

OPTIMASI OPERASI *PRE-WASH COLUMN* UNTUK KEMURNIAN METANA DAN PEMISAHAN KARBON DIOKSIDA (CO₂) SERTA HIDROGEN SULFIDA (H₂S)

Ahmad Zahro Ilmi¹, Diva Putty Imani¹, Pandu Dava Akmal¹, Tun Sriana^{1*}

¹Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, Jawa Tengah 58311

E-mail: tun.sriana@gmail.com

ABSTRAK

Gas alam merupakan sumber energi strategis yang berperan penting dalam menjaga ketahanan energi nasional. Namun, kandungan pengotor seperti karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen sulfida (H₂S) sering menurunkan nilai kalor dan menimbulkan korosi pada sistem pemrosesan gas. Penelitian ini menghadirkan pendekatan komprehensif terhadap optimasi operasi *Pre-Wash Column V-0101* di PT XYZ untuk meningkatkan kemurnian metana (CH₄) sekaligus mengurangi beban energi proses. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Aspen HYSYS dengan model termodinamika *Acid Gas – Chemical Solvent* guna memprediksi perilaku sistem pada berbagai kondisi tekanan, temperatur, dan rasio cairan terhadap gas (L/G). Dua formulasi pelarut diuji, yaitu MDEA + Air serta MEA + Piperazine + Air, untuk menentukan kombinasi paling efisien dalam pemisahan gas asam. Hasil simulasi menunjukkan bahwa MEA + Piperazine + Air menghasilkan efisiensi penghilangan CO₂ hingga 100% dengan CH₄ recovery tertinggi, namun disertai peningkatan energi regenerasi dan biaya kapital. Sebaliknya, MDEA + Air memberikan efisiensi CO₂ removal 98% dan CH₄ recovery 104,3% dengan konsumsi energi 17% lebih rendah. Oleh karena itu, sistem MDEA + Air dinyatakan paling optimal karena menawarkan keseimbangan ideal antara efisiensi teknis, stabilitas operasi, dan keekonomian proses pada unit *Pre-Wash Column*.

Kata kunci: *Pre-Wash Column*, Optimasi, MDEA, MEA, Piperazine

1. PENDAHULUAN

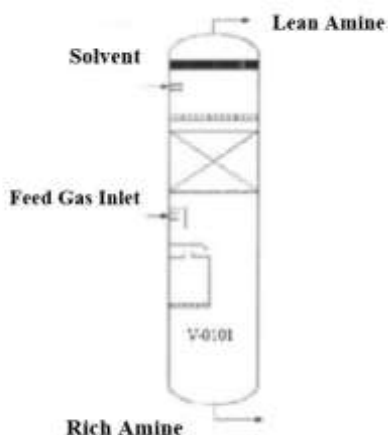
PT. XYZ merupakan salah satu fasilitas pemrosesan gas bumi di Indonesia yang berperan penting dalam menjaga ketahanan energi nasional. Gas alam dari sumur produksi mengandung metana (CH₄) sebagai komponen utama, tetapi juga disertai *impurities* berupa karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen sulfida (H₂S). Kandungan CO₂ yang tinggi akan menurunkan nilai kalor gas, sedangkan H₂S bersifat korosif dan beracun, sehingga keduanya harus dikurangi hingga memenuhi spesifikasi gas pipa [1]. Salah satu unit penting di PT. XYZ yang berfungsi sebagai tahapan awal pemurnian adalah V-0101 (*Pre-Wash Column*). Unit ini bekerja berdasarkan prinsip absorpsi, yaitu kontak antara gas umpan dengan larutan pencuci (*solvent*) sehingga CO₂ dan H₂S dapat terlarut dalam fase cair, sedangkan metana dengan kemurnian yang lebih tinggi keluar sebagai gas produk. Kinerja kolom ini sangat menentukan keberhasilan proses *downstream*, karena jika V-0101 tidak berfungsi optimal, beban pemisahan akan semakin besar pada unit-unit berikutnya dan menyebabkan peningkatan konsumsi energi serta biaya operasional [2].

Pada kondisi aktual di PT XYZ, *solvent* yang digunakan pada unit *Pre-Wash Column* masih berupa air murni (H₂O). Penggunaan air sebagai *solvent* memiliki keterbatasan dalam hal selektivitas terhadap gas-gas asam serta berpotensi menambah beban energi pada tahapan

pemurnian berikutnya. Atas dasar itu, penelitian ini melakukan kajian untuk mengevaluasi kemungkinan penggunaan *solvent* alternatif beserta penentuan kondisi operasi yang paling sesuai yang mampu meningkatkan kemurnian metana, serta pemisahan CO₂ dan H₂S secara lebih efektif, sekaligus menurunkan kebutuhan energi dan potensi biaya kapital dibandingkan dengan penggunaan *solvent* eksisting. Untuk itu, optimasi operasi V-0101 menjadi hal yang penting. Optimasi ini meliputi pengaturan laju alir gas dan *solvent*, tekanan operasi, serta kondisi temperatur. Dengan penerapan neraca massa dan energi, dapat dilakukan analisis efisiensi dan strategi perbaikan. Tujuan akhirnya adalah meningkatkan kemurnian metana, meminimalkan kandungan CO₂ dan H₂S, serta mengurangi konsumsi energi dan *solvent* sehingga tercapai efisiensi ekonomi yang lebih baik.

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa jenis dan pemilihan *solvent* sangat berpengaruh terhadap efisiensi proses pemisahan CO₂ dan H₂S dalam pemurnian gas alam. Menurut Kurniawan et al. (2021) menemukan bahwa penggunaan MDEA (*Methyl Diethanolamine*) dapat meningkatkan kemampuan penyerapan CO₂ dengan kebutuhan energi regenerasi yang lebih rendah dibandingkan MEA [3]. Sementara itu, Alie et al. (2020) menyatakan bahwa campuran MDEA dengan *Piperazine* mampu menyerap H₂S secara lebih efektif tanpa mengurangi kemampuan *solvent* dalam menangkap CO₂ [4]. Selain itu, Wahyudi et al. (2022) menunjukkan bahwa pengaturan laju alir *solvent*, tekanan operasi, dan temperatur yang tepat dapat mengurangi kebutuhan energi regenerasi hingga 15% [5]. Dari hasil-hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa pemilihan dan pengoperasian *solvent* serta kondisi operasi secara optimal menjadi faktor penting dalam meningkatkan kinerja unit absorpsi seperti V-0101 di fasilitas pengolahan gas bumi.

Dalam penelitian ini, penulis mengevaluasi efektivitas dua jenis kombinasi antara 3 jenis *solvent*, laju alir *solvent*, tekanan operasi, dan temperatur yang dapat memberikan dan mengoptimalkan kemurnian metana, pemisahan H₂S dan CO₂, serta efisiensi keseimbangan ideal antara efisiensi teknis, stabilitas operasi, dan keekonomian proses pada unit *Pre-Wash Column*. *Solvent* yang dibandingkan yaitu Air + MDEA (*Methyldiethanolamine*) dan MEA (*Monoethanolamine*) + *Piperazine* + Air, pada *Pre-Wash Column* untuk menangkap kandungan klorin dan senyawa asam pada aliran gas. MDEA (*Methyldiethanolamine*) adalah senyawa kimia yang digunakan sebagai pelarut dalam proses pemisahan gas, terutama untuk menyerap gas asam seperti hidrogen sulfida (H₂S) dan karbon dioksida (CO₂) dari aliran gas alam atau gas sintetik. MDEA termasuk dalam kelompok amina tersier dan memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan amina primer atau sekunder, termasuk selektivitasnya yang tinggi terhadap H₂S dan kemampuan untuk menyerap CO₂ dengan kecepatan reaksi yang lebih lambat [6]. Sedangkan, MEA (*Monoethanolamine*) adalah senyawa kimia yang digunakan sebagai pelarut dalam proses penyerapan gas asam seperti karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen sulfida (H₂S) dari gas buang industri atau gas alam. Memiliki reaktivitas tinggi terhadap gas asam, MEA mampu menyerap CO₂ dengan cepat dan efektif. MEA, di sisi lain, memiliki kekurangan, yaitu mengalami kerusakan (degradasi) secara termal dan kimiawi dengan lebih cepat, serta membutuhkan konsumsi energi yang lebih besar saat proses regenerasi [7]. Gas masuk dan *solvent* diukur konsentrasinya sebelum dan sesudah kolom, sehingga melalui neraca massa dapat dihitung jumlah senyawa asam yang diserap. Skema neraca massa *Pre Wash Column* ditunjukkan pada Gambar 1. Pendekatan ini bertujuan untuk memudahkan penulis menentukan kombinasi *solvent* yang paling optimal dari sisi efisiensi penyerapan, konsumsi bahan kimia, dan pertimbangan ekonomis, dengan tujuan meningkatkan kinerja kolom dan menekan biaya operasional Unit *Pre-treatment* PT. XYZ.



Gambar 1. Skema Neraca Massa *Pre Wash Column*

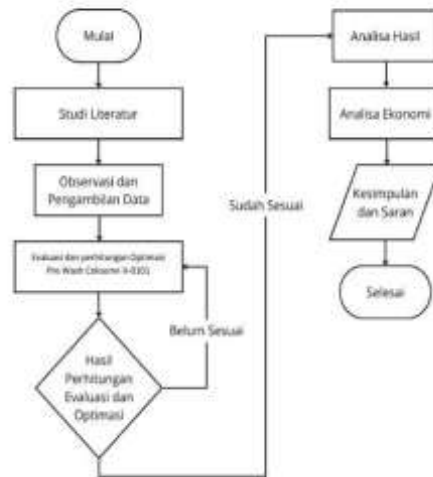
2. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak Aspen HYSYS untuk mensimulasikan kinerja *Pre-Wash Column* dalam pemisahan gas asam. Tujuan utama adalah memperoleh kondisi operasi optimum yang dapat meningkatkan kemurnian metana (CH_4) sekaligus menurunkan kandungan pengotor berupa karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S), sekaligus menurunkan kebutuhan energi dan potensi biaya kapital. Data komposisi umpan diperoleh dari PT XYZ, kemudian dimasukkan ke dalam HYSYS dengan kondisi awal berupa *flow solvent* sebesar 4409 lbmole/h, *flow feed* sebesar 7703 lbmole/hr, tekanan 2963 Kpa, serta komposisi molar CH_4 sebesar 0,6949%, CO_2 sebesar 0,2155%, dan H_2S sebesar 0,0052% sesuai data lapangan. Kandungan metana mendominasi sebagai komponen utama, sedangkan CO_2 dan H_2S hadir dalam jumlah yang lebih kecil sebagai pengotor yang harus direduksi melalui proses pemisahan. Penelitian ini menggunakan pemodelan sifat termodinamika berdasarkan interaksi antara gas asam dan *solvent* kimia (*Acid Gas – Chemical Solvent*) untuk merepresentasikan sistem hidrokarbon bercampur gas asam secara akurat. *Acid Gas – Chemical Solvents* dalam teknologi *Acid Gas* yang mendukung pelarut seperti MDEA, dan MEA, serta campuran pelarut. Paket ini dikembangkan dengan persamaan keadaan *Peng-Robinson* untuk fase uap dan model termodinamika elektrolit NRTL (eNRTL) untuk fase elektrolit [8]. Kolom dimodelkan sebagai *packed absorption column*, dengan variasi parameter operasi yang diuji mencakup tekanan, temperatur, dan rasio cairan terhadap gas (L/G), untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap performa pemisahan gas asam.

Penelitian ini membandingkan dua jenis kombinasi *solvent* serta mengevaluasi laju alir *solvent*, tekanan operasi, dan temperatur yang dapat memberikan efisiensi keseluruhan *Pre-Wash Column* paling besar. *Solvent* yang dibandingkan yakni MDEA + air serta MEA + *piperazine* + air. MDEA dipilih karena sifat selektifnya terhadap H_2S serta kestabilannya dalam operasi jangka panjang, sedangkan MEA yang dipadukan dengan *piperazine* memberikan laju reaksi lebih tinggi sehingga mempercepat proses absorpsi CO_2 [9]. Kedua kombinasi diuji secara sistematis untuk mengetahui efektivitasnya dalam mencapai *purity* CH_4 maksimal, mengurangi kandungan CO_2 dan H_2S , serta meminimalkan kehilangan metana, dan efisiensi penggunaan energi serta biaya.

Detail alur penelitian disajikan pada Gambar 2. Dalam penelitian ini, metode yang digunakan mencakup variabel penelitian, metode kerja, dan metode analisis. Variabel penelitian terdiri dari variabel bebas dan variabel terikat yang saling berhubungan. Variabel bebas utama meliputi jenis

dan konsentrasi pelarut (MDEA + air serta MEA + *piperazine* + air), sedangkan variabel bebas pendukung mencakup tekanan, temperatur, dan laju alir proses. Variabel terikat dalam penelitian ini meliputi kemurnian CH₄, kadar CO₂ dan H₂S pada keluaran kolom, kehilangan CH₄, serta efisiensi energi proses. Gambar 2 menunjukkan alur penelitian yang dimulai dari studi literatur, pengumpulan data operasi, simulasi menggunakan Aspen HYSYS, hingga analisis hasil untuk menentukan kondisi operasi dan pelarut paling optimal.



Gambar 2. Detail Alur Penelitian

Selanjutnya, analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja kolom dan menentukan efisiensi proses penyisihan komponen terlarut pada *Pre-Wash Column* V-0101. Proses ini dilaksanakan secara sistematis melalui beberapa tahapan perhitungan dan evaluasi kinerja sebagai berikut [10] :

A. Efisiensi *Pre-Wash Column*

Efisiensi kolom absorpsi menunjukkan seberapa besar komponen gas yang berhasil diserap oleh pelarut :

a. Efisiensi penyerapan komponen

$$\eta = \frac{y_{in} - y_{out}}{y_{in}} \times 100\% \quad (1)$$

b. Efisiensi terhadap target removal

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{out}} \times 100\% \quad (2)$$

B. Neraca Massa Komponen

Perhitungan utama absorpsi didasarkan pada neraca massa antara fase gas dan cair:

$$G(y_{in} - y_{out}) = L(x_{out} - x_{in}) \quad (3)$$

C. Laju Alir Pelarut Minimum

Dengan menggunakan rumus berikut ini dapat menentukan L minimum yang diperlukan:

$$L_{min} = \frac{G(y_{in} - y_{out})}{(x_{in} - x_{out})} \quad (4)$$

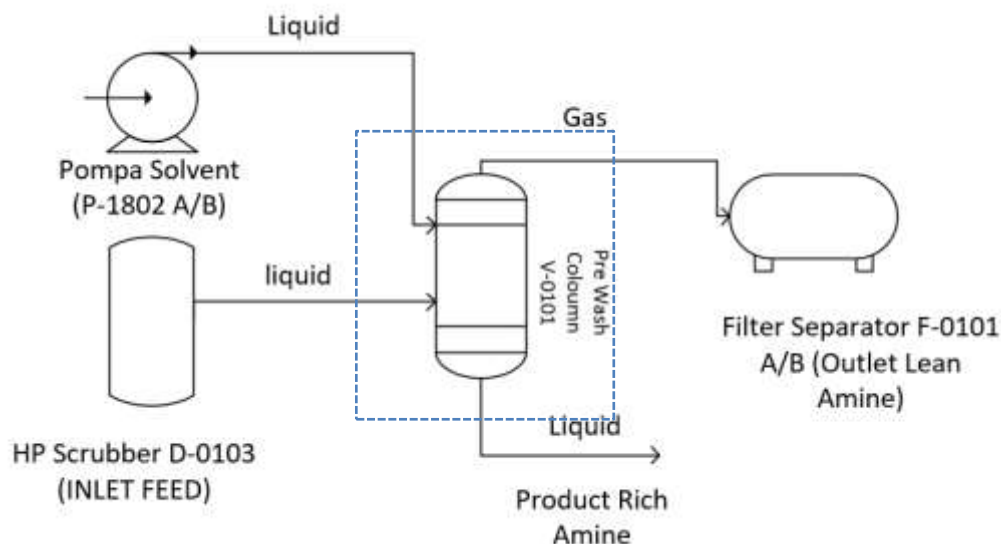
D. Total Biaya Operasional Tahunan (OPEX)

Rumus umum yang digunakan adalah :

$$\text{OPEX}_{\text{total}} = \text{Biaya Utilities} + \text{Biaya Solvent Makeup} + \text{Biaya Bahan Kimia} + \text{Biaya Maintenance} \quad (5)$$

3. PEMBAHASAN

Pre-Wash Column di PT XYZ berfungsi untuk memisahkan gas asam berupa karbon dioksida (CO₂) dan hidrogen sulfida (H₂S) dari gas umpan sehingga menghasilkan metana (CH₄) dengan kemurnian lebih tinggi. Gas yang diproses berasal dari produksi lapangan dan terlebih dahulu melewati *Gas Separation Unit* (GSU) untuk memisahkan fraksi berat serta *impurities* lainnya sebelum masuk ke kolom. Kondisi operasi seperti temperatur, tekanan, serta rasio cairan terhadap gas (L/G) diatur agar sesuai dengan kebutuhan proses absorpsi. Pelarut yang digunakan dalam penelitian ini adalah kombinasi MDEA (*Methyldiethanolamine*) + air serta MEA (*Monoethanolamine*) + *piperazine* + air, dengan karakteristik berbeda dalam kemampuan penyerapan CO₂ dan H₂S. Adapun untuk *Pocess Flow Diagram* unit *Pre-Wash Column* pada PT XYZ dapat dilihat pada Gambar 3 berikut ini;



Gambar 3. PFD unit *Pre-Wash Column* pada PT XYZ

Proses pemisahan berlangsung pada kolom yang dilengkapi dengan *packing section*, berfungsi memperluas area kontak antara gas dan cairan melalui mekanisme *counter-current flow*. Gas metana keluar sebagai produk utama, sedangkan CO₂ dan H₂S terikat dalam pelarut. Sebagai dasar analisis, Tabel 1 menyajikan perbandingan efektivitas antara pelarut MDEA + air dengan MEA + *piperazine* + air, yang dibandingkan dengan pelarut awal pada PT. XYZ (H₂O) guna untuk menentukan sistem pelarut paling efisien dalam proses penyerapan.

Tabel 1. Perbandingan Sebelum dan Sesudah Optimasi (MDEA + Air vs MEA + Piperazine + Air)

Parameter	Unit	Sebelum Optimasi (100% H ₂ O)	Sesudah Optimasi (MEA+Piperazine+Air) 0.7000 : 0.0040 : 0.2960	Sesudah Optimasi (MDEA+ H ₂ O) 0,25 : 0,75
Feed Gas – CH ₄	Fraksi Mol	0.6949	0.6949	0.6949
Feed Gas – CO ₂	Fraksi Mol	0.2155	0.2155	0.2155
Feed Gas – H ₂ S	Fraksi Mol	0.0052	0.0052	0.0052
Outlet CH ₄ (Sweet Gas)	Fraksi Mol	0.6983	0.8588	0.7245
Outlet CO ₂	Fraksi Mol	0.2134	0.0000	0.1900
Outlet H ₂ S	%	0.0000	0.0000	0.0000
CH ₄ Recovery	%	100.5%	123.6%	104.3 %
CO ₂ Removal Efficiency	%	97%	100%	98 %
H ₂ S Removal Efficiency	%	100%	100%	100 %
Ekonomis capital	USD	1.863.430	2.181.310	1.802.430

Berdasarkan hasil optimasi pada tabel di atas, dapat dilihat bahwa perubahan jenis *solvent* memberikan pengaruh signifikan terhadap kinerja pemisahan gas asam (CO₂ dan H₂S) serta perolehan gas metana (CH₄ recovery). Sebelum dilakukan optimasi, sistem menggunakan 100% air sebagai *solvent*, menghasilkan fraksi mol metana (CH₄) sebesar 0,6983 dengan efisiensi penghilangan CO₂ sebesar 97%. Setelah dilakukan optimasi dengan MEA + *piperazine* + air, fraksi mol CH₄ meningkat drastis menjadi 0,8588, menunjukkan pemisahan yang paling efisien di antara ketiga perbandingan yang dilakukan. Namun, kombinasi ini juga diikuti dengan peningkatan kebutuhan energi regenerasi dan biaya kapital sebesar 2.181.310 USD. Sementara itu, kombinasi *solvent* MDEA + air (1:3) menghasilkan fraksi mol CH₄ sebesar 0,7245 dan efisiensi CO₂ removal sebesar 98%, dengan biaya kapital yang jauh lebih rendah, yaitu sebesar 1.802.430 USD.

Secara teknis, MEA + *piperazine* + air menunjukkan performa penyerapan terbaik. Hal ini disebabkan oleh sifat reaktivitas tinggi dari amina primer (MEA) terhadap CO₂ yang berlangsung cepat melalui pembentukan *carbamate*, serta peran *piperazine* sebagai promotor kinetik yang mempercepat pembentukan produk reaksi. Kombinasi ini menghasilkan efisiensi penyerapan CO₂ hingga mendekati 100% dengan waktu kontak gas-cair yang lebih singkat dan *loading solvent* yang tinggi. Oleh sebab itu, kombinasi *solvent* ini disebut paling unggul dalam hal efisiensi pemisahan dan tingkat pemurnian gas. Namun demikian, keunggulan tersebut dibayar dengan konsekuensi energi dan biaya operasi yang lebih besar. Sistem berbasis MEA membutuhkan panas regenerasi tinggi, sekitar 3,5–4,0 GJ/ton CO₂ yang dilepaskan, akibat ikatan kimia yang kuat antara MEA dan CO₂. *Piperazine*, meskipun mempercepat reaksi, juga meningkatkan viskositas dan memperbesar kebutuhan sirkulasi pompa. Selain itu, MEA cenderung mengalami degradasi termal dan oksidatif lebih cepat dibanding amina tersier seperti

MDEA, sehingga memerlukan penggantian *solvent* secara *periodic*. Dari sisi operasional jangka panjang, biaya energi dan pemeliharaan ini dapat meningkat secara signifikan, terutama bila diterapkan pada sistem skala industri yang kontinu seperti *Pre-Wash Column*.

Sebaliknya, MDEA + air memberikan keseimbangan terbaik antara performa dan keekonomisan. MDEA merupakan amina tersier dengan reaktivitas moderat terhadap CO₂ namun sangat selektif terhadap H₂S, menghasilkan proses pemisahan yang lebih stabil dan konsumsi energi yang lebih rendah. Penambahan air dalam MDEA rasio 1:3 (0,25 : 0,75) berfungsi mengencerkan sistem sehingga menurunkan viskositas, memperbaiki difusi gas, dan mengurangi beban panas pada kolom regenerasi. Hasil ini membuat efisiensi CO₂ *removal* pada MDEA + air tetap tinggi (98%) meskipun tidak se optimal MEA + *piperazine* + air, tetapi biaya kapital dan operasionalnya lebih rendah sebesar sekitar 17% dibanding sistem MEA + *piperazine* + air. Pada kondisi keekonomian awal dengan pelarut H₂O, sistem menunjukkan performa terbatas karena air hanya bertindak sebagai pelarut fisik dan tidak bereaksi secara kimia dengan CO₂ maupun H₂S. Setelah optimasi menggunakan sistem berbasis amina, efisiensi penghilangan gas dan pemulihan CH₄ meningkat secara signifikan. Meskipun demikian, tujuan utama optimasi adalah menemukan keseimbangan antara kinerja teknis dan efisiensi biaya operasional.

Kombinasi MDEA + air juga memberikan dampak pada umur *solvent* yang lebih panjang, risiko korosi lebih kecil, dan energi regenerasi lebih rendah, sehingga lebih layak digunakan untuk sistem *Pre-Wash Column* di industri pengolahan gas berskala besar yang menuntut stabilitas operasi dan biaya minimum. Selanjutnya, Tabel 2 menampilkan data spesifikasi desain dan kondisi operasi *Pre-Wash Column* PT XYZ yang menggunakan *solvent* MDEA + air. Parameter ini meliputi temperatur, tekanan, laju alir gas, dan konsumsi pelarut. Berdasarkan hasil simulasi Aspen HYSYS, diperoleh titik operasi optimum yang mampu meningkatkan kemurnian CH₄ sekaligus menurunkan kadar CO₂ dan H₂S dalam gas keluaran.

Tabel 2. Data Spesifikasi dan Konsisi Operasi *Pre-Wash Column* V-0101

Data Spesifikasi dan Kondisi Operasi <i>Pre-Wash Column</i> V-0101		
Parameter	Spesifikasi	Satuan
Alat	<i>Pre-Wash Column</i> V-0101	-
Tipe <i>Solvent</i>	MDEA+Air	-
Tipe <i>Packed</i>	Pall	-
<i>Packing Material</i>	Metal	-
<i>Packing Dimension</i>	1.5	Inchi
<i>Section Packed Height</i>	5	Meter
<i>Diameter Packed</i>	1.668	Meter
<i>Num of Stages</i>	10	Stage
Tekanan <i>Inlet Feed Gas</i>	2963	Kpa
Tekanan <i>Inlet Solvent</i>	2963	Kpa
Tekanan <i>Outlet Lean Amine</i>	2894	Kpa
<i>Outlet Lean Amine</i>	37.7	°C
<i>Outlet Rich Amine</i>	59.17	°C
<i>Inlet Molar Flow Feed Gas</i>	3494	Kgmol/h
<i>Inlet Molar Flow Solvent</i>	2000	Kgmol/h
<i>Outlet Molar Flow Lean Amine</i>	3349	Kgmol/h

Data Spesifikasi dan Kondisi Operasi <i>Pre-Wash Column V-0101</i>		
Parameter	Spesifikasi	Satuan
<i>Outlet Molar Flow Rich Amine</i>	2145	Kgmol/h
Efisiensi	98	%

Adapun berdasarkan data pada Tabel 3, temperatur optimal untuk operasi *Pre-Wash Column* berada pada 29°C, karena pada temperatur ini efisiensi pemisahan mencapai nilai tertinggi yaitu 98%. Ketika temperatur *solvent* dinaikkan di atas 29°C, efisiensi *column* menurun secara bertahap hingga mencapai 94% pada temperatur 33°C. Penurunan ini terjadi karena pada temperatur yang lebih tinggi kemampuan *solvent* untuk menyerap CO₂ dan H₂S menjadi lebih rendah, sehingga kinerja pemisahan dalam kolom tidak sebaik pada temperatur optimalnya.

Tabel 3. Efisiensi Keseluruhan *Pre-Wash Column V-0101*

Efisiensi Keseluruhan <i>Pre-wash Column V-0101</i>				
<i>Flow Feed</i>	<i>Flow Solvent</i>	<i>Temperature Solvent</i>	<i>Pressure Solvent</i>	Efisiensi (%)
7703 lbmole/hr	4409 lbmole/h	29 °C	29.63 Bar	98%
7703 lbmole/hr	4409 lbmole/h	30°C	29.63 Bar	97%
7703 lbmole/hr	4409 lbmole/h	31°C	29.63 Bar	96%
7703 lbmole/hr	4409 lbmole/h	32°C	29.63 Bar	95%
7703 lbmole/hr	4409 lbmole/h	33°C	29.63 Bar	94%

Selanjutnya adalah tabel 4 yang menunjukkan hasil *overall mass balance* dan *energy balance* dari simulasi Aspen HYSYS. Dari Tabel dapat dilihat bahwa dengan deviasi massa <1%, menandakan sistem stabil dan sesuai hukum kekekalan massa. Total energi sistem sebesar -1.156.000.000 kJ/h menunjukkan proses bersifat endotermik, di mana *solvent* menyerap energi selama proses absorpsi. Secara keseluruhan, kondisi optimum diperoleh pada temperatur 29°C dan tekanan 29,63 bar, dengan efisiensi tertinggi dan keseimbangan massa dan energi yang baik. Hasil simulasi ini menunjukkan bahwa pelarut MDEA + air merupakan opsi paling optimal karena mampu memberikan efisiensi pemisahan tinggi, stabilitas proses yang baik, serta penggunaan energi dan biaya yang lebih ekonomis pada operasi *Pre-Wash Column V-0101*.

Tabel 4. Overall Mass Balance dan Overall Energy Mass

<i>Stream</i>	<i>Overall Mass Balance</i>	<i>Overall Energy Mass</i>
<i>Solvent Inlet</i>	86.600 Kg/h	-660.300.000 Kj/h
<i>Feed Gas Inlet</i>	82.980 Kg/h	-495.700.000 Kj/h
<i>Lean Amine Outlet</i>	76.820 Kg/h	-448.200.000 Kj/h
<i>Rich Amine Outlet</i>	92.770 Kg/h	-707.800.000 Kj/h
Total	169.590 Kg/h	-1.156.000.000 Kj/h

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian optimasi operasi *Pre-Wash Column* V-0101 di PT XYZ, dapat disimpulkan bahwa kombinasi pelarut MDEA + air memberikan hasil paling optimal antara efisiensi pemisahan dan keekonomisan proses. Hasil simulasi menggunakan Aspen HYSYS menunjukkan bahwa pelarut MEA + *piperazine* + air mampu mencapai penghilangan CO₂ hingga 100% dan kemurnian CH₄ sebesar 0,8588, namun memerlukan energi serta biaya operasi yang lebih besar. Sebaliknya, pelarut MDEA + air menunjukkan efisiensi penghilangan CO₂ sebesar 98%, H₂S 100%, dan CH₄ *recovery* mencapai 104,3% dengan konsumsi energi serta biaya sekitar 17% lebih rendah. Pada kondisi optimum tekanan 2963 kPa dan temperatur 29°C, efisiensi penyerapan mencapai 98%.

Dari sisi keekonomian, biaya kapital operasional pada unit *pre-wash colomn* V-0101 dalam keseluruhan yang menggunakan *solvent* MDEA + air sebesar 1.802.430 USD, sedangkan MEA + *piperazine* + air mencapai 2.181.310 USD, sehingga terdapat selisih sekitar 378.880 USD atau lebih tinggi $\pm 21\%$ pada sistem berbasis MEA + *piperazine* + air. Dengan demikian, MDEA + air direkomendasikan sebagai kombinasi *solvent* paling efektif dan ekonomis dalam kategori *pre-wash coloum* untuk aplikasi industri karena memberikan performa stabil, umur pelarut lebih panjang, risiko korosi lebih rendah, serta efisiensi energi dan biaya operasional yang lebih baik serta sangat memberikan dampak maksimal untuk pemisahan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Farooqi, R. M. Ramli, S. S. M. Lock, A. S. Farooqi, M. Z. Shahid, S. M. Wajahat ul Hasnain, N. E. Hira, and B. Abdullah, "Removal of Carbon Dioxide and Hydrogen Sulfide from Natural Gas Using a Hybrid Solvent of Monoethanolamine and N-Methyl 2-Pyrrolidone," *ACS Omega*, vol. 9, no. 24, pp. 25704–25714, Jun. 2024.
- [2] S. E. Sanni, M. V. Ricci, and M. R. Abdullah, "Optimization of Natural Gas Treatment for the Removal of CO₂ and H₂S," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 80, pp. 103403, Mar. 2020.
- [3] Kurniawan, D., Nugroho, B., dan Sari, M. 2021. *Comparative analysis of MEA and MDEA solvents in CO₂ absorption process for natural gas purification*. *Chemical Engineering Transactions*, 84(9): 541–546.
- [4] Alie, Z., Rahman, A., dan Fadhilah, R. 2020. *Performance enhancement of MDEA–Piperazine blends for H₂S and CO₂ absorption in natural gas sweetening*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 77: 103–118.
- [5] Wahyudi, A., Prasetyo, T., dan Lestari, D. 2022. *Optimization of solvent circulation rate and operating pressure to minimize energy consumption in amine regeneration unit*. *Energy Reports*, 8(2): 3145–3154.
- [6] A. E. Etoumi, M. R. Alhansh, M. M. Almabrouk, and M. M. Emtir, "Performance Improvement of Gas Sweetening Units by Using a Blend of MDEA/PZ," *CET Journal*, vol. 21, pp. 177-184, Apr. 2021.
- [7] S. Pramuang, "Effect of Monoethanolamine Concentrations for CO₂ and H₂S Elimination in Biogas Improving Process," *SNRU J. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 207–212, Sept–Dec 2020.
- [8] G. S. Zamre & D. Semwal, "Simulation of Acid Gas Removal Unit using MDEA Amine Solvent," *International Journal of Scientific Development and Research (IJS DR)*, vol. 9, no. 5, pp. 1038-1044, May 2024.
- [9] J. Xue, C. Yang, J. Fu, J. He, dan J. Li, "Research and Performance Evaluation on Selective Absorption of H₂S from Gas Mixtures by Using Secondary Alkanolamines," *Processes*, vol. 10, no. 9, art. no. 1795, 2022.
- [10] M. Schlager, "Determination of volumetric mass transfer coefficients for absorption/stripping processes," *Chemical Engineering and Processing*, vol. 183, 109053, 2022.

Daftar Simbol

G	=	Laju alir molar gas, kmol/jam atau lbmol/jam
μ	=	Viskositas fluida, N·s/m ²
L	=	Laju alir molar pelarut, kmol/jam atau lbmol/jam
y_{in}	=	Fraksi mol komponen gas pada gas masuk, –
y_{out}	=	Fraksi mol komponen gas pada gas keluar, –
x_{in}	=	Fraksi mol komponen terlarut dalam pelarut masuk, –
x_{out}	=	Fraksi mol komponen terlarut dalam pelarut keluar, –
η	=	Efisiensi penyerapan komponen, %
$\eta_{removal}$	=	Efisiensi penghilangan CO ₂ atau H ₂ S, %
L_{min}	=	Laju alir pelarut minimum, kmol/jam