DESAIN FASILITAS PEMISAHAN CO_2-GAS ALAM SECARA ABSORPSI MENGGUNAKAN SULFINOL

Siti Nadya Oktavia[1*], Haris Numan Aulia[1], Annasit[1]
[1]Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl. Gajah Mada No. 38, Cepu, 58315
**E-mail*: sitinadya741@gmail.com

ABSTRAK

Gas alam umumnya mengandung karbon dioksida (CO_2) yang menurunkan nilai kalor, meningkatkan korosi, dan menyebabkan gas tidak memenuhi spesifikasi penjualan. Penelitian ini bertujuan merancang fasilitas pemisahan CO_2 dari gas alam melalui absorpsi menggunakan pelarut Sulfinol-X. Simulasi dilakukan dengan Aspen HYSYS V14 menggunakan paket fluida *Acid Gas–Chemical Solvents* pada kapasitas umpan 321,01 MMSCFD dan kandungan CO_2 33,24 mol%. Pelarut terdiri atas sulfolane, metildietanolamina, piperazine, dan air, dengan konsentrasi sulfolane divariasikan dalam analisis. Hasil simulasi menunjukkan kandungan CO_2 turun hingga 0,05 ppmv, memenuhi spesifikasi *sweet gas* kurang dari 50 ppmv dengan efisiensi pemisahan lebih dari 99,99%. Diameter absorber 3,459 m dan regenerator 5,831 m dengan kondisi hidraulik aman. Sistem bekerja optimum pada kandungan CO_2 umpan 0,29–0,37 fraksi mol dan kapasitas 150–350 MMSCFD, dengan konsentrasi sulfolane minimum 0,284 fraksi massa. Pada kondisi dasar, total utilitas sekitar $1{,}94 \times 10^9$ kJ/jam, biaya modal total USD 19,6 juta, biaya operasi USD 109,1 juta/tahun, dan biaya tahunan total USD 128,7 juta/tahun, dengan biaya operasi mendominasi 82–85% biaya tahunan. Dengan demikian, Sulfinol-X efektif memisahkan CO_2 dari gas alam berkadar tinggi dan menghasilkan gas yang memenuhi spesifikasi penjualan.

Kata kunci: gas alam, CO_2, absorpsi, *Sulfinol-X*, Aspen HYSYS

1. PENDAHULUAN

Gas alam merupakan salah satu sumber energi utama yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar maupun bahan baku industri karena memiliki efisiensi pembakaran yang tinggi dan menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan batu bara dan minyak bumi [1]. Selain digunakan sebagai sumber energi, gas alam juga berperan penting sebagai bahan baku pada industri petrokimia, produksi hidrogen, dan industri pupuk. Seiring meningkatnya kebutuhan energi global, pemanfaatan gas alam terus berkembang sehingga diperlukan proses pengolahan yang memadai agar memenuhi spesifikasi produk dan aman untuk didistribusikan [2].

Gas alam yang diproduksi dari *reservoir* umumnya masih mengandung komponen nonhidrokarbon seperti karbon dioksida (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), nitrogen (N_2), dan uap air [3]. Kandungan CO_2 yang tinggi dapat menurunkan nilai kalor gas, meningkatkan potensi korosi pada peralatan proses dan jaringan perpipaan, serta menyebabkan gas tidak memenuhi spesifikasi penjualan yang dipersyaratkan oleh industri [4]. Selain itu, keberadaan CO_2 juga dapat menurunkan efisiensi proses hilir seperti pencairan gas alam (LNG) dan pengolahan petrokimia sehingga perlu dihilangkan sebelum gas dipasarkan [5].

Berbagai teknologi telah dikembangkan untuk memisahkan CO_2 dari gas alam, antara lain absorpsi, adsorpsi, pemisahan membran, dan proses kriogenik [6]. Di antara teknologi tersebut, absorpsi merupakan metode yang paling banyak diterapkan pada industri pengolahan gas alam karena mampu menangani kapasitas gas yang besar dengan efisiensi pemisahan yang tinggi [7].

Pemilihan jenis pelarut menjadi faktor penting dalam menentukan kinerja proses absorpsi, kebutuhan energi regenerasi, dan biaya operasi keseluruhan.

Salah satu teknologi absorpsi yang banyak digunakan pada industri pengolahan gas alam adalah *Sulfinol-X*. Pelarut ini merupakan pelarut hibrida yang mengombinasikan absorpsi fisika oleh *sulfolane* dengan absorpsi kimia oleh *methyldiethanolamine (MDEA)* dan *piperazine (PZ)* [8]. Kombinasi tersebut memungkinkan peningkatan kapasitas penyerapan gas asam sekaligus menurunkan kebutuhan energi regenerasi dibandingkan penggunaan pelarut kimia konvensional [9]. Oleh karena itu, *Sulfinol-X* banyak digunakan pada fasilitas pemrosesan gas alam yang memiliki kandungan CO_2 tinggi dan membutuhkan tingkat pemurnian yang ketat [10].

Penelitian ini bertujuan untuk merancang fasilitas pemisahan CO_2 dari gas alam menggunakan pelarut *Sulfinol-X* melalui simulasi proses menggunakan Aspen HYSYS V14. Evaluasi dilakukan terhadap kinerja pemisahan CO_2, desain kolom absorber dan regenerator, sensitivitas perubahan komposisi umpan, fleksibilitas kapasitas operasi, variasi konsentrasi *solvent*, serta kebutuhan energi dan aspek ekonomi proses. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan referensi dalam pengembangan desain fasilitas *gas sweetening* yang efektif dan efisien untuk menghasilkan *sweet gas* yang memenuhi spesifikasi penjualan.

2. METODE

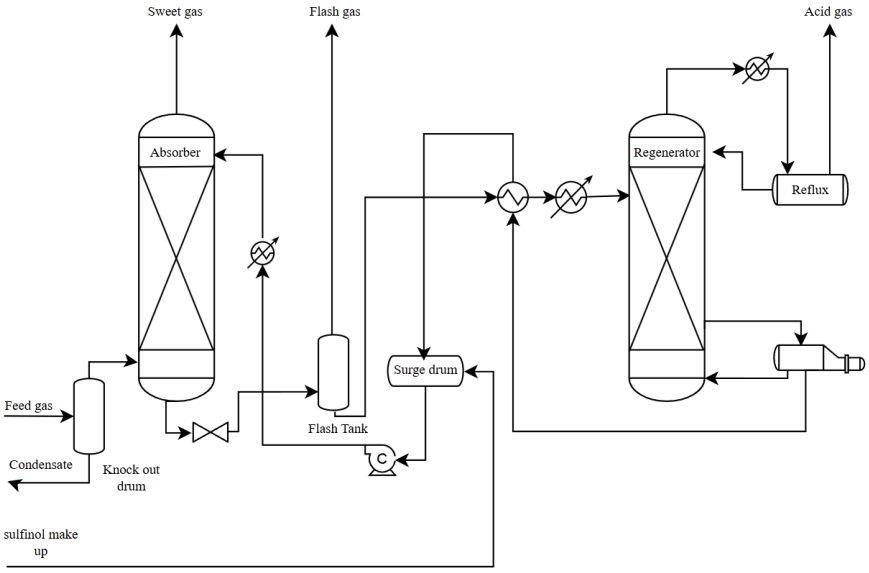
A. Subjek Penelitian

Tabel 1. Data Umpan

Parameter	Nilai
kapasitas	321,01 MMSCFD
Tekanan	514 psig
Temperature	80°F
CH_4	61,41 mol%
CO_2	33,24 mol%
C_2–C_4	3,24 mol%
C_5^+ (termasuk aromatik)	0,96 mol%
N_2	0,34 mol%
H_2O	0,79 mol%
H_2S, COS, merkaptan	0,02 mol%

Tabel 2. Komposisi *Sulfinol-X*

Komponen	Fraksi Massa (%)
Sulfolane	40,5
MDEA	45,6
Piperazine	5,1
Air	8,8



Gambar 1. PFD Absorpsi menggunakan *sulfinol-X*

B. Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah proses pemisahan CO_2 dari gas alam melalui absorpsi menggunakan pelarut Sulfinol-X untuk menurunkan kadar CO_2 hingga memenuhi spesifikasi *sweet gas* (<50 *ppmv*) menggunakan Aspen HYSYS V14.

C. Parameter Penelitian

1. Parameter Operasi Proses
   a. Suhu operasi pada kolom absorber dan regenerator
   b. Tekanan operasi pada kolom absorber dan regenerator
   c. Laju alir umpan gas alam
   d. Laju alir pelarut *Sulfinol-X*
   e. Konsentrasi CO_2 dalam gas umpan
2. Parameter Kinerja yang Diamati
   a. Efisiensi penyisihan *(removal)* CO_2
   b. Konsentrasi CO_2 pada gas produk *(sweet gas)*
   c. Kebutuhan energi proses
   d. Kelayakan ekonomi proses secara keseluruhan

D. Metode Simulasi dan Model Termodinamika

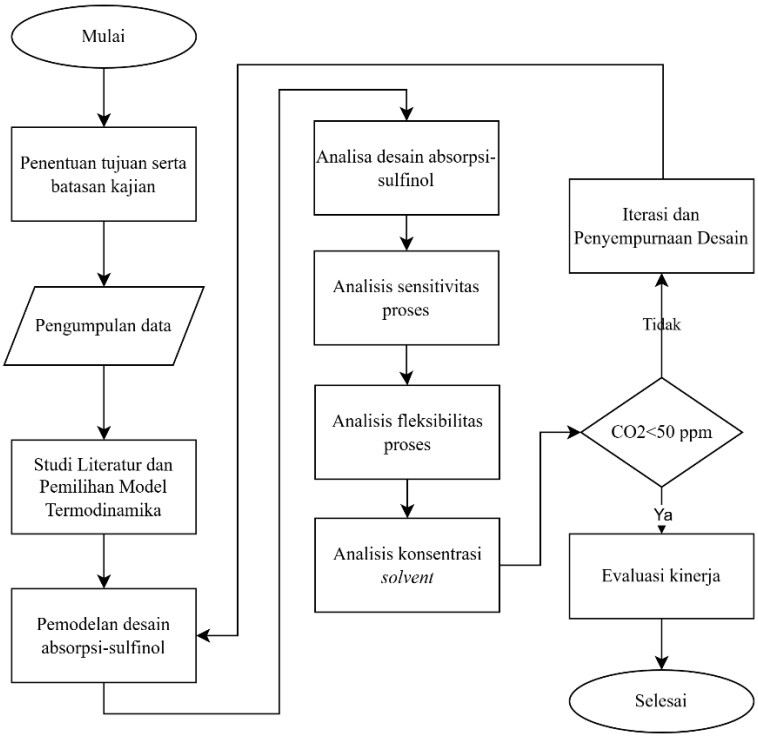
Simulasi dilakukan menggunakan Aspen HYSYS V14 dengan paket fluida *Acid Gas–Chemical Solvents*. Paket fluida ini dipilih karena sesuai untuk sistem yang melibatkan CO_2 sebagai *acid gas* dan Sulfinol-X sebagai pelarut kimia dan fisika yang terdiri dari sulfolane, MDEA, *piperazine (PZ),* dan air.

Proses pemisahan dimodelkan menggunakan absorber dan regenerator. Pada absorber, gas umpan dikontakkan secara *counter-current* dengan *lean Sulfinol-X* untuk menyerap CO_2. *Rich solvent* kemudian dialirkan ke regenerator untuk melepaskan CO_2, sedangkan *lean solvent* hasil regenerasi disirkulasikan kembali menuju absorber.

E. Metode Perhitungan dan Analisi

Perhitungan dan analisis kinerja proses dilakukan berdasarkan hasil simulasi Aspen HYSYS V14, meliputi komposisi dan kondisi aliran, dimensi kolom, serta kebutuhan utilitas. Analisis ekonomi dilakukan menggunakan *Aspen Process Economic Analyzer (APEA)* dengan parameter *Total Capital Cost (TCC), Total Operating Cost (TOC),* dan *Total Annual Cost (TAC).*

F. Metode Penelitian

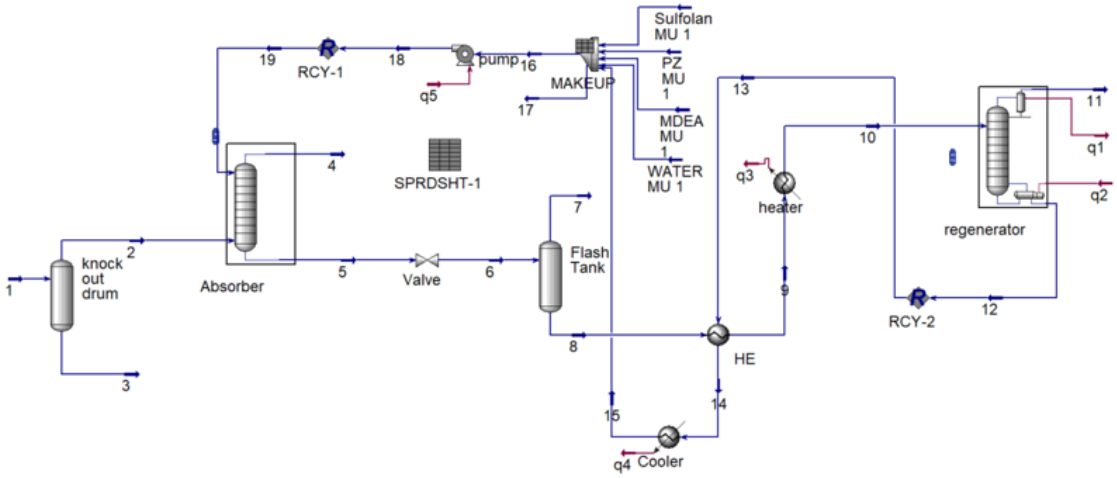


Gambar 2. *Flowchart* penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi Aspen HYSYS V14

Simulasi flo*wsheet* pada Gambar 3 telah mencapai kondisi steady-state dan konvergen, dengan hasil utama kinerja proses ditunjukkan pada Tabel 3.



Gambar 3. *Flowsheet* simulasi

Tabel 3. Parameter Kinerja Proses

Parameter	Nilai
CO_2 feed gas	33,24 mol%
CO_2 sweet gas	0,05 *ppmv*
Target CO_2 *sweet gas*	<50 *ppmv*
Efisiensi *removal* CO_2	99,99%
Laju sirkulasi *solvent*	3318033,6 kg/h

Hasil simulasi proses pemisahan CO_2 menggunakan Aspen HYSYS menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi *steady state* dan konvergen. Berdasarkan hasil evaluasi, komposisi CO_2 pada *sweet gas* berhasil diturunkan hingga 0,05 *ppmv,* yang telah memenuhi bahkan melampaui target spesifikasi yaitu <50 *ppmv*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem absorpsi menggunakan pelarut *Sulfinol-X* memiliki kinerja pemisahan yang sangat tinggi dengan efisiensi *removal* CO_2 mencapai 99,99998%. Tingginya laju sirkulasi *solvent* sebesar 3.318.033,6 kg/jam berkontribusi terhadap peningkatan kontak antara fase gas dan cair, sehingga memperbesar laju penyerapan CO_2 di dalam absorber.

B. Evaluasi Kinerja Pemisahan CO_2

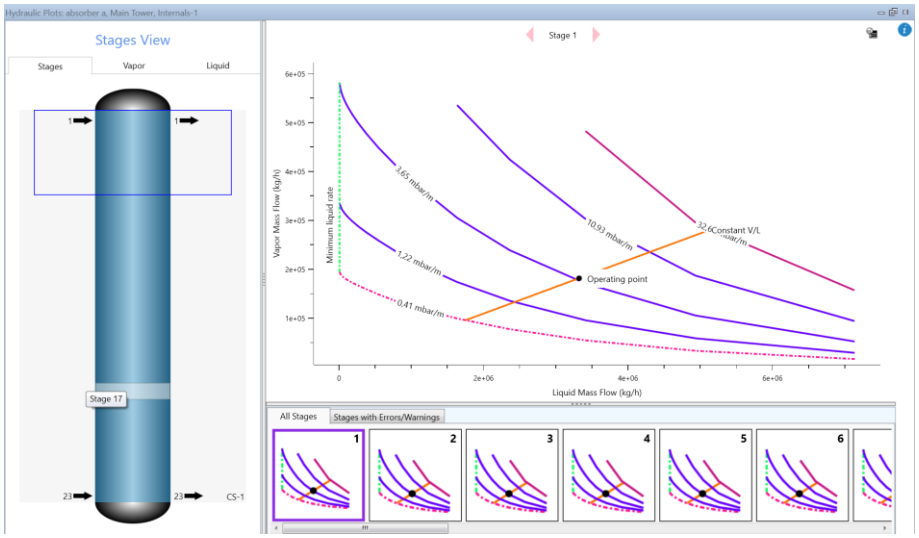
Kinerja proses dievaluasi berdasarkan efisiensi *removal* CO_2. Berdasarkan hasil simulasi, kandungan CO_2 pada gas umpan sebesar 33,24 mol% berhasil diturunkan menjadi 0,05 *ppmv* sehingga diperoleh efisiensi pemisahan sebesar 99,99%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses absorpsi menggunakan *Sulfinol-X* sangat efektif untuk aplikasi *deep CO_2 removal* pada gas alam dengan kandungan CO_2 tinggi.

Tingginya efisiensi pemisahan menunjukkan bahwa kombinasi *sulfolane, MDEA*, dan *piperazine* mampu memberikan sinergi yang baik antara absorpsi fisika dan absorpsi kimia. Selain menghasilkan kualitas *sweet gas* yang sangat baik, sistem regenerasi juga mampu mempertahankan kualitas *lean solvent* sehingga performa proses dapat dijaga secara berkelanjutan.

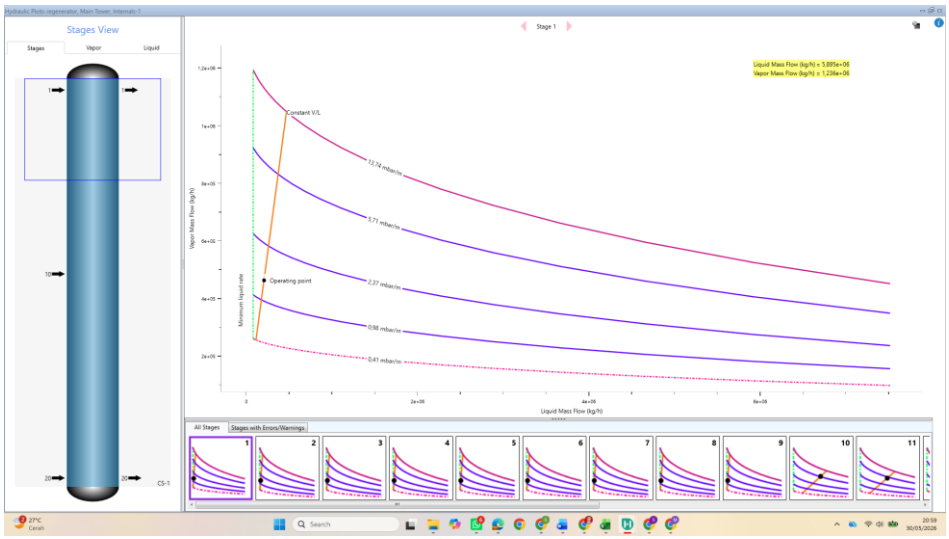
C. Sizing Kolom Absorber dan Regenerator

Sizing peralatan utama difokuskan pada kolom absorber dan regenerator karena kedua unit tersebut merupakan inti dari proses pemisahan CO_2. Hasil *sizing* menunjukkan bahwa absorber dirancang sebagai *packed column* dengan diameter 3,459 m dan tinggi *packing* 13,8 m, sedangkan regenerator memiliki diameter 5,831 m dan tinggi packing 12 m. Kedua kolom menggunakan *Cross Flow Grid Structured Packing* berbahan logam dengan 23 *stage* pada absorber dan 20 *stage* pada regenerator.

Penggunaan *structured packing* dipilih karena memiliki *pressure drop* yang rendah dan kapasitas hidraulik yang tinggi sehingga sesuai untuk menangani laju alir gas dan pelarut yang besar. Hasil *hydraulic plot* menunjukkan bahwa seluruh titik operasi berada pada daerah aman dan jauh dari batas *flooding*. Dengan demikian, dimensi kolom yang diperoleh dinilai mampu mengakomodasi beban gas dan cairan selama operasi tanpa menimbulkan kendala hidraulik yang signifikan.

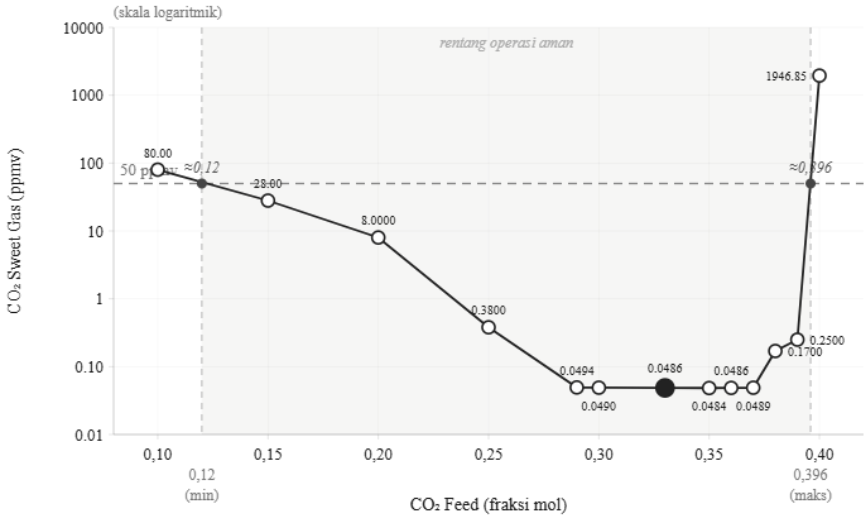


Gambar 4. *Hydraulic plot* absorber



Gambar 5. *Hydraulic plot* regenerator

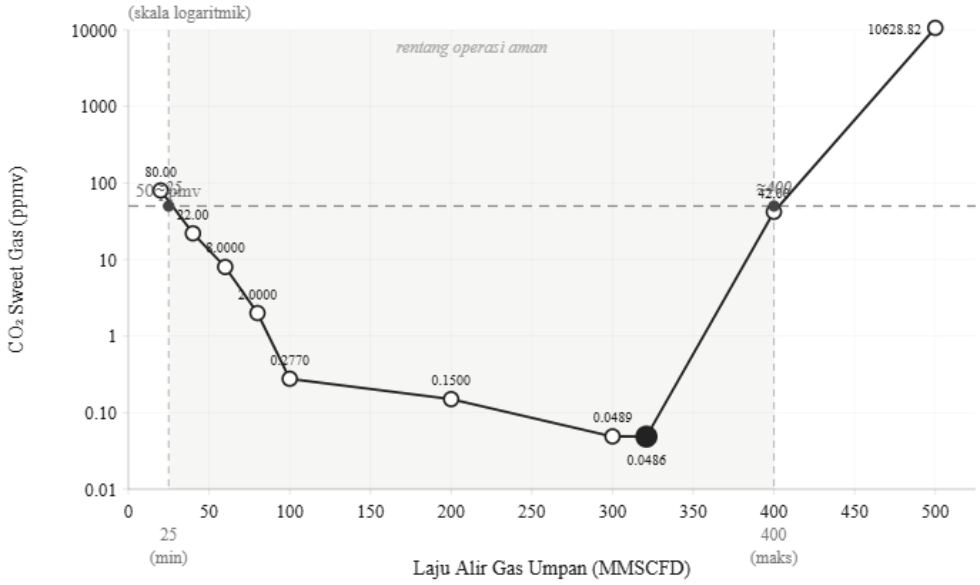
D. Analisis Sensitivitas



Gambar 6. Grafik pengaruh kandungan CO_2 pada gas umpan terhadap kadar CO_2 *sweet gas*

Analisis sensitivitas dilakukan dengan memvariasikan kandungan CO_2 gas umpan pada rentang 0,10–0,40 fraksi mol dengan kondisi operasi dan laju sirkulasi *solvent* tetap. Hasil menunjukkan *respons non-linear* terhadap kadar CO_2 *sweet gas*. Pada kandungan CO_2 umpan rendah (< 0,25 fraksi mol), *driving force* perpindahan massa gas-cair mengecil akibat rendahnya perbedaan konsentrasi CO_2 antara fase gas dan fase cair, sehingga efisiensi absorpsi menurun. Sebaliknya, pada kandungan CO_2 umpan yang terlalu tinggi (> 0,396 fraksi mol), beban CO_2 melampaui kapasitas sirkulasi *solvent* sehingga regenerasi *solvent* tidak sempurna, *lean solvent* yang kembali ke absorber masih mengandung CO_2 berlebih, dan terjadi *breakthrough* yang menyebabkan kadar CO_2 *sweet gas* melonjak hingga 1.946 *ppmv.* Performa optimal dicapai pada rentang 0,29–0,37 fraksi mol, di mana kadar CO_2 *sweet gas* stabil sekitar 0,048 *ppmv,* jauh di bawah batas spesifikasi 50 ppmv. Rentang ini menunjukkan bahwa desain proses memiliki margin operasi yang memadai terhadap fluktuasi komposisi gas umpan.

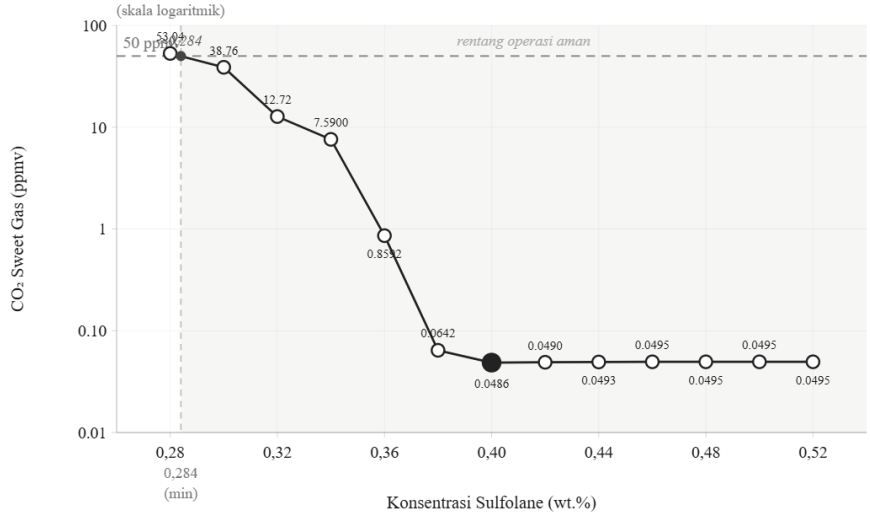
E. Analisis Fleksibilitas Operasi



Gambar 7. Grafik pengaruh laju alir gas umpan terhadap kadar CO2 *sweet gas*

Analisis fleksibilitas dilakukan dengan memvariasikan laju alir gas umpan pada rentang 25–500 MMSCFD dengan kondisi operasi dan laju sirkulasi *solvent* tetap. Hasil menunjukkan pola *respons non-linear* di mana kadar CO_2 *sweet gas* cenderung menurun seiring peningkatan laju alir hingga titik optimal, kemudian melonjak drastis pada batas atas operasi. Pada laju alir rendah (25–100 MMSCFD), kadar CO_2 *sweet gas* berada di kisaran 20–30 *ppmv* akibat rasio *liquid-to-gas* yang terlalu tinggi sehingga distribusi aliran dalam *packing* kolom tidak merata dan efisiensi kontak *gas-liquid* menurun. Performa optimal dicapai pada rentang 150–350 MMSCFD, di mana kolom absorber beroperasi pada kondisi hidrolik sesuai desain dan kadar CO_2 *sweet gas* mencapai nilai minimum sekitar 0,05 *ppmv*. Kondisi kritis terjadi ketika laju alir melampaui 400 MMSCFD; pada 500 MMSCFD kadar CO_2 *sweet gas* melonjak hingga ~10.000 ppmv akibat *flooding* pada kolom absorber yang menyebabkan *breakthrough* CO_2 secara masif. Hasil ini mengindikasikan bahwa kolom absorber merupakan *bottleneck* utama sistem, sehingga diperlukan sistem kontrol laju alir yang andal dengan *interlock* otomatis sebagai *safeguard* operasional.

F. Analisis Konsentrasi Sulfinol-X



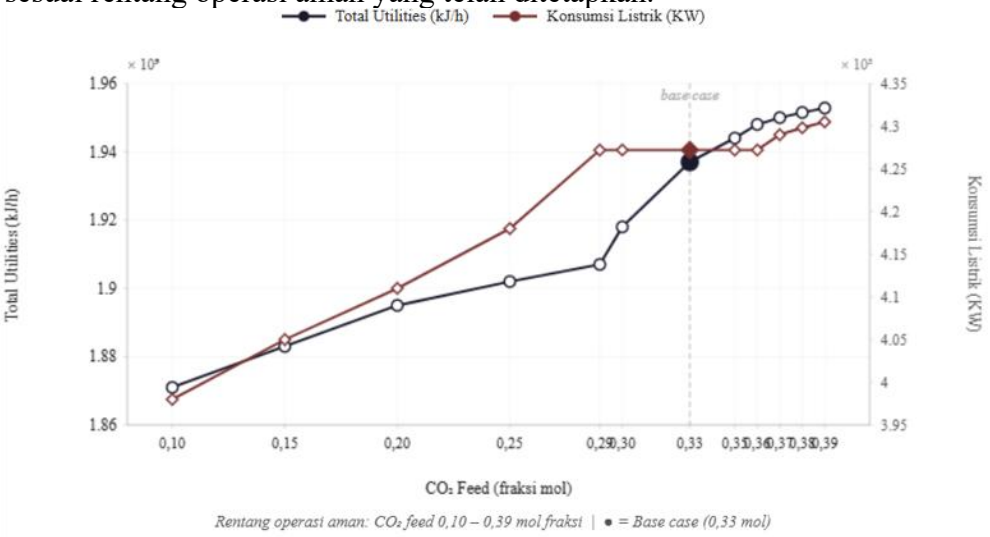
Gambar 8. Grafik pengaruh konsentrasi *sulfolane* terhadap kadar CO2 *sweet gas*

Analisis konsentrasi *solvent* dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi *Sulfolane* pada rentang 0,28–0,52 wt.%, di mana perubahannya dikompensasi oleh fraksi air sementara konsentrasi *MDEA, piperazine*, dan parameter operasi lain dijaga tetap pada kondisi *base case* (0,40 wt.%). Hasil simulasi menunjukkan kurva berbentuk lembah dengan kadar CO_2 *sweet gas* minimum pada konsentrasi *base case*. Pada konsentrasi rendah (0,28–0,34 wt.%), tingginya fraksi air menyebabkan kelarutan fisik CO_2 belum optimal dan viskositas larutan relatif tinggi sehingga laju difusi CO_2 menuju situs aktif amina terhambat, dengan kadar CO_2 *sweet gas* berkisar 7,59–53,04 *ppmv*. Pada rentang 0,34–0,40 wt.%, penambahan *Sulfolane* meningkatkan kelarutan fisik CO_2 secara signifikan tanpa mengganggu kapasitas absorpsi kimia amina, sehingga kadar CO_2 *sweet gas* turun hingga 0,0486 *ppmv*. Pada konsentrasi tinggi (0,42–0,52 wt.%), berkurangnya fraksi air secara berlebihan meningkatkan viskositas larutan dan menurunkan mobilitas ion serta homogenitas pelarutan amina, sehingga efektivitas reaksi kimia CO_2–amina menurun meskipun konsentrasi amina tidak berubah dan kadar CO_2 *sweet gas* kembali naik hingga 7,29 *ppmv*. Berdasarkan interpolasi dan ekstrapolasi tren data, rentang

operasi konsentrasi Sulfolane yang aman untuk memenuhi spesifikasi ≤ 50 ppmv adalah 0,284–0,538 wt.%.

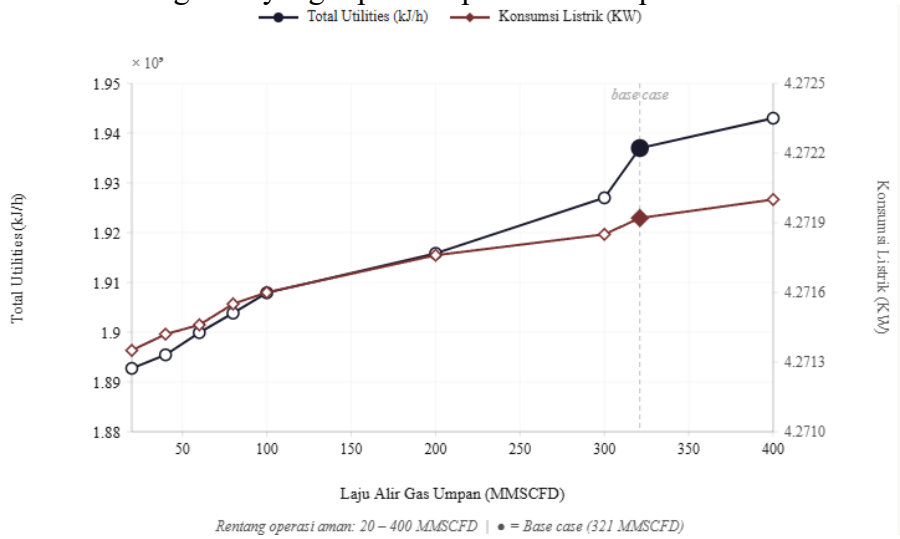
G. Evaluasi Energi

Evaluasi energi dilakukan dengan menganalisis dua parameter utama, yaitu total utilitas (kJ/h) dan konsumsi listrik (kW), pada kondisi variasi kandungan *CO_2 feed* dan variasi laju alir gas umpan sesuai rentang operasi aman yang telah ditetapkan.



Gambar 9. Pengaruh kandungan CO_2 *feed* terhadap konsumsi *total utilities* dan konsumsi listrik

Pada variasi kandungan CO_2 *feed*, total utilitas meningkat secara konsisten dari sekitar 1,867 × 10^9 kJ/h pada fraksi mol 0,10 hingga mendekati 1,950 × 10^9 kJ/h pada fraksi mol 0,39, Peningkatan kebutuhan utilitas sejalan dengan bertambahnya jumlah CO_2 yang diserap oleh *solvent*, sehingga beban regenerasi *solvent* pada *reboiler* meningkat. Konsumsi listrik berada pada kisaran 4,27 kW dan menunjukkan perubahan yang relatif kecil terhadap variasi kandungan CO_2 *feed*. Pada kondisi *base case* dengan fraksi mol CO_2 sebesar 0,33, kebutuhan utilitas berada dalam rentang nilai yang diperoleh pada variasi operasi.

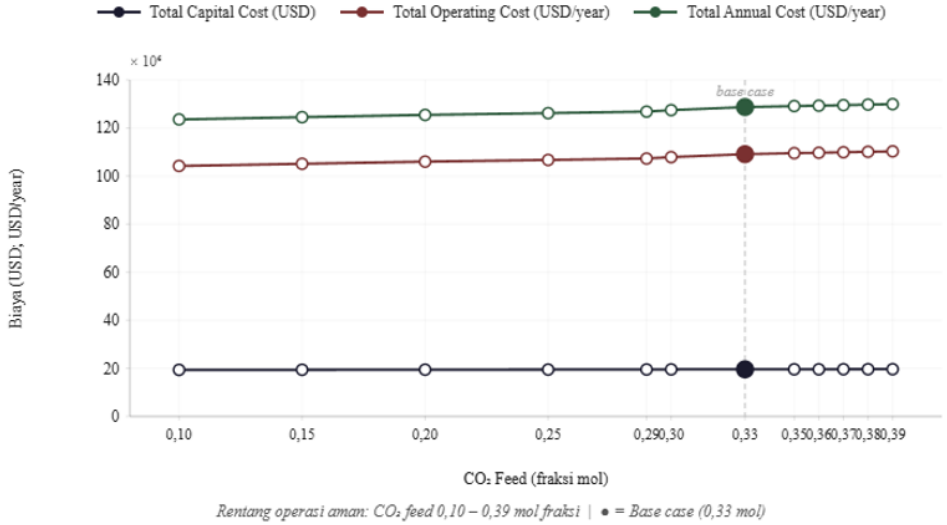


Gambar 10. Grafik pengaruh laju alir gas umpan terhadap konsumsi *total utilities* dan konsumsi listrik

Pada variasi laju alir gas umpan, total utilitas meningkat dari 1,893 × 10^9 kJ/h pada 20 MMSCFD hingga 1,943 × 10^9 kJ/h pada 400 MMSCFD, dengan total kenaikan hanya sekitar 2,6% sepanjang rentang operasi. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kenaikan laju alir gas umpan menyebabkan peningkatan kebutuhan utilitas proses. Sementara itu, konsumsi listrik menunjukkan perubahan yang relatif kecil, yaitu dari sekitar 4,27135 kW menjadi 4,27200 kW. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan laju alir gas umpan pada rentang operasi yang dianalisis memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap kebutuhan daya listrik berdasarkan hasil simulasi.

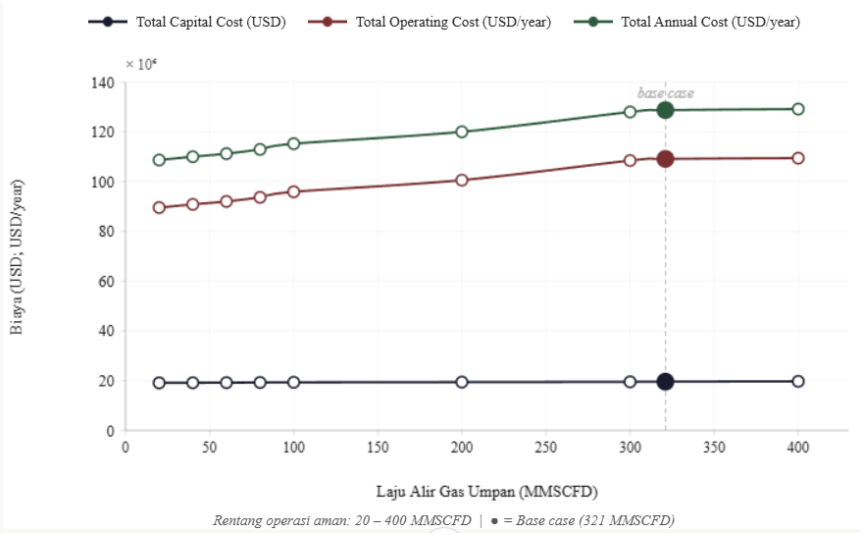
H. Evaluasi Ekonomi

Evaluasi ekonomi dilakukan berdasarkan tiga komponen biaya utama, yaitu *Total Capital Cost (TCC), Total Operating Cost (TOC), dan Total Annual Cost (TAC),* pada kondisi *base case* (0,33 fraksi mol CO_2, 321 MMSCFD) yang menghasilkan TCC sebesar USD 19.601.800, TOC sebesar USD 109.099.000/tahun, dan TAC sebesar USD 128.700.800/tahun.



Gambar 11. Grafik pengaruh kandungan CO_2 *feed* terhadap biaya investasi dan operasi

Pada variasi kandungan CO_2 *feed*, TCC bersifat sangat tidak sensitif dengan kenaikan kumulatif kurang dari 1,4% sepanjang rentang 0,10–0,39 fraksi mol, karena dimensi peralatan utama ditentukan oleh kapasitas volumetrik gas umpan, bukan komposisinya. TOC menunjukkan kenaikan yang lebih terasa namun tetap moderat, yaitu dari USD 104.200.000/tahun hingga USD 110.280.000/tahun (selisih ~5,6%), mencerminkan meningkatnya kebutuhan energi regenerasi *solvent* seiring bertambahnya beban CO_2. TAC mengikuti pola TOC dan bergerak dari USD 123.562.000/tahun hingga USD 129.915.000/tahun. Gradien kenaikan yang kecil dan stabil ini menunjukkan ketahanan ekonomi sistem *Sulfinol* terhadap fluktuasi komposisi gas umpan.



Gambar 12. Grafik pengaruh laju alir gas umpan terhadap biaya investasi dan operasi

Pada variasi laju alir gas umpan, TCC meningkat secara marginal dari USD 19.103.700 pada 20 MMSCFD hingga USD 19.720.000 pada 400 MMSCFD (~3,2%), mencerminkan bahwa peralatan utama telah dirancang pada skala optimal *base case*. TOC menunjukkan kenaikan yang jauh lebih signifikan, yaitu dari USD 89.548.000 hingga USD 109.400.000 (~22,2%), karena konsumsi utilitas terutama steam regenerasi berbanding hampir langsung dengan volume gas yang diproses. TAC meningkat dari USD 108.651.700 hingga USD 129.120.000 (~18,8%), dengan TOC mendominasi sekitar 82–85% dari total biaya tahunan di seluruh rentang operasi. Dominasi TOC ini mengindikasikan bahwa efisiensi konsumsi energi jangka panjang jauh lebih menentukan kelayakan ekonomi desain dibandingkan biaya investasi awal, sehingga optimasi integrasi panas menjadi pertimbangan penting untuk peningkatan efisiensi di masa mendatang.

4. SIMPULAN

Simulasi menggunakan Aspen HYSYS V14 menunjukkan bahwa teknologi *Sulfinol-X* mampu menurunkan kandungan CO_2 dari 33,24 mol% menjadi 0,05 *ppmv* pada *sweet gas*, melampaui spesifikasi 50 *ppmv* dengan efisiensi *removal* 99,99% melalui sinergi absorpsi fisika-kimia *sulfolane, MDEA,* dan *piperazine.* Sistem beroperasi optimal pada kandungan CO_2 umpan 0,29–0,37 fraksi mol, laju alir 150–350 MMSCFD, dan konsentrasi *Sulfolane* 0,284–0,538 wt.%, dengan kolom absorber dan regenerator dinyatakan layak secara hidraulik. Konsumsi energi relatif stabil sepanjang rentang operasi aman, dan evaluasi ekonomi pada kondisi base case menghasilkan TAC sebesar USD 128.700.800/tahun dengan TOC mendominasi 82–85% dari total biaya, menegaskan bahwa optimasi efisiensi energi merupakan kunci peningkatan kelayakan ekonomi jangka panjang.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] S. Mokhatab, W. A. Poe, and J. Y. Mak, *Handbook of natural gas transmission and processing: principles and practices*. books.google.com, 2018. [Online]. Available: https://books.google.com/books?hl=en%5C&lr=%5C&id=buRyDwAAQBAJ%5C&oi=fnd%5C&pg=PP1%5C&dq=natural+gas%5C&ots=lpHw46Dl4l%5C&sig=wTo8nMh

60Com61GxdkPDDr4QD8o
[2] S. Faramawy, T. Zaki, and A. A. E. Sakr, "Natural gas origin, composition, and processing: A review," *... Nat. Gas Sci. Eng.*, 2016, [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510016304139
[3] J. Li, D. Wang, and F. Xie, "Failure analysis of CO2 corrosion of natural gas pipeline under flowing conditions," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 137, no. March, pp. 1–12, 2022, doi: 10.1016/j.engfailanal.2022.106265.
[4] M. R. Aliff Radzuan, N. A. Syarina, W. M. Wan Rosdi, A. H. Hussin, and M. F. Adnan, "Sustainable Optimization of Natural Gas Sweetening Using A Process Simulation Approach and Sustainability Evaluator," *Mater. Today Proc.*, vol. 19, pp. 1628–1637, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.191.
[5] J. G. Speight, *Natural gas: a basic handbook*. books.google.com, 2018. [Online]. Available: https://books.google.com/books?hl=en%5C&lr=%5C&id=TqlBDwAAQBAJ%5C&oi=fnd%5C&pg=PP1%5C&dq=natural+gas%5C&ots=VITZjCaNug%5C&sig=COP10pB9y0SdozXFxk4J_H6Icd4
[6] X. Y. D. Soo *et al.*, "Advancements in CO2 capture by absorption and adsorption: A comprehensive review," *J. CO2 Util.*, vol. 81, p. 102727, 2024, doi: https://doi.org/10.1016/j.jcou.2024.102727.
[7] J. G. Speight, *Gas cleaning processes*. 2019. doi: 10.1016/b978-0-12-809570-6.00008-4.
[8] S. Catalysts and T. Natural, "SULFINOL A Cost-Effective Solution for Treating Increasingly Complex Natural Gas".
[9] A. T. A. Glance, C. Drivers, V. Delivered, and P. Point, "SWITCHING TO ADIP-X OR SULFINOL-X".
[10] A. Bin Sahl, A. Mahmoud, Z. Y. Kong, and J. Sunarso, "Techno-economic analyses of Sulfinol-based absorber-stripper configurations for improving the energy consumption of natural gas sweetening process," *South African J. Chem. Eng.*, vol. 43, no. January 2022, pp. 91–103, 2023, doi: 10.1016/j.sajce.2022.10.003.

Daftar Singkatan

APEA	*Aspen Process Economic Analyzer*
HYSYS	*Hydrocarbon Systems* (perangkat lunak simulasi proses)
LNG	*Liquefied Natural Gas*
MDEA	*Methyldiethanolamine*
MMSCFD	*Million Standard Cubic Feet per Day*
PFD	*Process Flow Diagram*
ppmv	*Parts per million by volume*
PZ	*Piperazine*
TAC	*Total Annual Cost*
TCC	*Total Capital Cost*
TOC	*Total Operating Cost*