



JURNAL REKAYASA PROSES

Volume 10 No.1, 2016, hal. 1-9

Journal homepage: <http://journal.ugm.ac.id/jrekpros>



Evaluasi Keandalan Reaktor Biogas Skala Rumah Tangga di Daerah Istimewa Yogyakarta dengan Metode Analisis *Fault Tree*

Ning Puji Lestari*, Siti Syamsiah, Sarto, dan Wiratni Budhijanto
Program Studi S2 Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl Grafika No.2 Kampus UGM, Yogyakarta, 55281
*Alamat korespondensi: ning18starry@yahoo.co.id

(Submisi;; Revisi;; Penerimaan:)

ABSTRACT

Biogas technology is one of the solutions for improving sanitation, environment, economy and energy conservation especially for smallholder farmers who are applying mixed crop and livestock farming. Indonesia Domestic Biogas Programme (BIRU) has been implemented in DIY since 2009. However, the household digesters that operate effectively only accounts for less than 50% of the total existing digesters in 2017. These problems should be identified and analyzed for more effective implementation and efficient operation of small-sized biogas system in the future. This research applied fault tree analysis (FTA) method to identify failures and evaluated their effects on the operation of small-sized biogas based on processes, physical component, and human factor point of view. Forty-one sets of BIRU biogas were selected and sampled using stratified purposive random sampling method. Nineteen minimal cut set and three subsystems were defined, which included process failures, infrastructure failures, and human errors. The fault probabilities of the three subsystems were found to be 0.79; 0.59; and 0.96, respectively. It implied that human error gave the highest probability of errors, followed by process failure, while the physical structure of the reactor had been sufficiently well controlled. This study suggested that careful selection on prospective users should be conducted prior to installation, to ensure the motivation of the users in maintaining the reactor in good conditions. Besides, trainings and assistance system are also required to improve the skills of the user to maintain the performance of their reactor.

Keywords: *anaerobic digestion, small-size digester, fault tree analysis, failure.*

ABSTRAK

Teknologi biogas merupakan salah satu solusi untuk menyelesaikan masalah energi, sanitasi, lingkungan, dan ekonomi bagi masyarakat daerah pedesaan yang menerapkan sistem pertanian terpadu. Program pembangunan biogas telah banyak dilakukan di Daerah Istimewa Yogyakarta salah satunya melalui program Biogas Rumah (BIRU) dengan tingkat keberhasilan program yang belum memuaskan dengan angka keberhasilan di bawah 50%. Evaluasi keandalan sistem biogas BIRU dilakukan dengan menggunakan metode *fault tree analysis* (FTA). Metode ini mencakup seluruh aspek yang mempengaruhi beroperasinya sebuah sistem biogas baik dari segi proses, komponen fisik (infrastruktur), maupun faktor manusia. Sebanyak 41 unit biogas yang mengalami kegagalan diteliti setelah dipilih dengan metode *stratified purposive random sampling*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode FTA cocok digunakan sebagai metode evaluasi keandalan sehingga faktor penyebab

kegagalan dan nilai probabilitas setiap faktor dapat diketahui. Dengan metode FTA, diperoleh hasil bahwa penyebab kegagalan sistem biogas berupa 19 *minimal cut set* yang dapat dikelompokkan dalam subsistem kegagalan proses, kegagalan komponen (infrastruktur), dan *human errors* dengan nilai probabilitas kegagalan masing-masing 0,79; 0,59; dan 0,96. Hal ini menunjukkan bahwa kemungkinan terbesar kegagalan proses disebabkan oleh faktor manusia, kemudian disusul oleh faktor proses, sementara faktor komponen fisik reaktor sudah cukup baik kualitasnya. Studi ini menunjukkan bahwa untuk aplikasi teknologi biogas skala rumah tangga, seleksi calon pengguna harus dilakukan dengan teliti untuk menjamin motivasi calon. Selain itu, diperlukan pelatihan dan pendampingan untuk mempersiapkan calon pengguna agar mampu memelihara keberlanjutan teknologi biogas tersebut.

Kata kunci: peruraian anaerobik, digester skala rumah tangga, *fault tree analysis*

1. Pendahuluan

Jumlah petani di Indonesia mencapai 42% dari total penduduk dan 55% dari mereka menerapkan sistem pertanian terpadu (BPS, 2013). Sistem pertanian terpadu adalah praktek yang mengerjakan budidaya tanaman dan peternakan secara simultan. Apabila tidak dikelola dengan baik limbah ternak dapat menimbulkan masalah bagi kesehatan dan pencemaran lingkungan.

Salah satu teknik pengolahan limbah peternakan yang sesuai untuk masyarakat petani adalah dengan teknologi biogas. Biogas merupakan produk hasil peruraian material organik oleh bakteri yang bekerja pada kondisi tanpa oksigen (*anaerobic digestion*). Secara umum, biogas sebagian besar terdiri atas 55-70% metana (CH_4), 30-45% karbon dioksida (CO_2) dan juga terdapat sedikit kandungan gas lain (Deublein dan Steinhauser, 2008).

Proses peruraian anaerobik untuk menghasilkan biogas, merupakan proses yang terdiri dari tiga tahapan proses. Tahap yang pertama adalah tahap hidrolisis. Pada tahap ini senyawa organik yang tidak larut akan diproses menjadi senyawa organik yang dapat larut. Tahap kedua, bakteri pembentuk asam (asidogen) akan mengubah senyawa organik yang dapat larut tersebut menjadi asam volatil, alkohol, dan H_2 . Dan pada tahap ketiga, produk dari tahap kedua oleh bakteri metanogen dikonversi menjadi CH_4 , CO_2 , dan H_2S (Shuler dan Kargi, 2002).

Selain untuk mereduksi emisi gas rumah kaca, proses peruraian anaerobik pada kotoran ternak juga dapat menghasilkan pupuk organik cair yang berasal dari material organik yang tidak

terkonversi menjadi biogas. Selain itu dapat mengurangi bau dan bakteri patogen, serta menghasilkan bahan bakar terbarukan yang menjadi solusi tepat untuk menyelesaikan permasalahan energi (Putra dkk., 2015). Penggunaan teknologi biogas memberikan manfaat antara lain: 1) Energi pengganti bahan bakar fosil dan berkurangnya penggunaan bahan bakar kayu (2 ton/tahun/reaktor); 2) Penghematan waktu untuk memasak, membersihkan, dan mengumpulkan kayu (2 jam/hari/keluarga); 3) Pemanfaatan limbah peternakan; 4) Pengurangan emisi gas rumah kaca, mengingat gas metana (CH_4) yang lepas tak terkontrol dari kotoran ternak tak terolah memiliki tingkat pencemaran 21 kali lebih kuat dibandingkan CO_2 dan menyebabkan pemanasan global; 5) Ketersediaan pupuk organik; dan 6) Peningkatan kesejahteraan masyarakat (ESDM, 2014).

Meskipun dinilai sebagai solusi yang tepat, penerapan teknologi biogas bukan tanpa masalah. Pembangunan fasilitas produksi biogas (reaktor biogas) secara masif di negara berkembang ternyata banyak yang belum menghasilkan gas secara optimal, bahkan ada yang berhenti beroperasi. Cina memulai program pembangunan reaktor biogas pada tahun 1980 dengan membangun 7 juta unit reaktor biogas, pada tahun 1985 jumlah reaktor biogas yang masih aktif tinggal 5 juta unit (He, 1988). Tiga tahun berikutnya jumlah reaktor biogas yang aktif menjadi 4,7 juta (Deng, 1990). Di negara berkembang angka keberhasilan penerapan teknologi biogas berkisar antara 50-75%. Di Indonesia sendiri sejak pembangunan tahun 2009, pada tahun 2012 reaktor biogas yang masih

beroperasi hanya 89% dan pada tahun 2013 menjadi tinggal 83% (ESDM, 2014).

Produksi biogas sangat tergantung pada aktivitas metabolisme mikroorganisme penghasil metana yang kinerjanya dipengaruhi oleh suhu, derajat keasaman (pH), toksisitas (*toxicity*), rasio C/N (Nijaguna, 2006), *loading rate*, persentase kandungan bahan kering (% *dry matter*), *volatile solid* (Widodo, 2008), waktu tinggal (Fry, 1976), tekanan, tipe substrat, bidang permukaan dari material, konsentrasi bakteri, dan cahaya (Deublein dan Steinhauser, 2008). Namun di lain pihak, pengembangan dan keberhasilan penggunaan teknologi biogas tidak hanya murni karena faktor teknis tetapi juga dipengaruhi oleh masalah sosial, ekonomi, perilaku manusia (Caceres dkk., 1986), dan motivasi (Qu dkk., 2013).

Evaluasi reaktor biogas skala rumah tangga dengan menggunakan *fault tree analysis* untuk analisis kegagalan reaktor biogas dari segi teknis pernah dilakukan di Nepal yang menunjukkan bahwa metode ini cocok untuk evaluasi kehandalan reaktor biogas (Cheng dkk., 2013). *Fault Tree Analysis* adalah metode analisis, dengan adanya suatu kejadian yang tidak diinginkan (*undesired event*) pada suatu sistem, yang kemudian dianalisis dengan kondisi lingkungan dan operasional yang ada untuk menemukan semua kejadian yang mungkin terjadi dan mengarah pada terjadinya kejadian yang tidak diinginkan tersebut (Vesely dkk., 1981).

Untuk menganalisis kegagalan sistem dengan metode FTA, perlu dibuat pohon kegagalan (*fault tree*) terlebih dahulu. *Fault tree* adalah model grafis dari kegagalan-kegagalan pada sistem dan kombinasinya yang menghasilkan terjadinya kejadian yang tidak diinginkan (Vesely dkk., 1981). Kegagalan yang ada pada sistem bisa disebabkan kegagalan pada komponen teknologinya (infrastruktur), kegagalan pada manusia yang mengoperasikannya (*human error*), dan kejadian-kejadian di luar sistem yang dapat mengarah pada terjadinya kejadian yang tidak diinginkan.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis kehandalan reaktor biogas dengan menggunakan

fault tree analysis (FTA) yang mencakup faktor teknis baik dari segi proses maupun dari segi komponen teknologi secara fisik dan faktor non teknis yang berhubungan dengan manusia. Dengan FTA akan diperoleh diagram yang menunjukkan aneka faktor penyebab kegagalan reaktor biogas beserta nilai kuantitatif masing-masing faktor penyebab kegagalan sehingga dapat diketahui faktor yang paling berpengaruh dalam kegagalan sebuah sistem produksi biogas, khususnya skala rumah tangga sebagai kasus yang ditinjau pada studi ini.

2. Metode Penelitian

2.1 Ruang Lingkup Spasial

Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) merupakan provinsi terkecil di Indonesia dengan luas wilayah 3.185,80 km², dengan ketinggian 100-499 mdpl, dan suhu udara rata-rata 26,1°C. Daerah Istimewa Yogyakarta terdiri dari lima kabupaten yaitu Kab. Gunungkidul, Kab. Kulonprogo, Kab. Sleman, Kab. Bantul, dan Kota Yogyakarta dengan persentase luas wilayah berturut-turut sebagai berikut: 46,63%, 18,40%, 18,04%, 15,91%, dan 1,02% (BPS, 2015).

Untuk evaluasi kehandalan reaktor biogas dengan menggunakan *fault tree analysis* telah dilakukan pengamatan dan wawancara terstruktur dengan kuesioner kepada 41 pengguna reaktor biogas BIRU dengan ukuran 6 m³ yang tidak lagi beroperasi atau beroperasi tidak optimal di DIY. Pemilihan responden dilakukan dengan *stratified purposive random sampling* dengan populasi dibagi ke dalam kelompok yang tidak saling tumpang tindih. Pengecekan komponen unit reaktor biogas dan wawancara terhadap pemilik reaktor biogas serta pihak-pihak terkait dilakukan untuk mengetahui penyebab kegagalan unit reaktor biogas tersebut.

Untuk mengetahui kondisi operasi yang mempengaruhi proses produksi gas dilakukan pengukuran laju produksi gas dan kadar VFA dengan mengikuti standard APHA (2005) pada masukan dan keluaran unit reaktor biogas BIRU ukuran 6 m³ yang masih beroperasi dengan baik di Dusun Botokan, Desa Jatirejo, Kecamatan Lendah, Kabupaten Kulonprogo dan di Dusun

Jetis, Desa Selopamiro, Kecamatan Imogiri, Kabupaten Bantul.

2.2 Sistem Biogas BIRU

Indonesia Domestic Biogas Program (IDBP) atau juga disebut Biogas Rumah (BIRU) adalah program pembangunan reaktor biogas skala rumah tangga oleh Pemerintah Belanda bekerja sama dengan Kementerian ESDM dan beberapa lembaga lokal. Jumlah total Biogas Rumah berukuran 6 m³ di Provinsi DIY adalah 1.393 unit. Peninjauan kegagalan sistem biogas BIRU dilakukan meliputi 3 kategori yaitu kegagalan proses sejak pengisian hingga pengolahan *slurry*, kegagalan komponen yang meliputi seluruh komponen fisik biogas seperti pada Gambar 1, dan faktor kesalahan manusia.

2.3 Fault Tree Analysis (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui faktor penyebab kegagalan unit reaktor biogas BIRU dan besarnya pengaruh masing-masing faktor tersebut. Dalam melakukan FTA, terdapat suatu prosedur yang berlaku secara umum (Pandey, 2005), yaitu: 1) Mendefinisikan sistem yang akan dikaji secara jelas, beserta kondisi dan batasan dari sistem tersebut; 2) Mendefinisikan *top event* yaitu kejadian/ masalah/ kegagalan yang menjadi subjek untuk dianalisis; 3) Mendefinisikan struktur *tree top* dengan menentukan kejadian-kejadian atau kondisi yang langsung menyebabkan *top event*; 4) Mengeksplorasi masing-masing cabang *tree top* secara detail, dengan menentukan kejadian dan kondisi yang

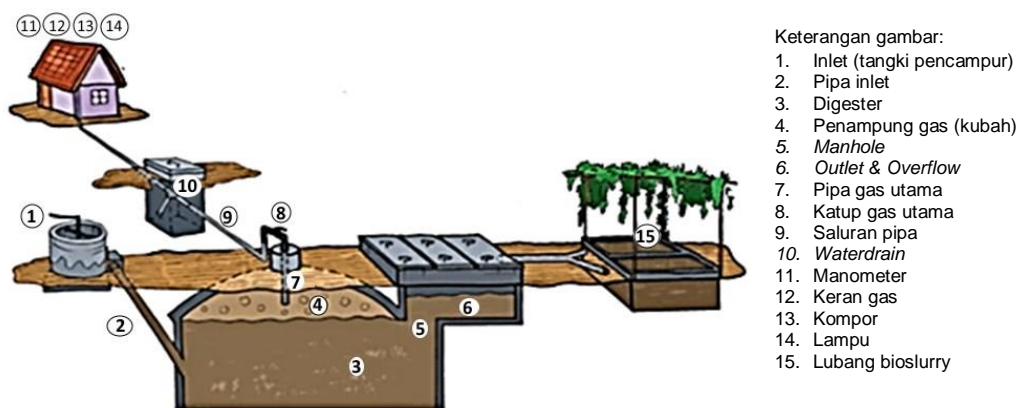
menyebabkan untuk tiap cabang di *tree top* hingga terbentuk model pohon kegagalan yang utuh; 5) Analisis dan identifikasi kombinasi kejadian-kejadian dasar yang turut berkontribusi menyebabkan terjadinya *top event*; 6) Identifikasi potensi keterkaitan satu sama lain antar kejadian-kejadian; 7) Analisis kuantitatif menggunakan data-data statistik untuk mengukur performa dari sistem; dan 8) Penarikan kesimpulan mengenai tingkat kerentanan sistem serta rekomendasi yang diperlukan untuk mengurangi resiko sistem tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

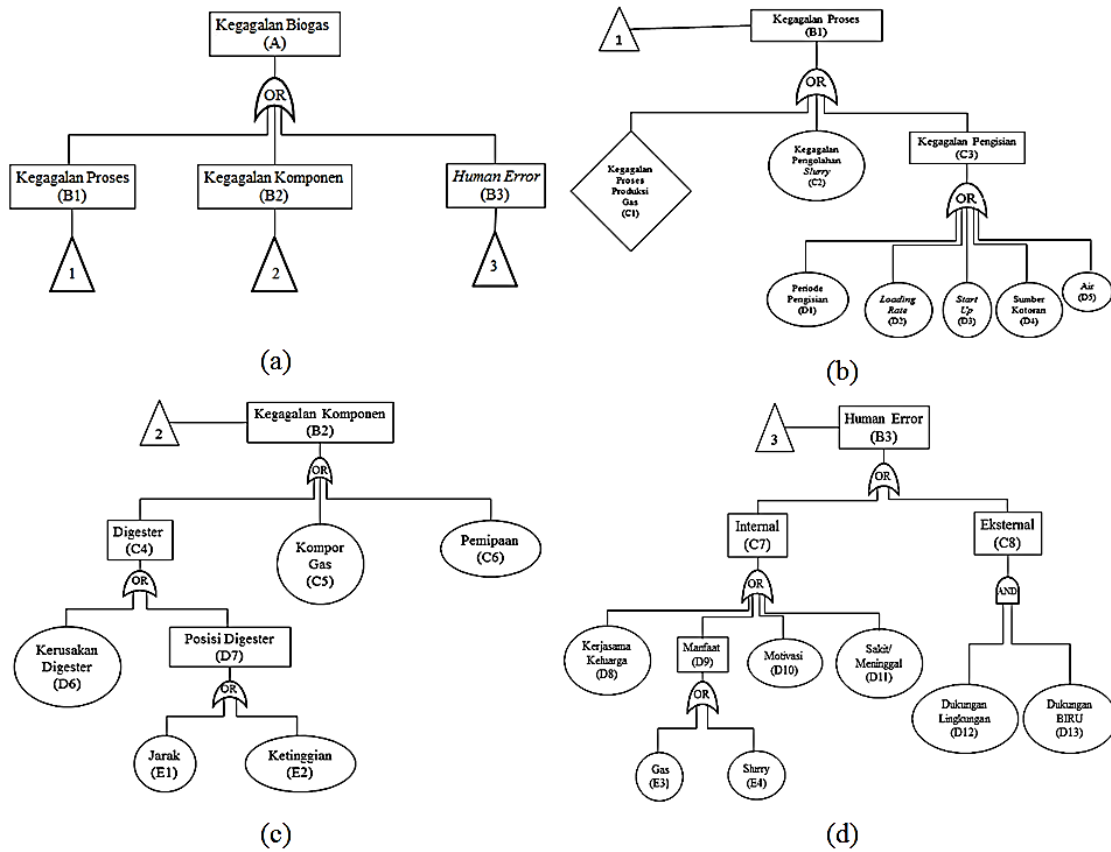
3.1 Penyusunan *Fault Tree Analysis*

Sebuah sistem biogas dinyatakan gagal apabila sudah tidak lagi difungsikan oleh pemiliknya. Hasil analisis kualitatif menunjukkan bahwa penyebab kegagalan sebuah sistem biogas terdiri dari masalah kegagalan proses, kegagalan komponen secara fisik, dan faktor manusia. Ketiga masalah tersebut kemudian menjadi *tree top* (subsistem) dalam diagram *fault tree* yang dihubungkan dengan menggunakan gerbang “OR” seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.

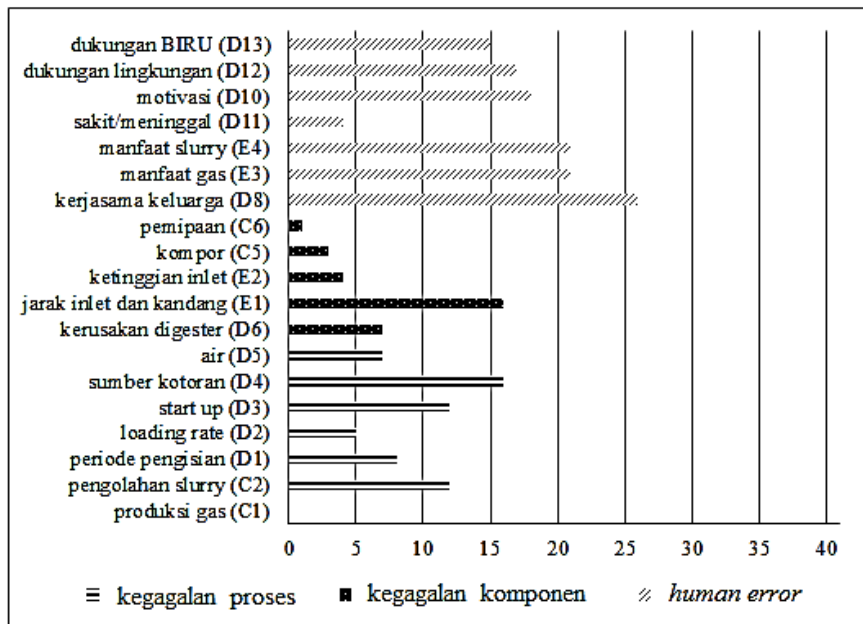
Gerbang “OR” digunakan karena kegagalan sistem biogas yang merupakan *top event* dapat terjadi apabila paling tidak terdapat satu kejadian di antara ketiga penyebab tersebut. Setiap subsistem digali lebih lanjut faktor penyebab kegagalannya hingga ditemukan penyebab paling mendasar (*minimal cut set/ MCS*). Dalam studi ini, telah ditemukan 19 MCS penyebab kegagalan reaktor biogas BIRU di DIY.



Gambar 1. Desain Biogas BIRU (Buku Panduan Konstruksi Biogas Rumah)



Gambar 2. Fault Tree Diagram (a) Sistem Biogas BIRU (b) Kegagalan Proses (c) Kegagalan Komponen (d) Human Error



Gambar 3. Jumlah Angka Kegagalan Biogas berdasarkan Minimal Cut Set Penyebab Kegagalan

Untuk dapat melakukan analisis kuantitatif terhadap FTA pada reaktor biogas perlu dilakukan pemberian *score* terhadap masing-masing MCS. Pemberian *score* dilakukan dengan

menggunakan kriteria pada Tabel 1. Jumlah angka kegagalan berdasarkan hasil pemberian *score* masing-masing MCS pada 41 unit reaktor biogas yang diteliti dapat dilihat pada Gambar 3.

Tabel 1. Kriteria Kegagalan *Minimal Cut Set* Sistem Biogas BIRU

<i>Score</i> <i>Event</i>	1	0
Proses Produksi	Terdapat masalah dalam produksi biogas yang ditunjukkan dari hasil analisis VFA dan laju produksi biogas pada unit biogas yang aktif dengan variasi <i>loading rate</i> dan waktu tinggal.	Variasi <i>loading rate</i> dan waktu tinggal pada unit biogas yang aktif menunjukkan produksi gas masih dalam rentang wajar.
Pengolahan <i>slurry</i>	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Slurry</i> tidak mengalir ke bak penampung • <i>Slurry</i> tidak dimanfaatkan • Pengguna kesulitan melakukan pengambilan <i>slurry</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Slurry</i> dimanfaatkan • Tidak ada masalah dalam pengambilan <i>slurry</i>
Periode pengisian	Pengisian dilakukan tidak teratur, lebih lama dari 3 hari sekali (4 hari sekali, bahkan seminggu sekali)	Pengisian dilakukan teratur dalam rentang 1-3 hari sekali
<i>Loading rate</i>	>160 L/pengisian	≤ 160L/pengisian
<i>Start up</i>	<ul style="list-style-type: none"> • < 7 hari • Produksi gas belum pernah berhasil • Menggunakan kotoran lama 	<ul style="list-style-type: none"> • > 7 hari • Gas sudah berproduksi dan dapat digunakan
Sumber kotoran	<ul style="list-style-type: none"> • Pengguna tidak lagi memiliki sapi • Jumlah sapi kurang • Kandang berkelompok 	Masih memiliki sapi ≥ 2 ekor
Air	Air sulit diperoleh, berbayar, atau jauh	Air mudah diperoleh
Kerusakan kompor	Terdapat kerusakan pada tumpuan api, knop/ <i>gas tap</i> , atau korosi	Tidak ada kerusakan
Pemipaan	Terdapat kerusakan pada pemipaan gas, katup gas, <i>water drain</i> , dan atau manometer	Tidak terjadi kerusakan
Kerusakan <i>digester</i>	<i>Digester</i> mengalami kerusakan baik berupa keretakan, sumbatan, bocor, atau kerusakan pengaduk	Tidak ada kerusakan pada <i>digester</i>
Jarak <i>digester</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Jarak <i>inlet</i> dengan kandang lebih dari 2 m • Posisi <i>inlet</i> sulit dijangkau 	Jarak <i>inlet</i> dan kandang kurang dari 2 m Posisi <i>inlet</i> mudah dijangkau
Ketinggian <i>digester</i>	Posisi <i>inlet</i> lebih tinggi dari kandang	Posisi <i>inlet</i> sama atau lebih rendah dari <i>inlet</i>
Kerjasama keluarga	Pengisian dan perawatan hanya dilakukan satu anggota keluarga	Pengisian dan perawatan dilakukan lebih dari satu anggota keluarga
Manfaat <i>slurry</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Kotoran sapi sebelum memiliki biogas dijual • <i>Slurry</i> tidak dimanfaatkan 	<ul style="list-style-type: none"> • Mengalami masalah dengan pengolahan kotoran sapi sebelum ada biogas • <i>Slurry</i> dimanfaatkan
Manfaat gas	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak ada kesulitan bahan bakar selain biogas • Penggunaan bahan bakar selain biogas sama sebelum dan selama penggunaan biogas 	<ul style="list-style-type: none"> • Terdapat penghematan bahan bakar selain biogas selama menggunakan gas • Bahan bakar lain sulit diperoleh
Motivasi	<ul style="list-style-type: none"> • Pemasangan bukan atas keinginan pribadi (hanya ditunjuk) • Tidak mengeluarkan biaya 	<ul style="list-style-type: none"> • Memiliki motivasi lain • Mengajukan diri • Mengeluarkan biaya untuk pembuatan biogas
Sakit/ meninggal	Pengguna biogas sakit sehingga tidak memungkinkan untuk melakukan pengisian atau meninggal	Pengguna tidak sakit atau meninggal
Dukungan lingkungan	<ul style="list-style-type: none"> • Dalam satu desa kurang dari 10 pengguna • Tidak ada penanggungjawab dari masyarakat setempat 	<ul style="list-style-type: none"> • Dalam satu desa terdapat lebih dari 10 pengguna • Ada penanggungjawab dari masyarakat setempat • Ada pertemuan rutin sesama pengguna biogas
Dukungan BIRU	<ul style="list-style-type: none"> • Tidak memiliki kontak pihak BIRU • Tidak ada/tidak mengikuti pelatihan 	<ul style="list-style-type: none"> • Masih memiliki kontak pihak BIRU • Pernah diadakan/mengikuti pelatihan

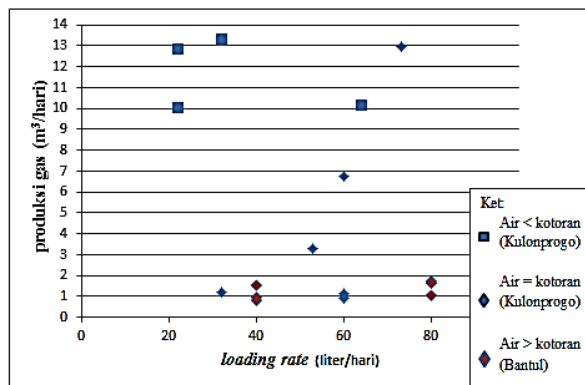
3.2 Kegagalan Proses

Kemungkinan kegagalan proses pada reaktor biogas BIRU bisa terjadi pada tiga komponen proses utama yaitu kemungkinan kegagalan proses produksi biogas, kegagalan proses pengisian biogas, dan kegagalan proses pengolahan *slurry* yang ketiganya dapat dibagi menjadi 7 MCS seperti pada Gambar 2(b).

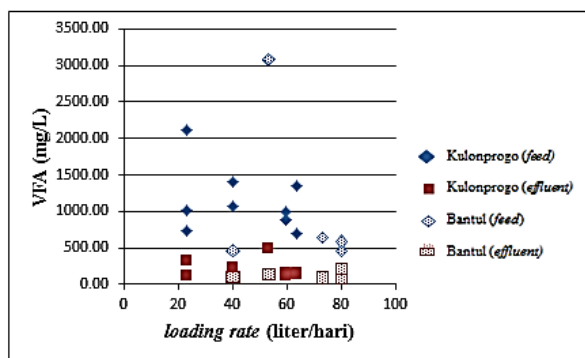
Reaktor biogas BIRU dengan kapasitas 6 m³ didesain untuk memproduksi biogas 1,6-2,4 m³/hari dengan ketentuan jumlah ternak 5-6 ekor, dengan waktu tinggal 50 hari dan *input flow rate* 80 hingga 120 liter setiap hari. Hasil pengamatan pada unit reaktor biogas BIRU yang masih aktif menunjukkan bahwa waktu tinggal bervariasi antara 75 hingga 262 hari dengan *input flow rate* 22-80 liter setiap hari dan jumlah ternak rata-rata 2 ekor.

Hasil pengukuran laju produksi gas dapat dilihat pada Gambar 4(a) yang menunjukkan nilai terendah sebesar 0,82 m³/hari. Angka tersebut sudah lebih tinggi daripada setengah nilai produksi gas yang diharapkan sehingga dapat dikatakan tidak ada masalah dalam proses produksi gas. Dalam proses pembentukan metana, bakteri metanogen bertanggungjawab dalam proses perubahan VFA menjadi metana, jika kondisi operasi tidak berjalan sebagaimana mestinya maka keberadaan bakteri metanogen akan terganggu sehingga VFA tidak terkonversi. Pada kondisi demikian kadar VFA pada *slurry* akan sama atau lebih tinggi daripada kadar VFA pada *feedstock*. Selain itu kadar VFA 4000 mg/L dapat meracuni mikroorganisme (Rein, 2007). Hasil pengukuran pada *feedstock* menunjukkan kadar VFA tertinggi 3.092 mg/L, dengan reduksi kadar VFA rata-rata 84%, dan kadar VFA *slurry* terendah 91,03 mg/L (Gambar 4(b)).

Angka probabilitas kegagalan subsistem kegagalan proses dapat diketahui dengan mensubstitusikan angka kegagalan pada Gambar 3 ke dalam persamaan probabilitas berdasarkan *fault tree diagram* pada Gambar 2(b) dengan menggunakan Persamaan 2a-2d (Vesely dkk., 1981).



(a)



(b)

Gambar 4. Hasil Pengukuran (a) Laju Produksi Biogas (b) Kadar VFA Berdasarkan Perbedaan Loading Rate

$$P(B1) = P(C1 \text{ or } C2 \text{ or } C3)$$

$$P(B1) = 1 - \{[1-P(C1)][1-P(C2)][1-P(C3)]\} \quad (2a)$$

dengan

$$P(C1) = 0 \quad (2b)$$

$$P(C2) = \frac{N(C2)}{N(S)} = \frac{7}{41} \quad (2c)$$

$$\begin{aligned}
 P(C3) &= P(D1 \text{ or } D2 \text{ or } D3 \text{ or } D4 \text{ or } D5) \\
 &= 1 - \{[1-P(D1)][1-P(D2)][1-P(D3)][1-P(D4)][1-P(D5)]\} \\
 &= 1 - \left\{ \left[1 - \frac{8}{41} \right] \left[1 - \frac{5}{41} \right] \left[1 - \frac{12}{41} \right] \left[1 - \frac{16}{41} \right] \left[1 - \frac{7}{41} \right] \right\} \\
 &= 0,747 \\
 &\dots (2d)
 \end{aligned}$$

Dengan substitusi nilai P(C1), P(C2), dan P(C3) maka Persamaan 2a dapat diselesaikan dan angka probabilitas kegagalan subsistem kegagalan proses dapat diketahui yaitu 0,79. Angka ini secara kuantitatif akan dibandingkan dengan kemungkinan kegagalan komponen dan kemungkinan kegagalan akibat *human error*. Hal ini merupakan indikasi bahwa dalam

pengoperasian reaktor biogas skala rumah tangga, motivasi pengguna adalah hal paling penting untuk menjamin keberhasilan dan keberlanjutan teknologi ini.

3.3 Kegagalan Komponen

Kemungkinan kegagalan ini terkait dengan komponen fisik unit reaktor biogas yang terdiri dari lima MCS seperti pada Gambar 2(c) yaitu kegagalan sistem pemipaan, kerusakan kompor, kerusakan *digester*, dan kesalahan pemasangan *digester* baik karena faktor ketinggian *inlet* maupun karena jarak *inlet* dengan kandang.

Persamaan probabilitas kegagalan subsistem kegagalan komponen dapat diketahui dari Gambar 2(c) dan dinyatakan dalam Persamaan 3a-3d (Vesely dkk., 1981).

$$P(B2) = P(C4 \text{ or } C5 \text{ or } C6)$$

$$P(B2) = 1 - \{[1-P(C4)][1-P(C5)][1-P(C6)]\} \quad (3a)$$

dengan

$$P(C4) = P(D6 \text{ or } D7) = 0,543 \quad (3b)$$

$$P(C5) = \frac{3}{41} \quad (3c)$$

$$P(C6) = \frac{1}{41} \quad (3d)$$

Dengan substitusi nilai $P(C4)$, $P(C5)$, dan $P(C6)$, maka Persamaan 3a dapat diselesaikan dan angka probabilitas kegagalan subsistem kegagalan komponen dapat diketahui yaitu 0,59. Jika dibandingkan dengan angka probabilitas kegagalan reaktor biogas akibat proses sebesar 0,79, maka terlihat bahwa faktor komponen fisik relatif jauh lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa infrastruktur fisik reaktor biogas BIRU sebetulnya sudah bagus, tetapi ketaatan pengguna pada *standard operational procedure* (SOP) kemungkinan belum baik, sehingga proses produksi biogas belum optimal

3.4 Human Error

Faktor penyebab kegagalan sistem biogas yang berhubungan dengan faktor manusia (*human error*) terdiri atas dua macam kemungkinan, yaitu masalah yang berkaitan dengan faktor luar/eksternal dan faktor internal pengguna biogas seperti yang terdapat pada

Gambar 2(d). Subsistem ini terdiri dari tujuh MCS yaitu kurangnya kerjasama antar anggota keluarga, pengguna kurang merasakan manfaat gas dan *slurry*, kurangnya motivasi, pengguna sakit/ meninggal, kurangnya dukungan masyarakat sekitar dan pihak BIRU.

Persamaan probabilitas kegagalan sistem biogas yang disebabkan oleh faktor *human error* dinyatakan dalam Persamaan 4a-4d (Vesely dkk., 1981).

$$P(D9) = P(E3 \text{ or } E4) = 0,76 \quad (4a)$$

$$P(C7) = P(D8 \text{ or } D9 \text{ or } D10 \text{ or } D11) = 0,95 \quad (4b)$$

$$P(C8) = P(D12 \text{ and } D13) = 0,15 \quad (4c)$$

$$P(B3) = P(C7 \text{ or } C8) = 0,96 \quad (4d)$$

Perhitungan dalam Persamaan 4a-4d menunjukkan bahwa angka probabilitas *human error* sebagai penyebab kegagalan reaktor biogas mencapai nilai tertinggi (0,96) dibandingkan faktor komponen fisik dan kegagalan proses.

4. Kesimpulan

Fault tree analysis dapat digunakan sebagai metode evaluasi kehandalan reaktor biogas skala rumah tangga secara objektif. Dalam studi ini, penyebab kegagalan reaktor biogas BIRU telah dirumuskan yang terdiri dari 19 MCS yang dapat dikelompokkan dalam tiga subsistem yaitu kegagalan proses, kegagalan komponen fisik, dan *human error* dengan angka probabilitas berturut-turut 0,79; 0,59; dan 0,96. Hasil tersebut menunjukkan bahwa faktor *human error* paling sering menjadi penyebab kegagalan reaktor biogas, sehingga proses identifikasi calon pengguna biogas perlu dilakukan dengan lebih baik dan pendampingan secara intensif kepada pengguna perlu dilakukan oleh pemrakarsa program BIRU agar kegagalan sistem biogas dapat diperkecil.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini dapat terlaksana dengan baik berkat dukungan dari DPUP ESDM DIY, pengelola BIRU program area DIY, serta masyarakat pengguna biogas BIRU.

Daftar Pustaka

- BPS, 2013, *Agricultural Statistic Base on Sensus 2013*, (<http://st2013.bps.go.id/dev2index.php/site/index>).
- BPS, 2016, *Provinsi D.I.Yogyakarta Dalam Angka 2016*, Badan Pusat Statistik DIY, Yogyakarta.
- Caceres, E.R., and Chiliquinge, B., 1986, *Experiences with Rural Biodigesters in Latin America*. In *Biogas Technology, Transfer, and Diffusion*, Elsevier, London and New York, pp 150-165.
- Cheng, S., Li, Z., Mang, H.P, Neupane, K, Wauthelet, M., and Huba, E.M., 2013, *Application of FaultTree Approach for Technical Assessment of Small-Sized Biogas Systems in Nepal*, *Applied Energy* 113, Elsevier, pp 1372-1381.
- Deng, K.Y., 1990, *China actively promote the development of biogas technology*, in *Int Conf. Biogas Technology Implementation strategies*, BORDA, Bremen, pp 242-253.
- Deublein, D., and Steinhauser, A., 2008, *Biogas from Waste and Renewable Resources*, Willey VCH Verlag GmbH&Co.KgaA, Deggendorf, Germany.
- ESDM, 2014, *Final Report Indonesia Domestic Biogas Program*.
- Fry, L.J., 1974, *Practical Building of Methane Power Plant For Rural Energy Independence*, 2nd edition, Chapel River Press, Hampshire-Great Britain.
- McCarty, P.L., 1964, *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals, Part One, Chemistry and Microbiology*, Public works 107-112.
- McCarty, P.L., 1964, *Anaerobic Waste Treatment Fundamentals, Part Two, Environmental Requirement and Control*, Public works 123-126.
- Nijaguna, B.T., 2002, *Biogas Technology*, New Age Internasional Publisher, New Delhi.
- Pandey, M., 2005, *Fault Tree Analysis*, Diktat, University of Waterloo, Waterloo.
- Putra, R.A.R.S, Liu, Z, and Lund, M, 2015, *The Impact of Biogas Technology Adoption for Farm Households- Empirical evidence from mixed crop and livestock farming systems in Indonesia*, *Renewable and Sustainable energy reviews*, Elsevier.
- Qu, W., Tu, Q., and Bluemling, B., 2013, *Which Factors are Effective for Farmer's Biogas Use Evidence from a large-scale survey in China*, *Energy Policy* 63, Elsevier, China, pp 26-33.
- Rein, D.A., 2007, *Converting Thin Stillage into Renewable Energy, Fertilizer and Recyclable Water*, *Repot Phase II-Thin Stillage*, Rein and Associates, State of Minnesota.
- Shuler, M.L., and Kargi, F., 2002, *Bioproses Engineering*, 2st ed., Prentice Hall PTR, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp. 499, 500.
- Vesely, W.E., Goldberg, F.F., Robert, N.H., and Haasl, D.F., 1981, *Fault Tree Handbook*, U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington D.C.
- Widodo, S., 2008, *Penentuan Potensial Biogas dari Sampah Organik Kota Melalui Proses Anaerobik Digestion Sistem Batch Menggunakan Inokulum dari Instalasi Biogas Sobacken Boras Swedia sebagai Salah Satu Parameter dalam Perancangan Reaktor Biogas Skala Rumah Masal*, Tesis, Jurusan Teknologi Pengelolaan dan Pemanfaatan Sampah/Limbah Perkotaan, Program studi Magister Sistem Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.