



OPTIMASI KINERJA UNIT FRAKSIONASI LNG–LPG SERTA STABILISASI KONDENSAT BERBASIS *MACHINE LEARNING* DAN *ASPEN HYSYS*

Zami Furqon^a, Rr. Tsaniya Faza Al-machzum Azmi^a, Agus Setiyono^{a*}

^aProgram Studi Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No.38, Cepu, Kab. Blora, Jawa Tengah Indonesia 58315

*Corresponding author at: agasasutadewa@gmail.com; (Agus Setiyono) Tel.: +62857-1927-2087

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 29 Januari 2026

Direvisi pada 13 Juli 2026

Disetujui pada 30 Juli 2026

Tersedia daring pada 31 Juli 2026

Kata kunci:

Gas bumi, Jumperline, LNG, LPG, Optimasi

Keywords:

Jumperline, LNG, LPG, Natural Gas, Optimization

ABSTRAK

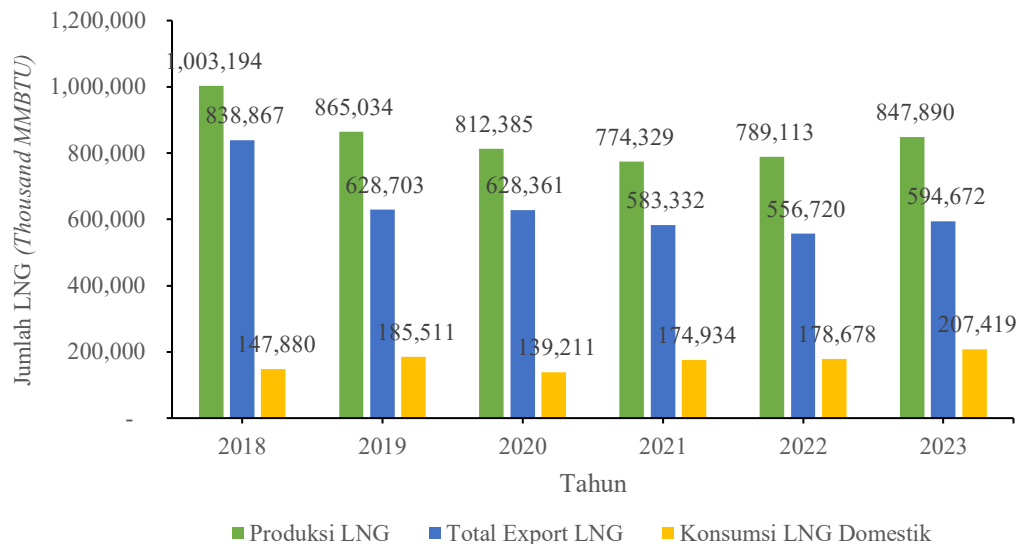
Pada 2023, produksi LNG Indonesia mencapai 847,89 juta MMBTU dengan ekspor sebesar 594,67 juta MMBTU. Pada tahun yang sama, konsumsi LPG mencapai 8,71 juta ton dan sebagian besar dipenuhi melalui impor sebesar 6,95 juta ton, sedangkan produksi domestik hanya 1,97 juta ton. Di PT XYZ, kondensat hasil fraksionasi dialirkan langsung ke tangki ketika kolom bertekanan rendah (low-pressure/LP) tidak beroperasi. Pada kondisi startup atau shutdown, Reid Vapor Pressure (RVP) kondensat dapat mencapai 106,3 psia sehingga berisiko mengganggu sistem floating roof tangki. Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan kondisi operasi kolom untuk meningkatkan yield LNG dan LPG serta merancang jumperline menuju kolom bertekanan tinggi (high-pressure/HP) agar kondensat tetap dapat distabilisasi. Sebanyak 1.301 data operasi dibersihkan menjadi 1.069 data, kemudian dianalisis menggunakan machine learning berbasis Python. Model Random Forest digunakan untuk memprediksi laju alir produk atas dan bawah, sedangkan skenario optimal divalidasi melalui simulasi Aspen HYSYS. Hasil optimasi meningkatkan yield Deethanizer, Depropanizer, dan Debutanizer masing-masing sebesar 3,95 %, 3,77 %, dan 2,35 %, sedangkan yield Scrub Column menurun 0,64 %. Perubahan efisiensi tray pada keempat kolom berturut-turut adalah -1,54 %, 1,00 %, 1,25 %, dan 0,97 %. Desain jumperline menurunkan RVP kondensat saat shutdown menjadi 10,01 psia. Estimasi operating profit tahunan mencapai US\$2.124.960.645,03 atau Rp38.498.974.486.331. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi machine learning dan Aspen HYSYS berpotensi meningkatkan kinerja fraksionasi sekaligus memperkuat keselamatan stabilisasi kondensat.

ABSTRACT

In 2023, Indonesia produced 847.89 million MMBTU of LNG and exported 594.67 million MMBTU. In the same year, LPG consumption reached 8.71 million tonnes, most of which was supplied by 6.95 million tonnes of imports, while domestic production was only 1.97 million tonnes. At PT XYZ, fractionation condensate is routed directly to the storage tank when the low-pressure (LP) column is unavailable. During startup or shutdown, the condensate Reid Vapor Pressure (RVP) can reach 106.3 psia, creating a risk to the tank floating-roof system. This study aimed to optimize column operating conditions to improve LNG and LPG yields and to design a jumperline to the high-pressure (HP) column so that condensate can remain stabilized. A total of 1,301 operating records were cleaned to 1,069 records and analyzed using Python-based machine learning. A Random Forest model predicted the top- and bottom-product flow rates, and the optimal scenarios were validated in Aspen HYSYS. Optimization increased the yields of the deethanizer, depropanizer, and debutanizer by 3.95 %, 3.77%, and 2.35 %, respectively, while the scrub-column yield decreased by 0.64%. The corresponding tray-efficiency changes were -1.54 %, 1.00 %, 1.25 %, and 0.97 %. The jumperline reduced condensate RVP during shutdown to 10.01 psia. The estimated annual operating profit was US\$2,124,960,645.03, equivalent to Rp38,498,974,486,331. These findings show that integrating machine learning with Aspen HYSYS can improve fractionation performance while strengthening the operational safety of condensate stabilization.

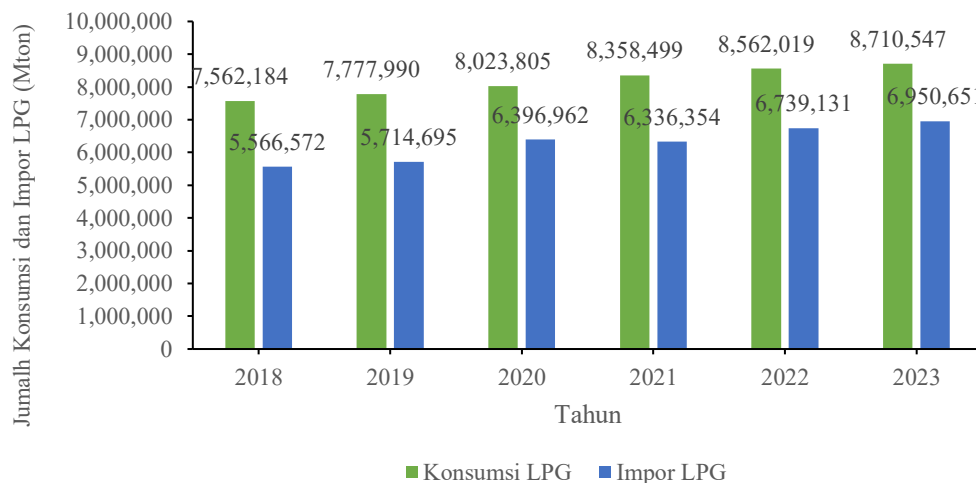
1. PENGANTAR

Minyak mentah dan gas bumi masih memegang peran penting sebagai sumber energi primer dan bahan baku industri di Indonesia (Rahmayanti dkk., 2021). Dalam rantai pemanfaatan gas bumi, Liquefied Petroleum Gas (LPG) terutama tersusun atas propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}), sedangkan Liquefied Natural Gas (LNG) merupakan gas alam yang dicairkan pada temperatur sekitar -160°C dan tekanan atmosfer (Suryo dkk., 2023; Fadl dkk., 2021). Di sisi lain, proyeksi defisit neraca gas bumi menegaskan perlunya peningkatan efisiensi pemanfaatan gas sekaligus percepatan pengembangan sumber energi alternatif, seperti landfill gas, biogas, dan hidrogen (Wibowo dkk., 2022). Pada 2023, kontribusi gas bumi terhadap bauran energi nasional mencapai 16,28% (KESDM, 2024). Laporan Statistik Migas 2023 mencatat produksi LNG sebesar 847.890.000 MMBTU, ekspor sebesar 594.672.000 MMBTU, dan konsumsi domestik sebesar 207.419.000 MMBTU (KESDM, 2023).



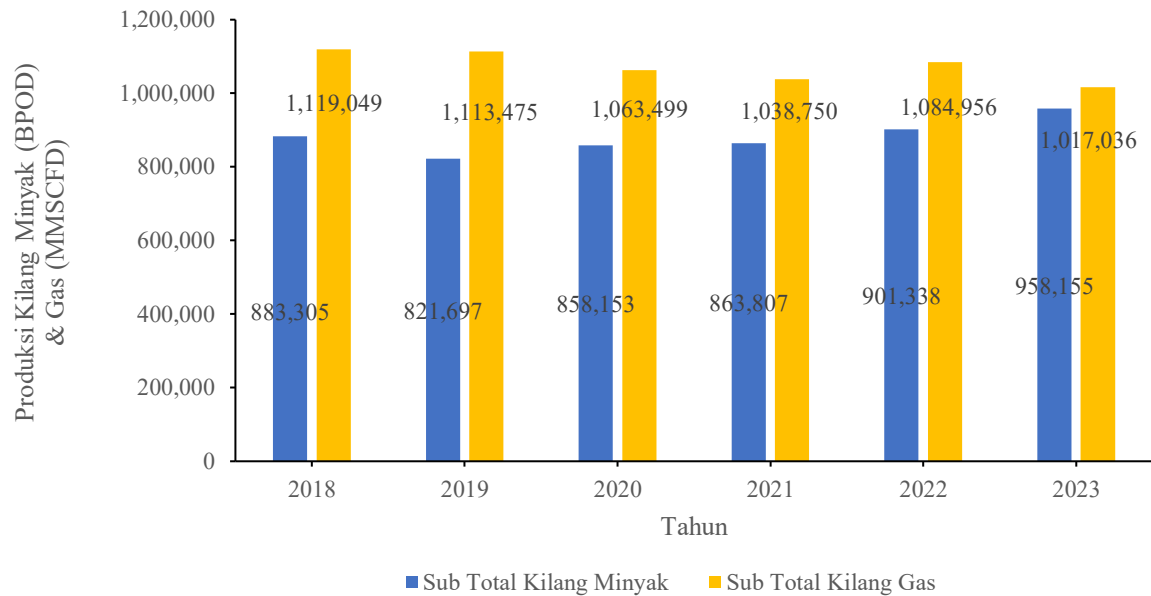
Gambar 1: Produksi, Ekspor, dan Konsumsi LNG

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1, produksi dan ekspor LNG pada 2023 masing-masing meningkat sebesar 7,4 % dan 9,0 % dibandingkan tahun sebelumnya. Kenaikan tersebut diikuti oleh pertumbuhan konsumsi LNG domestik sebesar 13,8 %. Pada sektor LPG, Laporan Statistik Migas 2023 mencatat konsumsi sebesar 8.710.547 ton dan impor sebesar 6.950.651 ton (KESDM, 2023).



Gambar 2: Konsumsi dan Impor LPG 2018- 2023

Gambar 2 menunjukkan bahwa konsumsi LPG meningkat secara konsisten selama 2018-2023. Kebutuhan tersebut sebagian besar dipenuhi melalui impor, sedangkan produksi domestik berasal dari 19 kilang minyak dan gas yang beroperasi di Indonesia. Pada 2023, produksi LPG domestik mencapai 1.975.191 ton, turun sekitar 0,6% dibandingkan tahun sebelumnya (KESDM, 2023).



Gambar 3: Produksi LPG 2018- 2023

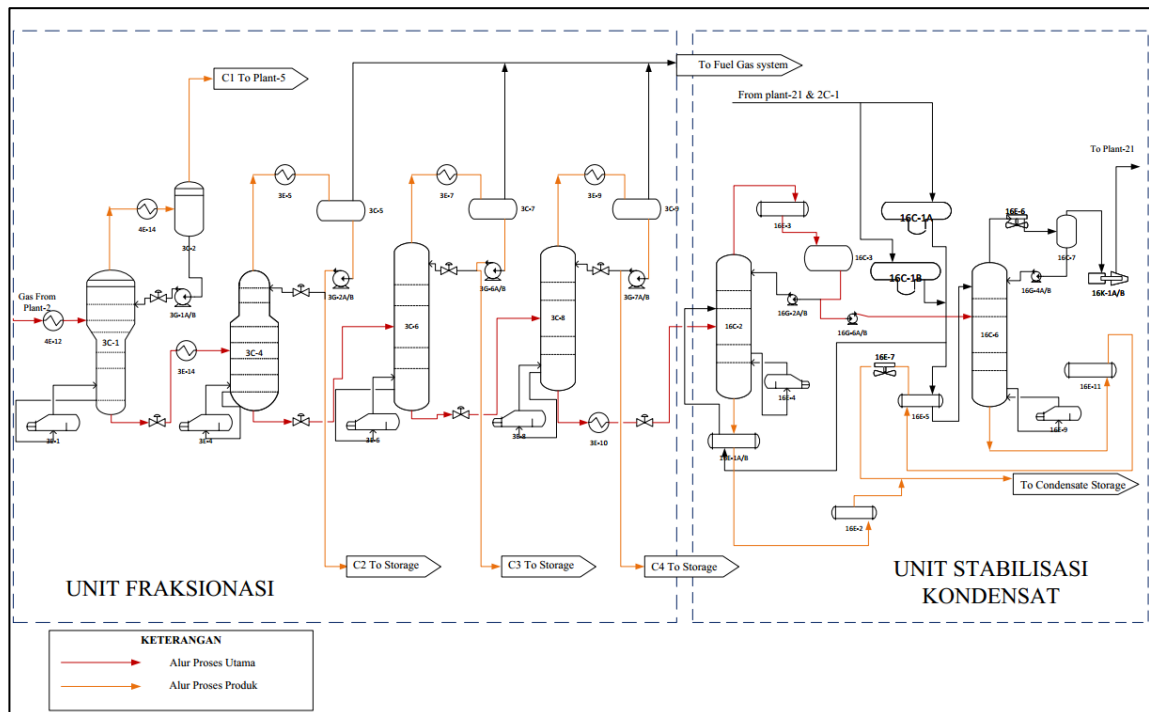
Berdasarkan Gambar 3, produksi LPG domestik lebih banyak berasal dari 13 kilang gas, sedangkan enam kilang minyak memberikan kontribusi yang lebih kecil. Salah satu fasilitas utama adalah PT Badak NGL di Bontang, Kalimantan Timur, yang pada 2023 menyumbang sekitar 34 % produksi LNG dan 24 % produksi LPG nasional (KESDM, 2023). Permintaan LPG dipengaruhi oleh perkembangan ekonomi dan demografi. Produk Domestik Regional Bruto dilaporkan berpengaruh terhadap peningkatan konsumsi LPG (Ravan, 2017), sementara pertumbuhan jumlah rumah tangga juga mendorong permintaan (Asamoah dkk., 2012). Faktor lain yang berpotensi memengaruhi permintaan energi meliputi tingkat partisipasi angkatan kerja dan inflasi (Zhao dkk., 2016; Behname, 2013).

Selain LNG dan LPG, unit fraksionasi menghasilkan kondensat sebagai produk samping yang dikenal sebagai Bontang Return Condensate (BRC) (Salsabila dkk., 2021; Indarti dkk., 2022). BRC merupakan minyak mentah yang diproduksi bersama gas alam di wilayah lepas pantai antara Kalimantan Timur dan Makassar, kemudian dialirkan ke Terminal Santan di dekat Balikpapan. Harga BRC ditetapkan berdasarkan Indonesian Crude Price, dengan kapasitas produksi sekitar 30.000 barel per hari (Chevron Crude Oil Marketing, 2018). Pada fasilitas yang diteliti, kondensat berasal dari knocked-out drum, drier separator decanter, dan produk bawah Debutanizer. Untuk memenuhi persyaratan mutu dan keselamatan penyimpanan, kondensat perlu distabilisasi pada RVP sekitar 9-11 psia (Tampubolon dkk., 2021). Ketika LP column dinonaktifkan karena keterbatasan MLP steam dan cooling water, kondensat bertekanan rendah dari Debutanizer tidak dapat dialirkan ke HP column dan langsung menuju tangki penyimpanan. Pada kondisi startup atau shutdown, RVP kondensat dapat mencapai 106,3 psia, sehingga berpotensi merusak sistem floating roof dan meningkatkan risiko keselamatan. Sebagian besar cairan dengan RVP berlebih saat ini dibakar di wet flare melalui pengendalian yang masih bergantung pada operator.

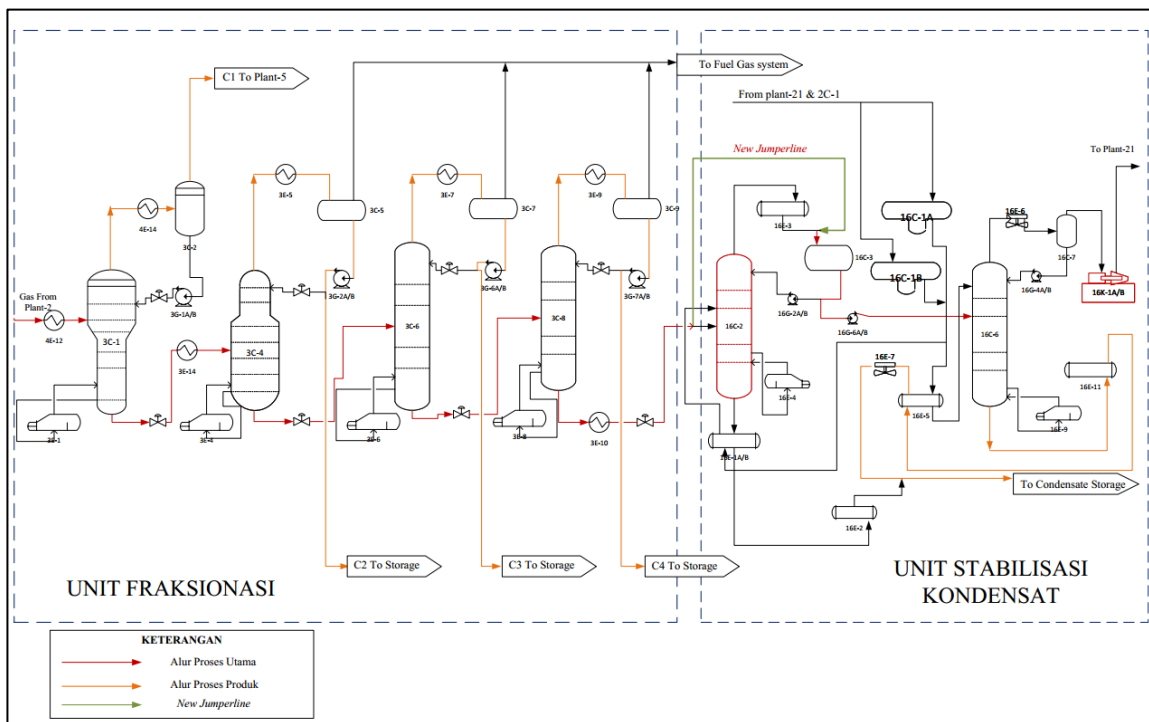
Permasalahan tersebut memerlukan optimasi kondisi operasi untuk meningkatkan produksi LNG dan LPG sekaligus memastikan kondensat tetap memenuhi spesifikasi. Penelitian terdahulu umumnya mengandalkan pendekatan trial and error pada Aspen HYSYS dan belum mengintegrasikan kemampuan prediktif berbasis data. Oleh karena itu, penelitian ini menggabungkan machine learning dan simulasi Aspen HYSYS untuk menentukan kondisi operasi optimum serta merancang jumperline dari Debutanizer menuju HP column ketika LP column tidak beroperasi (Febriani dkk., 2025; Giffary dkk., 2024). Pendekatan ini ditujukan untuk meningkatkan yield LNG, LPG, dan kondensat, mengevaluasi kelayakan teknis-ekonomis modifikasi, serta memperkuat keselamatan operasi pada kondisi transien.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan kombinasi analisis data historis, *machine learning*, simulasi proses Aspen HYSYS, dan evaluasi desain perpipaan untuk mengoptimalkan unit fraksionasi serta stabilisasi kondensat. Modifikasi yang diusulkan berupa *jumperline* untuk mengalihkan produk bawah Debutanizer dari jalur LP column yang tidak beroperasi menuju HP column melalui *receiver*, sehingga kondensat tetap dapat distabilisasi dan potensi bottleneck dapat dikurangi. Gambar 4 memperlihatkan konfigurasi aktual di lapangan, sedangkan Gambar 5 menunjukkan skema optimasi yang diusulkan. Keterangan simbol peralatan pada kedua skema disajikan pada Tabel 1.

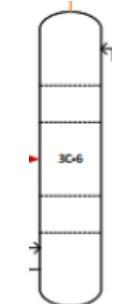
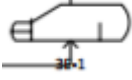


Gambar 4: Skema Kondisi Aktual Lapangan

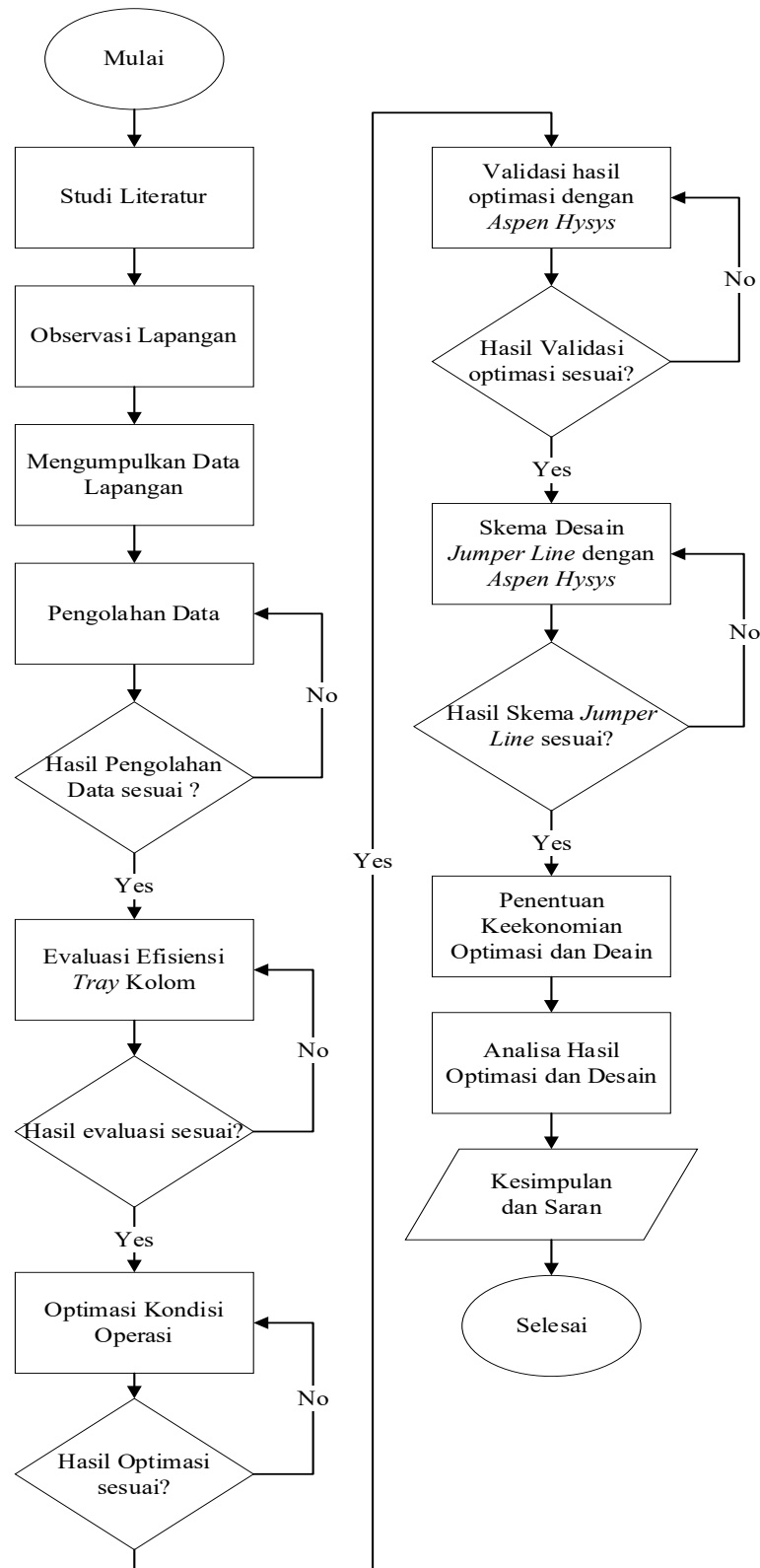


Gambar 5: Skema Rencana Optimasi

Tabel 1: Keterangan Simbol pada Gambar 4 dan 5

Simbol	Keterangan
	Heat Exchanger seri 3E no 5
	Pompa Centrifugal seri 3G no 2
	Column seri 3C no 6
	Reboiler seri 3E no 1
	Air Blown Cooler seri 16E no 6

Skema pada Gambar 5 meningkatkan fleksibilitas operasi dengan mempertahankan jalur stabilisasi kondensat ketika LP column tidak tersedia. Variabel bebas yang dianalisis meliputi laju alir *feed gas*, kandungan C1 pada *feed gas*, laju alir refluks, temperatur *reboiler*, dan laju alir produk bawah *Debutanizer*. Variabel respons mencakup efisiensi *tray*, *yield* produk atas kolom, RVP kondensat, dan *yield* kondensat. Tahapan penelitian meliputi studi literatur dan observasi lapangan, pengumpulan serta pembersihan data, evaluasi efisiensi *tray*, optimasi berbasis *machine learning*, validasi menggunakan *Aspen HYSYS*, desain *jumperline*, serta evaluasi teknis dan ekonomis. Alur lengkap penelitian ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6: Flowchart Metode Kerja

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Uraian Proses

Plant 3 pada Gambar 5 merupakan unit fraksionasi utama yang memisahkan komponen gas alam berdasarkan perbedaan titik didih melalui Scrub Column, Deethanizer, Depropanizer, Debutanizer, dan Splitter; Splitter hanya tersedia pada train ABCD. Gas umpan terlebih dahulu didinginkan menggunakan Propane Chiller, kemudian dialirkan ke Scrub Column (3C-1) untuk memisahkan sebagian besar metana (C1) sebagai komponen LNG. Aliran selanjutnya diproses secara berurutan di Deethanizer untuk memisahkan etana (C2), Depropanizer untuk memisahkan propana (C3), dan Debutanizer untuk memisahkan butana (C4), sedangkan fraksi berat C5+ dialirkan sebagai kondensat ke Plant 20. Setiap kolom dilengkapi reboiler dan condenser serta didukung sistem pendingin berupa propane, cooling water, dan refrigerant

C2/C3. Plant 16 berfungsi menstabilkan kondensat agar memenuhi spesifikasi RVP 9-11 psia. Kondensat berasal dari KOD, decanter 2C-1, dan produk bawah Debutanizer. Unit stabilisasi terdiri atas LP column 16C-2 pada tekanan 7,5 kg/cm²a dengan 32 tray dan HP column 16C-6 pada tekanan 13,5 kg/cm²a dengan 15 tray. Saat penelitian dilakukan, hanya HP column yang beroperasi karena LP column dinonaktifkan akibat keterbatasan MLP steam dan cooling water (Sembiring dkk., 2020). Pada konfigurasi awal, produk bawah Debutanizer 3C-8 dialirkan ke LP column. Ketika LP column tidak beroperasi, aliran tersebut tidak melalui proses stabilisasi dan langsung menuju tangki penyimpanan C4 to Storage. Kondisi ini berisiko terutama selama startup atau shutdown karena RVP kondensat dapat mencapai 106,3 psia. Sebagai alternatif, dirancang jumperline dari 3C-8 menuju HP column 16C-6 melalui receiver 16C-3. Kondensat ditampung sementara, kemudian dipompa menuju tray ke-4 HP column untuk distabilisasi sebelum dialirkan ke tangki. Konfigurasi ini menjaga kontinuitas proses meskipun LP column dinonaktifkan (Sembiring dkk., 2020).

3.2. Pengolahan Data

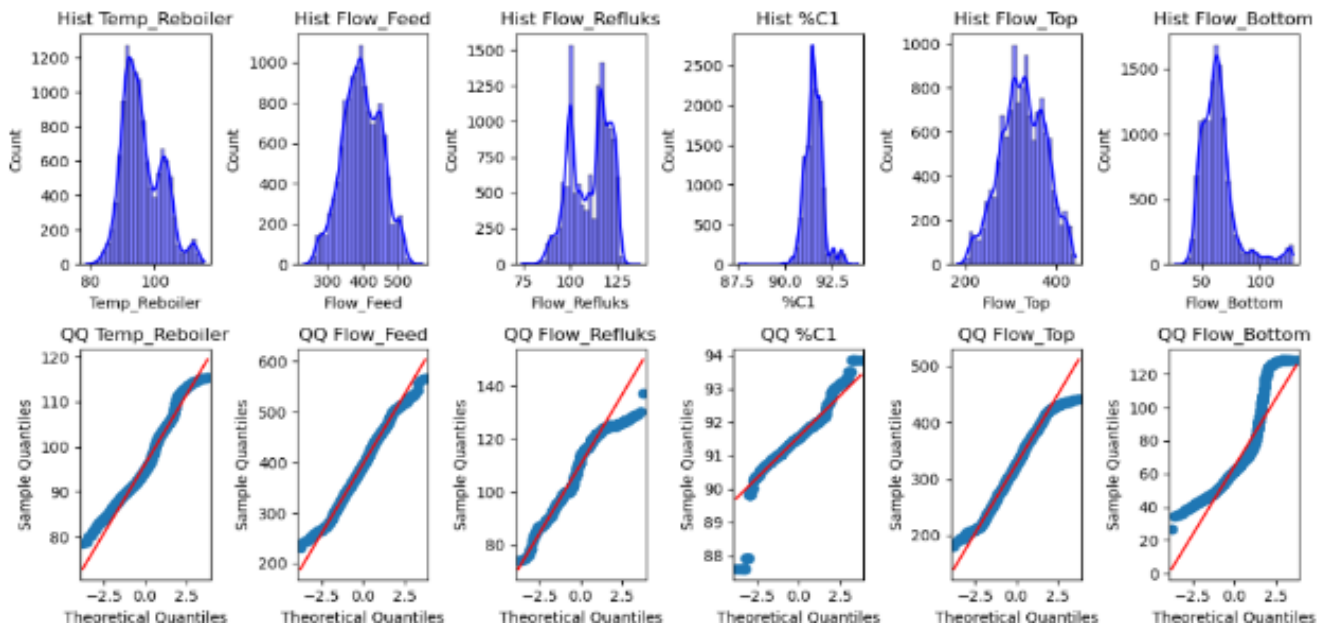
Data operasi dikumpulkan dari Juli 2025 hingga Januari 2026. Sebanyak 1.301 rekaman awal diproses dan, setelah tahap pembersihan, diperoleh 1.069 rekaman yang layak dianalisis. Pembersihan data dilakukan untuk menghapus nilai yang tidak relevan atau menyimpang agar model prediksi lebih representatif terhadap kondisi operasi. Tahapan pengolahan meliputi identifikasi *outlier*, uji normalitas, pengujian beberapa model regresi, dan validasi parameter.

Tabel 2: Jumlah *Outlier* Setiap Kolom

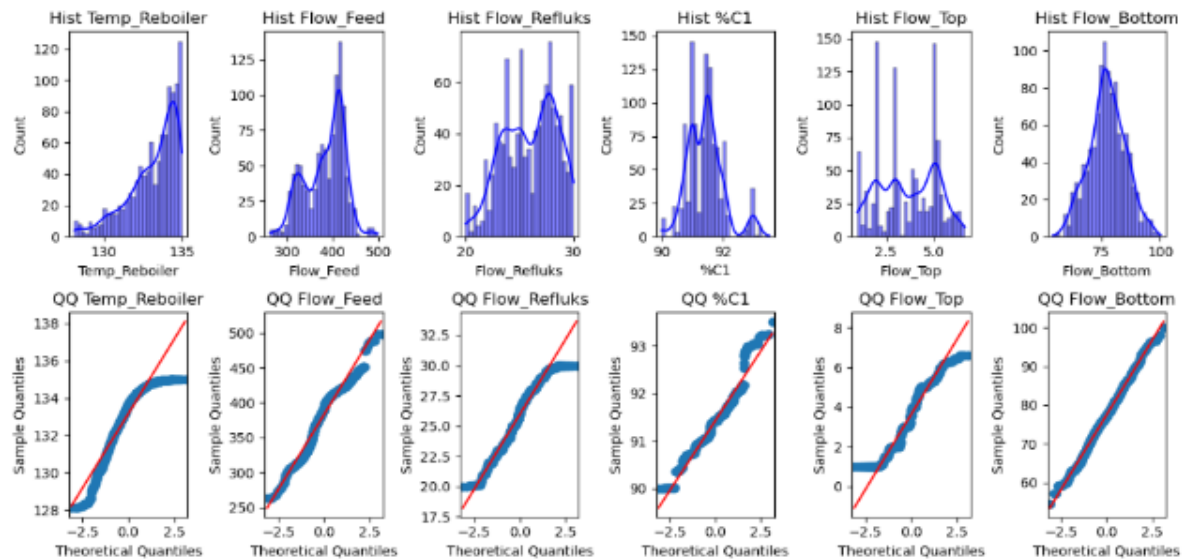
Parameter	Scrub Column	Deethanizer	Depropanizer	Debutanizer
Jumlah <i>Outlier</i> (pcs)	716	686	401	492

Tabel 2 menunjukkan bahwa jumlah *outlier* yang teridentifikasi adalah 716 pada *Scrub Column*, 686 pada *Deethanizer*, 401 pada *Depropanizer*, dan 492 pada *Debutanizer*. Jumlah *outlier* terbesar pada *Scrub Column* mengindikasikan variabilitas data yang lebih tinggi, yang dapat berkaitan dengan fluktuasi kondisi umpan atau gangguan operasi. Uji normalitas selanjutnya dilakukan untuk mengevaluasi pola distribusi setiap variabel sebelum pemilihan metode pemodelan.

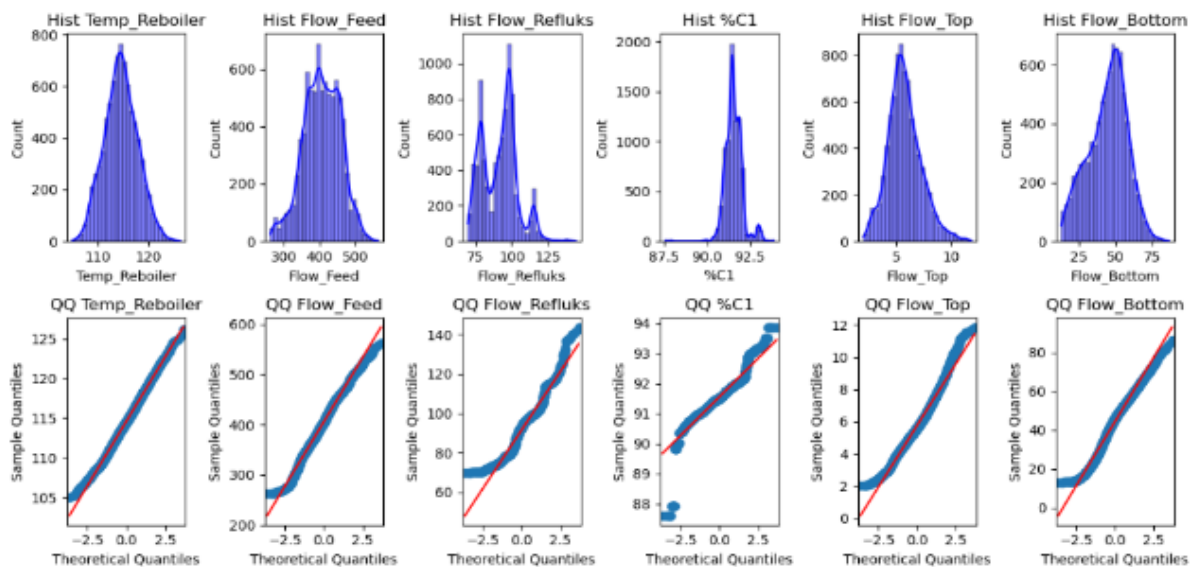
Hasil uji *Shapiro-Wilk* dan *KS test* menunjukkan *p-value* umumnya lebih kecil dari 0,05 pada seluruh variabel di keempat kolom. Dengan demikian, data tidak memenuhi asumsi distribusi normal. Pola ini konsisten dari *Scrub Column* hingga *Debutanizer* dan mengindikasikan hubungan nonlinier serta kemungkinan pengaruh variabel operasi lain yang belum dimasukkan ke dalam model. Oleh karena itu, selain regresi linier, metode nonlinier dan *machine learning* digunakan untuk meningkatkan kemampuan prediksi.



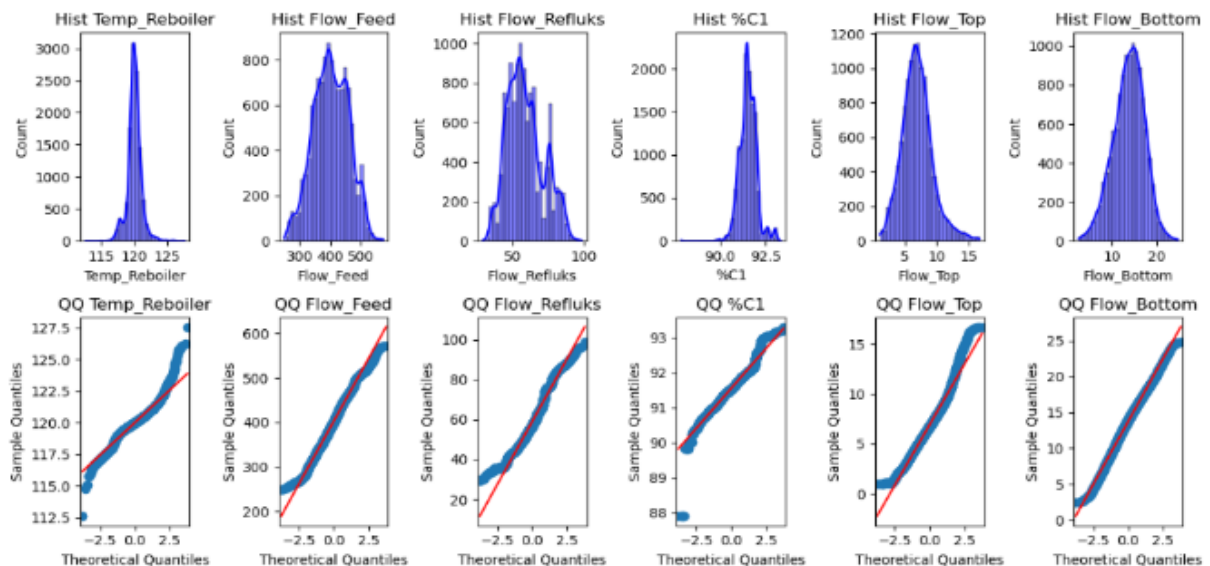
Gambar 7: Visualisasi Distribusi Data *Scrub Column*



Gambar 8: Visualisasi Distribusi Data Deethanaizer



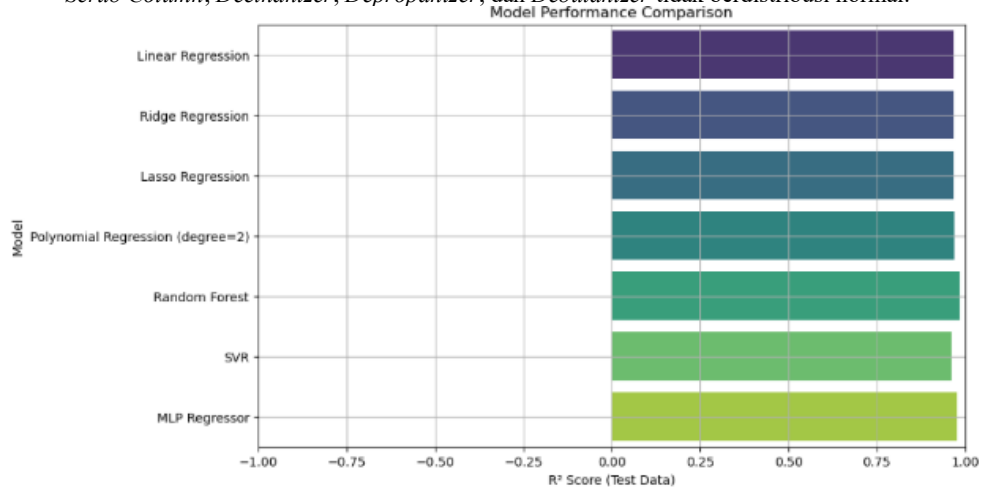
Gambar 9: Visualisasi Distribusi Data Depropanizer



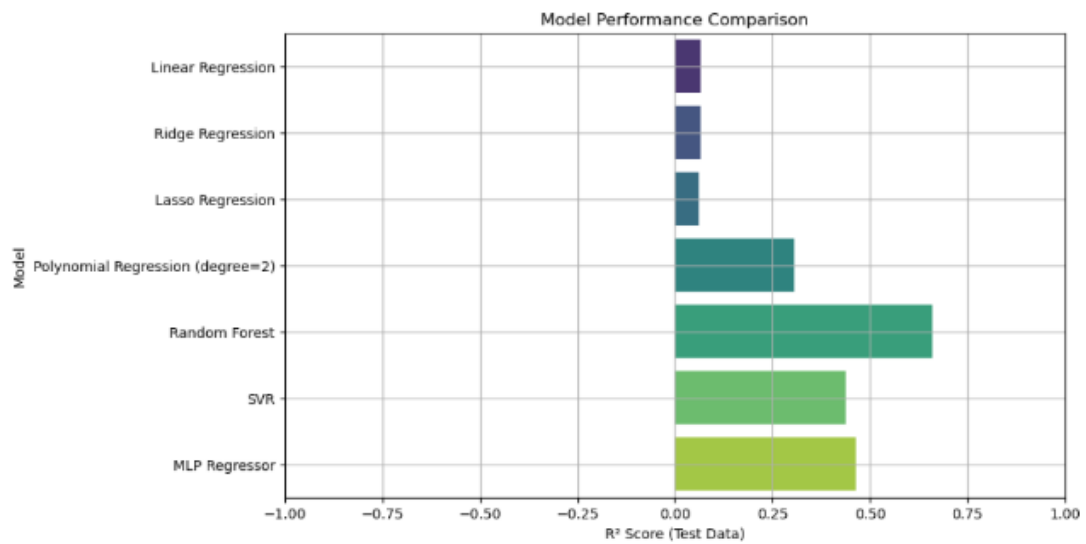
Gambar 10: Visualisasi Distribusi Data Debutanizer

Visualisasi pada Gambar 7-10 memperkuat hasil pengujian statistik. Sebagian besar histogram tidak simetris, sedangkan titik-titik pada *Q-Q plot* menyimpang dari garis diagonal, terutama pada bagian *tail*. Temuan tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar variabel pada

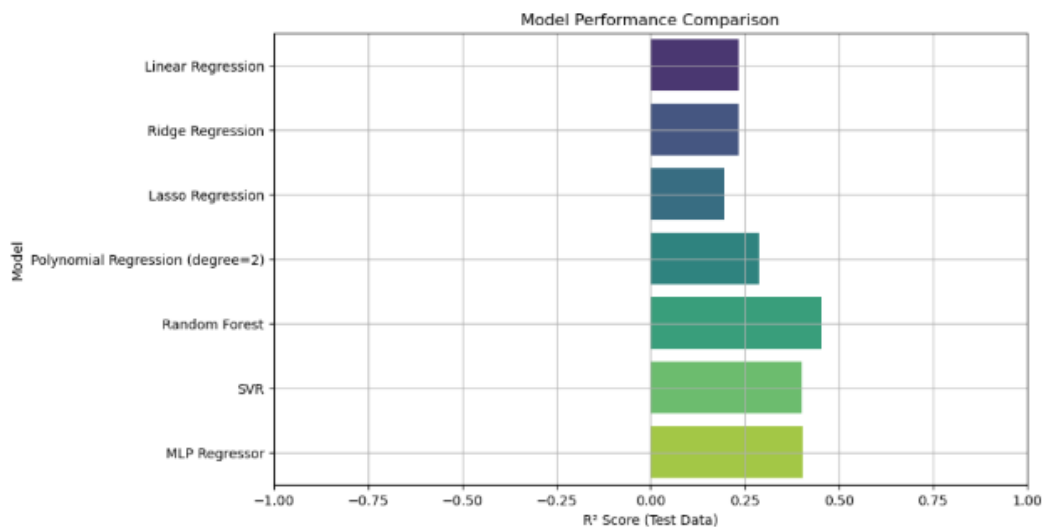
Scrub Column, Deethanizer, Depropanizer, dan Debutanizer tidak berdistribusi normal.



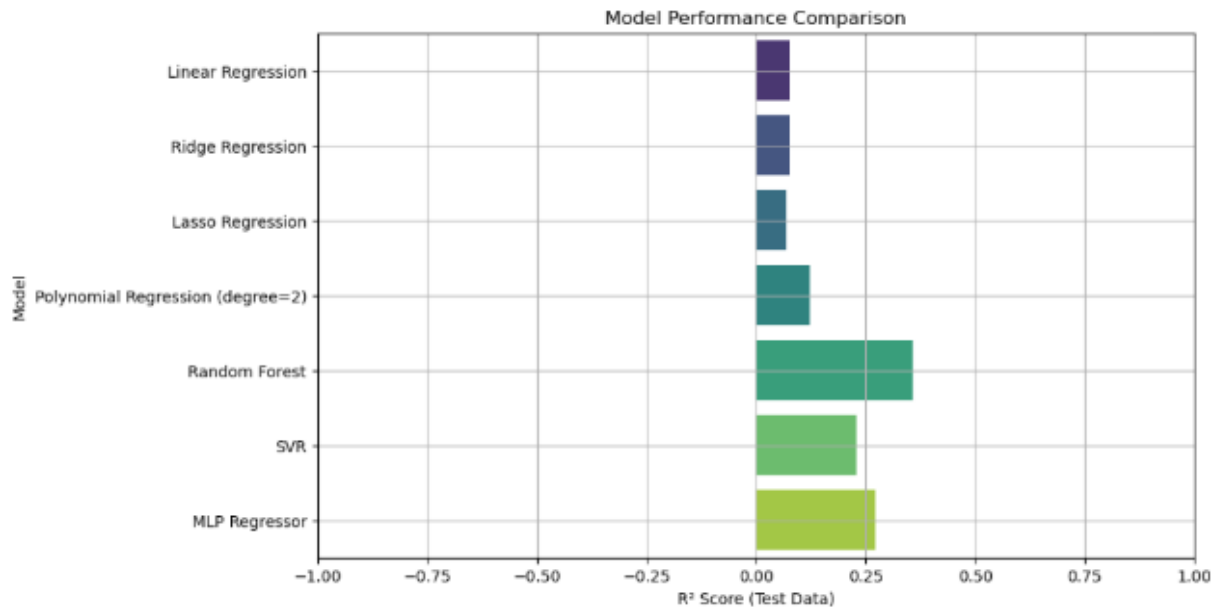
Gambar 11: Visualisasi Uji Regresi R^2 Test *Scrub Column*



Gambar 12: Visualisasi Uji Regresi R^2 Test *Deethanizer*



Gambar 13: Visualisasi Uji Regresi R^2 Test *Depropanizer*



Gambar 14: Visualisasi Uji Regresi R² Test Debutanizer

Perbandingan pada Gambar 11-14 menunjukkan bahwa kemampuan model, yang dinyatakan melalui koefisien determinasi (R^2), cenderung menurun dari *Scrub Column* (3C-1) menuju *Debutanizer* (3C-8). Pada *Scrub Column*, laju alir umpan dan kandungan C1 masih menjelaskan sebagian besar variasi respons sehingga beberapa model menghasilkan R^2 yang tinggi. Pada kolom-kolom berikutnya, interaksi antarvariabel dan kompleksitas proses meningkat, sehingga kemampuan prediksi menurun. Meskipun demikian, model tetap dapat digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan operasi, dengan catatan bahwa hasil pada kolom akhir memerlukan validasi proses yang lebih ketat.

3.3. Evaluasi Efisiensi Tray

Evaluasi efisiensi tray dilakukan untuk menilai kinerja pemisahan setiap kolom sebelum optimasi. Perhitungan rinci disajikan untuk *Scrub Column* sebagai contoh, sedangkan hasil *Deethanizer*, *Depropanizer*, dan *Debutanizer* diringkas sebagai pembanding. Evaluasi menggunakan metode Underwood-Gilliland berdasarkan tekanan, temperatur, dan komposisi aliran. Metana (C1) ditetapkan sebagai light key dan etana (C2) sebagai heavy key. Nilai *relative volatility* digunakan untuk menentukan konstanta *Underwood* (θ), minimum *reflux ratio* (R_m), dan jumlah *tray teoritis*. Hubungan *Gilliland* kemudian digunakan untuk memperkirakan jumlah *tray* aktual dan menghitung efisiensi *tray* menggunakan Persamaan 1.

$$E_o = \frac{N_{ideal}}{N_{aktual}} \times 100\% \quad (1)$$

Tabel 3: Contoh Perhitungan Efisiensi Tray - *Scrub Column*

Parameter	Nilai
Relative Volatility (C1/C2, α avg)	15,6246
Konstanta <i>Underwood</i> (θ)	3,3145
Minimum <i>Reflux Ratio</i> (R_m)	0,0875
<i>Tray</i> Teoritis (N)	2
<i>Tray</i> Aktual (N_a)	9
<i>Reflux</i> Operasi (Rops)	0,4949
<i>Reflux Ratio</i> ($R = Rops/R_m$)	5,6529
Efisiensi Tray (%)	13,39%

Rekapitulasi efisiensi *tray* untuk *Scrub Column*, *Deethanizer*, *Depropanizer*, dan *Debutanizer* disajikan pada Tabel 4. Nilai tersebut membandingkan efisiensi desain, hasil perhitungan *Macroplus* berdasarkan data desain, dan hasil perhitungan berdasarkan data operasi.

Tabel 4: Rekapitulasi Hasil Efisiensi Tray Kolom

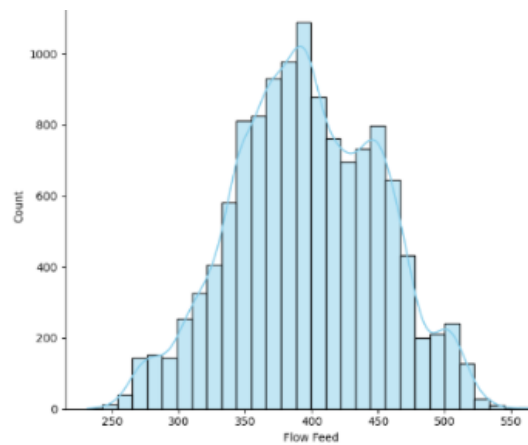
Kolom	<i>Scrub Column</i> (%)	<i>Deethanizer</i> (%)	<i>Depropanizer</i> (%)	<i>Debutanizer</i> (%)
Efisiensi Data Desain	30,00	50,00	75,00	67,00
<i>Macroplus</i> Efisiensi Data Desain	27,46	43,66	74,51	60,68
<i>Macroplus</i> Efisiensi Data Operasi	13,39	20,37	73,13	52,21

Tabel 4 menunjukkan bahwa efisiensi operasi *Scrub Column* dan *Deethanizer* jauh di bawah nilai desain. Kondisi ini dapat mengindikasikan *weeping*, *entrainment*, maldistribusi fluida, atau deviasi kondisi operasi dari rancangan. *Depropanizer* memiliki kinerja paling mendekati desain, sedangkan efisiensi *Debutanizer* masih lebih rendah daripada target. Hasil tersebut menunjukkan bahwa

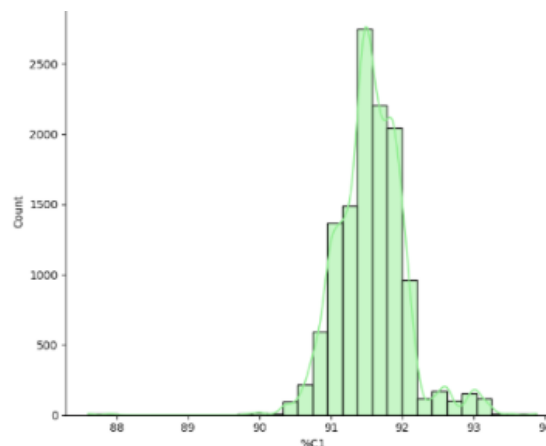
pendekatan teoritis yang dikombinasikan dengan data operasi dapat menggambarkan kondisi lapangan, tetapi inspeksi peralatan dan evaluasi lebih lanjut tetap diperlukan untuk memastikan penyebab penurunan efisiensi.

3.4. Optimasi Kondisi Operasi Metode Machine Learning

Optimasi kondisi operasi dilakukan menggunakan machine learning berbasis Python pada data historis yang telah dibersihkan dari empat kolom distilasi. Parameter yang dioptimalkan adalah laju alir refluks dan temperatur reboiler untuk memaksimalkan produk atas dengan tetap mempertimbangkan konsumsi steam. Optimasi terdiri atas tahap single-column dan multi-column. Pada tahap single-column, setiap kolom dimodelkan secara terpisah untuk mengevaluasi hubungan antara kondisi operasi dan laju alir produk. Model Random Forest digunakan untuk memprediksi Flow_Top dan Flow_Bottom. Pada Scrub Column, model menghasilkan R^2 sebesar 0,985 untuk Flow_Top dan 0,804 untuk Flow_Bottom. Sebaliknya, prediksi Flow_Bottom pada Debutanizer hanya menghasilkan R^2 sebesar 0,349, yang menunjukkan meningkatnya kesulitan pemodelan pada kolom akhir. Pada tahap multi-column, batas variabel kontrol Flow Feed dan %C1 Feed ditentukan dari distribusi data historis agar skenario optimasi tetap berada dalam rentang operasi yang realistis. Analisis histogram dan statistik digunakan untuk mengidentifikasi nilai dominan serta rentang operasi yang paling sering terjadi. Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai input model machine learning dan simulasi optimasi terintegrasi.



Gambar 15: Hasil Running Coding Python Penentuan Variabel Kontrol Flow Feed



Gambar 16: Hasil Running Coding Python Penentuan Variabel Kontrol %C1

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 15 dan 16, optimasi multi-column mempertimbangkan keterkaitan antarkolom, yaitu output suatu kolom menjadi input bagi kolom berikutnya. *Flow Feed* memiliki rentang dominan 325,98-466,63 kNm^3/h , sedangkan %C1 *Feed* berada pada rentang 90,99-92,05 % mol. Lima nilai *Flow Feed* dipilih berdasarkan kuartil dan tiga nilai %C1 *Feed* dipilih berdasarkan modus serta variasi aktual. Kombinasi tersebut menghasilkan 15 skenario yang mewakili kondisi operasi lapangan. Hasil optimasi menunjukkan bahwa peningkatan *Flow Feed* dan kandungan C1 umumnya meningkatkan *Flow Top* dan profit. Salah satu skenario terbaik diperoleh pada %C1 sebesar 91,5 % dan *Flow Feed* 466,63 kNm^3/h , dengan profit sebesar US\$235.928,65 dan konsumsi steam total 445,54 ton/jam. Seluruh parameter optimum masih berada dalam batas operasi, dengan temperatur *reboiler* 88,69-132,94 °C dan laju alir refluks 24,68-122,90 m^3/h , bergantung pada kolom dan skenario. Meskipun optimasi menunjukkan potensi peningkatan kinerja, fungsi objektif belum memasukkan seluruh komponen konsumsi energi dan biaya proses. Oleh karena itu, enam skenario dengan profit yang berdekatan, sekitar US\$235.000, divalidasi menggunakan Aspen HYSYS. Validasi ini dilakukan untuk memastikan bahwa kondisi optimum tidak hanya baik secara matematis, tetapi juga layak diterapkan secara teknis dan ekonomis.

Kolom	Performa machine learning dalam Prediksi	
	Produk Atas (%)	Produk Bawah (%)
Scrub Column	90,71	109,50
Deethanaizer	87,33	139,99
Depropanizer	63,26	110,27
Debutanizer	25,06	75,27

Tabel 6 memperlihatkan rasio hasil prediksi *machine learning* terhadap nilai pembanding untuk produk atas dan bawah. Nilai produk atas menurun dari 90,71 % pada *Scrub Column* menjadi 25,06 % pada *Debutanizer*, yang menegaskan berkurangnya kemampuan model pada kolom akhir. Pada produk bawah, nilai di atas 100 %, seperti 139,99 % pada *Deethanizer*, menunjukkan kecenderungan overprediction dan tidak dapat ditafsirkan sebagai akurasi yang lebih tinggi. Oleh karena itu, performa model perlu dievaluasi menggunakan ukuran *error* tambahan dan validasi data lapangan.

Tabel 7: Peningkatan *Yield* Produk dan Efisiensi Absorpsi

Kolom	Peningkatan <i>Yield</i> (%)	Peningkatan Efisiensi Absorpsi (%)
<i>Scrub Column</i>	-0,64	-1,54
<i>Deethanizer</i>	3,95	1,00
<i>Depropanizer</i>	3,77	1,25
<i>Debutanizer</i>	2,35	0,97

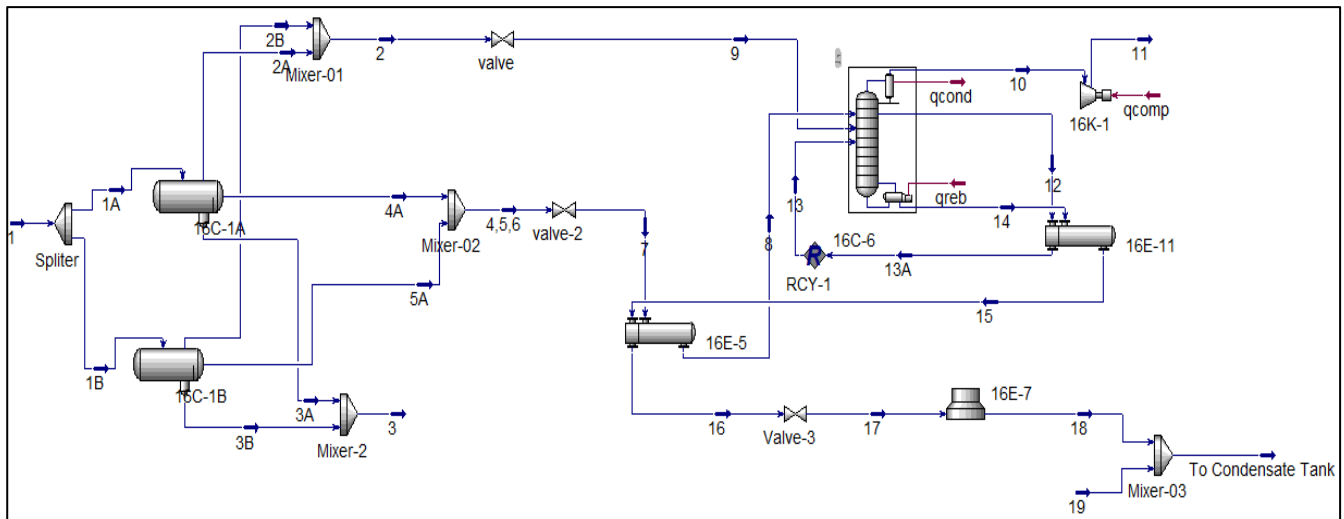
Tabel 8: Perbandingan Hasil Perhitungan Efisiensi Absorpsi Data Desain, Aktual, dan Optimasi

Kolom	<i>Scrub Coloumn</i> (%)	<i>Deethanaizer</i> (%)	<i>Depropanizer</i> (%)	<i>Debutanizer</i> (%)
Efisiensi Data Desain	30,00	50,00	75,00	67,00
Macroplus Efisiensi Data Operasi	13,39	20,37	73,13	52,21
Macroplus Efisiensi Data Optimasi	13,19	20,58	74,05	52,71

Hasil pada Tabel 7 dan 8 menunjukkan bahwa optimasi meningkatkan *yield* dan efisiensi *tray* pada tiga dari empat kolom. *Yield Deethanizer*, *Depropanizer*, dan *Debutanizer* meningkat masing-masing sebesar 3,95 %, 3,77 %, dan 2,35 %, sedangkan *yield Scrub Column* menurun 0,64%. Perubahan efisiensi *tray* berturut-turut adalah -1,54 %, 1,00 %, 1,25 %, dan 0,97 %. Penurunan kecil pada *Scrub Column* diikuti peningkatan pada kolom berikutnya, sehingga kinerja keseluruhan unit fraksinasi tetap menunjukkan perbaikan.

3.7. Validasi Simulasi HP Kolom 16C-6

Model Aspen HYSYS untuk HP column 16C-6 divalidasi dengan membandingkan parameter *input-output* simulasi terhadap data desain pada *Process Flow Diagram*. Batas toleransi *error* ditetapkan maksimum 5 % agar model dapat digunakan untuk mengevaluasi stabilisasi kondensat ketika LP column tidak beroperasi. Hasil pada Gambar 18 menunjukkan bahwa seluruh parameter kunci memiliki *error* dalam batas yang dapat diterima. Dengan demikian, model dianggap representatif dan dapat digunakan untuk menganalisis kinerja HP column 16C-6 pada berbagai kondisi umpan.



Gambar 18: Skema Validasi Simulasi HP Kolom 16C-6 dengan Data Desain

3.8. Variasi Umpan HP Kolom 16C-6

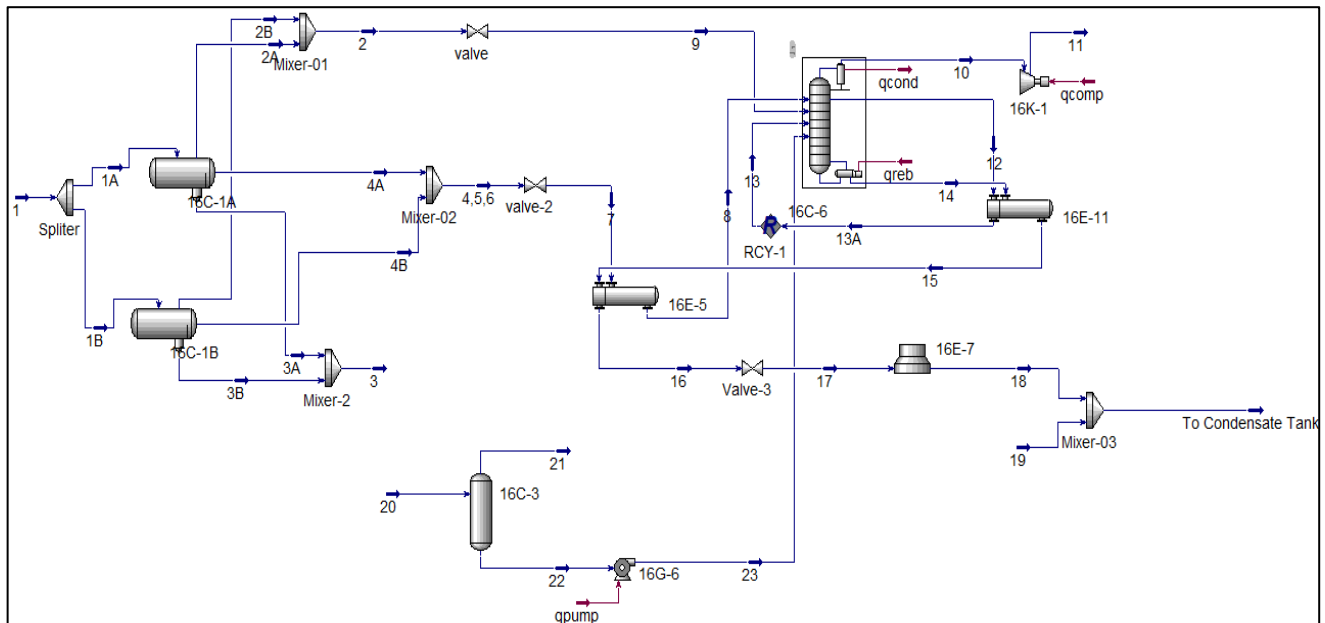
Setelah model HP column 16C-6 dinyatakan valid, dilakukan simulasi variasi laju alir produk bawah *Debutanizer* 3C-8. Data laju alir diambil dari dua *train* yang beroperasi, yaitu *Train G* dan *H*, sedangkan komposisi umpan mengacu pada data desain karena data komposisi *real-time* tidak tersedia. Kondensat dari 3C-8 pada tekanan 7 kg/cm² dan temperatur 111 °C dialirkan ke *receiver* 16C-3, kemudian dipompa hingga 16,71 kg/cm² sebelum masuk ke *tray* ke-4 HP column 16C-6. Aliran kondensat lain dari KOD dan *Plant 2* dipertahankan sebesar 30 m³/jam sesuai data desain.

Tabel 9: Variasi Umpan Kondensat *Debutanizer* 3C-8 ke HP kolom 16C-6

Kasus	Jumlah kondensat 3C-8 menuju HP kolom 16C-6 (m ³ /h)	Jumlah kondensat 3C-8 menuju tanki 20D-6/7 (m ³ /h)	RVP Kondensat di Tanki (psia)	Kondisi	Keterangan
1	0	36	10,34	<i>On spec</i>	Kondensat dari 2 <i>train</i> ke tanki
2	14	24	10,02	<i>On spec</i>	Kondensat dari <i>train H</i>
3	24	14	9,770	<i>On spec</i>	Kondensat dari <i>Train G</i>

Kasus	Jumlah kondensat 3C-8 menuju HP kolom 16C-6 (m ³ /h)	Jumlah kondensat 3C-8 menuju tanki 20D-6/7 (m ³ /h)	RVP Kondensat di Tanki (psia)	Kondisi	Keterangan
4	36	0	9,427	On spec	Kondensat dari 2 <i>train</i> ke HP kolom

Empat variasi umpan pada Tabel 9 menghasilkan RVP kondensat di tangki sebesar 9,427-10,34 psia, sehingga seluruh kasus memenuhi spesifikasi kurang dari 12 psia. Pada kondisi operasi normal dan *steady-state*, seluruh aliran dari 3C-8 bahkan dapat diarahkan langsung ke tangki tanpa melalui HP column. Namun, kondisi *startup* atau *shutdown* berbeda karena cairan dari *Scrub Column* hingga *Debutanizer* terakumulasi di 3C-8 dan dapat menghasilkan RVP hingga 106,3 psia. Pengaliran langsung cairan tersebut ke tangki berpotensi merusak sistem *sealing* pada *floating roof*.

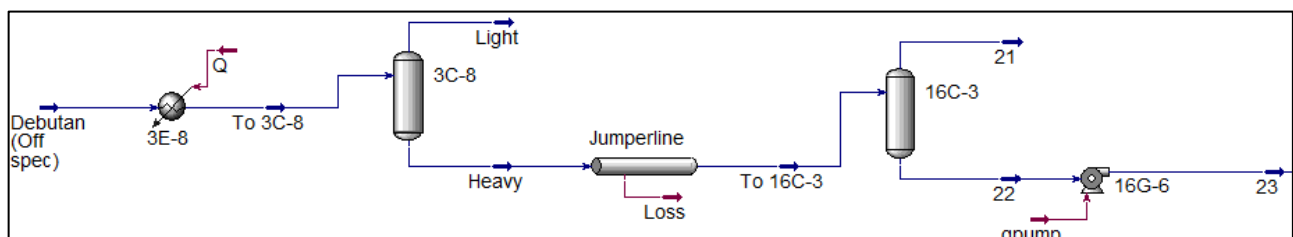


Gambar 19: Skema Simulasi Variasi Umpan HP Kolom 16C-6

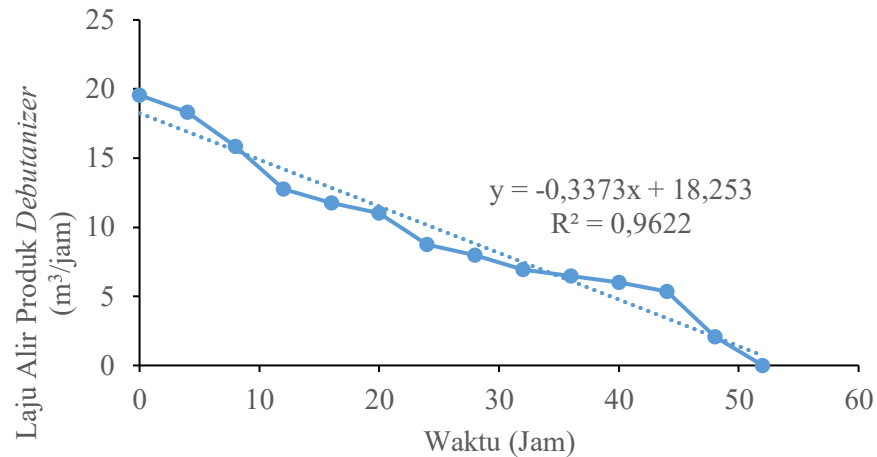
Gambar 19 memperlihatkan simulasi variasi umpan HP column 16C-6 menggunakan laju alir aktual dan komposisi desain. Pada kondisi *steady-state*, kondensat *Debutanizer* 3C-8 dengan RVP 11,9 psia tetap menghasilkan produk *on-spec* meskipun dialirkan langsung ke tangki. Sebaliknya, pada *startup* atau *shutdown*, campuran cairan dapat mencapai RVP 106,3 psia dan meningkatkan risiko terhadap sistem *sealing* tangki. Penanganan yang berlaku melalui *wet flare* masih bergantung pada tindakan operator. Oleh karena itu, *jumperline* dari *Debutanizer* ke HP column melalui LP stabilizer *receiver* direkomendasikan sebagai mitigasi keselamatan pada kondisi transien.

3.9. Modifikasi Penambahan Jumperline

Jumperline dirancang untuk mengalirkan produk bawah *Debutanizer* 3C-8 yang *off-spec* menuju HP column 16C-6 melalui LP stabilizer overhead receiver 16C-3. Aliran dipompa menggunakan pompa eksisting 16G-6 sehingga tidak memerlukan penggantian unit. Simulasi *Aspen HYSYS* menghasilkan *NPSHa* 16,11 m, jauh lebih tinggi daripada *NPSHr* pompa sebesar 1,6 m. Pipa yang dipilih adalah *carbon steel* 4 inci Schedule 40 sepanjang 19 m dengan *pressure drop* 0,258 kg/cm². Skema pengaliran kondensat melalui *jumperline* menuju receiver 16C-3 ditunjukkan pada Gambar 20.

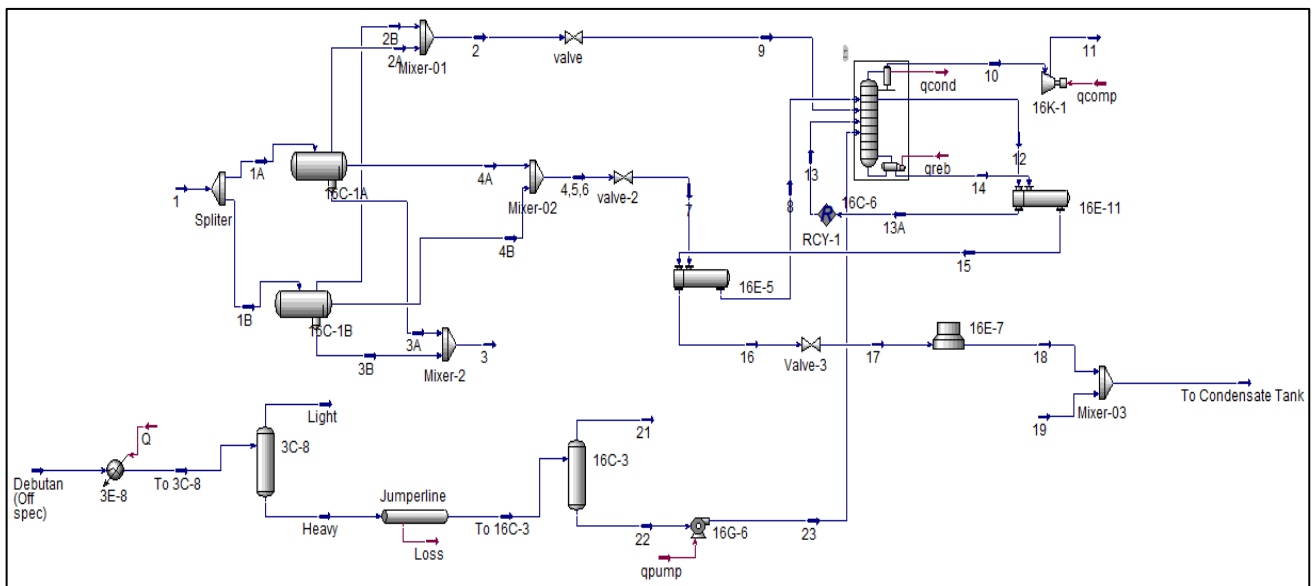


Gambar 20: Skema desain operasi pengaliran kondensat *Debutanizer* 3C-8 pada instalasi *jumperline* menuju LP stabilizer overhead receiver 16C-3



Gambar 21: Kurva laju alir *Debutanizer* 3C-8 terhadap waktu pada saat proses *shutdown train* H Tahun 2024

Gambar 21 menunjukkan bahwa laju alir kondensat *Debutanizer* selama *shutdown* pada 15-16 Oktober 2025 menurun secara bertahap dan mencapai nol setelah 52 jam. Total volume kondensat diperkirakan 493,294 m³. Dengan kapasitas pompa 16G-6, pengosongan keseluruhan sistem memerlukan sekitar 126,48 jam atau 5,27 hari. Karena *receiver* 16C-3 hanya berkapasitas 4 m³, sedangkan laju alir normal *Debutanizer* mencapai 18-19 m³/jam, laju dan urutan penyaluran harus dikendalikan untuk mencegah *overflowing*.



Gambar 22: Desain Operasi Pengaliran Kondensat *Debutanizer* 3C-8 pada Instalasi *Jumperline* Menuju HP Kolom 16C-6

Pada skema Gambar 22, kondensat dipanaskan hingga 60 °C pada tekanan 7 kg/cm²a sebelum memasuki *receiver*. Kondisi ini menurunkan RVP dari 106,3 menjadi 52,46 psia. Pemanasan hingga 90 °C tidak direkomendasikan karena dapat menguapkan fraksi berat dan mengganggu sistem *fuel gas* serta *boiler*. Setelah diproses di HP column, RVP kondensat di tangki turun menjadi 10,01 psia pada temperatur *reboiler* 165 °C, temperatur *condenser* 55,6 °C, dan *reflux ratio* 0,22. Analisis *HAZOP* menunjukkan bahwa *receiver* 16C-3 memiliki perlindungan PIC16, LIC5, T114, ESDV21, EDPV36, dan PSV, dengan MAWP 7 kg/cm²a. Tekanan operasi *jumperline* juga tetap di bawah batas tekanan hisap pompa 16G-6 sebesar 7,2 kg/cm²g. Dengan demikian, desain dinilai layak dan aman untuk kondisi transien, khususnya *shutdown*.

3.10. Evaluasi Ekonomi

Setelah simulasi menunjukkan bahwa RVP kondensat di tangki memenuhi spesifikasi, dilakukan evaluasi ekonomi terhadap instalasi *jumperline*. Komponen biaya utama meliputi pipa, tee, reducer, gate valve, dan elbow. Rincian estimasi biaya investasi disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10: Perkiraan Kebutuhan Biaya Instalasi *Jumperline*

No	Jenis	Kebutuhan	Harga per satuan (\$)	Subtotal (\$)
1	Pipa CB2B 4" sch 40	19m	201,19/6m	637,10
2	Tee 4"	1 pc	23,41	23,41
3	Tee reducer 6"-4"	1 pc	36,89	36,89
4	Gate valve 4" 10K	1 pc	271,65	271,65
5	Elbow 90 derajat 4"	4 pc	17,15	68,6
Total (\$)				1.037,65

Berdasarkan Tabel 10, total biaya material instalasi *jumperline* diperkirakan sebesar US\$1.037,65. Dengan asumsi satu kali *shutdown* setiap dua tahun, volume kondensat yang dapat dipulihkan 82,88 m³, dan harga BRC US\$53,56 per barel, potensi pendapatan mencapai US\$33.688,22. *Payback period* sebesar 0,031 tahun menunjukkan bahwa biaya investasi dapat dipulihkan dalam satu kejadian *shutdown*. Evaluasi tahunan selanjutnya menggunakan *OPEX* 2023 sebesar US\$139 juta untuk tiga *train*. Berdasarkan kapasitas *Train H* sebesar 803 m³/jam atau sekitar 35% dari total kapasitas, *OPEX Train H* diperkirakan US\$49.895.842,65. Rincian komponen biaya disajikan pada Tabel 11.

Tabel 11: Estimasi Rincian *Annual Cost* (OPEX) *Train H*

Estimasi Rincian <i>Annual Cost</i> (OPEX) <i>Train H</i>		
Komponen Biaya	Persentase dari total OPEX (%)	Estimasi untuk <i>Train H</i> (\$)
Energi (<i>Fuel gas</i> , <i>Steam</i> , listrik)	40	19.958.337,06
<i>Maintenance & Repairs</i>	20	9.979.168,53
Tenaga kerja	15	7.484.376,40
<i>Utilities</i> (air, pelumas)	10	4.989.584,26
General Admin dan lainnya	15	7.484.376,40
Total	100	49.895.842,65

Selain merinci *annual cost*, evaluasi pada Tabel 11 digunakan sebagai dasar untuk menghitung *operating profit Train H* berdasarkan kondisi optimum. Pendapatan dihitung dari penjualan metana, etana, propana, butana, dan BRC menggunakan harga produk yang tercantum pada Tabel 5. Hasil perhitungan penjualan setiap produk disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12: Total Penjualan Produk Atas Keempat Kolom *Train H*

Produk	Harga Total Produk Atas (\$)
Metana	254.345,73
Etana	3,93
Propana	3.809,54
Butana	10.194,96
<i>Bontang Return Condensate</i>	6.248,94
Total profit tiap jam	274.603,09
Total profit tiap tahun	2.174.856.487,68

Tabel 12 menunjukkan pendapatan kotor sebesar US\$274.603,09 per jam atau US\$2.174.856.487,68 per tahun dari penjualan metana, etana, propana, butana, dan BRC. Setelah dikurangi *OPEX Train H*, estimasi *operating profit* tahunan menjadi US\$2.124.960.645,03. Nilai ini masih bersifat awal karena belum mencakup depresiasi, *capital investment*, biaya *overhead*, dan data biaya aktual yang lebih rinci. Oleh sebab itu, analisis ekonomi lanjutan diperlukan sebelum hasil tersebut digunakan sebagai dasar keputusan investasi.

4. KESIMPULAN

Pendekatan terintegrasi berbasis machine learning dan simulasi *Aspen HYSYS* mampu mengidentifikasi kondisi operasi yang meningkatkan *yield* produk pada *Deethanizer* sebesar 3,95 %, *Depropanizer* 3,77 %, dan *Debutanizer* 2,35 %, sedangkan *yield Scrub Column* menurun 0,64%. Perubahan efisiensi tray pada keempat kolom masing-masing sebesar -1,54 %, 1,00 %, 1,25 %, dan 0,97 %. Peningkatan pada tiga kolom hilir menunjukkan bahwa pengaturan temperatur reboiler dan laju alir refluks hasil optimasi efektif memperbaiki pemisahan komponen, sementara penurunan kecil pada *Scrub Column* mencerminkan trade-off distribusi produk dalam rangkaian kolom yang saling terhubung. Keandalan model tetap berbeda pada setiap kolom; nilai R² prediksi *Flow Top* pada *Scrub Column* mencapai 0,985, sedangkan R² prediksi *Flow Bottom* pada *Debutanizer* hanya 0,349. Perbedaan ini membenarkan perlunya validasi menggunakan *Aspen HYSYS* dan data lapangan, terutama pada kolom akhir yang memiliki interaksi proses lebih kompleks. Desain *jumperline* terbukti layak sebagai jalur stabilisasi kondensat selama kondisi transien. Pada operasi normal, RVP kondensat berada pada kisaran 9,427–10,34 psia dan masih memenuhi spesifikasi, tetapi meningkat hingga 106,3 psia saat *shutdown*. Setelah dialirkan melalui *jumperline* dan distabilisasi di HP column 16C-6, RVP turun menjadi 10,01 psia. Kelayakan hidrauliknya didukung oleh penggunaan pipa carbon steel 4 inci SCH 40 sepanjang 19 m dengan pressure drop 0,258 kg/cm² serta NPSHa 16,11 m yang jauh lebih besar daripada NPSHr pompa sebesar 1,6 m. Dengan biaya instalasi sekitar US\$1.037,65, potensi pendapatan US\$33.688,22 untuk satu kejadian *shutdown*, dan *payback period* 0,031 tahun, modifikasi ini layak secara teknis dan ekonomis. Estimasi *operating profit* tahunan sebesar US\$2.124.960.645,03 tetap harus ditafsirkan secara hati-hati karena belum memasukkan depresiasi, *capital investment*, *overhead*, dan seluruh biaya operasi aktual; oleh sebab itu, keputusan implementasi memerlukan kajian rekayasa rinci, HAZOP lanjutan, serta analisis ekonomi berbasis data lapangan yang lengkap.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada Program Studi Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, atas terselenggaranya penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, baik dalam bentuk fasilitas maupun ide pikiran.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel yang berjudul Optimasi *Yield* Produk LNG Dan LPG Pada Kolom Unit *Fraksionasi* Serta Desain *Jumperline* Untuk Stabilisasi Kondensat Berbasis *Machine Learning* Dan *Aspen Hysys*.

DAFTAR PUSTAKA

- Asamoah, D. dkk. (2012). "Analysis of Liquefied Petroleum Gas (LPG) Shortage in Ghana: A Case of the Ashanti Region". *Int. J. Bus. Adm.*, vol. 3, no. 5, pp. 89–98, 2012.
- Behname, M. (2013). "The relationship between Market Size, Inflation and Energy".
- Chevron Crude Oil Marketing. (2018). http://crudemarketing.chevron.com/crude/far_eastern/bontang.aspx. Waktu Akses tanggal 23 Juli 2018.
- Fadl, M. H. N. dkk. (2021). Pra Desain Pabrik *Liquefied Natural Gas* dari Gas Alam. *Journal of Fundamentals and Applications of Chemical Engineering*, Vol 2 No 2, 2021.
- Febriani, A.V. dkk. (2025). Penerapan Machine Learning Dalam Optimasi Proses Konversi Biomassa Menjadi Energi. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2025 (Semnastek)*, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta, 28 Mei 2025.
- Giffary, M. dkk. (2024). Optimasi Energi Pada Produksi Syngas Dari R-LNG (*Regasified Liquefied Natural Gas*) Menggunakan Aspen Hysys V.10. *Chemical Engineering Journal Storage* 4:4(Agustus2024) 477-486.
- Indarti, E. dkk. (2022). *Recovery* Air Kondesat pada Stasiun Perebusan Untuk Menekan *Oil Losses* : Studi Kasus PKS Cot Girek. *Jurnal Agointek*, Vol 16 No 2, 2022.
- KESDM. (2024) "Pemerintah Kejar Target Tingkatkan Bauran EBT". *Kementerian ESDM*, Accessed: Jan. 22, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemerintah-kejar-tingkatkan-bauran-ebt>.
- KESDM. (2023). Handbook Of Energy & Economic Statistics Of Indonesia 2023. *Kementerian ESDM*.
- Rahmayanti, L. dkk. (2021). Analisa Pemanfaatan Sumber Daya Energi Minyak dan Gas Bumi di Indonesia. *Jurnal Sains Edukatika Indonesia*, Vol 3, No 2, hal 9-16 Oktober 2021.
- Ravan, S. V. (2017). "Impact of LPG on Indian Economy". *Prime Int. Res. J.*, vol. 1, no. 4, 2017.
- Salsabila, S. R. dkk. (2021). Studi Literatur Pengaruh Kondisi Operasi Fraksionasi TKKS dengan Proses Organosolv terhadap Kadar Selulosa dan Lignin. *Prosiding The 12th Industrial Research Workshop And National Seminar*, hal 770-778, 2021.
- Sembiring, S. dkk. (2020) "Pemanfaatan Gas Alam sebagai LPG (*Liquefied Petroleum Gas*)". *J. Tek. ITS*, vol. 8, no. 2, 2020.
- Suryo, T. A. dkk. (2023). Perbandingan Komposisi Hidrokarbon *Liquefied Petroleum Gas* Antara Sampel LPG di Kilang SPBE dan Agen Menggunakan GC-LPG. *Jurnal Konversi*, Vol 12 No 1, 2023.
- Tampubolon, A. P. C. & Kiono, B. F. T. (2021) "Overview Perkembangan Pemanfaatan Energi Primer Gas Bumi Di Indonesia," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 2, no. 1, pp. 36–52, 2021.
- Wibowo, Y. E. & Windarta, J. (2022). Kondisi Gas Bumi Indonesia dan Energi Alternatif Pengganti Gas Bumi. *Jurnal Energi dan Terbarukan*, Vol 3 No 1, pp 1-14, 2022.
- Zhao, H. dkk. (2016). "Economic growth, electricity consumption, labor force and capital input: A more comprehensive analysis on North China using panel data". *Energies*, vol. 9, no. 11, pp. 1–21, 2016.