] A. Nikolov and A. Brümmer, "Two-phase mass flow rate through restrictions in liquid-flooded twin-screw compressors or expanders," *International Journal of Refrigeration*, vol. 148, pp. 152–167, 2023, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2023.01.017.
- [12] Y. Tian, Z. Wang, Z. Liu, Z. Jiang, Z. Zhao, and H. Zhang, "Two-phase flow characteristics and leakage in the shaft seal of steam screw expanders," *International Journal of Refrigeration*, vol. 172, pp. 214–227, 2025, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2025.01.028.
- [13] Y. Tian, Z. Wang, Y. Geng, X. Chen, H. Zhang, and Q. He, "A non-uniform pressure distribution model on the end face in screw expander and shaft seal leakage characteristics," *International Journal of Refrigeration*, vol. 154, pp. 99–110, 2023, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2023.07.007.
- [14] X. Liu *et al.*, "Experimental study of the nonisothermal gas-liquid two-phase heat transfer characteristics in a rectangular helical channel," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 163, p. 111393, 2025, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2024.111393.