



Disertasi

**PEMURNIAN BIOGAS UNTUK MENCAPAI *PIPELINE QUALITY GAS*
SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN
YANG RAMAH LINGKUNGAN**

**NANI HARIHASTUTI
NIM 21080110500005**

**Universitas Diponegoro
Semarang**

2016

Lembar Pengesahan

PEMURNIAN BIOGAS UNTUK MENCAPAI *PIPELINE QUALITY GAS* SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN YANG RAMAH LINGKUNGAN

**NANI HARIHASTUTI
NIM 21080110500005**

Telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal 5 Februari 2016
oleh Tim Penguji Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro

Promotor

Ko-Promotor

Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA
Tanggal

Dr. Istadi, ST, MT
Tanggal

Mengetahui,

Program Pascasarjana
Universitas Diponegoro
Direktur

Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
Program Pascasarjana
Universitas Diponegoro
Plt. Ketua

Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA
NIP. 19611228 198601 1 004

Dr. Henna Rya Sunoko, Apt, MES
NIP. 19520825 197903 2 001

Lembar Pengesahan

PEMURNIAN BIOGAS UNTUK MENCAPAI *PIPELINE QUALITY GAS* SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN YANG RAMAH LINGKUNGAN

NANI HARIHASTUTI
NIM 21080110500005

Telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal 5 Februari 2016
oleh Tim Penguji Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan
Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro

Tim Penguji:

- | | |
|--------------------------------------------------------------|---------|
| 1. Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA (Promotor) | 1. |
| 2. Dr. Istadi, ST, MT (Ko-Promotor) | 2. |
| 3. Dr. Agus Kuncaka, DEA (Penguji Eksternal) | 3. |
| 4. Sugeng Ariyono, B.Eng, M.Eng, Ph.D
(Penguji Eksternal) | 4. |
| 5. Dr. Tri Retnaningsih Soeprbowati, M.App.Sc
(Penguji) | 5. |
| 6. Prof. Dr. Anies, M.Kes, PKK (Penguji) | 6. |
| 7. Dr. Henna Rya Sunoko, Apt., MES (Penguji) | 7. |

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa disertasi dengan judul “Pemurnian Biogas Untuk Mencapai *Pipeline Quality Gas* Sebagai Sumber Energi Terbarukan yang Ramah Lingkungan” merupakan hasil karya saya sendiri, yang saya susun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar doktor pada Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Diponegoro Semarang.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan disertasi yang saya kutip dari hasil karya orang lain, telah ditulis sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah yang ada.

Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian disertasi ini bukan hasil karya saya sendiri atau plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima pencabutan gelar akademik yang saya sandang dan sanksi-saksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.

Semarang, Februari 2016

Yang membuat pernyataan,

Nani Harihastuti

BIODATA PENULIS

Ir. NANI HARIHASTUTI, M.Si



Penulis dilahirkan pada tanggal 19 September 1955 di Semarang. Pendidikan yang telah ditempuh oleh penulis yaitu Sekolah Dasar di Surakarta lulus pada tahun 1968, Sekolah Menengah Pertama di SMP Negeri IV Surakarta lulus pada tahun 1971, Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri I Surakarta lulus pada tahun 1974. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, lulus pada tahun 1982. Pada tahun 2005 penulis melanjutkan pendidikan strata dua (S2) pada Program Magister Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro dan lulus pada tahun 2007. Selanjutnya penulis menempuh program doktoral pada tahun 2010 pada Program Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro hingga saat ini.

Penulis saat ini bekerja di Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri (BBTPPI) Semarang di bawah Badan Penelitian dan Pengembangan Industri Kementerian Perindustrian RI dengan jabatan Peneliti Utama. Organisasi profesi yang diikuti oleh penulis adalah Ikatan Peneliti Industri Indonesia (IKPII), Himpunan Kimia Indonesia (HKI), dan Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo).

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penyusun panjatkan kehadirat Allah SWT, atas limpahan rahmat dan karuniaNya sehingga penyusun dapat menyelesaikan disertasi yang berjudul “Pemurnian Biogas Untuk Mencapai *Pipeline Quality Gas* Sebagai Sumber Energi Terbarukan yang Ramah Lingkungan” sebagai syarat untuk memperoleh gelar doktor pada Program Doktor Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Diponegoro.

Latar belakang pemilihan judul ini adalah untuk mendapatkan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan yang bersumber dari biogas berbasis air limbah industri tahu di sentra industri tahu Sumber Rejeki yang berlokasi di Kelurahan Kartasura, Kecamatan Kartasura, Kabupaten Sukoharjo. Biogas mempunyai potensi energi cukup tinggi karena mengandung CH_4 dalam jumlah yang cukup besar. Namun demikian, di dalamnya juga terkandung komponen gas-gas pengotor (H_2S , NH_3 , CO_2 , dan H_2O) yang dapat mengurangi nilai kalori dan mencemari lingkungan, sehingga harus dihilangkan. Proses penghilangan gas pengotor dilakukan dengan integrasi proses kondensasi dan adsorpsi bertingkat menggunakan adsorben karbon aktif dan zeolit untuk memperoleh CH_4 dengan kemurnian tinggi setara dengan *pipeline quality gas*.

Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Purwanto, DEA selaku Direktur Program Pascasarjana merangkap Promotor atas arahan dan bimbingan selama menempuh pendidikan pada program Doktor Ilmu Lingkungan.

2. Dr. Henna Rya Sunoko, Apt, MES selaku Plt. Ketua Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan merangkap penguji, yang telah memberikan dukungan moril, dorongan, bimbingan, dan masukan dalam penulisan disertasi ini.
3. Dr. Istadi, ST, MT selaku ko-promotor atas waktu dan bimbingan serta masukan dalam penyelesaian disertasi ini.
4. Dr. Agus Kuncaka, DEA; Sugeng Ariyono, B.Eng, M.Eng, Ph.D; Prof. Dr. dr. Anies, M.Kes., PKK; dan Dr. Tri Retnaningsih Soeprbowati, M.App.Sc. selaku penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan disertasi ini.
5. Dr. Ir. Sudarto, MM selaku kepala BBTPPI Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penyusun untuk dapat melanjutkan pendidikan doktor.
6. Ibunda Soebanti Soeharto, suami (alm) Ir. T. Nadjib Mustafa, MT, anak-anak (Fithri Nur Purnamastuti, ST, M.Eng dan Anissa Dwi Hariyanti, ST, MM), menantu (Yuhendrizal Fahmi, ST dan Wisynu Aryo Wicaksono, SP, M.Si), dan cucu-cucuku (Syazwana dan Azalea) yang telah memberikan dukungan moral dan spiritual sejak awal studi sampai selesainya penyusunan disertasi ini.
7. Seluruh staf pengajar pada Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan Universitas Diponegoro atas ilmu yang diberikan dan seluruh staf administrasi yang telah membantu selama menempuh pendidikan doktor.
8. Rekan-rekan peneliti, Laboratorium Gas, dan Laboratorium Air di BBTPPI Semarang yang telah membantu untuk kelancaran penelitian disertasi ini.
9. Bapak Solikin dan Bapak Narto Suwito yang telah membantu dalam pengumpulan data penelitian.

10. Rekan-rekan mahasiswa Program Doktor Ilmu Lingkungan angkatan 4 atas semangat dan dukungan selama ini.
11. Semua pihak yang telah memberikan dukungan serta bantuan selama penyusunan disertasi ini.

Penyusun menyadari bahwa disertasi ini masih jauh dari sempurna. Kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Semoga disertasi ini dapat bermanfaat dalam pengembangan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi, serta bermanfaat bagi industri tahu terutama dalam memanfaatkan air limbah sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Semarang, Februari 2016

Nani Harihastuti

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul	i
Lembar Persetujuan	iii
Lembar Pengesahan	v
Halaman Pernyataan	vii
Biodata Penulis	ix
Kata Pengantar	x
Daftar Isi	xiii
Daftar Tabel	xvii
Daftar Gambar	xviii
Daftar Lampiran	xx
Daftar Singkatan	xxi
Glosari	xxiii
Abstrak	xxv
Abstract	xxvi
Ringkasan	xxx
Summary	xxxix
BAB I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Perumusan Masalah	7
C. Orisinalitas	11

D. Tujuan Penelitian.....	16
E. Manfaat Penelitian.....	17
F. Luaran Penelitian.....	17
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA.....	18
A. Air Limbah Industri Tahu.....	18
B. Energi Baru Terbarukan	19
C. Biogas.....	21
D. Pencemaran Udara.....	26
E. Pemurnian Biogas.....	29
E.1. Kondensasi	33
E.2. Adsorpsi	37
E.2.1. Kinetika Adsorpsi.....	42
E.2.2. Adsorpsi Menggunakan Karbon Aktif.....	44
E.2.3. Adsorpsi Menggunakan Zeolit.....	50
E.2.4. Regenerasi Adsorben.....	56
F. <i>Pipeline Quality Gas</i>	57
BAB III. KERANGKA TEORI, KERANGKA KONSEP DAN HIPOTESIS.....	58
A. Kerangka Teori.....	58
B. Kerangka Konsep.....	68
C. Hipotesis.....	70

BAB IV. METODE PENELITIAN.....	72
A. Tempat dan Waktu Penelitian.....	72
A.1. Tempat Penelitian	72
A.2. Waktu Penelitian	76
B. Desain Penelitian.....	76
C. Sampel Penelitian.....	79
D. Variabel Penelitian.....	80
E. Materi Penelitian.....	81
F. Teknik Pengumpulan Data.....	84
G. Alur Penelitian.....	85
H. Pengolahan dan Analisis Data.....	86
H.1. Pengolahan Data	86
H.2. Analisis Data	86
 BAB V. HASIL DAN PEMBAHASAN	 89
A. Karakteristik Air Limbah Industri Tahu.....	89
B. Karakteristik Biogas dari Air Limbah Industri Tahu	91
C. Proses Pemurnian Biogas	95
C.1. Penyisihan Kandungan Uap Air (H ₂ O).....	96
C.2. Penyisihan Hidrogen Sulfida (H ₂ S).....	106
C.3. Penyisihan Amonia (NH ₃)	113
C.4. Penyisihan Karbon Dioksida (CO ₂).....	121
D. Perubahan Konsentrasi CH ₄ Setelah Rangkaian Proses Pemurnian	127

E. Evaluasi Penggunaan Adsorben dan Perhitungan Waktu Jenuh Adsorben.....	130
F. Potensi Keberlanjutan.....	137
F.1. Tinjauan Ekonomi	135
F.2. Tinjauan Sosial	143
F.3. Tinjauan Lingkungan.....	144
G. Perbandingan Kinerja Pemurnian Biogas.....	147
H. Rekomendasi Penerapan Teknologi Pemurnian Biogas Terintegrasi	148
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN.....	151
A. Kesimpulan.....	151
B. Saran.....	152
DAFTAR PUSTAKA.....	154
LAMPIRAN.....	168

DAFTAR TABEL

	Halaman
1. Tabel 1	Komposisi kandungan gas dalam biogas 26
2. Tabel 2	Perbandingan beberapa teknologi pemurnian biogas 30
3. Tabel 3	Jenis, karakteristik, kegunaan, dan kelemahan adsorben 32
4. Tabel 4	Karakteristik biometan (<i>Renewable Natural Gas</i>) dibanding biogas 57
5. Tabel 5	Bahan-bahan kimia yang digunakan pada analisis laboratorium 82
6. Tabel 6	Karakteristik air limbah industri tahu sebelum dan setelah proses digestasi 89
7. Tabel 7	Komposisi biogas dari air limbah industri tahu..... 92
8. Tabel 8	Perbedaan komposisi biogas berdasarkan sumber bahan baku 94
9. Tabel 9	Perbandingan kinerja pemurnian biogas pada teknologi non-integrasi dan teknologi integrasi 147

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Gambar 1 Sasaran bauran energi primer Indonesia pada tahun 2025	20
2. Gambar 2 Pemakaian energi nasional	21
3. Gambar 3 Reaktor/digester anaerob biogas	25
4. Gambar 4 Karbon aktif granular	45
5. Gambar 5 Permukaan fungsional asam dan basa pada bidang basal karbon	48
6. Gambar 6 Kelompok gugus nitrogen pada permukaan karbon.....	49
7. Gambar 7 Struktur zeolit.....	53
8. Gambar 8 Diagram alir kerangka teori dalam pemecahan masalah melalui pemurnian biogas	67
9. Gambar 9 Diagram alir proses pemurnian biogas untuk mencapai <i>pipeline quality gas</i>	70
10. Gambar 10 Letak Kabupaten Sukoharjo	73
11. Gambar 11 Letak Kelurahan Surakarta.....	74
12. Gambar 12 Kelurahan Kartasura.....	75
13. Gambar 13 Titik-titik pengambilan sampel pada proses pemurnian biogas	80
14. Gambar 14 Unit peralatan penelitian pemurnian biogas.....	83
15. Gambar 15 Diagram alir tahapan penelitian	85
16. Gambar 16 Karbon aktif granul yang digunakan dalam penelitian	96
17. Gambar 17 Zeolit 13X yang digunakan dalam penelitian	96
18. Gambar 18 Grafik pengaruh laju alir terhadap konsentrasi H ₂ O dalam biogas selama proses pemurnian	99

19. Gambar 19	Grafik pengaruh laju alir terhadap konsentrasi H_2S dalam biogas selama proses pemurnian	107
20. Gambar 20	Kapasitas penyerapan gas H_2S selama proses adsorpsi 2 tahap.....	111
21. Gambar 21	Grafik pengaruh laju alir terhadap konsentrasi NH_3 dalam biogas selama proses pemurnian	114
22. Gambar 22	Kapasitas penyerapan gas NH_3 selama proses adsorpsi 2 tahap.....	118
23. Gambar 23	Grafik pengaruh laju alir terhadap konsentrasi CO_2 dalam biogas selama proses pemurnian	122
24. Gambar 24	Kapasitas penyerapan gas CO_2 selama proses adsorpsi 2 tahap	124
25. Gambar 25	Grafik pengaruh laju alir terhadap konsentrasi CH_4 dalam biogas selama proses pemurnian	128

DAFTAR LAMPIRAN

1.	Lampiran 1	Daftar Publikasi	168
2.	Lampiran 2	Matriks orisinalitas penelitian mengenai pemurnian biogas	169
3.	Lampiran 3	Cara uji konsentrasi CO ₂ pada sumber tidak bergerak (SNI 19-7117.10-2005)	190
4.	Lampiran 4	Cara uji kadar NH ₃ pada sumber tidak bergerak dengan metode indofenol menggunakan spektrofotometer (SNI 19-7117.6-2005).....	191
5.	Lampiran 5	Cara uji kadar uap air dengan metode gravimetri pada sumber tidak bergerak (SNI 19-7117.4-2005)	192
6.	Lampiran 6	Cara uji kadar hidrokarbon sebagai CH ₄ menggunakan <i>hydrocarbon vapor meter</i>	193
7.	Lampiran 7	Cara uji kadar H ₂ S dengan metode metilen biru menggunakan spektrofotometer (SNI 19-7117.7-2005).....	194
8.	Lampiran 8	Cara uji COD dengan refluks tertutup secara spektrofotometri (SNI 6989.2:2009).....	195
9.	Lampiran 9	Potensi IKM Tahu Paguyuban Pengrajin Tahu Sumber Rejeki	196
10.	Lampiran 10	Konsentrasi gas-gas komponen biogas selama proses pemurnian	197
11.	Lampiran 11	Penyerapan adsorben terhadap gas-gas pengotor	202

DAFTAR SINGKATAN

1. ESDM : Energi Sumber Daya Mineral
2. PerPres : Peraturan Presiden
3. UU : Undang Undang
4. Inpres : Intruksi Presiden
5. EBT : Energi Baru Terbarukan
6. TPA : Tempat Pembuangan Akhir
7. BTU/ft³ : British Thermal Unit per kubik feet
8. kcal/m³ : Kilo kalori per meter kubik
9. kJ/m³ : Kilo joule per meter kubik
10. LNG : *Liquid Natural Gas*
11. OLR : *Organic Loading Rate*
12. HRT : *Hydraulic Retention Time*
13. Kep-MenLH 1996 : Keputusan Menteri Negara Lingkungan Hidup tahun 1996
14. KTK : Kapasitas Tukar Kation
15. PSA : *Pressure Swing Adsorption*

16. TSA : *Temperature Swing Adsorption*
17. GRK : Gas Rumah Kaca
18. CNG : *Compression Natural Gas*
19. COD : *Chemical Oxygen Demand*
20. BOD : *Biological Oxygen Demand*
21. TSS : *Total Suspended Solid*
22. IKM : Industri Kecil Menengah

GLOSARI

1. Adsorpsi : Proses suatu bahan dalam penyerapan senyawa (cair atau gas) pada permukaannya secara adhesi
2. Adsorban : Bahan yang diserap
3. Adsorben : Zat atau bahan yang dapat menyerap zat lain sehingga menempel pada permukaannya
4. Adsorbat : Zat yang teradsorpsi (terjerap) pada permukaan zat lain
5. Amorf : Bahan yang tidak menghablur dan tidak mempunyai bentuk geometri tertentu
6. Biogas : Gas-gas yang terbentuk pada proses perombakan zat organik secara anaerob oleh mikroorganisme.
7. *Biological Oxygen Demand*: Oksigen yang dibutuhkan untuk mendegradasi zat organik secara biologi.
8. *Chemical Oxygen Demand* : Oksigen yang dibutuhkan untuk mendegradasi zat organik secara kimia.
9. Elastisitas energi : Perbandingan antara tingkat pertumbuhan konsumsi energi dengan tingkat pertumbuhan ekonomi suatu negara.
10. Gas impurities : Gas pengotor dalam biogas.

11. *Hydraulic Retention Time* : Waktu tinggal dalam reaktor yang dibutuhkan untuk proses memecah senyawa organik air limbah menjadi senyawa yang lebih sederhana sesuai yang diinginkan.
12. Kondensat : Molekul yang terkondensasi.
13. *Organic loading rate* : Beban cemaran organik yang dinyatakan dalam BOD atau COD persatuan waktu, biasanya per hari
14. *Pipeline Quality gas* : Suatu kondisi dimana biogas yang telah dibersihkan dari gas-gas pengotornya (H_2O , H_2S , NH_3 , CO_2 , dan H_2O) sehingga memiliki karakteristik/kualitas yang sama dengan gas alam.
15. Regenerasi : Proses pengaktifan kembali adsorben yang telah jenuh oleh zat pengotor.
16. *Renewable Natural Gas* : Gas Alam yang terbarukan atau disebut juga *biomethane*

ABSTRAK

Kebutuhan energi alternatif di Indonesia sudah mendesak untuk mencari dan menggunakan energi baru terbarukan (EBT), salah satu sumber energi alternatif yang terbarukan adalah biogas. Biogas merupakan salah satu sumber energi terbarukan dengan komponen penyusun utama CH_4 dan CO_2 , serta gas lain dalam jumlah relatif kecil, yaitu H_2S , NH_3 , H_2 , N_2 , dan H_2O . Untuk memaksimalkan nilai kalori biogas dan menghilangkan kerugian yang dapat ditimbulkan dari adanya gas pengotor, maka harus dilakukan proses pemurnian dengan cara menghilangkan gas-gas pengotor dari biogas. Metode kondensasi dan adsorpsi dipilih karena kemampuannya dalam pemurnian biogas, dengan adsorben yang digunakan adalah karbon aktif dan zeolit. Tujuan dari penelitian ini adalah (1) mengembangkan sumber energi terbarukan berbasis biogas dari air limbah industri tahu; (2) menghilangkan gas-gas pengotor dalam biogas melalui proses kondensasi dan adsorpsi menggunakan karbon aktif dan zeolit; (3) mengevaluasi penerapan teknologi yang terintegrasi dalam satu sistem untuk mendapatkan kemurnian CH_4 mencapai *pipeline quality gas*; dan (4) merekomendasikan penerapan teknologi pemurnian biogas yang terintegrasi pada masyarakat industri. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental melalui integrasi kondensasi dan adsorpsi bertingkat dengan adsorben karbon aktif dan zeolit. Teknik wawancara bebas juga dilakukan terhadap terhadap tokoh masyarakat dan industri tahu. Beberapa hasil penting dari penelitian ini yaitu biogas dari air limbah industri tahu mengandung CH_4 45,89%; CO_2 29,69%; H_2S 0,33%; NH_3 0,0006%; H_2O 24,10%. Kadar komponen gas dalam biogas dianalisis menggunakan metode sesuai SNI. Potensi CH_4 yang dihasilkan pada 1 sentra industri tahu sebesar 1.350.650 l/hari dengan nilai kalor sebesar 10.800.900 kkal/hari. Pemanfaatan biogas tersebut dapat mensubstitusi 100% kebutuhan solar, 100% kebutuhan LPG, dan 15,3% kebutuhan serbuk gergaji pada sentra dengan total penghematan biaya operasional sebesar Rp 3.176.840,00/hari. Proses pemurnian biogas yang dilakukan secara integrasi dapat menghasilkan CH_4 dengan kadar 99,55%, efisiensi penyisihan H_2O 99,79%; H_2S 98,98%; NH_3 98,87%; dan CO_2 97%. Dari hasil perhitungan waktu jenuh, karbon aktif akan dicapai setelah 13 jam operasi dan zeolit setelah 37 jam operasi. Waktu jenuh dihitung menggunakan neraca massa persamaan Freundlich karena adsorben dapat menyerap berbagai macam molekul gas, selain itu terjadi interaksi antara adsorben dan adsorbat. Hal yang dapat disimpulkan dari penelitian ini adalah metode pemurnian terintegrasi dapat diterapkan pada industri tahu lainnya untuk mendapatkan CH_4 dengan kemurnian tinggi setara *pipeline quality gas* yang merupakan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Kata kunci: biogas, pemurnian, air limbah tahu, *pipeline quality gas*.

ABSTRACT

The need of alternative renewable energy is urgent in Indonesia, one of the alternative renewable energy source is biogas. The main components of biogas are CH₄ and CO₂. Furthermore, it contains other gases in relatively slight quantities, such as H₂S, NH₃, H₂, N₂, and H₂O. The methane content causes biogas combustible, so that it can be used as fuel. To maximize the calorific value of biogas, it has to be purified through elimination of impurities gases, besides their existence in biogas can cause losses to human and environment. Condensation and adsorption methods were chosen due to their capability in biogas purifications, the adsorbents used were activated carbon and zeolite. The objectives of this study are (1) to develop renewable energy source based on biogas from tofu waste water; (2) to remove the impurities of biogas through condensation and adsorption processes using activated carbon and zeolite; (3) to evaluate the integrated technology application to get CH₄ purity equal to pipeline quality gas; (4) to recommend the purification technology application in industry community. The method used was experimental method through integrated process of condensation and adsorption using activated carbon and zeolite. Open interview technique was also conducted to the public figures and the tofu industries. Some important results got from the research were biogas from tofu waste water contains CH₄ as much as 45,89%; CO₂ 29,69%; H₂S 0,33%; NH₃ 0,0006%; H₂O 24,10%. The gas components were analyzed using method based on SNI. The potency of CH₄ produced in tofu industry center is 1.350.650 l/day, its calorific value is 10.800.900 kcal/day. Utilization of the biogas can substitute 100% of diesel fuel, 100% of LPG, and 15,3% of sawdust needs in entire center as operational cost savings Rp 3.176.840,00/day in total. Purification process using the integrated method can reach maximum CH₄ purity of 99,55%, the removal efficiency of H₂O was 99,79%; H₂S 98,98%; NH₃ 98,87%; and CO₂ 97%. Activated carbon will reach its saturation after 13 hours purification process and zeolite after 37 hours process by calculation. Saturation time was calculated using mass balance of Freundlich equation, because the adsorbents can adsorb many kinds of gas molecules and it was occurred interaction between adsorbent and adsorbate. It can be concluded that integrated purification method may apply in other tofu industries to get high purity of CH₄ in biogas that can be used as environmentally friendly and sustainable energy source.

Keywords: biogas, purification, tofu waste water, *pipeline quality gas*.

RINGKASAN

1. PENDAHULUAN

Pembangunan sektor ekonomi menyebabkan konsumsi energi di semua sektor tumbuh sangat pesat dengan rata-rata 4% per tahun pada kurun waktu tahun 2000-2007. Sektor industri merupakan pengonsumsi energi terbesar (Pusat Data dan Informasi ESDM, 2008). Berdasarkan Rencana Induk Konservasi Energi Nasional tahun 2005 yang diturunkan melalui Perpres No.5 tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional, UU No. 30 tahun 2007 tentang Energi, Inpres No.2 tahun 2008 tentang Penghematan Energi dan Air, ditargetkan tercapainya elastisitas energi kurang dari 1 pada tahun 2025 dan bauran energi (energi mix) yang optimal pada tahun 2025 (Perpres No. 5 tahun 2006). Elastisitas energi Indonesia sekarang mencapai 1,84 yang berarti masih sangat boros dalam mengonsumsi energi. Untuk penggunaan energi primer mix pada tahun 2025 adalah optimal dengan rincian sebagai berikut: sumber energi dari minyak bumi 20 %, batubara 33 %, gas bumi/gas alam 30 % dan yang lain 17 %. Sumber energi yang lain merupakan energi yang bersumber dari Energi Baru Terbarukan (EBT) di antaranya adalah energi nuklir, energi panas bumi, energi surya, energi air, dan energi biofuel.

Ketersediaan energi fosil yang kian waktu kian menipis, penghapusan subsidi yang menyebabkan harga minyak naik, dan kualitas lingkungan yang menurun akibat penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan, maka semakin mendesak untuk mencari sumber energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan. Biogas merupakan salah satu sumber energi alternatif terbarukan yang bersumber dari bahan organik yang didegradasi secara anaerobik oleh bakteri dalam lingkungan bebas oksigen (Soerawidjaja, 2006). Komponen utama dari biogas yaitu metana (CH_4 54-70%-vol) dan karbondioksida (CO_2 20-45%-vol), di samping itu juga terdapat gas lain yang jumlahnya relatif lebih kecil, yaitu hidrogen sulfida (H_2S), amonia (NH_3), hidrogen (H_2), nitrogen (N_2), dan uap air (H_2O). Selain berpotensi tinggi, pemanfaatan energi biogas memiliki banyak keuntungan antara lain: mengurangi efek terjadinya gas rumah kaca (GRK), mengurangi bau tidak sedap, mencegah penyebaran penyakit, menghasilkan panas dan daya (mekanis/listrik) serta memperoleh hasil samping berupa pupuk padat dan cair (Hozairi dkk., 2012). Arsana (2005) menyebutkan bahwa kegiatan yang berpotensi sebagai sumber biogas antara lain rumah potong hewan, tempat pemrosesan akhir (TPA), industri peternakan, industri makanan (tahu, tempe, susu, restoran), sampah organik pasar, limbah

domestik/tinja, pengolahan limbah industri dan sebagainya. Sadzali (2010) menyebutkan bahwa dari jumlah industri tahu yang ada di Indonesia, limbah tahu sangat berpotensi untuk dijadikan sumber biogas. Jumlah industri tahu yang ada di Indonesia mencapai 84.000 unit usaha dengan produksi lebih dari 2,56 juta ton per hari pada tahun 2010. Jumlah limbah cair yang dihasilkan oleh industri tahu sebesar 15-20 liter/kg bahan baku kedelai, dan kandungan zat organiknya sangat tinggi dengan nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) berkisar antara 7.500-14.000 mg/liter (Herlambang, 2002). Apabila air limbah tersebut dibuang langsung ke badan air, maka akan menimbulkan pencemaran lingkungan perairan, sehingga perlu dilakukan upaya pengendalian atau pemanfaatan limbah sebelum dibuang ke badan air, antara lain dengan pemanfaatan sebagai sumber energi berupa biogas, sesuai dengan UU No. 32 Tahun 2009. Pada proses degradasi secara anaerob, setiap 1 kg COD akan menghasilkan 350 liter CH₄ (Benfield dan Randall, 1980). Hal ini menunjukkan bahwa limbah cair industri tahu memiliki potensi yang sangat besar sebagai bahan baku pembentukan biogas.

Komponen terbesar dalam biogas adalah CH₄ yang berpotensi sebagai sumber energi. Selain itu, di dalamnya terdapat komponen gas-gas pengotor yang dapat menurunkan nilai kalori biogas. Untuk itu, perlu dilakukan penghilangan gas-gas pengotor seperti hidrogen sulfida (H₂S), amonia (NH₃), uap air (H₂O), dan karbon dioksida (CO₂) dengan tujuan meningkatkan nilai kalori biogas. Penghilangan gas-gas pengotor dapat dilakukan dengan berbagai teknik, antara lain adsorpsi pada padatan, absorpsi ke dalam cairan, permeabel melalui membran dan *cryogenic* (Biernat dan Samson-Brek, 2011). Namun, pada umumnya proses pemurnian biogas yang telah dilakukan hanya bertujuan untuk menyisihkan salah satu atau beberapa gas-gas pengotor saja. Dalam penelitian ini dilakukan pemurnian biogas secara menyeluruh dengan mengintegrasikan proses kondensasi dan adsorpsi bertingkat. Metode pemurnian ini dipilih karena ramah lingkungan (tidak menyebabkan permasalahan lainnya/*secondary waste*). Adsorben yang digunakan adalah karbon aktif dan zeolit. Karbon aktif dipilih sebagai adsorben karena daya reaktifnya terhadap H₂S dan NH₃, sedangkan zeolit dipilih karena reaktif terhadap CO₂.

Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan sumber energi terbarukan berbasis biogas dari limbah industri tahu, menghilangkan/mereduksi gas-gas pengotor (H₂S, NH₃, CO₂ dan H₂O) yang terkandung dalam biogas melalui integrasi proses kondensasi dan adsorpsi dengan adsorben karbon aktif dan zeolit, mengevaluasi penerapan teknologi tersebut untuk

mendapatkan kemurnian metana (CH_4) mencapai *pipeline quality gas*, dan merekomendasikan penerapan teknologi pemurnian biogas yang dihasilkan sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di salah satu industri yang telah mempunyai digester penghasil biogas yang beroperasi dengan baik yang berbahan baku limbah cair tahu pada sentra industri tahu Sumber Rejeki. Sentra industri tahu Sumber Rejeki terletak di Kelurahan Kartasura, Kecamatan Kartasura, Kabupaten Sukoharjo. Analisis laboratorium dilakukan di Balai Besar Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri (BBTPPI) di Jalan Ki Mangunsarkoro No. 6 Semarang.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental. Tujuan dari penelitian eksperimental yaitu untuk menemukan faktor-faktor sebab dan akibat dari suatu kejadian. Penelitian yang dilaksanakan adalah pemurnian biogas dari air limbah tahu yang dilakukan secara terintegrasi proses kondensasi dan adsorpsi bertingkat menggunakan karbon aktif dan zeolit.

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini mencakup variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

1. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kecepatan alir biogas (2,5 l/menit; 3,5 l/menit; 5,0 l/menit) dan waktu alir biogas (1 jam, 2 jam, 3 jam, 4 jam, 5 jam).
2. Variabel terikat yang dianalisis adalah konsentrasi gas CH_4 , CO_2 , H_2S , NH_3 , dan H_2O yang terkandung dalam biogas dari limbah tahu setelah proses pemurnian.
3. Variabel kontrol pada penelitian ini adalah berat karbon aktif (500 gr), berat zeolit (470 gr), suhu biogas ($38\text{-}39^\circ\text{C}$), tekanan biogas (141,9 mmHg), kecepatan sirkulasi air pendingin (10 l/menit), suhu air pendingin (28°C), suhu udara lingkungan ($32\text{-}34^\circ\text{C}$), dan tekanan udara lingkungan (756-758 mmHg).

Pengumpulan data dilakukan secara langsung dan tidak langsung. Data yang dikumpulkan secara langsung diperoleh dari lapangan menghasilkan data primer, yang berupa data jumlah industri tahu di sentra industri tahu Sumber Rejeki, jumlah penggunaan bahan baku kedelai, penggunaan energi untuk proses produksi tahu, kapasitas produksi tahu, potensi limbah cair tahu, karakteristik biogas awal (CH_4 , CO_2 , H_2S , NH_3 , dan H_2O), data H_2O yang

terkondensasi, jumlah parameter CO₂, H₂S, NH₃ yang teradsorpsi, dan kenaikan konsentrasi CH₄. Selain itu, ada data yang didapat dengan cara tidak langsung melalui pihak pengelola sentra industri tahu Sumber Rejeki yang menghasilkan data sekunder. Data sekunder yang didapat antara lain data-data hasil penelitian yang pernah dilakukan di sentra industri tahu Sumber Rejeki.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada sentra industri tahu Sumber Rejeki terdapat 35 produsen tahu yang tergabung dalam Paguyuban Pengrajin Tahu Sumber Rejeki, dengan total bahan baku yang digunakan sebanyak 10.630 kg kedelai setiap harinya. Dari 35 produsen tahu tersebut, baru 12 produsen tahu yang mempunyai Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL), 3 produsen di antaranya merupakan instalasi digester biogas yang berfungsi dengan baik dan telah dimanfaatkan oleh pengrajin tersebut. Sampel air limbah diambil dari salah satu IPAL yang berfungsi sebagai digester biogas yang beroperasi dengan baik, pada titik influen dan efluen IPAL dengan karakteristik sebagai berikut.

Tabel a. Karakteristik air limbah industri tahu sebelum dan setelah proses digestasi

Parameter	Influen	Efluen	Perda Jateng No. 5 Tahun 2012
BOD	4.685 mg/l	134,4 mg/l	150 mg/l
COD	7.441 mg/l	382,7 mg/l	275 mg/l
TSS	1.438 mg/l	294 mg/l	100 mg/l
pH	4,7	7,4	6,0-9,0
Suhu	45,3°C	33,2°C	38°C

Pada Tabel a tersebut dapat dilihat kualitas air limbah industri tahu pada titik influen dan efluen. Parameter yang digunakan sebagai acuan atau indikator dalam konversi menjadi biogas adalah parameter COD. Benefield dan Randall (1980) menyebutkan bahwa setiap perombakan 1 kg COD dapat menghasilkan 350 liter gas CH₄. Nilai COD yang terdegradasi dalam penelitian ini adalah nilai COD influen dikurangi nilai COD efluen, yaitu sebesar 7.058,3 mg/l. Hasil degradasi COD ini akan menghasilkan biogas yang mengandung gas CH₄ dengan konsentrasi tinggi dalam digester biogas. Air limbah tahu yang diolah dalam digester berasal dari proses pemasakan dengan debit 18 m³/hari, sehingga dari proses degradasi COD akan terbentuk gas CH₄ sebanyak 44,5 m³. Potensi energi yang terkandung dalam biogas jika setiap 1 kg CH₄ mengandung 11.900 kkal sebesar 355.457,76 kkal.

Dari Tabel tersebut juga diketahui untuk parameter BOD, pH, dan suhu pada efluen memenuhi baku mutu berdasarkan Perda Jateng No. 5 Tahun 2012 untuk industri tahu, sedangkan untuk parameter COD dan TSS masih belum memenuhi baku mutu. Tetapi karakteristik air limbah pada efluen berkurang banyak dibandingkan dengan karakteristik air limbah pada influen. Hal ini berarti proses penguraian kandungan substrat dalam air limbah industri tahu menggunakan digester biogas dapat mengurangi kandungan substrat, sehingga mengurangi beban pencemar yang diterima oleh badan air. Dengan memanfaatkan biogas yang dihasilkan dari digester berarti mengurangi CH_4 yang terlepas ke atmosfer. Gas CH_4 sendiri merupakan gas rumah kaca yang menyebabkan kenaikan temperatur bumi, sehingga laju pemanasan global dapat dihambat/dikurangi. Upaya pengonversian air limbah industri tahu menjadi biogas merupakan salah satu upaya pengendalian pencemaran lingkungan, sesuai dengan UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.

Apabila seluruh industri tahu dalam sentra industri tahu Sumber Rejeki mengalirkan air limbahnya untuk diolah dalam digester penghasil biogas, maka jumlah CH_4 yang dihasilkan setiap harinya adalah 1.350.650 l CH_4 . Maka, potensi energi keseluruhan yang dimiliki oleh sentra industri tahu tersebut adalah 10.800.900 kkal.

Air limbah industri tahu pada sentra industri tahu Sumber Rejeki diolah menggunakan digester biogas sehingga menghasilkan biogas yang kandungannya sebagai berikut: CH_4 45,89%; CO_2 29,89%; H_2S 0,33%; NH_3 0,0006%; H_2O 24,10%. Diketahui kandungan biogas yang terbanyak dalam biogas dari air limbah industri tahu pada sentra industri tahu Sumber Rejeki adalah CH_4 , CO_2 , dan H_2O . Persentase CH_4 dalam biogas ini dapat meningkat dengan cara menghilangkan kandungan-kandungan gas pengotor dalam biogas. Untuk meningkatkan kemurnian biogas, dilakukan serangkaian proses pemurnian biogas yang terintegrasi dalam satu sistem, yaitu proses kondensasi yang kemudian diikuti dengan proses adsorpsi 2 tahap. Digunakan 2 kolom adsorber untuk 2 jenis adsorben yang berbeda. Tahap pertama yaitu proses adsorpsi menggunakan adsorben karbon aktif dan tahap kedua yaitu proses adsorpsi menggunakan adsorben zeolit 13X. Adsorber karbon aktif diletakkan setelah kondensasi dimaksudkan untuk menjaga penyerapan uap air yang tidak terkondensasi. Selain itu, zeolit 13X merupakan zeolit sintetis yang banyak mengandung kapur, apabila terkena uap air dapat

menurunkan kinerjanya serta meningkatkan suhu sehingga penyerapan CO₂ oleh zeolit dapat menjadi kurang maksimal.

Prinsip dari proses kondensasi adalah terjadinya kontak antara uap air yang panas dengan media pendingin, yang mana media pendingin yang digunakan mengabsorpsi panas dari uap air sehingga uap air terkondensasi menjadi cairan (Hermana dan Boedisantoso, 2010). Temperatur biogas dari air limbah industri tahu yang digunakan dalam penelitian ini berkisar antara 38-39°C dan media pendingin dalam proses kondensasi menggunakan air dengan temperatur biogas setelah proses pemurnian adalah 32°C. Perbedaan temperatur ini menyebabkan uap air dalam biogas berubah menjadi cair. Dalam penelitian ini, proses penghilangan kandungan uap air dalam biogas dilakukan melalui proses kondensasi dengan menggunakan air sebagai media pendingin.

Jumlah uap air yang disisihkan melalui proses kondensasi dan adsorpsi karbon aktif jauh lebih besar dibandingkan dengan jumlah uap air yang disisihkan melalui adsorpsi menggunakan zeolit. Hasil ini dikarenakan adanya proses kondensasi yang dalam penelitian ini memang ditujukan untuk menyisihkan uap air. Tetapi, tingginya konsentrasi uap air dalam biogas dari air limbah industri tahu menyebabkan uap air tidak dapat disisihkan seluruhnya hanya dengan proses kondensasi saja. Adanya proses adsorpsi bertingkat membantu pengurangan konsentrasi uap air. Hasil penelitian menunjukkan semakin lama waktu alir, semakin banyak uap air yang tersisa dalam biogas. Hal ini berarti semakin lama waktu alir yang digunakan, maka semakin banyak gas yang terakumulasi dalam adsorben, rongga-rongga dalam adsorben telah tersisi oleh gas pengotor, sehingga adsorben tidak dapat menyerap gas dengan baik. Selama waktu alir 5 jam, uap air yang tersisa dalam biogas selalu lebih banyak dibandingkan dengan waktu alir yang lebih singkat. Efisiensi penyisihan uap air yang terbaik dicapai pada kecepatan alir 2,5 l/menit dengan waktu alir 1 jam, yang dapat menyisihkan 100% uap air dari biogas.

Setelah melalui proses kondensasi, biogas masuk ke dalam kolom adsorber ganda, yaitu karbon aktif kemudian zeolit. Konsentrasi gas H₂S dalam biogas sebelum proses pemurnian sebesar 0,33% atau 5.962,93 mg/Nm³ yang mana jauh melebihi baku mutu gas H₂S di udara ambien berdasarkan Kep-50/MenLH/11/1996 yaitu sebesar 0,02 ppm atau 0,03 mg/Nm³. Berdasarkan hal tersebut dan juga kerugian yang dapat ditimbulkan oleh gas H₂S, maka gas ini dihilangkan dengan menggunakan proses adsorpsi menggunakan karbon aktif dan zeolit.

Dari hasil penelitian pemurnian menggunakan karbon aktif dengan 3 variasi kecepatan alir dan 5 jam waktu alir yang digunakan, didapatkan bahwa kecepatan alir 3,5 l/menit memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan kecepatan alir lainnya. Dengan waktu alir selama 3 jam mampu menghilangkan seluruh kandungan gas H₂S melalui rangkaian proses pemurnian yang digunakan. Kapasitas adsorpsi pada kondisi tersebut adalah 6,35 mg/g karbon aktif dan 1,24 mg/g zeolit. Semakin lama waktu alir biogas, semakin banyak kandungan gas H₂S yang tersisihkan dari biogas. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan alir dan waktu alir biogas juga berpengaruh dalam penyerapan H₂S. Kecepatan alir 5 l/menit yang merupakan kecepatan paling tinggi dalam penelitian ini memiliki sisa kandungan gas H₂S paling banyak setelah rangkaian proses pemurnian dalam waktu yang sama dibandingkan dengan kecepatan alir lainnya. Pada semua variasi kecepatan alir dan waktu alir yang digunakan, karbon aktif dapat menyerap gas H₂S lebih banyak daripada zeolit. Hal ini disebabkan karena gas H₂S yang terkandung dalam biogas telah terserap lebih dulu oleh karbon aktif, sehingga setelah proses adsorpsi oleh karbon aktif, kandungan gas H₂S telah banyak berkurang.

Selain gas H₂S, gas lain yang disisihkan dari biogas adalah NH₃. Dalam penelitian ini, kandungan gas NH₃ dalam biogas dari air limbah industri tahu adalah sebesar 0,0006% atau 5,33 mg/Nm³. Baku mutu gas NH₃ pada udara ambien adalah sebesar 2 ppm atau sebesar 1,39 mg/Nm³. Kandungan gas NH₃ dalam biogas ini melebihi baku mutu, sehingga harus disisihkan karena sifat bahaya yang dimiliki pada konsentrasi tertentu. Kecepatan alir 2,5 l/menit memberikan hasil penyisihan gas NH₃ yang lebih baik dibandingkan dengan kecepatan alir lainnya. Kecepatan alir yang lebih rendah memberikan hasil penyerapan yang lebih baik dibandingkan dengan kecepatan alir yang lebih tinggi. Kecepatan alir yang lebih rendah memberikan waktu kontak yang lebih banyak antara komponen gas dengan adsorben, sehingga lebih banyak gas pengotor yang diserap. Tetapi dengan banyaknya gas yang dapat diserap menyebabkan adsorben lebih cepat mengalami penurunan kemampuan penyerapan, yang ditunjukkan pada waktu alir 5 jam konsentrasi gas NH₃ dalam biogas setelah melalui adsorpsi oleh karbon aktif paling tinggi dibandingkan dengan kecepatan alir lainnya. Penurunan kemampuan penyerapan yang lebih cepat berarti waktu untuk mencapai kejenuhan juga lebih cepat. Kapasitas adsorpsi pada kecepatan alir 2,5 l/menit dan waktu alir 5 jam adalah 0,01 mg/g karbon aktif dan 0,00 mg/g zeolit.

Gas pengotor yang selanjutnya disisihkan adalah CO₂ dengan komposisi sebanyak 29,89% atau 699.681 mg/Nm³. Jumlah ini cukup signifikan dalam kemurnian biogas, yang dapat mempengaruhi nilai kalori biogas menjadi lebih rendah dan menurunkan kualitas biogas sebagai gas pembakar, serta dapat menyebabkan terjadinya korosi pada peralatan logam. Selain itu, gas CO₂ juga merupakan Gas Rumah Kaca dan salah satu penyebab terjadinya pemanasan global di bumi berdasarkan Protokol Kyoto pada tahun 2007. Dengan serangkaian proses pemurnian dalam penelitian ini, yaitu kondensasi yang diikuti dengan proses adsorpsi menggunakan adsorben karbon aktif dan zeolit, kandungan gas CO₂ dapat menurun.

Proses adsorpsi menggunakan karbon aktif belum dapat menghilangkan keseluruhan gas CO₂ dari biogas. Pada proses adsorpsi menggunakan adsorben karbon aktif dan zeolit, penyisihan gas CO₂ yang terbaik dicapai pada kecepatan alir 5,0 l/menit dan waktu alir 2 jam. Kapasitas adsorpsi pada kondisi tersebut adalah 510,72 mg/g karbon aktif dan 344,93 mg/g zeolit. Pada kondisi tersebut, efisiensi penyisihan gabungan antara karbon aktif dan zeolit mencapai 97%, gas CO₂ yang tersisa sebesar 0,89% atau 19.436 mg/Nm³ dengan Pada ketiga variasi kecepatan alir yang digunakan, setiap peningkatan waktu alir tidak selalu menghasilkan penurunan konsentrasi CO₂ yang lebih baik. Dalam penelitian ini, semakin tinggi kecepatan alir justru menghasilkan efisiensi penyisihan CO₂ yang lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan lainnya.

Setelah melalui serangkaian proses pemurnian, konsentrasi CH₄ sebelum proses kondensasi, setelah proses adsorpsi karbon aktif, dan setelah adsorpsi menggunakan zeolit dianalisis untuk diketahui perubahan konsentrasinya. Konsentrasi CH₄ pada biogas sebelum proses pemurnian adalah 45,89%. Setelah proses pemurnian menggunakan kondensasi dan adsorpsi karbon aktif, konsentrasi CH₄ tertinggi sebesar 81,94% dicapai pada kecepatan alir 3,5 l/menit dan waktu alir 3 jam. Tetapi setelah proses pemurnian secara keseluruhan dengan ditambahkan adsorpsi menggunakan zeolit, kandungan CH₄ tertinggi sebesar 99,55% dicapai pada kondisi kecepatan alir 5,0 l/menit dan waktu alir 2 jam. Untuk menjadi *biomethane*, kandungan CH₄ minimal dalam biogas sebesar 85% (Svensson, 2014). Maka, serangkaian proses pemurnian biogas yang dilakukan dapat menghasilkan biogas dengan kualitas setara *biomethane* pada kecepatan alir 5,0 l/menit dan waktu alir 2 jam, dengan peningkatan konsentrasi CH₄ sebesar 53,66%.

Melalui perhitungan menggunakan neraca massa persamaan Freundlich, didapatkan waktu jenuh untuk kedua adsorben pada kondisi terbaik tersebut. Untuk adsorben karbon aktif, waktu jenuh untuk menyerap gas H₂S adalah 14 jam, NH₃ 130 jam, dan CO₂ 13 jam, sedangkan waktu jenuh adsorben zeolit 211 jam penyerapan H₂S, 37 jam penyerapan NH₃, dan 206 jam penyerapan CO₂. Diketahui bahwa biogas merupakan campuran gas-gas, maka penentuan waktu regenerasi adsorben diambil berdasarkan waktu jenuh terpendek dari ketiga komponen gas yang diserap tersebut, sehingga pada output proses pemurnian tidak lagi mengandung gas pengotor. Karbon aktif harus diregenerasi setelah 13 jam proses penyerapan dan zeolit harus diregenerasi setelah 37 jam proses penyerapan. Waktu jenuh zeolit lebih lama dibandingkan dengan karbon aktif karena karbon aktif berinteraksi lebih dahulu dengan gas-gas pengotor dalam proses pemurnian, sehingga gas-gas pengotor terserap lebih banyak dan menyebabkan kejenuhan karbon aktif lebih cepat tercapai.

Berdasarkan hasil penyerapan gas-gas pengotor oleh karbon aktif dan zeolit, hampir seluruh gas pengotor dapat teradsorpsi pada kondisi terbaik, yaitu kecepatan alir 5 l/menit. Efisiensi penyisihan gas H₂O sebesar 99,79%; H₂S 98,98%; NH₃ 98,87%; dan CO₂ 97%. Dibandingkan dengan penelitian-penelitian terdahulu yang memurnikan biogas dengan menggunakan metode adsorpsi, hasil penelitian ini mencapai kemurnian CH₄ yang lebih tinggi. UOP (2005) menyatakan bahwa zeolit memiliki kation terbuka dalam kisi kristal yang menarik molekul gas pengotor yang bersifat polar. Gas H₂O, H₂S, NH₃ merupakan molekul yang polar, yaitu molekul yang mengandung atom O, S, Cl, atau N, sehingga gas H₂O, H₂S, NH₃, dan CO₂ dapat terserap. Zeolit yang bersifat alkalin atau memiliki pH yang basa, dan gas H₂S, NH₃, dan CO₂ merupakan gas yang asam, sehingga gas-gas tersebut dapat terserap oleh zeolit berdasarkan teori ini. Berdasarkan ukuran molekulnya, masing-masing gas pengotor memiliki ukuran molekul H₂S 3,6 Å, NH₃ 3,26 Å, H₂O 2,75 Å, CO₂ 3,3 Å (Grande, 2011). Karena ukuran pori-pori zeolit lebih besar dari ukuran molekul gas-gas tersebut, maka gas-gas pengotor dapat tertahan dalam pori. Adsorben karbon aktif dapat menyerap gas H₂S dengan baik, dimana H₂S diubah menjadi unsur S dan air (Bansal dan Goyal, 2005; Galante *et al.*, 2012). Unsur S yang dihasilkan ini yang diadsorpsi oleh karbon aktif. Karbon aktif juga dapat menyisihkan NH₃ (Galante *et al.*, 2012).

Potensi CH₄ yang terbentuk dari air limbah yang dihasilkan oleh 35 industri sebanyak 1.350.650 l dengan nilai kalor yang terkandung sebesar 10.800.900 kkal/hari. Nilai kalori

tersebut dapat digunakan untuk menggantikan penggunaan sumber energi yang telah digunakan, yaitu solar dan serbuk kayu untuk industri dan LPG untuk keperluan rumah tangga. Solar dibutuhkan untuk menyalakan genset sebagai penggerak alat penggiling kedelai, penerangan, dan pompa air, sedangkan serbuk kayu digunakan untuk membangkitkan uap dalam proses produksi tahu. Dengan asumsi dalam perhitungan tersebut, CH₄ dalam biogas dapat menggantikan 100% kebutuhan solar, 100% kebutuhan LPG, dan 15,3% kebutuhan serbuk gergaji pada sentra tersebut. Biaya operasional yang dapat dihemat pada sentra dari penggunaan biogas sebagai bahan bakar dalam proses produksi dan rumah tangga sebesar Rp 95.305.200,00 per bulan atau Rp 3.176.840,00 per hari. Dari hasil tersebut, maka didapatkan biogas dari air limbah industri tahu yang dimurnikan merupakan sumber energi yang menguntungkan secara ekonomi karena dapat memenuhi kebutuhan energi yang besar.

Dari tinjauan sosial, teknologi pemurnian ini akan memberikan keuntungan bagi industri-industri tahu yang ada dan akan berdampak pada kesejahteraan masyarakat sekitar sentra industri tahu yang hidup dari kelangsungan produksi tahu. Aplikasi teknologi yang tidak sulit akan memudahkan pekerja industri tahu dalam operasional dan perawatannya. Sedangkan dari aspek lingkungan, rangkaian proses pemurnian biogas yang dilakukan untuk menyisahkan gas-gas pengotor di atas, dapat menghasilkan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dari segi bahan biogas, proses pemurnian, maupun hasil pemurnian.

Kebaruan dalam penelitian ini adalah mendapatkan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan melalui konsep teknologi pemurnian biogas dari air limbah industri tahu secara terintegrasi menggunakan proses kondensasi dan adsorpsi bertingkat untuk menghasilkan CH₄ dengan kemurnian tinggi setara *pipeline quality gas*.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Hal-hal yang dapat disimpulkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Air limbah industri tahu merupakan sumber bahan baku biogas yang signifikan dalam hal kualitas dan kuantitas serta keberlanjutannya. Pada sentra industri tahu Sumber Rejeki, Sukoharjo, potensi biogas dari air limbah industri tahu yang dapat dihasilkan 1.350.650 l per hari dengan potensi energi sebesar 10.800.900 kkal per hari. Setiap kg bahan baku kedelai dapat menghasilkan 127 l CH₄/kg kedelai. Biogas sejumlah

tersebut dapat menggantikan 100% kebutuhan bahan bakar solar, 100% kebutuhan LPG, dan 15,3% kebutuhan bahan bakar serbuk gergaji.

2. Proses pemurnian biogas terintegrasi melalui proses kondensasi dan adsorpsi menggunakan karbon aktif dan zeolit dapat menghilangkan kandungan gas pengotor dalam biogas. Penghilangan konsentrasi gas H_2S , NH_3 , CO_2 , dan uap air maksimum masing-masing 5.962,93 mg/Nm³; 5,33 mg/Nm³; 680.245 mg/Nm³; dan 232.320 mg/Nm³ didapatkan pada kecepatan alir dan waktu alir yang berbeda-beda.
3. Kemurnian CH_4 dalam biogas maksimum yang dapat dicapai dalam penelitian ini adalah 99,55% pada kecepatan alir 5,0 l/menit dengan waktu alir selama 2 jam. Pada kecepatan dan waktu alir tersebut, efisiensi penghilangan uap air sebesar 99,79%; penyisihan H_2S sebesar 98,98%; penyisihan NH_3 sebesar 98,87%; dan penyisihan CO_2 sebesar 97%.
4. Teknologi pemurnian biogas yang terintegrasi melalui proses kondensasi dan adsorpsi terhadap biogas dari air limbah industri tahu dapat menghasilkan biogas dengan kemurnian tinggi. Teknologi ini dapat diterapkan pada sentra industri tahu yang lain untuk mendapatkan sumber energi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan dalam kegiatan produksinya, sehingga perlu disosialisasikan kepada industri tahu.

Saran yang dapat diberikan dari penelitian ini adalah:

1. Saran bagi pengembangan IPTEK: keterbatasan dalam penelitian ini belum mencakup proses regenerasi adsorben yang telah jenuh, maka disarankan pengembangan penelitian dalam hal proses regenerasi adsorben secara kontinyu yang sesuai dengan kondisi industri kecil menengah (IKM) tahu, dengan metode pemanasan.
2. Saran bagi pemerintah: pemerintah dapat berperan sebagai koordinator dalam penerapan hasil penelitian ini pada IKM tahu, dengan mengkoordinasikan pembuatan digester biogas beserta unit pemurniannya secara berkelompok pada pengrajin tahu, sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan oleh kelompok pengrajin tahu tersebut.
3. Saran bagi industri dan masyarakat: hasil penelitian ini dapat diterapkan pada IKM tahu yang telah memiliki digester biogas dan beroperasi dengan baik. Proses pemurnian yang dilakukan dengan baik akan menghasilkan sumber energi yang optimal, ramah lingkungan dan berkelanjutan yang dapat digunakan untuk memenuhi

kebutuhan energi dalam proses produksi. Selain itu, masyarakat dapat berperan sebagai pengguna biogas sebagai bahan bakar untuk kebutuhan sehari-hari apabila produksi dan pemurnian biogas ini dilakukan secara masif dan kontinyu sehingga penggunaan sumber energi fosil dapat dikurangi.

SUMMARY

1. INTRODUCTION

Development in economic sector causes rapidly increasing in energy consumption on every sector, 4% per year on average at 2000-2007. Industrial sector is the biggest energy consumer (Data and Information Center of Energy and Mineral Resources, 2008). According to The Master Plan of National Energy Conservation 2005, which derived on Perpres No. 5/2006 on National Energy Policy, UU No. 30/2007 on Energy, Inpres No. 2/2008 on Energy and Water Saving, energy elasticity less than 1 achievement targeted on 2025 and optimal energy mix on 2025 (Perpres No. 5/2006). Indonesia energy elasticity currently reach 1,84 that means very wasteful in energy using. Optimal primary mix energy using on 2025 detailed as follows: energy source from crude oil 20%, coal 33%, natural gas 30% and other 17%. Other energy source is energy that comes from renewable energy source, such as nuclear energy, geothermal energy, solar energy, water energy, and biofuel energy.

Thinning fossil energy availability from time to time, elimination of subsidies that caused oil prices rise, and decreasing in environment quality results of fossil fuel overuse, urged to seek alternative environmentally friendly and renewable energy source. Biogas is and alternative renewable energy source derived from organic material, which is anaerobic degraded by bacteria in oxygen-free environment (Soerawidjaja, 2006). The main component of biogas is methane (CH_4 54-70%-vol) and carbon dioxide (CO_2 20-45%-vol), besides other gases in relatively small concentration such as hydrogen sulfide (H_2S), ammonia (NH_3), hydrogen (H_2), nitrogen (N_2), and moisture (H_2O). In addition to its high energy potential, biogas usage as energy has many advantages, i.e. reduce green house gases, reduce odor, prevent the spread of disease, generate heat and mechanical/electrical power, and get a byproduct in the form of solid and liquid fertilizer (Hozairi et al., 2012). Arsana (2005) mentioned some potential activities to be the sources of biogas, such as slaughterhouse, landfill, livestock industry, food industry (tofu, tempe, milk, restaurant), organic waste of market, domestic waste/feces, industrial wastewater treatment, etc. Sadzali (2010) explained that from the number of tofu industries in Indonesia, their

wastewater is very potential to be the biogas source. The number of tofu industries in Indonesia reach 84.000 unit with more than 2,56 million tons of products per day at 2010. The amount of wastewater produced was 15-20 liter/kg soybean, and the content of organic substances named COD (Chemical Oxygen Demand) was very high, ranges 7.500-14.000 mg/l (Herlambang, 2002). If it is discarded to the river without any treatment, it will cause aquatic pollution, so that it needs control or utilization efforts before the disposal. One of the efforts is utilization as energy source in the form of biogas, in accordance with UU No. 32/2009 on Environment Protection and Management. In anaerobic degradation, each kilogram COD will generate 350 l CH₄ (Benefield and Randall, 1980). This shows that tofu industry wastewater has a huge potential as biogas raw material.

The main component of biogas is CH₄, which has potency as energy source. Biogas also contains impurities gases component that can reduce its calorific value. Therefore, it needs to be purified to remove the impurities, i.e. hydrogen sulfide (H₂S), ammonia (NH₃), moisture (H₂O), and carbon dioxide (CO₂) in order to increase the calorific value. The purification can be conducted through some techniques, such as adsorption, absorption, permeable through membrane, and cryogenic separation (Biernat and Samson-Brek, 2011). However, the purification was carried to remove one or some impurities in general. In this study, the purification was conducted to remove all the impurities through integrated processes of condensation and adsorption. This method is selected as it does not make any secondary waste. The adsorbents used are activated carbon and zeolite. Activated carbon is selected because its reactivity towards H₂S and NH₃, while zeolite is reactive to CO₂.

The aims of this study are to develop renewable energy source based on biogas from tofu industry wastewater, to remove the impurities of biogas (H₂S, NH₃, CO₂ dan H₂O) through the integration process of condensation and adsorption using activated carbon and zeolite as adsorbents, to evaluate the application of this technology to get high purity of CH₄ equal to *pipeline quality gas*, and to make a recommendation of the technology application of biogas purification as a sustainable environmentally friendly renewable energy source.

2. METHODS

This study was conducted in a tofu industry which has a properly operating biogas digester at tofu industrial center Sumber Rejeki. It is located in Kartasura village, district of Kartasura, Sukoharjo regency. The laboratory analyses was in Center of Industrial Pollution Prevention Technology (CIPPT) at Jalan Ki Mangunsarkoro No. 6 Semarang.

This is an experimental study, which aim to find out the cause and effect factors of an incident. The study conducted was biogas purification through integrated method of condensation and adsorption using activated carbon and zeolite as adsorbents.

The variables of this study are independent variable, dependent variable, and control variable as follows.

1. Independent variables are biogas flow rate (2,5 l/min; 3,5 l/min; 5,0 l/min) and biogas flow time (1 hour, 2 hours, 3 hours, 4 hours, 5 hours).
2. Dependent variables are the concentration of CH₄, CO₂, H₂S, NH₃, and H₂O gases containing in biogas from tofu waste water after the purification process.
3. Control variables are mass of activated carbon (500 gr), mass of zeolite (470 gr), biogas temperature (38-39°C), biogas pressure (141,9 mmHg), circulation flow rate of cooling water (10 l/min), cooling water temperature (28°C), ambient temperature (32-34°C), and ambient pressure (756-758 mmHg).

The primary data were the number of tofu industries in Sumber Rejeki tofu industrial center, amount of soybean needs, energy usage in tofu production process, tofu production capacity, tofu waste water potency, raw biogas characteristic (CH₄, CO₂, H₂S, NH₃, and H₂O), condensed H₂O, amount of adsorbed CO₂, H₂S, and NH₃, and increase of CH₄ concentration. The secondary data obtained from Sumber Rejeki tofu industrial center management. They were result of studies that have been conducted in there.

3. RESULT AND DISCUSSION

Sumber Rejeki tofu industrial center has 35 tofu producers affiliated in Paguyuban Pengrajin Tahu Sumber Rejeki. Total number of soybean need is 10.630 kg everyday. From 35

tofu producers, 12 of them have WWTP, but only 3 producers that the WWTP is biogas digester, which are properly operate. The product of the digesters has already used by the producers. Waste water samples were taken from a properly operates WWTP in influent and effluent with the characteristics as follows.

Table a. Tofu waste water characteristics before and after digestion

Parameter	Influent	Effluent	Perda Jateng No. 5/2012
BOD	4.685 mg/l	134,4 mg/l	150 mg/l
COD	7.441 mg/l	382,7 mg/l	275 mg/l
TSS	1.438 mg/l	294 mg/l	100 mg/l
pH	4,7	7,4	6,0-9,0
Temperature	45,3°C	33,2°C	38°C

The parameter used as an indicator in conversion into biogas is COD. According to Benefield and Randall (1980), each kg of COD can produce 350 l of CH₄. Degraded COD in this study was influent COD minus effluent COD efluen equals 7.058,3 mg/l. It will produce biogas which contains high concentration of CH₄. Tofu waste water treats in the digester comes from cooking step, it is 18 m³/day. From the COD degradation, a total of 44,5 m³ CH₄ is generated. Potential energy of biogas if each kg CH₄ contains 11.900 kcal is 355.457,76 kcal.

From the table above, it can be seen that the parameters of BOD, pH, and temperature in effluent meet the quality standards based on Perda Jateng No. 5/2012 for tofu industry, while the parameters of COD and TSS are still exceeding the quality standards. But, it can be said that the characteristics in effluent are much better than in influent. The decomposition process of the substrates in tofu waste water in the digester can reduce the substrates content, that means reduce the pollution loading in the river. Utilizing the biogas generated from the digester means reduce CH₄ released into the atmosphere. CH₄ is a green house gas which causes the increase in earth temperature, utilizing it implies inhibit the global warming.

If all of the industries in Sumber Rejeki treat their waste water to the biogas digester, the amount of CH₄ generated every day is 1.350.650 l. Thus, the total of potential energy in the center is 10.800.900 kcal.

Tofu waste water at the center is treated by the biogas digester, it produced biogas containing CH₄ 45,89%; CO₂ 29,89%; H₂S 0,33%; NH₃ 0,33%; H₂O 24,10%. The most contents of biogas from tofu waste water are CH₄ and CO₂. The percentages of CH₄ and CO₂ can be increased through the elimination of the impurities. The integrated purification processes in one system are condensation followed by 2-step-adsorption using different adsorbents. First step adsorption used activated carbon, and the second used zeolite 13X. Activated carbon was placed next to condensation in order to adsorb the moisture that can't be condensed. Furthermore, zeolite 13X is a synthetic zeolite in which a lot of calcium content, if it is exposed to moisture will degrade the capability and increase the temperature so that the CO₂ adsorption by zeolite is not maximum.

The principle of condensation is the contact between high temperature of water vapor and the cooling medium that is used to absorb the heat, so that water vapor condense into liquid (Hermana and Boedisantoso, 2010). Temperature of biogas from tofu waste water used in this study ranges 38-39°C and the cooling medium used water. The biogas temperature after purification process was 32°C. This temperature difference makes the water vapor in biogas changed into liquid form.

Amount of eliminated moisture through condensation and activated carbon adsorption processes was higher than amount of eliminated moisture by zeolite adsorption. This result was caused by condensation that purposed to remove the moisture. But, the high moisture content of tofu waste water leded the incomplete removal of moisture by condensation. Adsorption in series helped in reducing moisture concentration. Result showed that the longer flow time, the more moisture remaining in biogas. It means the more flow time used, the more gases accumulated in the adsorbents, cavity in adsorbents has been filled by the impurities, so that the adsorbents could not adsorb well. During 5 hours flow time, remaining moisture was always higher than the shorter flow time. The best moisture removal efficiency was achieved at flow rate of 2,5 l/min with 1 hour flow time, which can remove 100% of moisture in biogas.

After going through the process of condensation, biogas flowed into dual absorber column, the first column contained activated carbon and the second one contained zeolite. The concentration of H₂S in biogas before the purification process was 0,33% or 5.962,93 mg/Nm³,

which far exceeded the quality standard of H₂S in ambient air based on Kep-50/MenLH/11/1996 in the amount of 0,02 ppm or 0,03 mg/Nm³. According to it, and the losses that can be caused by H₂S, it is removed through adsorption process using activated carbon and zeolite. From the purification using activated carbon with 3 variations of flow rate and 1-5 hours of flow time used, it was found that flow rate of 3,5 l/min provide better results compared to other flow rate. Three hours of flow time was able to eliminate the entire content of H₂S through a series of purification processes used. The longer the flow time of biogas, the more the H₂S content were removed from biogas. This shows that the flow rate and flow time biogas was also influential in the adsorption of H₂S. Flow rate of 5,0 l/min which is the highest flow rate in this study, had a residual content of H₂S gas at most after a series of purification processes in the same time compared to other flow rate. On all variations of the flow rate and flow time used, activated carbon can adsorb H₂S more than zeolites. This is because the H₂S gas contained in biogas has adsorbed first by the activated carbon, so that after the process of adsorption by activated carbon, H₂S gas content have been greatly reduced.

Besides H₂S, other gas removed from biogas is NH₃. In this study, NH₃ concentration in the biogas from tofu wastewater was 0,0006% or 5,33 mg/Nm³. NH₃ gas quality standard in ambient air is 2 ppm or at 1,39 mg/Nm³. NH₃ gas content in the biogas exceeded the quality standard, so it should be removed because of its nature at certain concentrations. Flow rate of 2,5 l/min gave better result in NH₃ removal than other flow rates. Shorter flow rate provided longer contact time between gas and adsorbent, so that the more adsorbed impurities. In the other hand, more adsorbed gas lead the adsorbent more quickly decreased in adsorption ability, shown in the flow time of 5 hours, NH₃ gas concentration in the biogas after going through activated carbon adsorption was the highest compared with other flow rate. Faster decrease in adsorption capability means faster time to reach saturation.

In this study, the content of CO₂ gas in biogas was 29,89% or 699.681 mg/Nm³. This amount is quite significant in the purity of CH₄, which can lower the calorific value and the quality of biogas as a gas burner, and can cause corrosion on metal equipment. In addition, CO₂ is also a greenhouse gas and one of the causes of global warming on the earth under the Kyoto Protocol in 2007. With a series of purification processes, it can be decreased.

Adsorption process using activated carbon can not eliminate all of CO₂ gas from the biogas. In the adsorption process using activated carbon and zeolite, the best elimination of CO₂ is achieved at flow rate of 5,0 l/min and flow time of 2 hours. In these conditions, the removal efficiency combination of activated carbon and zeolite reaches 97%, the remaining CO₂ gas was 0,89% or 19.436 mg/Nm³. On the three variations of the flow rate, any increase in flow time is not always result better decrease in CO₂ concentration. In this study, the higher the flow rate would produce higher CO₂ removal efficiency than the other flow rate.

After going through a series of purification processes, CH₄ concentration before the condensation process, after the process of activated carbon adsorption, and after adsorption using zeolite was analyzed to know the changes in its concentration. Concentration of CH₄ in the biogas before the refining process was 45,89%. After the purification process using condensation and activated carbon adsorption, the highest CH₄ concentration was 81,94% achieved at flow rate of 3,5 l/min and flow time of 3 hours. But after the whole purification process with the addition of adsorption using zeolite, the highest CH₄ content was 99,55%, achieved in flow rate of 5,0 l/min and flow time of 2 hours. To become biomethane, minimum CH₄ content in the biogas is 85% (Svensson, 2014). Then, a series of biogas purification process can generate biomethane quality of biogas in flow rate of 5,0 l/min and flow time of 2 hours, with an increase of 53,66% in CH₄ concentrations.

Through a calculation using mass balance of Freundlich equation, it can be calculated the saturation time of each adsorbent at its best condition. The saturation time of activated carbon in adsorption of H₂S is 14 hours, NH₃ 130 hours, and CO₂ 13 hours, while zeolite's is 211 hours of H₂S, 37 hours for NH₃, and 206 hours for CO₂. Since biogas is a mixture of gases, thus the determination of saturation time is selected based on the shortest saturation time from 3 components' saturation time. Activated carbon must be regenerated after 13 hours of adsorption process and zeolite after 37 hours of adsorption process. Zeolite's saturation time is longer than the activated carbon, because activated carbon is interacted first with the impurities, thus the impurities was adsorpted more and causing saturation time of activated carbon is reached faster.

Based on the result of impurities adsorption by activated carbon and zeolite, almost all of the impurities can be adsorpted at the best conditions, flow rate of 5 l/min. Removal efficiency of

H₂O was 99,79%; H₂S 98,98%; NH₃ 98,87%; and CO₂ 97%. In compare with the previous studies in biogas purification using adsorption method, the result of this study can reach higher CH₄ purity. UOP (2005) stated that zeolite has open cations inside the crystal lattice which attract the impurities polar molecule. The polar molecule such as H₂O, H₂S, NH₃ are polar molecules which contain O, S, Cl, or N atomic, so that H₂O, H₂S, NH₃, and CO₂ gases can be adsorpted. Zeolite is alkaline which has base pH, where H₂S, NH₃, CO₂ are acidic gases, thus the gases can be adsorpted by zeolite based on this theory. In related to the molecule size, each impurities has the molecule size of H₂S 3,6 Å, NH₃ 3,26 Å, H₂O 2,75 Å, CO₂ 3,3 Å (Grande, 2011). Since the zeolite pore size is bigger than the molecule size of the impurities, so that the impurities can be held in the pores. Activated carbon can adsorp H₂S well, which H₂S is changed to S element and water (Bansal and Goyal, 2005; Galante *et al.*, 2012). The S element produced will be adsorpted by activated carbon. It also can remove NH₃ (Galante *et al.*, 2012).

The potency of CH₄ made from tofu waste water of 35 industries is 1.350.650 l with its calorific value is 10.800.900 kcal/day. The calorific value can be used to substitute energy sources in the center, such as diesel fuel and sawdust for production use, and LPG for household needs. Diesel fuel is needed as fuel for generator set to drive the soybeans grinding tool, lighting, and water pump, while sawdust is used to generate steam in tofu production process. From the calculation, CH₄ in biogas can replace 100% of diesel fuel, 100% of LPG, and 15,3% sawdust needs in the center. Operational cost savings in the center from biogas utilization as fuel is Rp 95.305.200,00 per month or Rp 3.176.840,00 per day. From the result, purified biogas from tofu waste water is an energy source which gives benefits economically since it can fulfill the energy needs of the center.

From social review, the purification technology will bring an advantage for tofu industries in the center and will give positive impact in community welfare around the center who live from the the continuity of tofu production. The easy application of the technology will facilitate the tofu workers in its operational and maintenance. From the environmental aspect, biogas purification technology in series to remove the impurities can produce renewable energy source from its material, purification process, and purification result.

Novelty of this research is to get a renewable energy source that is environmentally friendly and sustainable through the concept of tofu waste water based-biogas purification technology in an integrated process of condensation and adsorption to produce high purity of CH₄ equivalent with pipeline quality gas.

4. CONCLUSION AND RECOMMENDATION

1. Tofu industrial waste water as the material of biogas is significant in terms of quality and quantity as well as its sustainability. In Sumber Rejeki tofu industrial center, Sukoharjo, the potential of biogas that can be generated is 1.350.650 l per day with the potential energy of 10.800.900 kcal per day. Each kg of raw material soybeans can produce 127 l CH₄/kg of soybeans. The amount of biogas can replace 100% of the diesel fuel and 20% of sawdust fuel.
2. Integrated purification process biogas through condensation and adsorption using activated carbon and zeolite can eliminate impurity gas content in the biogas. The maximum removal of H₂S, NH₃, CO₂, and moisture are 5.962,93 mg/Nm³; 5,33 mg/Nm³; 680.245 mg/Nm³; and 232.320 mg/Nm³ respectively, obtained at different flow rate and flow time.
3. The maximum CH₄ purity that can be achieved in this study was 99,55% at flow rate of 5,0 l/min with the flow time of 2 hours. At those conditions, moisture removal efficiency was 99,79%; H₂S was 98,98%; NH₃ was 98,87%; and CO₂ was 97%.
4. Integrated purification technologies of biogas through condensation and adsorption on biogas from tofu industrial waste water can produce biogas with high purity. This technology can be applied to other tofu industrial centers to get energy sources that are environmentally friendly and sustainable in its production activities, so it needs to be disseminated to the tofu industries.

Recommendations can be given from the study are:

1. For the development of science and technology: limitation in this research is not take the regeneration process of saturated adsorbent in, thus it is recommended to develop in terms

of regeneration of adsorbent continually which is suitable with the condition of small and medium tofu industries. The method is by heating the adsorbent.

2. For the government: the government can play a role as the coordinator in implementation of this research in small and medium tofu industries. They can coordinate the biogas digester construction and its purification unit in groups of tofu producers, so that the energy produced can be used by the tofu producers.
3. For industry and society: the results of this study can be applied to tofu industries whose has the biogas digester and it is well functioned. The purification process properly conducted will produce environmentally friendly and sustainable energy source from biogas to get the energy requirements in the production process. Moreover, the community may contribute as biogas user to fulfill their daily needs of energy if biogas production and purification is conducted massively and continuously, thus the fossil fuel usage can be reduce.