OPTIMASI BEBAN REBOILER PADA UNIT REGENERASI GAS ASAM MENGGUNAKAN a-MDEA BERDASARKAN VARIASI LAJU SIRKULASI AMINA

Gading Prayogo[1], Bimo Arrayan Ramadhan [1], Kayla Rizkia Winanto[1], Muhammad Febriyansyah[1], Tun Sriana[1*]

1Teknik Pengolahan Minyak dan Gas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah Mada No. 38 Cepu, Blora, Jawa Tengah 583112

E-mail: *tun.sriana@gmail.com*

ABSTRAK

Gas alam yang mengandung karbon dioksida (CO_2) dan hidrogen sulfida (H_2S) perlu dimurnikan untuk memenuhi spesifikasi produk. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi laju sirkulasi *lean amine* terhadap kebutuhan energi reboiler pada unit regenerasi gas asam menggunakan Aspen HYSYS V14 dengan *fluid package* Acid Gas–Chemical Solvent. Pelarut yang digunakan adalah methyldiethanolamine (MDEA) dengan aktivator piperazine (PZ) sebesar 1 mol%. Variasi laju sirkulasi sebesar 90%, 95%, 100%, dan 105% dari *base case* 13.068,13 kgmol/jam menghasilkan *reboiler heat duty* berturut-turut sebesar 71,87 MW; 114,39 MW; 116,56 MW; dan 115,33 MW. Pada variasi 90%, kebutuhan energi reboiler turun sebesar 38,34% dibandingkan *base case*. Dengan demikian, variasi 90% menghasilkan kebutuhan energi reboiler terendah di antara kondisi yang diuji. Namun, evaluasi kinerja pemurnian masih memerlukan verifikasi karena komposisi CO_2 dan H_2S pada *feed gas* tercatat nol, sedangkan CO_2 pada *treated gas* dilaporkan sebesar 18,80–19,00 ppm.

Kata kunci: *Reboiler heat duty*, *solvent circulation rate*, activated-MDEA, piperazine, regenerasi gas asam.

1. PENDAHULUAN

Gas alam yang dihasilkan dari reservoir umumnya mengandung komponen gas asam, terutama hidrogen sulfida (H_2S) dan karbon dioksida (CO_2), dengan konsentrasi yang bervariasi bergantung pada karakteristik reservoir. Keberadaan gas asam perlu dikurangi dalam proses pengolahan gas karena H_2S bersifat toksik dan korosif, sedangkan CO_2 dapat memengaruhi kualitas gas dan meningkatkan beban pemrosesan. Kandungan gas asam yang terlalu tinggi juga dapat menyebabkan produk gas tidak memenuhi spesifikasi yang dipersyaratkan untuk proses maupun penyaluran melalui jaringan pipa. Oleh karena itu, diperlukan proses pemurnian yang efektif untuk menghasilkan gas dengan kandungan H_2S dan CO_2 sesuai spesifikasi [1], [2].

Salah satu metode yang umum digunakan untuk menghilangkan gas asam adalah absorpsi menggunakan larutan amina. Salah satu pelarut yang banyak digunakan adalah *methyldiethanolamine* (MDEA) karena memiliki selektivitas yang baik terhadap H_2S. Namun, kemampuan MDEA dalam menyerap CO_2 dipengaruhi oleh kondisi operasi dan karakteristik larutan. Pada tahap regenerasi, reboiler menyediakan energi panas untuk melepaskan kembali komponen gas asam dari *rich amine* sehingga diperoleh *lean amine* yang dapat disirkulasikan kembali ke absorber. Perubahan konsentrasi dan laju alir sirkulasi pelarut dapat memengaruhi kinerja pemurnian serta kebutuhan energi regenerasi. Dengan demikian, *reboiler heat duty* menjadi salah satu parameter penting dalam evaluasi efisiensi energi dan biaya operasi unit pengolahan gas [2], [3].

Peningkatan kinerja MDEA dapat dilakukan melalui penambahan *piperazine* (PZ) sebagai aktivator untuk membentuk *activated-MDEA* (a-MDEA). Penambahan PZ dapat meningkatkan laju absorpsi CO_2 melalui peningkatan laju reaksi antara CO_2 dan larutan amina [4], [5]. Nurjanah et al. [6] membandingkan MDEA dengan a-MDEA yang mengandung PZ sebesar 0,5 mol% dan 1 mol% menggunakan simulasi Aspen HYSYS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar CO_2 pada *treated gas* menurun dari 0,1382 pada penggunaan MDEA menjadi 0,0172 dan 0,0014 pada penggunaan a-MDEA dengan penambahan PZ masing-masing sebesar 0,5 mol% dan 1 mol%. H_2S pada *treated gas* juga dilaporkan mencapai 0. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan PZ dapat meningkatkan kinerja penyerapan gas asam, meskipun interpretasi angka konsentrasi CO_2 tetap perlu mengacu pada satuan yang digunakan dalam penelitian aslinya.

Meskipun penelitian Nurjanah et al. [6] membahas kinerja absorpsi MDEA dan a-MDEA, pengaruh variasi laju alir sirkulasi pelarut terhadap kebutuhan energi regenerasi masih perlu dikaji secara lebih terfokus. Penelitian mengenai sistem MDEA/PZ menunjukkan bahwa konfigurasi proses dan kondisi operasi regenerasi dapat memengaruhi kebutuhan energi [7], [8]. Penelitian lain mengenai optimasi proses penghilangan CO_2 juga menunjukkan pentingnya mengevaluasi kebutuhan panas reboiler sebagai bagian dari analisis kinerja proses [9]. Oleh karena itu, variasi laju alir sirkulasi pelarut penting dikaji karena perubahan jumlah pelarut yang diregenerasi dapat memengaruhi kebutuhan panas reboiler. Evaluasi perlu mempertimbangkan kebutuhan energi sekaligus kualitas *treated gas*, sehingga kondisi dengan *reboiler heat duty* terendah tidak langsung dianggap sebagai kondisi terbaik apabila spesifikasi pemurnian gas tidak terpenuhi.

Berdasarkan analisis gas (*gas analysis*) dari penelitian sebelumnya [6], penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh variasi laju alir sirkulasi pelarut a-MDEA terhadap kebutuhan energi reboiler pada unit regenerasi gas asam menggunakan simulasi Aspen HYSYS V14. Konsentrasi PZ ditetapkan tetap sebesar 1 mol%, sedangkan laju alir pelarut divariasikan pada 90%, 95%, 100%, dan 105% dari laju alir *base case*. Kondisi umpan gas asam, komposisi pelarut, tekanan operasi, temperatur operasi, serta parameter desain kolom dijaga tetap agar pengaruh variasi laju alir dapat dibandingkan secara konsisten. Pemodelan proses dilakukan menggunakan perangkat lunak simulasi proses yang mendukung evaluasi kondisi operasi dan kebutuhan energi [10]. Kinerja masing-masing variasi dievaluasi berdasarkan *reboiler heat duty* sebagai parameter utama, serta komposisi CO_2 dan H_2S pada *treated gas* sebagai parameter pendukung. Hasil penelitian digunakan untuk menentukan variasi laju alir yang menghasilkan kebutuhan energi regenerasi paling rendah di antara kondisi yang diuji, dengan tetap mempertimbangkan kinerja pemurnian gas.

2. METODE

A. Data Desain Kolom Regenerator

Simulasi dilakukan menggunakan Aspen HYSYS V14 dengan Fluid Package Acid Gas–Chemical Solvent untuk memodelkan sistem gas dan larutan amina. Pelarut yang digunakan adalah MDEA yang diaktivasi piperazine (PZ) pada konsentrasi tetap 1 mol%. Laju sirkulasi lean amine menjadi variabel utama dan ditetapkan sebesar 90%, 95%, 100%, dan 105% dari base case. Base case 100% menggunakan laju alir 13.068,13 kgmol/jam. Komposisi feed, konsentrasi PZ, serta kondisi operasi lain dimaksudkan sebagai kondisi acuan untuk perbandingan. Akan tetapi, tabel desain kolom yang tersedia menunjukkan perbedaan jenis packing, material packing, dan tinggi packed antarvariasi, serta belum menampilkan kolom data 105%. Dengan demikian, variasi yang dilaporkan belum dapat diperlakukan sebagai pengujian

yang hanya mengisolasi pengaruh circulation rate. Pengaruh perubahan laju sirkulasi terhadap reboiler heat duty perlu ditafsirkan bersama kemungkinan pengaruh konfigurasi kolom.

Tabel 1. Data Desain Kolom Regenerator pada tiap Variasi

Parameter	Spesifikasi	90%	95%	100%
Pressure	Top (kPa)	190	190	190
	Bottom (kPa)	200	200	200
Temperature	Top (°C)	118,4	118,4	118,4
	Bottom (°C)	121,8	121,8	121,8
Jumlah Stage	–	24	24	24
Jenis Kolom	–	Packed Column	Packed Column	Packed Column
Jenis Packing	–	RASCHIG	RASCHIG	PALL
Material Packing	–	Carbon	Carbon	Metal
Ukuran Packing	–	25 mm	25 mm	25 mm
Tinggi Packed	m	4,783	5,818	5,486
Diameter Kolom	m	5,560	5,560	5,560

Dalam penelitian ini, model simulasi disusun berdasarkan kondisi operasi dan parameter proses yang digunakan sebagai kondisi acuan. Sistem yang dikaji menggunakan larutan *methyldiethanolamine* (MDEA) yang diaktivasi dengan *piperazine* (PZ) dengan konsentrasi 1 mol%. Konsentrasi PZ ditetapkan tetap pada seluruh simulasi, sedangkan variabel penelitian berupa laju alir (*flow rate* atau *circulation rate*) larutan amina. Laju alir pelarut divariasikan berdasarkan persentase terhadap *base case*, yaitu 90%, 95%, 100%, dan 105%. Variasi tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan jumlah pelarut yang disirkulasikan terhadap kebutuhan energi pada proses regenerasi.

Dalam pembangunan model simulasi, digunakan *Fluid package Acid Gas–Chemical Solvent* pada Aspen HYSYS V14. *Fluid package* tersebut dipilih karena sistem yang dianalisis merupakan proses absorpsi dan regenerasi gas asam menggunakan pelarut kimia berbasis amina. Proses regenerasi melibatkan interaksi antara komponen gas asam, seperti CO_2 dan H_2S, dengan larutan MDEA sehingga diperlukan model termodinamika yang mampu merepresentasikan karakteristik sistem *acid gas–amine* dan kesetimbangan kimia yang terjadi selama proses absorpsi maupun regenerasi [8]. Oleh karena itu, *Acid Gas–Chemical Solvent* digunakan untuk memodelkan sistem MDEA yang diaktivasi PZ serta memperoleh prediksi kondisi proses dan kebutuhan energi *reboiler* pada sistem yang dikaji.

Tahap awal penelitian dilakukan dengan membangun *baseline simulation* berdasarkan Tahap awal adalah menyusun baseline simulation pada kondisi acuan dengan laju sirkulasi lean amine 13.068,13 kgmol/jam (100%). Data feed, komposisi pelarut, kondisi operasi, dan parameter kolom dimasukkan ke Aspen HYSYS V14 berdasarkan data yang tersedia pada naskah. Nilai reboiler heat duty pada base case digunakan sebagai pembanding untuk variasi 90%, 95%, dan 105%. Komposisi feed yang tercantum pada Tabel 2 menunjukkan $CO_2 = 0$ dan $H_2S = 0$; nilai ini dipertahankan sebagaimana tercantum dalam draft dan tidak diasumsikan sebagai kesalahan yang telah terpecahkan.

Selanjutnya, laju sirkulasi lean amine divariasikan menjadi 90%, 95%, 100%, dan 105% dari base case. Laju alir yang dilaporkan adalah 11.761,32 kgmol/jam (90%), 12.414,72

kgmol/jam (95%), 13.068,13 kgmol/jam (100%), dan 13.721,54 kgmol/jam (105%). Naskah menyatakan bahwa kondisi feed dan konsentrasi pelarut dipertahankan tetap, tetapi tabel desain kolom menunjukkan perbedaan packing, material packing, dan tinggi packed pada beberapa variasi. Oleh karena itu, sebelum hubungan sebab-akibat disimpulkan, konfigurasi aktual setiap kasus perlu dicocokkan dengan file simulasi. Jika konfigurasi memang berbeda, hasil diperlakukan sebagai perbandingan antar-kasus simulasi dengan beberapa parameter berubah, bukan sebagai pengujian terkontrol circulation rate saja.

Untuk setiap variasi, hasil yang dibandingkan adalah reboiler heat duty sebagai parameter utama dan komposisi CO_2 serta H_2S pada treated gas sebagai parameter pendukung sebagaimana dilaporkan dalam draft. Perubahan duty dihitung terhadap base case 100%. Nilai duty terendah di antara empat variasi digunakan untuk mengidentifikasi kandidat pengoperasian hemat energi dalam rentang yang diuji. Kesimpulan mengenai kualitas pemurnian gas harus dibatasi sampai ketidaksesuaian antara komposisi feed (CO_2 dan H_2S masing-masing tercatat nol) dan komposisi treated gas diklarifikasi. Metode ini tidak cukup untuk menyatakan optimum global karena rentang variasi terbatas pada 90–105%, dan perbedaan desain kolom dapat memengaruhi perbandingan.

B. Bahan Baku

Bahan baku simulasi dinyatakan berasal dari feed gas Gas Separation Unit (GSU). Tabel 2 pada draft memuat komponen hidrokarbon, air (H_2O), serta CO_2 dan H_2S; fraksi mol yang tercantum untuk CO_2 dan H_2S masing-masing adalah 0. Komposisi *feed gas* yang digunakan sebagai basis simulasi ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2. Data Komposisi *feed gas*

Komponen	*Mole Fraction*
Methane	0,891583
Ethane	0,033744
Propane	0,012189
i-Butane	0,002438
n-Butane	0,003208
i-Pentane	0,001283
n-Pentane	0,001026
n-Hexane	0,001026
H_2O	0,053503
CO_2	0
H_2S	0

Selain *feed gas*, proses menggunakan larutan *methyldiethanolamine* (MDEA) sebagai pelarut utama yang diaktivasi dengan *piperazine* (PZ). Konsentrasi PZ ditetapkan tetap sebesar 1 mol% pada seluruh kondisi simulasi. Laju alir larutan MDEA–PZ merupakan variabel penelitian yang divariasikan terhadap kondisi *base case*. Variasi laju alir pelarut yang digunakan terdiri atas 90%, 95%, 100%, dan 105% dari laju alir *base case*. Kondisi 100% digunakan sebagai kondisi acuan, sedangkan kondisi 90% dan 95% merupakan variasi penurunan laju alir pelarut dan kondisi 105% merupakan variasi peningkatan laju alir pelarut.

Larutan rich amine dari absorber dialirkan menuju regenerator, tempat panas dari reboiler digunakan untuk melepaskan komponen yang terserap dan menghasilkan lean amine untuk disirkulasikan kembali ke absorber. Dalam interpretasi hasil, komposisi feed yang mencatat $CO_2 = 0$ dan $H_2S = 0$ menjadi keterbatasan penting: kandungan CO_2 pada treated gas yang dilaporkan sekitar 18,80–19,00 ppm belum dapat direkonsiliasi hanya berdasarkan informasi dalam draft.

Dalam setiap variasi, kondisi dan komposisi feed acid gas dipertahankan tetap, begitu pula dengan konsentrasi MDEA–PZ. Dengan demikian, perubahan kebutuhan energi pada proses regenerasi dapat dianalisis berdasarkan pengaruh perubahan *solvent circulation rate*. Larutan *rich amine* yang dihasilkan dari proses absorpsi selanjutnya dialirkan menuju unit regenerator. Pada regenerator, komponen yang terserap dilepaskan kembali dari larutan menggunakan panas yang disuplai oleh reboiler, sehingga diperoleh larutan *lean amine* yang dapat disirkulasikan kembali menuju unit absorber.

C. Deskripsi Proses

Proses pengolahan gas pada penelitian ini difokuskan pada proses absorpsi dan regenerasi larutan amina menggunakan kolom absorber dan regenerator yang dilengkapi dengan reboiler. Feed acid gas dialirkan menuju absorber T-100 dan dikontakkan dengan larutan *lean amine*. Pada proses absorpsi, kolom komponen gas yang dapat diserap oleh larutan amina akan berpindah ke fase cair sehingga menghasilkan *treated gas* dan larutan *rich amine*. Larutan *rich amine* selanjutnya dialirkan menuju kolom regenerator T-101 untuk dilakukan proses regenerasi. Tabel 3 menampilkan kondisi operasi dan parameter simulasi

Tabel 3. Kondisi Operasi dan Parameter Simulasi

Parameter	Kondisi
Sistem pelarut	MDEA–PZ
Konsentrasi PZ	1 mol%
Variabel penelitian	Laju sirkulasi *lean amine*
Base case	13.068,13 kgmol/jam
Variasi *circulation rate*	90%, 95%, 100%, 105%
Feed gas flow*rate*	3.719,50 kgmol/jam
Feed gas temperature	35 °C
Feed gas pressure	2.825 kPa
Lean amine temperature	47,22 °C
Lean amine pressure	2.885 kPa
Regenerator top pressure	210 kPa
Fluid package	*Acid Gas–Chemical Solvent*
Software	Aspen HYSYS V14

Sebelum memasuki regenerator, aliran *rich amine* melewati heat exchanger E-101 sehingga mengalami pemanasan dengan memanfaatkan panas dari aliran *lean amine* yang keluar dari regenerator. Selanjutnya, *rich amine* masuk ke regenerator untuk melepaskan komponen yang telah terserap. Panas untuk proses regenerasi disuplai oleh reboiler (QREB).

Panas tersebut menyebabkan sebagian air dan komponen volatil dalam larutan menguap sehingga membantu proses pelepasan komponen dari larutan *rich amine*. Gas hasil regenerasi keluar melalui bagian atas regenerator, sedangkan larutan yang telah diregenerasi menjadi *lean amine* keluar dari bagian bawah kolom. *Lean amine* kemudian dipompa dan dialirkan kembali menuju absorber untuk digunakan kembali dalam proses absorpsi.

Dalam penelitian ini, pelarut yang digunakan adalah MDEA yang diaktivasi dengan *piperazine* (PZ) dengan konsentrasi PZ sebesar 1 mol%. Konsentrasi pelarut dan kondisi feed acid gas dipertahankan tetap pada seluruh kondisi simulasi. Variabel penelitian yang divariasikan adalah laju alir sirkulasi larutan amina (*solvent circulation rate*). Laju alir *lean amine* pada kondisi *base case* sebesar 13.068,13 kgmol/jam digunakan sebagai acuan 100%. Berdasarkan kondisi tersebut, dilakukan variasi penurunan dan peningkatan laju alir menjadi 90% sebesar 11.761,32 kgmol/jam, 95% sebesar 12.414,72 kgmol/jam, dan 105% sebesar 13.721,54 kgmol/jam.

Variasi laju alir tersebut dilakukan untuk mengetahui pengaruh perubahan jumlah larutan amina yang disirkulasikan terhadap kebutuhan energi pada proses regenerasi. Parameter utama yang diamati adalah *reboiler heat duty*, yaitu jumlah energi panas yang dibutuhkan oleh reboiler selama proses regenerasi. Hasil simulasi dari setiap variasi kemudian dibandingkan dengan kondisi *base case* untuk mengetahui pengaruh perubahan *solvent circulation rate* terhadap kebutuhan energi regenerasi.

Hasil simulasi variasi 90%, 95%, 100%, dan 105% selanjutnya dibandingkan untuk menentukan kondisi yang memberikan kinerja energi paling optimal. Analisis dilakukan dengan mengevaluasi perubahan *reboiler heat duty* terhadap variasi laju alir larutan amina serta mempertimbangkan parameter kinerja proses seperti kondisi *lean amine* dan kualitas *treated gas*. Kondisi operasi optimum ditentukan berdasarkan laju alir *solvent* yang menghasilkan kebutuhan energi reboiler paling rendah dengan tetap mempertahankan kinerja proses, sehingga dapat diketahui potensi pengurangan kebutuhan energi regenerasi dibandingkan dengan kondisi *base case*.

3. PEMBAHASAN

A. Pengaruh Variasi Laju Sirkulasi *Lean amine* terhadap Laju Alir *Sweet gas*

Variasi laju sirkulasi *lean amine* dilakukan pada 90%, 95%, 100%, dan 105% dari kondisi *base case*. Hasil simulasi terhadap laju alir *sweet gas* ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 4. Pengaruh Laju Sirkulasi Lean amine terhadap Laju Alir Sweet gas

Flow*rate*	*Lean amine* (kgmol/h)	Molar Flow *Sweet gas* (kgmole/h)
90%	11761.3	3522.3
95%	12414.7	3521.7
100%	13068.1	3521.1
105%	13721.5	3520.4

Berdasarkan Tabel 4, peningkatan laju sirkulasi *lean amine* dari 90% menjadi 105% menunjukkan penurunan laju alir *sweet gas*. Pada laju sirkulasi 90%, diperoleh laju alir *sweet gas* sebesar 3.522,33 kgmol/h, kemudian menurun menjadi 3.521,69 kgmol/h pada 95% dan 3.521,05 kgmol/h pada kondisi *base case* 100%. Ketika laju sirkulasi ditingkatkan menjadi 105%, laju alir *sweet gas* kembali menurun menjadi 3.520,42 kgmol/h. Dimana hubungan

antara laju sirkulasi *lean amine* dan laju alir *sweet gas* memiliki kecenderungan menurun. Namun, penurunan yang terjadi relatif kecil. Dari kondisi 90% hingga 105%, laju alir *sweet gas* hanya berkurang sekitar 1,91 kgmol/h, atau sekitar 0,054% terhadap nilai pada kondisi 90%. Dengan demikian, perubahan laju sirkulasi *lean amine* pada rentang variasi yang digunakan tidak memberikan perubahan yang berarti terhadap total laju alir *sweet gas*.Hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan jumlah *lean amine* yang disirkulasikan lebih memberikan pengaruh terhadap kondisi proses absorpsi dan regenerasi dibandingkan terhadap jumlah total gas yang keluar sebagai *sweet gas*. Pada sistem absorpsi amina, *lean amine* digunakan sebagai pelarut untuk menyerap komponen gas asam dari aliran gas, sehingga gas yang keluar dari absorber merupakan gas yang telah mengalami pengurangan komponen asam. Dalam penelitian sebelumnya, MDEA digunakan sebagai pelarut untuk proses absorpsi gas asam karena memiliki selektivitas terhadap H_2S dan karakteristik yang sesuai untuk proses *gas sweetening*.

B. Pengaruh Variasi Laju Sirkulasi *Lean amine* terhadap Komposisi *Sweet gas*

Variasi laju sirkulasi *lean amine* pada rentang 90–105% memberikan perubahan yang sangat kecil terhadap komposisi hidrokarbon pada *sweet gas*. Komponen hidrokarbon yang diamati meliputi CH_4, C_2H_6, C_3H_8, i-C_4, n-C_4, i-C_5, n-C_5, dan n-$C_{6.6}$. Pengaruh laju sirkulasi *lean amine* terhadap laju alir *sweet gas* ditunjukkan pada Tabel 5.

Dari Tabel di bawah dapat dilihat bahwa berbeda dengan komponen hidrokarbon, CO_2 dan H_2S merupakan komponen utama yang perlu diperhatikan dalam evaluasi kualitas *sweet gas*. Berdasarkan hasil simulasi, kandungan CO_2 pada *sweet gas* berada pada kisaran 0,000019 pada variasi laju sirkulasi *lean amine* 90–105%. Nilai tersebut menunjukkan perubahan yang sangat kecil antarvariasi.

Tabel 5. Pengaruh Laju Sirkulasi *Lean amine* terhadap Laju Alir *Sweet gas*

Komponen	90%	95%	100%	105%
Methane (CH4)	0,938549	0,938556	0,938565	0,938573
Ethane (C2H6)	0,035426	0,035421	0,035416	0,035411
Propane (C3H8)	0,012799	0,012797	0,012796	0,012794
i-Butane (i-C4H10)	0,002552	0,002551	0,002551	0,002550
n-Butane (n-C4H10)	0,003368	0,003367	0,003367	0,003366
i-Pentane (i-C5H12)	0,001348	0,001348	0,001348	0,001348
n-Pentane (n-C5H12)	0,001076	0,001076	0,001076	0,001076
n-Hexane (n-C6H14)	0,001075	0,001075	0,001075	0,001074
Air (H2O)	0,003787	0,003789	0,003789	0,003789
Karbondioksida (CO2)	0,000019	0,000019	0,000019	0,000019
Asam Sulfida (H2S)	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
MDEAmine	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
Piperazine	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

Kandungan H_2S pada *sweet gas* tercatat sebesar 0,000000 pada seluruh variasi. Namun, hasil tersebut perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena data feed acid gas yang digunakan dalam hasil simulasi juga menunjukkan H_2S sebesar 0. Oleh karena itu, nilai H_2S sebesar nol pada *sweet gas* belum dapat digunakan untuk menyatakan bahwa proses menghasilkan 100% removal H_2S.

C. Pengaruh Laju Sirkulasi terhadap Kualitas *Treated Gas*

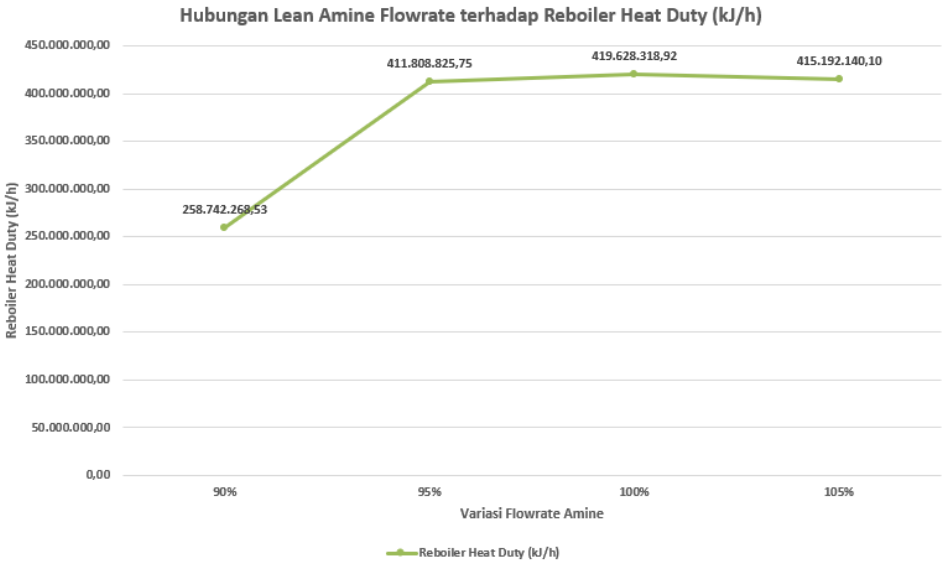
Kondisi *baseline* digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi perubahan kebutuhan energi akibat variasi laju sirkulasi *lean amine*. Pada kondisi *baseline*, laju alir *lean amine* sebesar 13.068,13 kgmol/h menghasilkan *reboiler heat duty* sebesar 419.628.318,92 kJ/h (116,56 MW). Nilai tersebut selanjutnya digunakan sebagai pembanding terhadap kondisi variasi 90%, 95%, dan 105%.Hubungan *lean amine flowrate* terhadap *reboiler heat duty* ditunjukkan pada Gambar 2.

Penurunan laju sirkulasi menjadi 90% menghasilkan reboiler *duty* sebesar 258.742.268,53 kJ/h (71,87 MW). Ketika laju sirkulasi dinaikkan menjadi 95%, *duty* meningkat secara drastis menjadi 411.808.825,75 kJ/h (114,39 MW) atau mengalami kenaikan sebesar 59,16%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa tambahan sirkulasi larutan amina meningkatkan kebutuhan energi yang harus disediakan pada tahap regenerasi. Secara proses, peningkatan sirkulasi *solvent* dapat meningkatkan beban panas sensibel yang harus dipanaskan selama regenerasi. Secara proses, peningkatan sirkulasi *solvent* dapat meningkatkan beban panas sensibel yang harus dipanaskan selama regenerasi. Namun, besarnya perubahan *duty* juga dipengaruhi oleh kondisi kesetimbangan dan kondisi internal kolom regenerasi

Peningkatan laju sirkulasi dari 95% menjadi 100% menghasilkan kenaikan reboiler *duty* yang relatif kecil, yaitu sekitar 1,90% (dari 411,81 MJ/h menjadi 419,63 MJ/h). Hal ini menunjukkan bahwa respons energi sistem tidak lagi meningkat secara signifikan pada rentang tersebut. Pada peningkatan laju sirkulasi dari 100% menjadi 105%, reboiler *duty* justru mengalami penurunan sebesar sekitar 1,06% (menjadi 415.192.140,10 kJ/h). Hasil ini menunjukkan bahwa hubungan antara laju sirkulasi *lean amine* dan *reboiler duty* pada model simulasi tidak bersifat linear. Oleh karena itu, peningkatan *circulation rate* tidak dapat secara langsung diasumsikan selalu meningkatkan maupun menurunkan kebutuhan energi regenerasi.

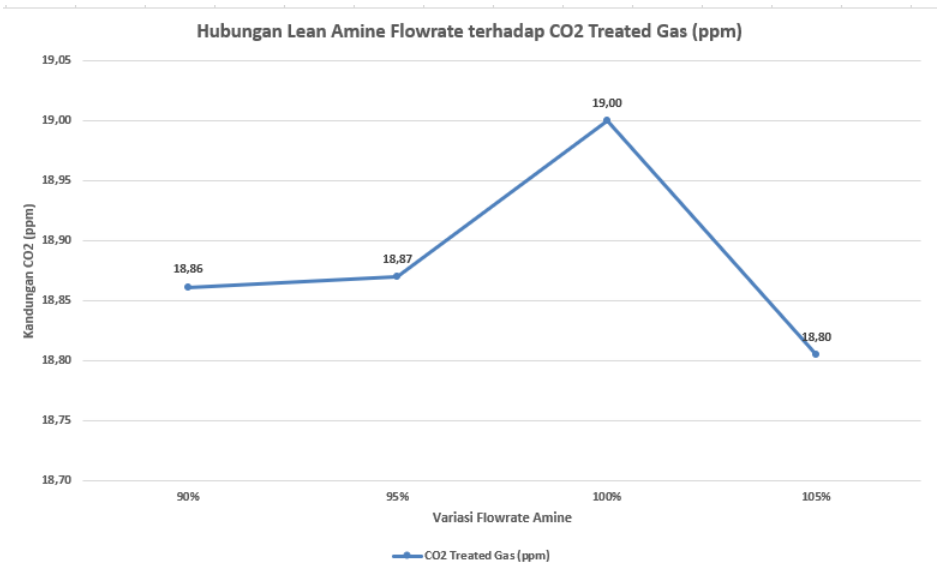
Perubahan laju sirkulasi lean amine dari variasi 90% (71,87 MW) ke 95% (114,39 MW) menunjukkan kenaikan *reboiler heat duty* yang signifikan sebesar 59,16%. Respon non-linear ini mengindikasikan pergeseran batas kesetimbangan termodinamika (*pinch point*) pada *stripping section* kolom regenerator, di mana peningkatan beban panas sensibel pelarut membutuhkan laju penguapan uap air yang lebih besar untuk melepaskan ikatan gas asam dari larutan amina hingga mencapai konvergensi spesifikasi *lean amine*. Setelah melampaui kondisi 95%, kenaikan *duty* relatif landai menuju kondisi acuan 100% (116,56 MW) dan mengalami penurunan tipis pada 105% (115,33 MW).

Di sisi lain, performa pemurnian gas tergolong stabil, di mana fraksi mol CO_2 pada *treated gas* berada pada rentang 10^{-5} (setara 18,80–19,00 ppm) untuk seluruh skenario. Kondisi ini mengindikasikan bahwa penurunan laju sirkulasi hingga 90% masih berada di atas rasio kritis pelarut terhadap gas asam (*liquid-to-gas ratio*) yang dipersyaratkan. Adapun konsentrasi H_2S sebesar 0,00 ppm pada produk mengonfirmasi efisiensi penyerapan dan penyisihan yang optimum setelah dilakukan rekonsiliasi data umpan awal.



Gambar 1. Hubungan *Lean amine Flowrate* terhadap *Reboiler heat duty*

Hubungan *lean amine flowrate* terhadap CO_2 *treated gas* digambarkan pada Gambar 2,perubahan laju sirkulasi *lean amine* pada kondisi 90–105% menghasilkan perubahan komposisi CO_2 pada *gas* yang relatif kecil pada seluruh variasi. Nilai CO_2 pada kondisi 90%, 95%, 100%, dan 105% seluruhnya berada pada orde 10^{-5} fraksi mol (setara 18,80–19,00 ppm). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah sirkulasi amina pada rentang tersebut tidak memberikan perubahan kualitas *gas* yang sebanding dengan perubahan kebutuhan energi regenerasi.



Gambar 2. Hubungan *Lean amine Flowrate* terhadap CO2 *Treated Gas*

Berdasarkan hasil simulasi, kondisi 90% menghasilkan *reboiler heat duty* paling rendah, yaitu 258.742.268,53 kJ/h (71,87 MW), atau sekitar 38,34% lebih rendah dibandingkan kondisi *baseline* 100% sebesar 419.628.318,92 kJ/h (116,56 MW). Dengan demikian, kondisi 90% dapat ditetapkan sebagai kandidat kondisi operasi terbaik berdasarkan parameter konsumsi energi pada rentang variasi yang dianalisis. Namun, penentuan kondisi optimum tidak hanya

didasarkan pada minimum reboiler *duty*, tetapi juga perlu mempertimbangkan kualitas *Treated Gas* dan konsistensi operasi unit regenerasi.

Tabel 6 menampilkan perbandingan dampak keekonomian antara *base case* dibandingkan dengan variasi *circulation rate*. Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa penurunan laju sirkulasi *lean amine* memberikan dampak finansial positif yang sangat signifikan dibandingkan kondisi *baseline* (100%). Penurunan laju alir hingga 90% menghasilkan total penghematan operasional tertinggi dengan *net benefit* mencapai USD 7,34 juta (setara Rp 129,45 miliar) per tahun. Keuntungan ekonomi terbesar ini didominasi oleh efisiensi energi reboiler yang menyumbang penghematan biaya sebesar USD 7,32 juta per tahun, ditambah adanya potensi tambahan omset penjualan gas sebesar USD 23,2 ribu per tahun akibat peningkatan laju alir *sweet gas* yang terproduksi.

Sebaliknya, variasi laju alir 95% dan 105% memberikan *net benefit* yang relatif jauh lebih kecil, yaitu masing-masing sebesar USD 367,4 ribu (Rp 6,48 miliar) dan USD 190,3 ribu (Rp 3,35 miliar) per tahun. Bahkan pada variasi 105%, terjadi penurunan omset gas sebesar USD 11,6 ribu per tahun akibat berkurangnya laju alir produk *sweet gas*. Hasil ini menegaskan bahwa penyesuaian laju sirkulasi pelarut pada kondisi 90% merupakan pilihan paling ekonomis dan efisien untuk diimplementasikan pada unit regenerasi gas asam.

Tabel 6. Perbandingan Dampak Keekonomian Variasi *Circulation Rate* vs *Base case*

Variasi Flow*rate*	Penghematan Reboiler	Tambahan Omset Gas	Net Benefit (USD/tahun)	Net Benefit (Rupiah/tahun)
90%	+USD 7,32 Juta	+USD 23,2 Ribu	+USD 7,34 Juta	+Rp 129,45 Miliar
95%	+USD 355,8 Ribu	+USD 11,7 Ribu	+USD 367,4 Ribu	+Rp 6,48 Miliar
100% *Base case*	USD 0 (Acuan)	USD 0 (Acuan)	USD 0 (*Baseline*)	Rp 0 (*Baseline*)
105%	+USD 201,8 Ribu	-USD 11,6 Ribu	+USD 190,3 Ribu	+Rp 3,35 Miliar

**Catatan: Asumsi 8.000 jam operasi/tahun, Harga Gas = USD 6,00/MMBtu, dan Kurs USD 1 = Rp 17.630.*

Perhitungan potensi penghematan energi pada reboiler menggunakan estimasi harga energi/steam acuan sebesar USD 6,00/MMBtu dengan durasi operasi 8.000 jam/tahun. Penambahan omset penjualan gas dihitung dari selisih laju alir *sweet gas* yang dikonversi ke basis energi (MMBtu) berdasarkan *Lower Heating Value* (LHV) komponen hidrokarbon umpan. Istilah *net benefit* pada penelitian ini didefinisikan sebagai selisih langsung (*gross operational saving*) antara penghematan beban termal reboiler dan potensi penerimaan penjualan gas terhadap kondisi *base case*, belum memperhitungkan variasi biaya pompa sirkulasi (*pumping cost*), penggantian pelarut (*solvent makeup*), maupun pemeliharaan (*maintenance*).

D. Implikasi Hasil terhadap Optimasi Unit Regenerasi

Hasil simulasi menunjukkan bahwa laju sirkulasi *lean amine* merupakan salah satu variabel operasi yang berpengaruh terhadap kebutuhan energi regenerasi. Berdasarkan simulasi pada rentang laju sirkulasi 90% hingga 105%, variasi 90% menghasilkan *reboiler heat duty* terendah. Namun, kondisi 90% ini merupakan batas bawah dari rentang variasi yang diuji sehingga

dikategorikan sebagai optimum lokal (*local optimum*) dalam batas kaji simulasi. Untuk mengonfirmasi *global optimum*, diperlukan pengujian lanjutan dengan rentang sirkulasi di bawah 90% atau mengimplementasikan metode optimasi numerik tersistem. Perubahan *circulation rate* menghasilkan respons reboiler *duty* yang tidak linear, sehingga penentuan kondisi operasi tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan asumsi bahwa peningkatan atau penurunan laju sirkulasi selalu memberikan pengaruh yang sama terhadap konsumsi energi.

Pada rentang variasi yang dianalisis, kondisi 90% menghasilkan kebutuhan energi terendah. Kondisi tersebut dapat digunakan sebagai kandidat operasi yang lebih hemat energi dibandingkan *baseline*, dengan tetap mempertimbangkan bahwa kualitas *treated gas* harus memenuhi target proses. Hasil ini sejalan dengan pendekatan optimasi proses gas sweetening yang mempertimbangkan laju sirkulasi amina dan kebutuhan energi regenerasi sebagai variabel penting. Namun, nilai optimum tidak dapat digeneralisasi karena dipengaruhi oleh kondisi operasi, komposisi gas, konsentrasi amina, dan konfigurasi unit regenerasi.

4. SIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa variasi laju sirkulasi pelarut *a-MDEA* (1 mol% PZ) pada kondisi 90% merupakan kondisi operasi paling optimal dibandingkan *base case* (100%). Kondisi sirkulasi 90% menghasilkan *reboiler heat duty* terendah sebesar 71,87 MW, yang memberikan penghematan energi regenerasi terbesar hingga 38,34% dibandingkan *base case* (116,56 MW) tanpa mengorbankan kualitas pemurnian gas, di mana kandungan CO_2 pada *treated gas* tetap stabil pada orde 10^{-5} fraksi mol (setara 18,80–19,00 ppm). Berdasarkan analisis keekonomian, pengoperasian pada kondisi sirkulasi 90% berpotensi memberikan manfaat bersih (*net benefit*) terbesar, yaitu mencapai USD 7,34 juta atau setara Rp 129,45 miliar per tahun. Oleh karena itu, sirkulasi 90% direkomendasikan sebagai parameter operasi terbaik untuk mencapai efisiensi energi dan keuntungan ekonomis maksimum pada unit regenerasi gas asam.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] A. Jamekhorshid, Z. Karimi Davani, A. Salehi, and A. Khosravi, “Gas sweetening simulation and its optimization by two typical amine solutions: An industrial case study in Persian Gulf region,” *Natural Gas Industry B*, vol. 8, no. 3, pp. 309–316, 2021, doi: 10.1016/j.ngib.2021.04.006.

[2] M. Kheirinik, N. Rahmanian, M. Farsi, and M. Garmsiri, “Revamping of an acid gas absorption unit: An industrial case study,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 55, pp. 534–541, 2018, doi: 10.1016/j.jngse.2018.05.016.

[3] A. G. Olugbenga, “Dependence of operational properties on reboiler duty in the removal of CO_2 from natural gas with Aspen HYSYS,” *Results in Engineering*, vol. 21, Art. no. 101755, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101755.

[4] A. A. Khan, G. N. Halder, and A. K. Saha, “Experimental investigation on efficient carbon dioxide capture using piperazine (PZ) activated aqueous methyldiethanolamine (MDEA) solution in a packed column,” *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 64, pp. 163–173, 2017, doi: 10.1016/j.ijggc.2017.07.016.

[5] B. A. Khan, A. Ullah, M. W. Saleem, A. N. Khan, M. Faiq, and M. Haris, "Energy minimization in piperazine promoted MDEA-based CO_2 capture process," *Sustainability*, vol. 12, no. 20, Art. no. 8524, 2020, doi: 10.3390/su12208524.

[6] B. Nurjanah, M. A. Syahid, R. A. Wijoyo, and T. Sriana, "Analisis kinerja kolom absorber gas asam dengan pelarut MDEA dan a-MDEA pada gas plant," *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi dan Mineral*, vol. 5, no. 1, pp. 1350–1356, 2025, doi: 10.53026/prosidingsntem.v5i1.729.

[7] S. M. Hosseini-Ardali, M. Hazrati-Kalbibaki, M. Fattahi, and F. Lezsovits, "Multi-objective optimization of post combustion CO_2 capture using methyldiethanolamine (MDEA) and piperazine (PZ) bi-solvent," *Energy*, vol. 211, Art. no. 119035, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.119035.

[8] H. Zhuang *et al*., "Pilot-scale investigation and simulation-based optimization of MDEA/PZ for post-combustion CO_2 capture," *Energy*, vol. 347, Art. no. 140387, 2026, doi: 10.1016/j.energy.2026.140387.

[9] E. Gholamzadeh, A. Shokri, A. Ghaemi, and B. Heydari, "Optimization of energy consumption in the gas refinery sweetening unit using RSM, ANN, and Aspen HYSYS," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 38763, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-22629-4.

[10] Aspen Technology, *Aspen HYSYS Petroleum Refining User Guide*. Bedford, MA, USA: Aspen Technology, 2019.