



ARTIKEL PENELITIAN

Analisis perilaku hidrodinamik kolom absorber pada laju alir gas umpan rendah terhadap perubahan laju alir pelarut dan *wash water* pada unit penghilangan senyawa sulfur

Tri Partono Adhi¹, Aditya Nurfebriartanto^{1,*}, Antonius Indarto^{1,2}, Muhammad Agus Kariem³

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132, Indonesia

²Program Studi Teknik Bioenergi dan Kemurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jalan Let. Jen. Purn. Dr. (HC). Mashudi No.1/ Jl. Raya Jatinangor Km 20,75 Sumedang 45363

³Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha 10, Bandung, 40132

Disubmit 08 Maret 2022; direvisi 19 Agustus 2022; diterima 01 September 2022



OBJECTIVES Absorption is the most common method for natural gas cleaning from its acid compounds. Sulfur removal unit in PT BCD was designed to reduce H₂S composition in natural gas feed from 9957 ppm to less than 10 ppm with 327,7 MMSCFD feed flowrate in rated condition. Overall gas processing system was designed for 40% turndown ration. Due to operational reason, Acid Gas Removal Unit (AGRU) need to be operated at 20% design capacity (65,54 MMSCFD). Analysis was performed to understand hydrodynamic behaviour of absorber column and its supporting equipment at 20% design capacity. **METHODS** Simulation was carried out by using ASPEN HYSYS V11 software to understand absorber operating parameter and condition to support operation at 20% design capacity. **RESULTS** With current equipment design, weeping occurred at 28% design capacity (91,59 MMSCFD). At 28% design capacity, wash water pump reached its minimum flow, which is 78 gpm. **CONCLUSIONS** For smaller feed gas flowrate, wash water circulation shall be reduced to avoid weeping. To be able to operate at 20% design capacity, wash water pump flow shall be reduced up to 25 gpm.

KEYWORDS acid gas removal; circulation pump; operating range; sulfur compound

TUJUAN Metode absorpsi merupakan metode yang banyak digunakan dalam pemurnian gas alam dari senyawa pengasamnya. Unit pemisahan senyawa sulfur pada PT BCD dirancang untuk menurunkan konsentrasi H₂S pada gas alam dari 9957 ppm menjadi kurang dari 10 ppm dengan laju alir gas umpan pada *rated condition* adalah 327,7 MMSCFD. Keseluruhan sistem pengolahan gas didesain dengan *turndown ratio* 40%. Karena alasan operasi, laju alir gas umpan perlu diturunkan hingga 20% kapasitas desain (65,54 MMSCFD). Analisis dilakukan untuk mengetahui perilaku hidrodinamik kolom absorber dan sistem pendukungnya pada pengoperasian di 20% kapasitas desain. **METODE** Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak ASPEN HYSYS V11 untuk mengetahui parameter operasi kolom absorber dan kondisi untuk mendukung pengoperasian di 20% kapasitas desain. **HASIL** Dengan desain operasi peralatan saat ini, *weeping* terjadi pada laju alir gas umpan 28% desain (91,59 MMSCFD). Pada laju alir gas umpan 28% desain, *wash water pump* sudah mencapai kapasitas minimum, yaitu 78 gpm. **KESIMPULAN** Semakin kecil laju alir gas umpan, maka laju sirkulasi *wash water* perlu dikurangi untuk menghindari *weeping*. Untuk dapat beroperasi di gas umpan 20% desain, kapasitas *wash water pump* perlu diturunkan hingga 25 gpm.

KATA KUNCI penghilangan senyawa sulfur; pompa sirkulasi; rentang operasi; senyawa sulfur

1. PENDAHULUAN

Gas alam, mengandung pengotor berupa senyawa sulfur yang dapat menimbulkan kerusakan peralatan dan dampak buruk bagi kesehatan. Lebih dari 40% cadangan gas alam global yang tersimpan dalam *reservoir* mengandung pengotor H₂S (Rafati 2019). H₂S memiliki sifat asam, karena itu H₂S disebut juga sebagai gas asam. Penghilangan gas asam dari gas alam disebut dengan proses *gas sweetening*. Saat ini, metode absorpsi adalah metode yang banyak digunakan dalam

*Korespondensi: aditya.nurf@gmail.com

TABEL 1. Komposisi gas umpam.

No.	Komponen	Komposisi Molar
1.	H ₂ S	0,009957
2.	CO ₂	0,331861
3.	Nitrogen	0,003504
4.	Metana	0,617426
5.	Etana	0,021170
6.	Propana	0,006883
7.	H ₂ O	0,001406

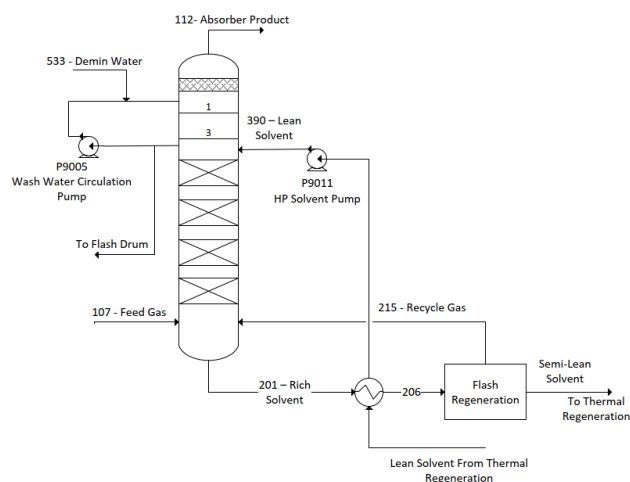
TABEL 2. Kondisi gas umpam.

No.	Deskripsi	Satuan	Nilai
1.	Fraksi Uap	-	1,00
2.	Tekanan	psig	534
3.	Temperatur	°F	85
4.	Laju alir volume (desain)	MMSCFD	327,7

proses *gas sweetening* (Ameen dkk. 2020). Metode ini menggunakan pelarut cair yang dapat diregenerasi dan digunakan kembali. Proses pemuatan dan sirkulasi pelarut dilakukan dengan menggunakan pompa sentrifugal.

Prinsip kerja metode absorpsi adalah kontak antara gas alam dan pelarut untuk memisahkan pengotor H₂S dari gas alam. Secara umum ada dua jenis pelarut yang digunakan dalam metode absorpsi, yaitu pelarut fisik dan pelarut kimia. Dalam memurnikan gas alam dari H₂S pelarut fisik memanfaatkan kelarutan H₂S dalam pelarut sedangkan pelarut kimia memanfaatkan reaksi H₂S dengan pelarut. Pelarut fisik memiliki keunggulan dalam kapasitas penyerapan yang tinggi. Kapasitas pelarut fisik dapat ditingkatkan dengan meningkatkan tekanan operasi. Namun semakin tinggi tekanan operasi akan mengakibatkan *hydrocarbon losses* yang tinggi (Thafseer dkk. 2021).

PT BCD mengolah gas alam dengan kandungan H₂S sebesar 9957 ppm menjadi maksimal 10 ppm. Pemisahan tersebut dilakukan di *Acid Gas Removal Unit* (AGRU) menggunakan proses absorpsi dengan pelarut fisik. Pelarut yang digunakan dalam proses ini adalah Selexol dengan rumus ki-



GAMBAR 1. Diagram alir proses absorpsi.

TABEL 3. Data kolom absorber.

Parameter	Satuan	Nilai
Column Section		Tray Section
No. of Tray		1 – 3
Tray Type		Floating Valve (V1)
Number of passes		1
Column Diameter	ft	11,98
Side Downcomer Width	inch	11,54
Side Weir Length	ft	6,5
Tray Spacing	ft	2,0
Weir Height	inch	1,97
Downcomer Clearance	inch	1,58
Column Cross-Sectional area	ft ²	112,7
Tray Active Area	ft ²	104,2
No. of Valve		1500
Column Section		Packed bed
Packing Type		Raschig Super-Ring Plus #2
Column Diameter	ft	11,98
No. of Bed		4
Packing Height	ft	29,86
Void Fraction	%	98
Specific Surface	ft ² /ft ³	30,48

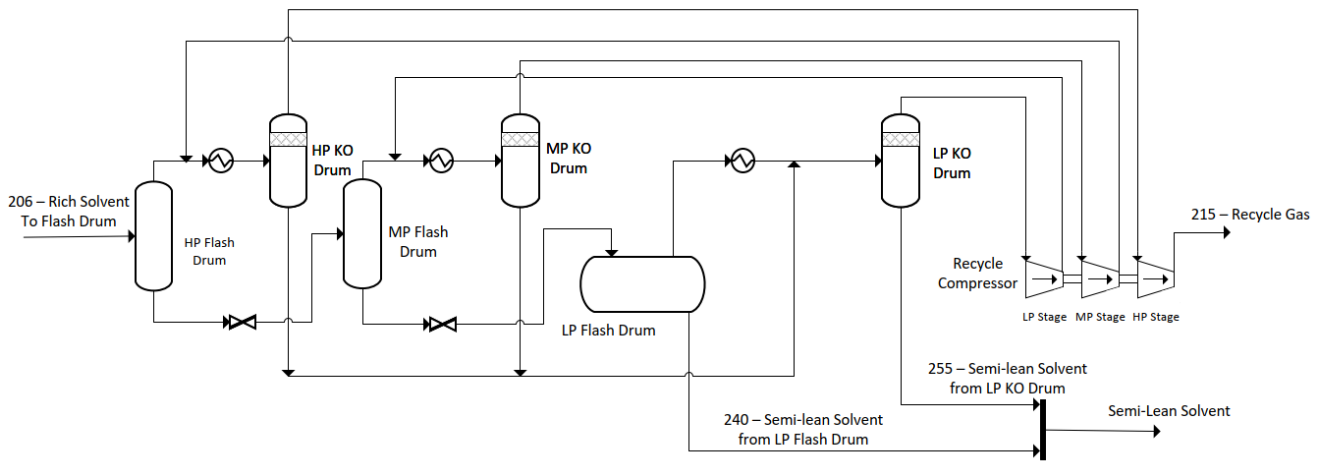
mia CH₃O(CH₂CH₂O)_nCH₃ di mana n = 3 – 9 (Zubeir dkk. 2018). Selexol memiliki kelarutan senyawa sulfur terbaik dibandingkan pelarut fisik lainnya (Jamali dkk. 2017).

Penyerapan H₂S dari gas alam dilakukan di dalam kolom absorber. Pelarut yang sudah menyerap H₂S dan pengotor lainnya disebut dengan *rich solvent*. PT BCD menggunakan *flash regenerator* dan *thermal regenerator* untuk memisahkan H₂S dan pengotor lainnya dari *rich solvent*. H₂S yang sudah dipisahkan dari *rich solvent* dikirim ke *Sulfur Recovery Unit* (SRU) untuk diolah menjadi H₂SO₄. SRU beroperasi pada temperatur tinggi, yaitu hingga 2300 °F (1260 °C) pada *acid gas incinerator* dan 500 °F (260 °C) pada *waste heat boiler*. Lins dan Guimarães mengamati bahwa keberadaan gas asam pada temperatur tinggi meningkatkan kecenderungan terjadinya korosi dan deposit sulfur pada peralatan di SRU (Lins dan Guimarães 2007). Pada unit SRU yang diamati oleh Lins dan Guimarães, terjadi tiga kali *emergency trip* (tahun 2001, 2002, 2003) akibat korosi dan deposit sulfur pada penukar panas di SRU (Lins dan Guimarães 2007).

Jika SRU *failed/trip*, maka gas H₂S terpaksa dibuang ke lingkungan melalui *flare* sebagai SO₂. Jumlah SO₂ yang dibuang ke lingkungan diatur oleh PP no. 22 tahun 2021, yaitu sebesar 75 ppb dalam waktu pengukuran 24 jam. Sistem AGRU sebaiknya tidak *trip* untuk menghindari kerugian produksi. Selain itu kehilangan waktu akibat proses *shut-down* dan *start-up* keseluruhan *gas processing plant* juga perlu dihindari. Salah satu opsi yang bisa dipilih adalah mengoperasikan AGRU dengan laju alir gas umpam yang rendah untuk mengurangi jumlah SO₂ yang dilepaskan ke lingkungan.

TABEL 4. Batasan operasi pompa.

	Satuan	Min	Rated	Maks
P9005– Washwater Circulation Pump				
Laju Alir Volumetrik	gpm	78	248	370
P9011 – HP Solvent Pump				
Laju Alir Volumetrik	gpm	1714	3553	5150



GAMBAR 2. Diagram alir flash regeneration.

Hal ini mungkin untuk dilakukan mengingat sumber senyawa sulfur utama adalah dari gas alam. Maka senyawa sulfur yang dilepaskan ke lingkungan dapat dikurangi dengan mengurangi laju alir gas alam.

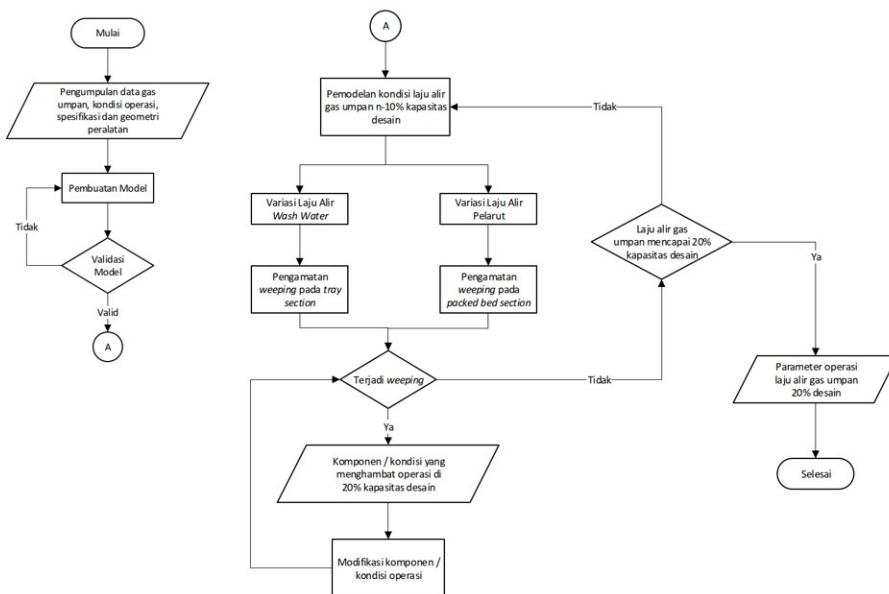
Menurut kalkulasi *Process Engineer*, batasan SO₂ sebesar 75 ppb pada sistem AGRU PT BCD dapat dipenuhi dengan mengurangi laju alir gas umpan hingga 20% desain. Hal ini melebihi batasan *turndown* keseluruhan *gas processing plant* yaitu sebesar 40%. Pengoperasian pada laju alir gas umpan rendah berpotensi menimbulkan masalah hidrodinamika ataupun penurunan kualitas absorpsi. Analisis perlu dilakukan untuk mengetahui apakah terjadi masalah hidrodinamika ataupun kualitas *treated gas* di absorber pada laju alir gas umpan 20% desain.

Permasalahan hidrodinamika yang cenderung terjadi pada laju alir gas umpan rendah adalah *weeping* (Yang dkk. 2021; Zarei dkk. 2013). *Weeping* merupakan parameter penting untuk menentukan batas operasi minimum kolom absorber. Pada saat terjadi *weeping*, efisiensi pemisahan akan berkurang dan bahkan dapat menyebabkan terjadinya *sur-*

ging pada *tray column* (Ma dkk. 2021; Zarei dkk. 2013). Faktor yang mempengaruhi terjadinya *weeping* adalah geometri kolom absorber, *gas loads* dan *liquid loads* (Wang dkk. 2019). Untuk menghindari kerugian waktu dan biaya karena modifikasi kolom absorber, maka dimensi dan geometri kolom absorber dijaga konstan.

Liquid loads dipengaruhi oleh peralatan pendukung proses absorpsi seperti pompa sirkulasi pelarut dan pompa sirkulasi *wash water*. Pompa sirkulasi pelarut menentukan kualitas *treated gas*. Sedangkan pompa sirkulasi *wash water* berfungsi untuk mengurangi *solvent losses*. Laju alir pompa perlu dianalisis untuk memastikan fungsi pompa tersebut terpenuhi, tidak terjadi permasalahan pada pengoperasian pompa dan beban fasa cair tidak mengakibatkan *weeping* pada kolom absorber.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku hidrodinamik kolom absorber pada laju alir gas umpan rendah di luar *turndown ratio*. Selain itu penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh pompa sirkulasi pelarut dan pompa sirkulasi *wash water* terhadap perilaku hidrodinamik ko-



GAMBAR 3. Diagram alir algoritma percobaan.

lom absorber. Adapun tujuan khusus penelitian adalah untuk memberikan rekomendasi supaya kolom absorber dan peralatan pendukungnya dapat dioperasikan pada laju alir gas umpan 20% desain.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Alat dan bahan penelitian

Pelarut yang digunakan adalah pelarut fisik berupa Selexol. Sesuai *method assistant* pada Apen Hysys, pemodelan dan simulasi dilakukan menggunakan *fluid package Acid Gas – Physical Solvents*. *Fluid package* ini didasarkan oleh persamaan keadaan PC-SAFT yang sesuai untuk memodelkan interaksi Selexol dengan komponen terkait. PC-SAFT adalah persamaan keadaan yang berbasis molekular yang diperkenalkan oleh Gross dan Sadowski (Gross dan Sadowski 2001).

Komponen gas umpan yang diproses oleh AGRU memiliki komposisi dan kondisi operasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Penelitian dilakukan dengan memodelkan proses AGRU sesuai dengan desain lisensor menggunakan basis dan asumsi yang tepat. Diperlukan deskripsi proses yang baik untuk membuat model yang mewakili desain lisensor. Untuk mencapai tujuan penelitian, dipilih variabel bebas yang berpengaruh pada perilaku sistem AGRU, terutama hidrodinamik kolom absorber. Deskripsi proses, basis desain, asumsi dan pemilihan variabel dijelaskan lebih lanjut sebagai berikut.

2.1.1 Deskripsi proses

Diagram alir proses ditunjukkan oleh Gambar 1 dan Gambar 2. Gas umpan (aliran 107) memasuki kolom absorber melalui tahap terbawah. Kemudian di dalam kolom absorber, gas umpan mengalir ke atas berkontak dengan pelarut hingga menjadi produk atas absorber berupa *treated gas* (aliran 112). *Wash water* disirkulasikan sebagai *pump around* untuk mengurangi *solvent losses*. Sebagian *wash water* yang mengandung pelarut dikirimkan ke *flash drum* untuk diregenerasi. Untuk menjaga kesetimbangan kandungan air, *demin water* (aliran 533) diinjeksikan di *discharge* pompa P9005. Pe-

larut (aliran 390) mengalir secara *counter-current* terhadap gas umpan dan melarutkan pengotor serta sebagian hidrokarbon.

Pelarut yang mengandung pengotor (*rich solvent* – aliran 201) diregenerasi dengan dua tahap, yaitu *flash regeneration* dan *thermal regeneration*. Sebelum memasuki *flash regenerator*, *rich solvent* dipanaskan terlebih dahulu memanfaatkan panas dari *thermal regenerator*. Penurunan tekanan pada aliran bertekanan tinggi yang mengandung fasa gas harus dilakukan secara bertahap untuk menghindari BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*). Karena alasan ini, *flash regenerator* terdiri dari tiga tahap yaitu HP (*high pressure*) *flash*, MP (*medium pressure*) *flash* dan LP (*low pressure*) *flash*. Produk atas *flash regenerator* berupa fasa gas yang mengandung hidrokarbon disirkulasikan kembali ke kolom absorber sebagai *recycle gas* (aliran 215). Sedangkan produk bawah *flash regenerator* berupa *semi-lean solvent*, dimurnikan lebih lanjut menggunakan *thermal regeneration* di dalam kolom distilasi.

Kolom absorber yang digunakan memiliki dua jenis internal, yaitu *tray* dan *packing bed*. *Tray* dengan tipe *valve*, digunakan pada tahap pertama hingga tahap ketiga. *Packing bed* yang digunakan adalah tipe *super-ring plus #2*. Kolom absorber memiliki 4 buah *packing bed*. Data kolom absorber dirangkum pada Tabel 3.

Aliran *wash water* disirkulasikan menggunakan pompa P9005. Aliran tersebut diambil dari bawah tahap ketiga dan dimasukkan kembali ke tahap nomor satu. Fungsi utama sirkulasi *wash water* adalah untuk mencegah kehilangan pelarut (Selexol) pada kolom absorber. Sebagian *wash water* yang mengandung Selexol dialirkan menuju *flash drum* untuk diregenerasi. *Make-up demin water* diinjeksikan ke *discharge* P9005 untuk menjaga kestabilan kandungan air di kolom absorber.

Aliran *lean solvent* masuk melalui tahap nomor empat. Sedangkan aliran gas umpan dan *recycle gas* masuk ke kolom absorber melalui tahap paling bawah. Fungsi utama aliran *lean solvent* adalah melarutkan pengotor dan menentukan kualitas *treated gas*.

Batasan operasi pompa P9005 dan P9011 sesuai datashe-

TABEL 5. Validasi kondisi proses.

Deskripsi	Satuan	Absorber Overhead (Kalkulasi Lisensor)	Simulasi	Galat (%) *
Nomor Stream		112	112	
Fasa	-	Uap	Uap	
Fraksi Uap	-	1,00	1,00	0,00
Temperatur	°F	64	63	-1,56
Tekanan	psig	532	532	0,00
Laju Alir Volume	MMSCFD	321,1	320,4	-0,21
Laju Alir Massa	lb/jam	920.457,00	916.068,13	-0,48
Massa Jenis	lb/ft ³	2,85	2,89	1,40
Entalpi	Btu/lb	-3.000,26	-3006,92	0,22
Massa molekul relatif	-	26,10	26,04	-0,23
Komposisi (Fraksi mol)				
H2S	ppm	10,0	9,4	-6,0
CO2	-	0,332533	0,331976	-0,17
Nitrogen	-	0,003576	0,003584	0,22
Metana	-	0,630050	0,631440	0,22
Etana	-	0,021546	0,021538	-0,04

* Galat didefinisikan sebagai persentase selisih hasil simulasi dengan kalkulasi lisensor terhadap nilai kalkulasi lisensor.

TABEL 6. Validasi besaran hidrodinamik.

Deskripsi	Satuan	Kalkulasi Lisensor	Simulasi	Galat (%) *
Fasa Cair				
Laju Alir Cair	lb/jam	118.488	118.586	0,08
Massa Jenis Cair	lb/ft ³	65,35	63,02	-3,57
Viskositas Cair	cP	1,055	1,037	-1,71
Tegangan Permukaan	dynes/cm	73,7	73,57	-0,18
Fasa Uap				
Laju Alir Uap	lb/jam	920.523	915.828,47	-0,51
Massa Jenis Uap	lb/ft ³	2,85	2,91	2,11
Viskositas Uap	cP	0,013	0,014	7,69
Data Hidrolik				
Dry Tray Pressure drop	mbar	2,64	2,70	2,27

*Galat didefinisikan sebagai persentase selisih hasil simulasi dengan kalkulasi lisensor terhadap nilai kalkulasi lisensor.

et dan kurva operasi pompa terkait dirangkum pada Tabel 4.

2.1.2 Pemilihan variabel

Weeping dipengaruhi oleh geometri internal absorber, beban fasa cair, dan beban fasa gas (Wang dkk. 2019). Modifikasi geometri dan dimensi kolom absorber tidak diharapkan. Sedangkan laju alir gas dijadikan sebagai target operasi. Perubahan kondisi operasi dilakukan untuk beban fasa cair berupa laju alir fasa cair. Variasi dilakukan pada laju alir pelarut dan laju alir wash water sebagai variabel bebas dengan dibatasi rentang operasi masing-masing pompa sirkulasi.

AGRU merupakan sistem kompleks yang memiliki ruang lingkup dan variabel yang luas. Untuk dapat mencapai tujuan penelitian ini, perlu diberikan batasan ruang lingkup dan asumsi. Asumsi dan batasan ruang lingkup yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

1. Pemodelan dan analisis difokuskan pada sistem pemurnian gas alam dari H₂S,
2. Peralatan yang ditinjau adalah kolom absorber, pompa sirkulasi pelarut, pompa sirkulasi wash water dan recycle compressor,
3. Sistem berada dalam kondisi tunak (steady state),
4. Komposisi lean solvent dari thermal regeneration konstan.

2.1.3 Algoritma percobaan

Tujuan penelitian dicapai dengan melakukan percobaan sesuai algoritma yang ditentukan. Algoritma percobaan ditampilkan pada diagram alir di Gambar 3.

2.1.4 Persamaan matematika yang digunakan

2.1.5 Basis dan asumsi

Perangkat Aspen Hysys memiliki kemampuan untuk mengkalkulasi suatu sistem proses berdasarkan persamaan matematika. Persamaan matematika yang digunakan Aspen Hysys untuk mendapatkan hasil dari input yang dimasukkan, dapat dilihat pada fitur help. Dengan merujuk pada fitur help pada Aspen Hysys, persamaan matematika yang digunakan adalah sebagai berikut:

A. Weeping pada tray section

Aspen Hysys menggunakan persamaan yang diajukan oleh Hsieh dan McNulty ataupun Lockett dan Banik untuk

menentukan terjadinya weeping atau tidak pada tray section (AspenTech, 2017).

Persamaan Lockett dan Banik ditunjukkan pada persamaan (1) hingga (3) sebagai berikut:

$$\frac{W}{A_h} = \frac{29,45}{\sqrt{Fr_h}} - 44,18 \quad (1)$$

$$Fr_h = 0.373 \frac{u_h^2}{h_c} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G} \right) \quad (2)$$

Persamaan (1) direkomendasikan untuk froude number ($Fr_h = \frac{u_h}{\sqrt{gZ}}$) kurang dari 0,2. Sedangkan untuk bilangan Froude yang lebih besar, digunakan persamaan (3) sebagai berikut:

$$\frac{W}{A_h} = \frac{1,841}{Fr_h^{1,533}} \quad (3)$$

Persamaan Lockett dan Banik tidak akurat untuk kondisi di bawah:

1. Tray dengan diameter besar dan laju alir fasa cair yang rendah,
2. Tray dengan ukuran lubang yang kecil (< 1/8 inch).

Persamaan Hsieh dan McNulty ditunjukkan pada persamaan (4) sampai (7).

$$\sqrt{J_G^*} + m\sqrt{J_L^*} = C_w \quad (4)$$

$$J_G^* = u_h \left[\frac{\rho_G}{gZ(\rho_L - \rho_G)} \right]^{0,5} \quad (5)$$

$$J_L^* = \frac{W}{448,83A_h} \left[\frac{\rho_L}{gZ(\rho_L - \rho_G)} \right]^{0,5} \quad (6)$$

$$Z = \frac{h_c^{1,5}}{12D_H^{0,5}} \quad (7)$$

Panjang karakteristik (Z) berkaitan dengan clear liquid

height (h_c) dan diameter valve equivalent (D_H). Sedangkan parameter D_H dipengaruhi oleh geometri valve tray.

B. Weeping pada packed bed section

Pada packed bed section, pressure drop dikalkulasi dengan menggunakan persamaan Generalized Pressure Drop Correlation (GPDC) sebagai berikut (AspenTech 2017):

$$Y = \frac{a(\Delta p)^b}{(1 + cX^d(\Delta p)^{\frac{b}{f}})^f} (1 - \exp(-gX^h)) \quad (8)$$

Di mana nilai konstanta yang didefinisikan oleh Aspen Hysys adalah sebagai berikut:

1. a : 7,8282
2. b : 1,087
3. c : 2,5292
4. d : 0,34185
5. f : 1,7976
6. g : 1,0557
7. h : -0,95216

Persamaan tersebut dapat dikorelasikan dengan grafik GPDC sebagai seperti ditunjukkan Gambar 4.

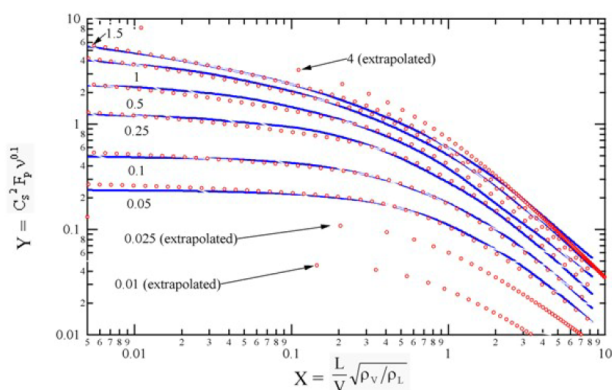
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemodelan dan simulasi dilakukan untuk mengetahui perilaku AGRU pada perubahan laju alir gas umpan. Analisis dilakukan pada hidrodinamik kolom absorber terhadap perubahan laju alir gas umpan, pompa wash water dan pompa pelarut.

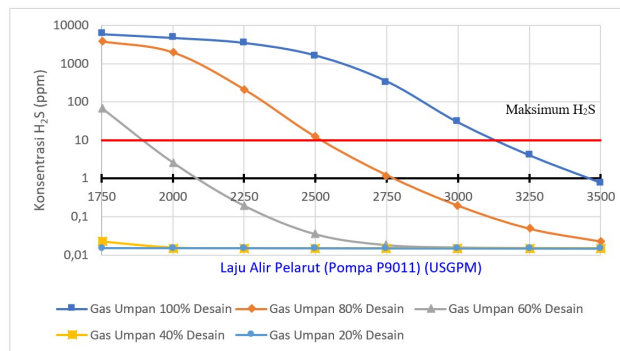
3.1 Validasi

Validasi pemodelan dilakukan dengan membandingkan output simulasi dan data lisensor untuk laju alir gas umpan 100% desain. Input simulasi untuk aliran masuk ke absorber merujuk pada besar laju alir, komposisi, tekanan, dan temperatur aliran sesuai dengan data lisensor. Geometri kolom absorber merujuk pada datasheet dan drawing kolom absorber. Hasil validasi ditunjukkan pada Tabel 5.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan galat yang kecil (<10%) dibandingkan dengan kalkulasi lisensor sehingga simulasi bisa dikatakan valid. Data aktual belum bisa didapatkan karena unit pengolahan gas belum beroperasi.



GAMBAR 4. Kurva generalized pressure drop correlation (AspenTech 2017).



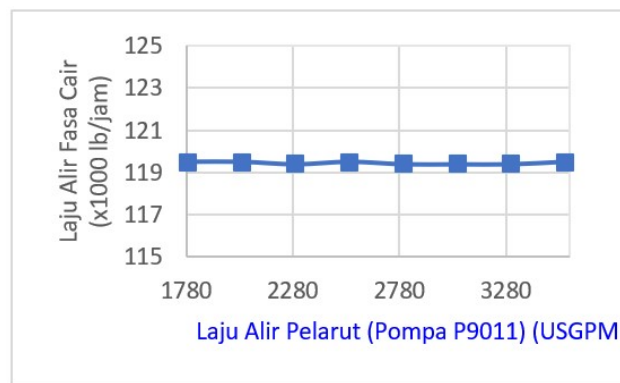
GAMBAR 5. Pengaruh laju alir gas umpan dan pelarut pada kualitas treated gas.

3.2 Karakteristik kolom absorber

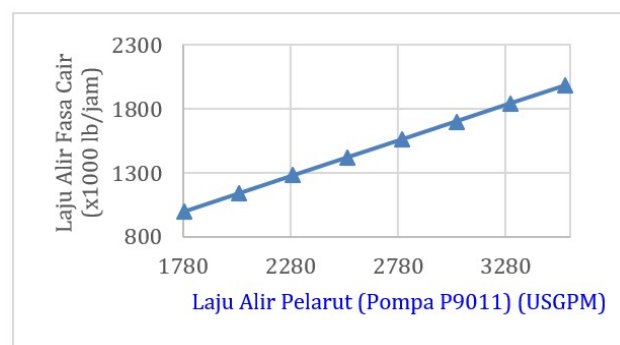
Karakteristik kolom absorber diamati pada berbagai laju alir pompa pelarut (P9011). Didapatkan karakteristik kolom absorber seperti ditunjukkan pada Gambar 5. Dengan berkurangnya laju alir gas umpan, konsentrasi H_2S pada treated gas akan semakin kecil. Pada laju alir gas umpan 40% kapasitas desain, kandungan H_2S kurang dari 10 ppm pada setiap laju alir pelarut di rentang operasi pompa. Kualitas treated gas bukan menjadi permasalahan pada laju alir gas umpan yang rendah.

Laju alir pelarut mempengaruhi beban fasa cair packed bed section seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Karena pelarut masuk ke kolom absorber melalui nozzle di bawah tray section, maka laju alir fasa cair tray section tidak dipengaruhi oleh laju alir pelarut.

Laju alir wash water pump mempengaruhi beban fasa cair pada tray section namun tidak mempengaruhi packed

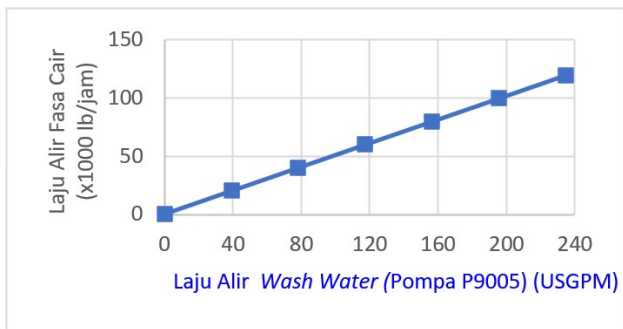


(a)

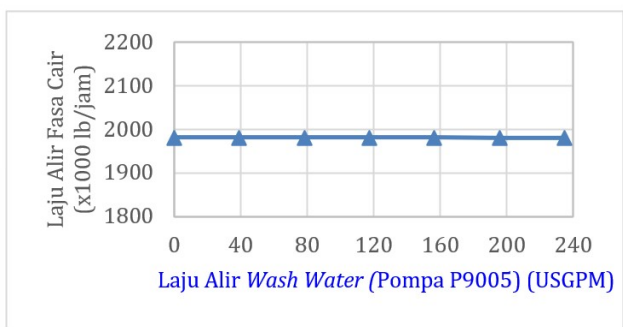


(b)

GAMBAR 6. Pengaruh laju alir pompa sirkulasi pelarut terhadap laju alir fasa cair pada: (a) tray section; (b) packed bed section.



(a)



(b)

GAMBAR 7. Pengaruh laju alir wash water pump terhadap laju alir fasa cair pada: (a) tray section; (b) packed bed section.

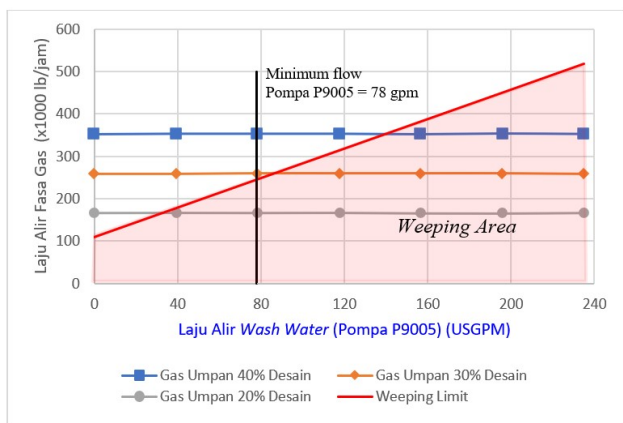
bed section seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Sehingga kondisi hidrodinamik tray section hanya dipengaruhi oleh wash water pump.

3.3 Modifikasi laju alir Gas umpan

Laju alir gas umpan diamati dari minimum turndown ratio, yaitu 40%. Kemudian secara bertahap laju alir gas umpan dikurangi hingga mencapai 20% kapasitas desain. Menurut pembahasan pada sub-bab 3.2, hidrodinamik tray section dan packed bed section dipengaruhi oleh pompa yang berbeda, maka weeping pada tray section dan packed bed section diamati secara terpisah.

3.3.1 Weeping pada tray section

Weeping pada tray section dipengaruhi oleh laju alir gas umpan dan laju alir wash water pump seperti ditunjukkan pada Gambar 8 di bawah. Batasan weeping dirujuk dari hasil kal-



GAMBAR 8. Pengaruh laju alir wash water pump terhadap weeping pada tray section.

TABEL 7. Spesifikasi singkat pompa tambahan.

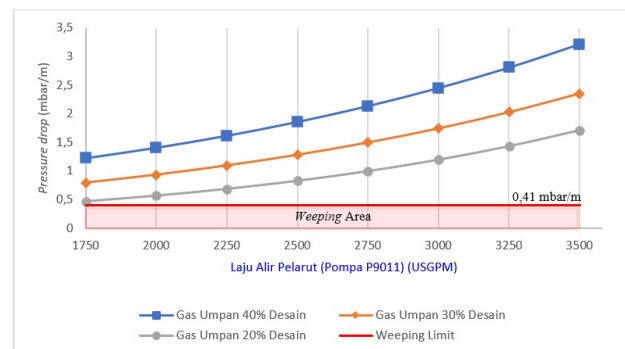
Item	Satuan	Nilai
Tipe		MegaCPK 040-025-200
Laju alir (min / rated / max)	gpm	2,86 / 25,10 / 33,86
Best efficiency point (BEP)	gpm	28,5
Rated flow to BEP ratio	%	87,7
Perbedaan head	ft	132,23
Kecepatan putar	rpm	2943
Efisiensi	%	25,2
Rated power	HP	3,33
Driver power	HP	5,36

kulasi Aspen Hysys. Pada setiap laju alir gas tertentu, terdapat beban fasa cair maksimum yang dapat ditahan oleh laju alir gas. Dengan berkurangnya laju alir gas, maka beban fasa cair yang dapat ditahan juga berkurang.

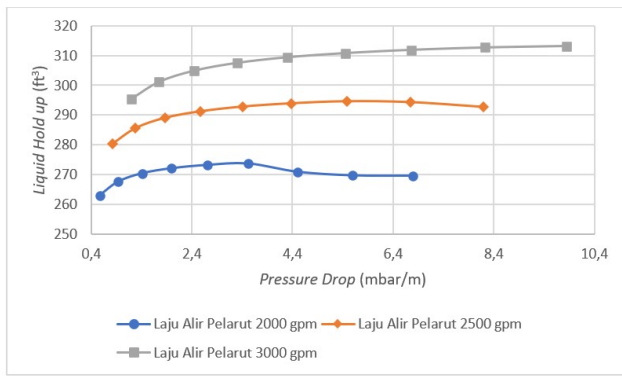
Pada tray section, kecenderungan weeping terjadi pada laju alir wash water pump tinggi dan laju alir gas umpan rendah. Beban fasa cair yang tinggi tidak bisa ditahan oleh laju alir fasa uap yang semakin kecil dengan berkurangnya laju alir gas umpan. Untuk menghindari weeping pada laju alir gas umpan yang rendah, beban fasa cair akibat laju alir P9005 perlu dikurangi. Beban fasa cair yang rendah dapat dicapai dengan laju alir pompa yang rendah. Namun laju alir pompa yang terlalu rendah dapat menyebabkan unsteady flow dan menyebabkan terjadi kavitasi (Feng dkk. 2021; Li dkk. 2016).

Pada laju alir gas umpan 28% desain (91,59 MMSCFD), pompa P9005 telah mencapai kapasitas minimumnya, yaitu 78 gpm. Gambar 8 menunjukkan pada laju alir gas umpan yang semakin rendah, diperlukan laju sirkulasi wash water yang semakin kecil untuk menghindari terjadinya weeping. Pengoperasian pompa P9005 di bawah 78 gpm akan mengakibatkan permasalahan pada pompa karena sudah berada di luar rentang operasi pompa. Modifikasi laju alir pompa P9005 perlu dilakukan supaya weeping tidak terjadi pada laju alir gas umpan 20%. Sesuai Gambar 8, untuk dapat beroperasi di laju alir 20% gas umpan (65,42 MMSCFD), pompa P9005 perlu beroperasi di laju alir 25 gpm.

Salah satu opsi solusi adalah memasang pompa dengan laju alir 25 gpm secara paralel terhadap P9005. Pompa tersebut hanya dioperasikan pada saat laju alir gas umpan lebih kecil dari 28% gas umpan. Salah satu tipe pompa yang sesuai untuk pompa tambahan adalah pompa dengan tipe Me-



GAMBAR 9. Pengaruh laju alir pelarut terhadap weeping pada packed bed section.



GAMBAR 10. Pengaruh *pressure drop* terhadap *liquid hold-up*.

gaCPK 040-025-200. Spesifikasi singkat pompa tersebut dirangkum pada Tabel 7.

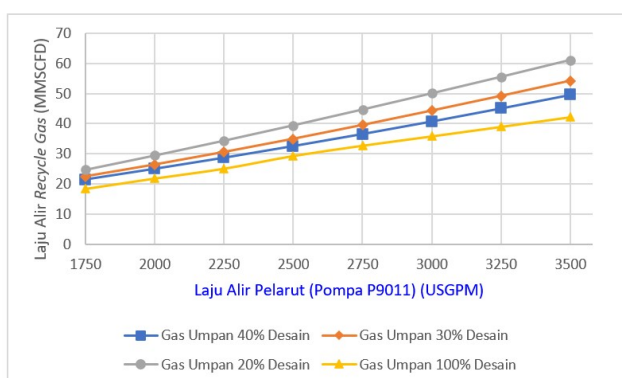
3.3.2 Weeping pada packed bed section

Batasan *weeping* pada *packed bed section* adalah *pressure drop*. Pengaruh laju alir pelarut terhadap *pressure drop* pada *packed bed section* ditunjukkan pada Gambar 9 di bawah.

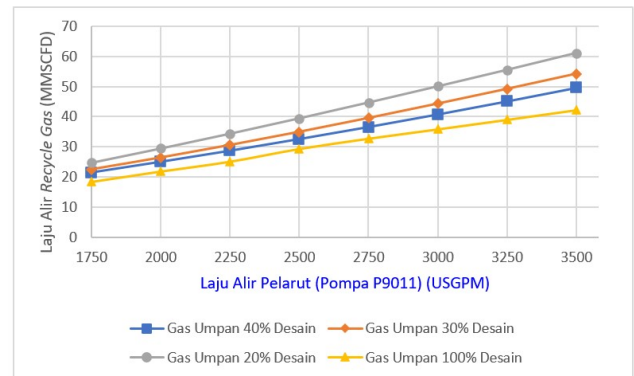
Pressure drop pada *packed bed section* semakin rendah pada laju alir gas umpan dan laju alir pelarut yang rendah. Aspen Hysys mendefinisikan batasan *pressure drop* minimum pada *packing bed* adalah 0,41 mbar/m (0,05 inH₂O/ft). Operasi dengan *pressure drop* lebih rendah dari 0,41 mbar/m tidak direkomendasikan oleh Aspen Hysys karena akan mengganggu kestabilan kolom.

Pressure drop yang rendah akan mengakibatkan *liquid hold-up* yang tidak stabil. Gradien penurunan *liquid hold-up* akan semakin curam pada *pressure drop* rendah seperti ditunjukkan pada Gambar 10. *Liquid hold-up* merupakan parameter yang menyatakan jumlah fasa cair yang berada di dalam *packed bed* dalam kondisi operasinya. Semakin besar *liquid hold-up*, kontak pelarut dan gas di dalam *packed bed* semakin baik.

Komponen gas yang dilepaskan oleh *flash regeneration* akan dikembalikan ke absorber sebagai *recycle gas*. Merujuk pada Gambar 9, semakin tinggi laju alir gas umpan maka *pressure drop* akan semakin tinggi. *Recycle gas* akan membantu menambah total gas yang masuk ke absorber untuk mempertahankan *pressure drop* yang tinggi. Pada laju alir gas umpan yang sama, peningkatan laju alir pelarut akan meningkatkan laju alir *recycle gas*. Jumlah komponen gas yang bisa ditangkap oleh *lean solvent* akan meningkat dengan ber-



GAMBAR 11. Pengaruh laju alir gas umpan dan pelarut terhadap *recycle gas*.



GAMBAR 12. Pengaruh laju alir gas umpan terhadap laju alir *rich solvent*.

tambahnya pelarut.

Peningkatan laju alir gas umpan akan menurunkan laju alir *recycle gas*. Semakin tinggi laju alir gas umpan, maka perbandingan rasio gas dan pelarut akan meningkat. Jumlah pelarut yang digunakan untuk memurnikan satu satuan molekul gas akan berkurang. Akibatnya jumlah pengotor dan hidrokarbon yang dapat diserap pelarut akan berkurang.

Laju alir *recycle gas* berkaitan dengan laju alir *rich solvent* dan jumlah fasa ringan yang dibawa oleh *rich solvent*. Laju alir *rich solvent* akan berkurang pada peningkatan laju alir gas umpan seperti ditunjukkan pada Gambar 12 di bawah.

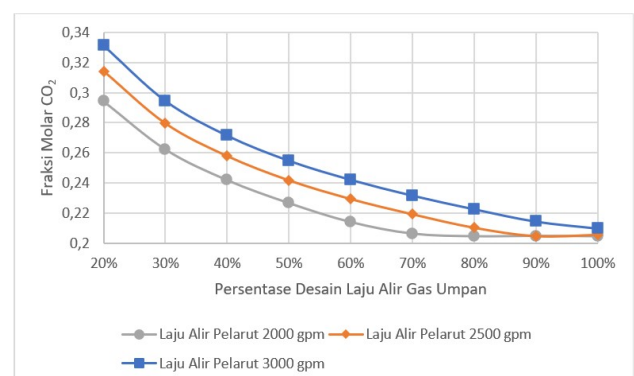
CO₂ merupakan komponen ringan pada *rich solvent* dengan komposisi terbanyak. Selain laju alir *rich solvent*, kandungan CO₂ pada *rich solvent* juga berkurang sebanding dengan peningkatan laju alir gas umpan seperti ditunjukkan Gambar 13. Hal ini mengakibatkan jumlah komponen gas ringan yang dilepaskan *flash regenerator* berkurang dengan peningkatan gas umpan. Perubahan laju alir *recycle gas* akan mempengaruhi laju alir *recycle compressor*.

Perubahan laju alir pelarut berpotensi menyebabkan *recycle compressor* bekerja di luar rentang operasinya. Untuk memastikan *recycle compressor* beroperasi pada rentang aman, sebaiknya pompa pelarut dioperasikan dalam rentang 2500 gpm – 3200 gpm.

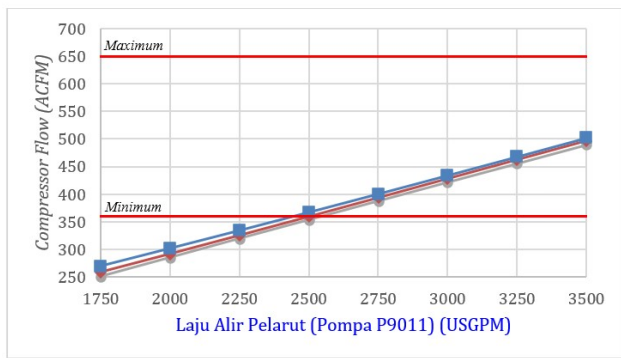
4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

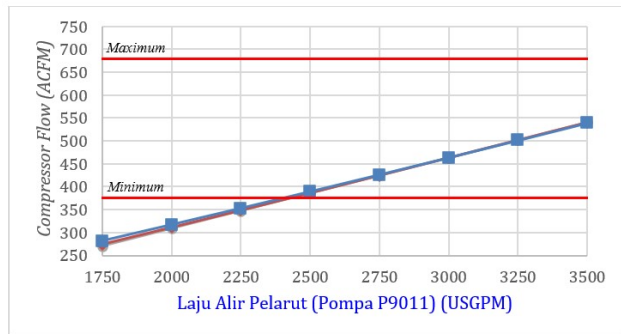
1. Perubahan laju alir gas umpan mempengaruhi kondisi hidrodinamik dan konsentrasi H₂S pada *treated gas*. Sema-



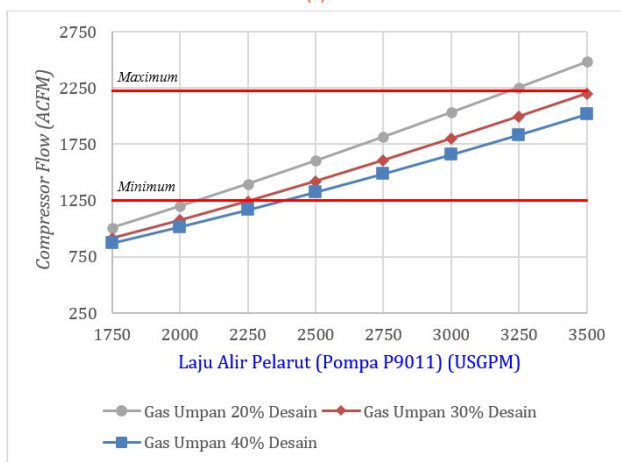
GAMBAR 13. Fraksi molar CO₂ di *rich solvent* pada berbagai laju alir gas umpan.



(a)



(b)



(c)

GAMBAR 14. Laju alir recycle compressor (a) low pressure stage (b) medium pressure stage (c) high pressure stage.

kin kecil laju alir gas umpan, konsentrasi H_2S pada *treated gas* semakin kecil. Namun potensi kegagalan hidrodinamik pada kolom berupa *weeping* semakin besar.

- Kolom absorber pada penelitian ini terdiri dari dua bagian, yaitu *tray section* dan *packed bed section*. *Weeping* pada *tray section* dipengaruhi oleh laju alir *wash water pump* (P9005). Pada *packed bed section*, *weeping* dipengaruhi oleh laju alir pompa pelarut (P9011).
- Dengan kondisi desain peralatan saat ini, laju alir minimum gas umpan yang tidak menimbulkan *weeping* adalah 28% kapasitas desain. Pada laju alir gas umpan 28%, *wash water pump* (P9005) sudah mencapai batasan operasi minimumnya, yaitu 78 gpm.
- Untuk dapat beroperasi pada laju alir gas umpan 20% desain, absorber membutuhkan laju alir *wash water* sebesar 25 gpm. Hal ini dapat dipenuhi dengan memasang pompa tambahan dengan kapasitas desain 25 gpm secara

ra paralel dengan pompa P9005. Salah satu tipe pompa yang sesuai dengan kebutuhan pompa tambahan adalah tipe MegaCPK 040-025-200.

- Laju alir pelarut mempengaruhi besar *recycle gas*, di mana hal ini berpengaruh pada operasi *recycle compressor*. Pada laju alir gas umpan 20% desain, rentang operasi laju alir pelarut yang disarankan adalah 2500 gpm – 3200 gpm

5. DAFTAR NOTASI

- A_h = Luas permukaan lubang, ft^2
- C_w = Konstanta persamaan *weeping*
- C_s = Capacity factor, ft/s
- D_H = Diameter *valve equivalent*, inch
- F_p = Packing factor, ft^{-1}
- Fr_h = Bilangan Froud
- G = Laju alir massa fasa gas, lb/jam
- g = Percepatan gravitasi, $32,2 ft/s^2$
- h_c = Clear liquid height, inch
- J_G^* = Bilangan tak berdimensi kecepatan alir fasa gas
- J_L^* = Bilangan tak berdimensi kecepatan alir fasa cair
- L = Laju alir massa fasa cair, lb/jam
- m = Konstanta persamaan *weeping*
- Δp = Pressure drop, in H_2O/ft
- u_h = Kecepatan alir uap pada lubang, ft/s
- X = Flow parameter
- Y = Capacity parameter
- W = Weep rate, gpm
- Z = Panjang karakteristik, ft
- ν = Viskositas kinetik, cP
- ρ_L = Massa jenis fasa cair, lb/ft^3
- ρ_G = Massa jenis fasa uap, lb/ft^3

DAFTAR PUSTAKA

- Ameen AW, Budd PM, Gorgojo P. 2020. Superglassy polymers to treat natural gas by hybrid membrane/amine processes: Can fillers help? *Membranes*. 10(12):1–23. doi:10.3390/membranes10120413.
- AspenTech. 2017. Aspen HYSYS Unit Operations Reference Guide Version Number : V10. <https://wiac.info/docview>.
- Feng J, Ge Z, Yang H, Zhu G, Li C, Luo X. 2021. Rotating stall characteristics in the vaned diffuser of a centrifugal pump. *Ocean Engineering*. 229(January):108955. doi:10.1016/j.oceaneng.2021.108955.
- Gross J, Sadowski G. 2001. Perturbed-Chain SAFT: An Equation of State Based on a Perturbation Theory for Chain Molecules. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 40(4):1244–1260. doi:10.1021/ie0003887.
- Jamali SH, Ramdin M, Becker TM, Torres-Knoop A, Dubeldam D, Buijs W, Vlucht TJ. 2017. Solubility of sulfur compounds in commercial physical solvents and an ionic liquid from Monte Carlo simulations. *Fluid Phase Equilibria*. 433:50–55. doi:10.1016/j.fluid.2016.11.015.
- Li Y, Li X, Zhu Z, Li F. 2016. Investigation of unsteady flow in a centrifugal pump at low flow rate. *Advances in Mechanical Engineering*. 8(12):1–8. doi:10.1177/1687814016682151.
- Lins VF, Guimarães EM. 2007. Failure of a heat exchanger generated by an excess of SO_2 and H_2S in the Sulfur Recovery Unit of a petroleum refinery. *Journal of Loss Preven-*

- tion in the Process Industries. 20(1):91–97. doi:[10.1016/j.jlp.2006.10.007](https://doi.org/10.1016/j.jlp.2006.10.007).
- Ma Y, Liu Y, Cao R, Shang W, Li G, Zhong F, Cui X, Liu Y. 2021. Mechanism and fundamental models of gas–liquid surging for valve columns. *AIChE Journal*. 67(11). doi:[10.1002/aic.17369](https://doi.org/10.1002/aic.17369).
- Rafati N. 2019. A novel low-cost process for sour gas sweetening and NGL recovery. Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2019, ADIP 2019. (November):11–14. doi:[10.2118/197269-ms](https://doi.org/10.2118/197269-ms).
- Thafseer M, Ani ZA, Gujarathi AM, Vakili-nezhaad GR. 2021. Journal of Natural Gas Science and Engineering Towards process , environment and economic based criteria for multi-objective optimization of industrial acid gas removal process. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 88(October 2020):103800. doi:[10.1016/j.jngse.2021.103800](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.103800).
- Wang J, Zhou X, Gao B, Huang C, Sun J, Sun X, Shao H, Ma J, Leng Y. 2019. Experimental study and modeling of weeping rate in rectangular large-scale valve trays. *AIChE Journal*. 65(11):1–14. doi:[10.1002/aic.16722](https://doi.org/10.1002/aic.16722).
- Yang S, Zhang J, Xue J, Wu Q, Li Q, Zhao H, Zhang L. 2021. Hydrodynamics and mass transfer performance analysis of flow-guided trapezoid spray packing tray. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 39:59–67. doi:[10.1016/j.cjche.2020.10.046](https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.10.046).
- Zarei A, Hosseini SH, Rahimi R. 2013. CFD and experimental studies of liquid weeping in the circular sieve tray columns. *Chemical Engineering Research and Design*. 91(12):2333–2345. doi:[10.1016/j.cherd.2013.03.006](https://doi.org/10.1016/j.cherd.2013.03.006).
- Zubeir LF, Lacroix MH, Meuldijk J, Kroon MC, Kiss AA. 2018. Novel pressure and temperature swing processes for CO₂ capture using low viscosity ionic liquids. *Separation and Purification Technology*. 204(May):314–327. doi:[10.1016/j.seppur.2018.04.085](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.04.085).