

# Studi Tekno-Ekonomi Pemurnian Biogas dari Limbah Domestik

Akhwari Wahyu P<sup>1,\*</sup>, Moh Fahrurrozi<sup>2</sup>, Muslikhin Hidayat<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PT Semen Baturaja

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Kimia Universitas Gadjah Mada, Indonesia

## Abstract

Biogas purification can increase the caloric value of combustion and prevent corrosion. Biogas with 95% of methane is similar to pipeline quality natural gas. The objective of this research was to study technical and economical feasibility of biogas purification and also to estimate gas production cost and scale up capacities.

This research used the secondary data from pilot plant of Biogas of Pasar Induk Buah dan Sayuran Gemah Ripah, Gamping, Sleman, Yogyakarta. This research was to obtain the production cost and scale up capacities for each biogas purification method. The sensitivity analysis was conducted to study the influence of gas composition ranged at 30-70% CH<sub>4</sub> toward the flow of absorbent to gas ratio, the price of waste changed from decreasing 100% up to increasing 100% and the finance changed ranged at 0-15% to the change of production cost.

The result showed that water scrubber was the cheapest method for scrubbing impurities. The production cost of scale up capacities compared to the price of pipeline quality natural gas which ranged at 6-10 US\$/MMBtu. The minimum capacity of economical biogas purification methods was 100 tons waste/day. The influence of gas composition ranged at 30-70% of CH<sub>4</sub> produced the L/G value change in the absorber column ranged at 0,005-0,025; the influence of waste price from decreasing and up to increasing 100% and finances from 0-15% produced the production cost change ranged at 3-8 US\$/MMBtu and 2-14 US\$/MMBtu respectively.

**Keywords:** biogas purification, domestic waste, techno-economic, bio-methane.

## Abstrak

Pemurnian biogas untuk meningkatkan nilai kalor pembakaran dan mencegah korosi. Biogas yang berkomporsi 95% CH<sub>4</sub> dapat dimanfaatkan sebagai pengganti gas alam kualitas *pipeline*. Penelitian ini bertujuan mempelajari kelayakan secara teknis dan ekonomi metode pemurnian biogas, nilai *production cost*, kapasitas *scale-up*.

Penelitian ini menggunakan data sekunder dari *pilot plant* Biogas Pasar Induk Buah dan Sayuran Gemah Ripah, Gamping, Sleman. Penelitian menghitung nilai *production cost* dan kapasitas *scale-up* untuk tiap metode pemurnian biogas. *Sensitivity analysis* yang dilakukan pada perubahan komposisi gas CH<sub>4</sub> terhadap nilai perbandingan laju solven terhadap laju biogas pada menara *absorber* dan perubahan harga limbah serta perubahan *finances*.

Secara ekonomi pemurnian biogas paling murah menggunakan *water scrubber* dengan kapasitas minimum 100 ton limbah domestik/hari. Nilai *production cost* yang lebih rendah dari harga gas alam kualitas *pipeline* berkisar antara 6-10 US\$/MMBtu. *Sensitivity analysis* menghasilkan perubahan nilai L/G berkisar 0,005-0,025; variasi harga limbah dari penurunan sampai dengan kenaikan 100% dan perubahan *finances* 0-15 %, masing-masing memberikan perubahan *production cost* antara 3-8 US\$/MMBtu dan 2-14 US\$/MMBtu.

**Kata kunci :** pemurnian biogas, limbah domestik, tekno-ekonomi, biometan

## Pendahuluan

Kebutuhan energi Indonesia yang terus meningkat dan keterbatasan persediaan energi mendorong pemanfaatan energi terbarukan. Salah satu energi terbarukan adalah biogas. Rousta (2008) meneliti sistem manajemen pengolahan limbah domestik menjadi biogas di Sobacken *Biogas Plant*, Borås, Swedia. Kapasitas limbah domestik 220.000 ton/tahun (sampah organik

12%), menghasilkan biogas 1 juta Nm<sup>3</sup>/tahun. Biogas yang dihasilkan dimurnikan dan digunakan untuk kebutuhan listrik dan panas, serta bahan bakar gas untuk kendaraan.

Di Indonesia pengolahan limbah domestik menjadi biogas telah mulai dilakukan, Sebagai contoh pengolahan sampah pasar menjadi biogas pada Pasar Induk Buah dan Sayur, Gamping, Sleman. Hasil sampah buah dan sayur sejumlah 3-4 ton/hari di musim panen dan 2-3 ton/hari pada saat tidak panen (Syamsiah dkk., 2011). Biogas yang dihasilkan masih mengandung 50 %

\* Alamat korespondensi: akhwari.wahyu@gmail.com

$\pm 0,65$  metan (Cahyari dan Putra, 2010) dan mengandung  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  yang bersifat korosif dengan adanya uap air. Pemurnian biogas diperlukan untuk mencegah korosi pada generator dan meningkatkan nilai kalor. Untuk itu diperlukan studi tekno-ekonomi pemurnian biogas dengan berbagai metode pemurnian biogas yang ekonomis untuk diaplikasikan.

Kandungan utama biogas adalah metana dan karbon dioksida. Komposisi biogas bervariasi tergantung dari jenis bahan bakunya. Gas *landfill* memiliki kadar metana sekitar 50%, sedangkan biogas dari limbah maju kadar metannya 55-75% (Deublein dan Steinhauser, 2008). Biogas dengan kadar metana tinggi dihasilkan dengan menghilangkan gas  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  dan  $\text{H}_2\text{S}$ . Pemurnian dengan beberapa proses tergantung dari *gas flowrate* dan ekonomi (Wellinger, 2011).

Komposisi biogas sebagai bahan baku untuk proses pemurnian diperoleh dari data *pilot plant* Biogas Pasar Induk Buah dan Sayuran Gemah Ripah, Gamping, Sleman (Cahyari dan Putra, 2010). Selain itu data diperoleh dari sumber lain untuk melengkapi komposisi komponen lain yang belum diketahui (Graaf dan Fendler, 2010). Komposisi biogas yang digunakan sebagai bahan baku dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1. Komposisi biogas sebagai bahan baku untuk proses pemurnian.**

Komposisi Biogas	Komponen (% vol)
Metana ( $\text{CH}_4$ )	50,7
Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )	41,3
Hidrogen sulfida ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0,3
Nitrogen ( $\text{N}_2$ )	0,2
Hidrogen ( $\text{H}_2$ )	2,0
Oksigen ( $\text{O}_2$ )	0,1
Air ( $\text{H}_2\text{O}$ )	5,5

Menurut Ryckebosch (2011) pemurnian biogas dapat dilakukan melalui dua langkah utama yaitu menghilangkan *trace components* seperti hidrogen sulfida dan uap air yang menyebabkan korosi dan menghilangkan gas karbon dioksida untuk meningkatkan nilai kalor.

Proses pemurnian biogas dapat dilakukan dengan berbagai metode pemurnian diantaranya menggunakan water scrubbing, penyerapan kimia menggunakan MEA dan DEA *pressure swing adsorption* dan *cryogenic separation*.

Pemurnian biogas menggunakan *water scrubbing* berdasarkan proses absorpsi fisis. Pemurnian ini dilakukan dengan prinsip kontak gas-cair secara arus berlawanan pada suhu lingkungan dan tekanan 8 bar. Gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  terlarut terikat di dalam cairan absorben melalui

aliran bawah kolom. Hal ini disebabkan gas  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  lebih *soluble* dibanding gas  $\text{CH}_4$  di dalam air. Air yang mengandung  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  kemudian diregenerasi ke dalam kolom *stripper*.

Pemurnian biogas menggunakan prinsip *Chemical Absorption* melibatkan reaksi kimia antara gas dan cairan absorben. Absorben yang umum digunakan adalah amina seperti mono-ethanolamin (MEA), di-ethanolamin (DEA), metil di-ethanolamin (MDEA) serta senyawa alkali seperti sodium, potassium dan kalsium hidroksida. Alasan pemilihan MEA dan DEA adalah kondisi proses yang dapat dilakukan pada suhu lingkungan dan tekanan 1 bar, namun untuk proses regenerasi absorben, proses membutuhkan panas hingga suhu  $90-120^\circ\text{C}$ . Hal ini sangat menguntungkan saat aplikasi di lapangan untuk skala kecil.

Metode *Pressure Swing Adsorption*, adsorpsi melibatkan transfer zat terlarut dalam fluida menuju permukaan dari material padat, dimana penyerapan zat terlarut akibat gaya fisis atau gaya *van der Waals* secara selektif. Bahan yang digunakan sebagai adsorben di antaranya zeolit, karbon aktif atau silika. Sebelum dilakukan metode *Pressure Swing Adsorption*, sebaiknya biogas sudah lebih dulu dihilangkan gas  $\text{H}_2\text{S}$  agar adsorben pada metode *Pressure Swing Adsorption* lebih awet karena gas  $\text{H}_2\text{S}$  bersifat racun bagi adsorben dan sulit diregenerasi. Untuk menghilangkan  $\text{H}_2\text{S}$  dapat dilakukan dengan adsorpsi menggunakan iron oxide ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Metode *Cryogenic Separation* pada pemurnian biogas melibatkan pemisahan campuran gas dengan cara kondensasi dan distilasi pada suhu sangat rendah. Proses ini memiliki keuntungan yaitu menghasilkan komponen murni dalam bentuk cairan yang mudah dipindahkan namun biaya proses ini cukup tinggi. Dalam pemisahan ini biogas ditekan hingga 40 bar suhu  $-80^\circ\text{C}$ . Kompresi ini dilakukan dari *multi-stage* dan *inter-cooling*.

Tekno-ekonomi menghubungkan antara data penelitian skala laboratorium atau *pilot plant* dengan aplikasi pabrik skala komersial yang bertujuan untuk mengidentifikasi alternatif berbagai teknologi proses biomassa yang ada dan mengetahui neraca massa dan panas, *fixed capital investment* dan *production cost* (Mahomed, 2010). Pada penelitian studi tekno-ekonomi pemurnian biogas dipelajari berbagai alternatif teknologi proses pemurnian biogas untuk evaluasi secara ekonomi dan menentukan kapasitas minimum yang ekonomis untuk diaplikasikan.

Biogas hasil pemurnian dapat digunakan sebagai pengganti gas alam kualitas *pipeline*. Untuk membandingkan dengan harga jual gas alam dalam US\$/MMBTU maka dibandingkan Production Cost/MMBTU biogas (95% CH<sub>4</sub>) dari berbagai model pemisahan pada variasi kapasitas.

Kapasitas minimum pemurnian biogas yang ekonomis berdasarkan pada nilai *production cost* pemurnian biogas yang telah mendekati harga jual gas alam dengan kualitas *pipeline*.

### Metode penelitian

Penelitian ini menggunakan data *pilot plant* Biogas Pasar Induk Buah dan Sayuran Gemah Ripah, Gamping, Sleman, kapasitas limbah 4 ton/hari dengan 12 % (w/w) *Volatile Solid* (VS) dan 86 % (w/w) *moisture* yang menghasilkan biogas dengan 50 % ± 0,65 metan dan jumlah biogas 300 Nm<sup>3</sup>/hari (Cahyari dan Putra, 2010). Asumsi *yield* biogas nilainya konstan yaitu 0,075 Nm<sup>3</sup>/kg limbah (0,6 Nm<sup>3</sup>/kgVS).

Penelitian dilakukan menggunakan *software* simulasi Aspen Plus sehingga diperoleh neraca massa, panas dan dimensi alat yang dibutuhkan pada tiap model tekno-ekonomi. *Property method* yang digunakan dalam simulasi adalah NRTL. Komponen senyawa menggunakan senyawa yang tersedia di Aspen Plus. Alat-alat pada tiap model tekno-ekonomi disimulasikan menggunakan *block diagram* yang tersedia di Aspen Plus. *Absorber*, *stripper* dan menara distilasi menggunakan *RadFrac* sedangkan *adsorption column* dan H<sub>2</sub>S *removal* menggunakan *Sep*. Modifikasi alat dilakukan pada *RadFrac* untuk pemurnian biogas menggunakan MEA dan DEA, dengan mengubah *property method* pada *block option absorber* menjadi *amines*.

Empat model tekno-ekonomi yang diajukan pada penelitian ini adalah menggunakan *water scrubbing*, penyerapan kimia menggunakan MEA dan DEA, *pressure swing adsorption* dan *cryogenic separation*. Setiap model tekno-ekonomi dihitung nilai-nilai *total installed cost* (TIC), *cost of site development* (10% TIC), *ware house and buildings* (15% TIC), *cost of contingencies and contractor's fee* (25% TIC), kemudian dihitung nilai *fixed capital investment* (FCI) (Turton dkk., 2003). FCI dari berbagai model pemisahan dibandingkan untuk memperoleh nilai yang paling murah. Harga dihitung pada tahun evaluasi. Data harga alat dan bahan baku diambil dari Peters dkk (2003), [www.matche.com](http://www.matche.com) dan [www.alibaba.com](http://www.alibaba.com). Selain nilai *fixed capital investment* juga dihitung nilai:

$$\text{Working capital} = 10\% \text{ fixed capital investment} \quad (1)$$

$$\text{Total capital investment (TCI)} = \text{fixed capital investment} + \text{working capital} \quad (2)$$

Komponen yang dihitung untuk menentukan *production cost* biogas:

#### 1. Variable costs

- *Raw material* (base case harga Rp100/kg limbah domestik)
- *Utility*
- *Plant supplies* (10% Maintenance)

#### 2. Fixed costs

- *Operating labor* (US\$250/orang/bulan)
- Menentukan jumlah *labor* yang dibutuhkan pada *fluids processing plant* membutuhkan 0,33-2 *employee-hours per 1000 kg of product* (Peters dkk., 2003) sehingga diambil 2 *employee-hours per 1000 kg of product*.
- *Maintenance* (2% FCI)
- *Insurance* (1% FCI)
- *Supervision* (10 % labor)
- *Laboratory* (10% labor)
- *Plant overhead* (50% labor)
- *Depreciation* (10% FC)
- *Finances* (base case 10% TCI)

#### 3. General Expenses

- *Administration*  
(1% (Variable Cost+Fixed Cost))
- *Research*  
(1% (Variable Cost+Fixed Cost))

$$\text{Production cost} = \text{variable costs} + \text{fixed costs} + \text{general expenses} \quad \dots (3)$$

*Sensitivity analysis* yang dilakukan dengan variasi komposisi CH<sub>4</sub> dalam biogas terhadap nilai L/G pada menara *absorber*. Variasi harga bahan baku limbah domestik pada kapasitas 100 ton/hari dan variasi bunga bank (*finances*) terhadap nilai *production cost* biogas.

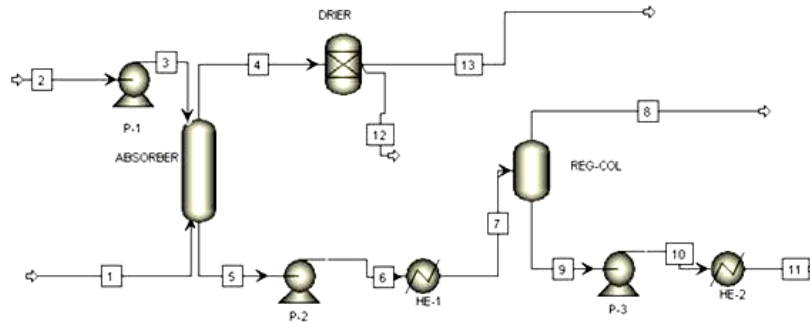
## Hasil dan Pembahasan

### Simulasi Model Tekno-Ekonomi

#### a. Pemurnian biogas menggunakan *water scrubber* (ws)

Gambar 1 menunjukkan simulasi pemurnian biogas menggunakan *water scrubber*. Biogas yang dihasilkan 95% CH<sub>4</sub> dan *yield* CH<sub>4</sub> 97%. Nilai kemurnian ini jika ditingkatkan akan menyebabkan *yield* CH<sub>4</sub>





Gambar 2. Simulasi pemurnian biogas menggunakan DEA atau MEA.

Tabel 3. Dimensi absorber dan kolom regenerasi pemurnian biogas menggunakan MEA (30% w/w).

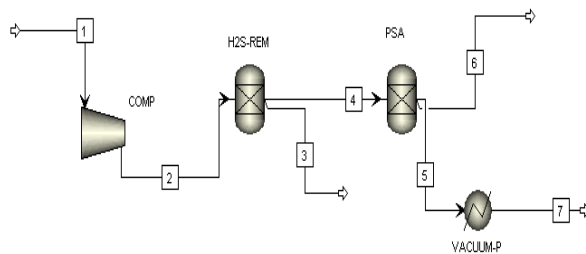
Kapasitas (ton/hari)	Jumlah Biogas (Nm <sup>3</sup> /hari)	Absorber		Kolom Regenerasi	
4	300	D = 5,40 cm	H = 1,44 m	D = 1,36 m	H = 2,72 m
20	1.500	D = 12,12cm	H = 2,90 m	D = 2,65 m	H = 5,30 m
100	7.500	D = 27,12cm	H = 5,50 m	D = 3,00 m	H = 10,96 m
500	37.500	D = 60,62cm	H = 11,35 m	D = 3,00 m	H = 20,65 m
2500	187.500	D = 100,32cm	H = 22,54 m	D = 3,00 m	H = 28,56 m

D=diameter, H=tinggi

Tabel 4. Dimensi absorber dan kolom regenerasi pemurnian biogas menggunakan DEA (30 % w/w).

Kapasitas (ton/hari)	Jumlah Biogas (Nm <sup>3</sup> /hari)	Absorber		Kolom Regenerasi	
4	300	D = 6,14 cm	H = 1,64 m	D = 2,00 m	H = 4,00 m
20	1.500	D = 13,72cm	H = 3,15 m	D = 3,00 m	H = 9,18 m
100	7.500	D = 30,68cm	H = 5,92 m	D = 3,00 m	H = 15,52 m
500	37.500	D = 67,68cm	H = 11,75 m	D = 3,00 m	H = 25,67 m
2.500	187.500	D = 100,73cm	H = 23,12 m	D = 3,00 m	H = 33,54 m

D=diameter, H=tinggi



Gambar 3. Simulasi pemurnian biogas menggunakan pressure swing adsorption.

Tabel 5. Dimensi kolom adsorpsi pemurnian biogas menggunakan pressure swing adsorption

Kapasitas (ton/hari)	Jumlah Biogas (Nm <sup>3</sup> /hari)	Kolom Adsorpsi
4	300	D = 6,50 cm, H = 20 cm
20	1.500	D = 11,76 cm, H = 25 cm
100	7.500	D = 20,53 cm, H = 41,96 cm
500	37.500	D = 35,10 cm, H = 70,21 cm
2.500	187.500	D = 60,03 cm, H = 100,2 cm

D=diameter, H=tinggi

Pemurnian biogas menggunakan *pressure swing adsorption* memiliki keuntungan yaitu proses tidak butuh panas dan dapat dioperasikan pada kapasitas kecil. Di Swedia, pemurnian biogas menggunakan *pressure swing adsorption* telah dilakukan pada berbagai kapasitas dari 360–8.500 Nm<sup>3</sup>/hari (Jönsson, 2004).

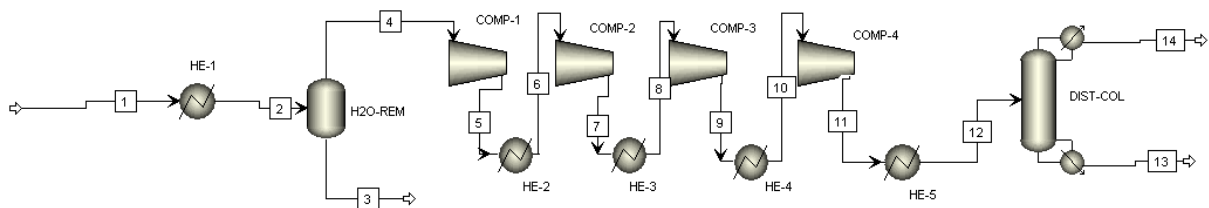
d. Pemurnian biogas menggunakan *cryogenic separation* (CS)

Gambar 4 menunjukkan simulasi pemurnian biogas menggunakan *cryogenic separation*. Kemurnian biogas yang dihasilkan adalah 95% CH<sub>4</sub> dengan *yield* CH<sub>4</sub> 98%. Kemurnian biogas ini jika ditingkatkan lagi akan menyebabkan *yield* CH<sub>4</sub> turun sehingga kehilangan gas CH<sub>4</sub> bertambah. Pemurnian biogas menggunakan *cryogenic separation* masih sebatas skala penelitian dan *pilot plant*. Hal ini disebabkan proses ini membutuhkan alat yang banyak dan kondisi operasi dengan suhu yang sangat rendah dan tekanan tinggi. Pada Tabel 6 ditampilkan dimensi menara distilasi yang dibutuhkan untuk memurnikan biogas hingga mencapai 95 % CH<sub>4</sub>.

Tabel 6. Dimensi menara distilasi pemurnian biogas menggunakan *cryogenic separation*.

Kapasitas (ton/hari)	Jumlah Biogas (Nm <sup>3</sup> /hari)	Menara Distilasi
4	300	D = 0,30 m, H = 1,5 m
20	1.500	D = 0,50 m, H = 2,5 m
100	7.500	D = 1,1 m, H = 5,2 m
500	37.500	D = 1,6 m, H = 8,2 m
2.500	187.500	D = 2,15 m, H = 10,4 m

D=diameter, H=tinggi



Gambar 4. Simulasi pemurnian biogas menggunakan cryogenic separation.

**Analisis Teknis Pemurnian Biogas**

Dalam menganalisis secara teknis proses pemurnian biogas, maka dibandingkan kondisi operasi, yield dan kemurnian CH<sub>4</sub> yang dapat dilihat pada Tabel 7. Dari Tabel 7 terlihat bahwa secara teknis pemurnian biogas menggunakan metode water scrubber, chemical absorption (menggunakan MEA dan DEA), pressure swing adsorption dan cryogenic separation dapat mencapai kemurnian CH<sub>4</sub> minimal 95% sehingga biogas dapat digunakan sebagai pengganti gas alam dengan kualitas pipeline.

Tabel 7. Perbandingan kondisi operasi, yield dan kemurnian CH<sub>4</sub> pada berbagai metode pemurnian biogas.

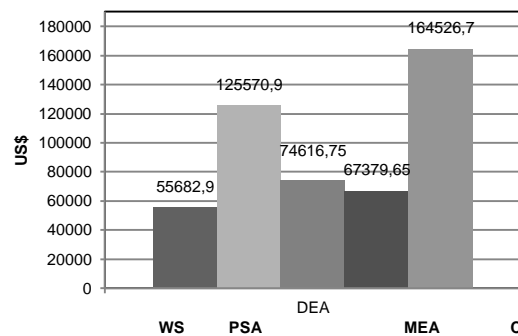
Metode	Kondisi Operasi	Yield CH <sub>4</sub> (%)	Kemurnian CH <sub>4</sub> (%)
Water Scrubber (WS)	Absorber: 8 bar, 35°C Stripper: 2 bar, 35°C Flash Tank: 2 bar, 35°C	97	95
Pressure Swing Adsorption (PSA)	Adsorpsi: 5 bar, 35°C Desorpsi: 0,1 bar, 35°C	98	95
Chemical Absorption - MEA (30% w/w)	Absorber: 1 bar, 35°C Regeneration Column: 1 bar, 95°C	99	95
Chemical Absorption - DEA (30% w/w)	Absorber: 1 bar, 35°C Regeneration Column: 1 bar, 100°C	99	95
Cryogenic Separation (CS)	Menara Distilasi: 40 bar, -90°C	98	95

**Analisis Ekonomi Pemurnian Biogas**

Setiap model tekno ekonomi pemurnian biogas dihitung nilai fixed capital investment. Gambar 5 menunjukkan perbandingan fixed capital investment pada berbagai metode pemurnian biogas yaitu water scrubber (WS), chemical absorption-MEA, chemical absorption-DEA, pressure swing adsorption (PSA) dan cryogenic separation (CS) pada kapasitas limbah domestik 4 ton/hari.

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa harga fixed capital investment (FCI) yang paling murah adalah pemurnian biogas menggunakan water

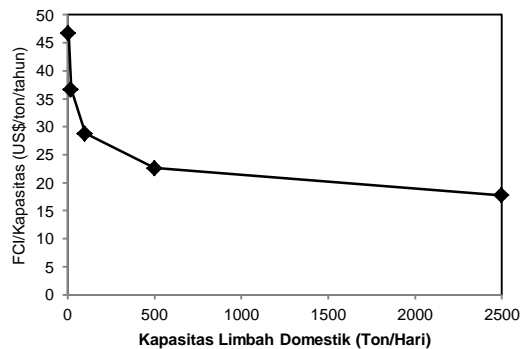
scrubber namun membutuhkan banyak air dalam pengoperasiannya. Water scrubber menggunakan suhu lingkungan 35°C dan tidak membutuhkan panas yang banyak namun menggunakan tekanan tinggi hingga 8 bar dan untuk flash tank dan stripper dengan tekanan 2 bar. Pada kapasitas 4 ton/hari, walaupun nilai FCI water scrubber paling murah namun secara teknis sulit untuk diaplikasikan karena dimensi absorber yang kecil (D = 5,70 cm; H = 1,52 m). Untuk kapasitas kecil 4-20 ton/hari, lebih cocok digunakan pemurnian biogas menggunakan pressure swing adsorption karena bisa digunakan untuk kapasitas di bawah 20 ton/hari (Jönsson, 2004).



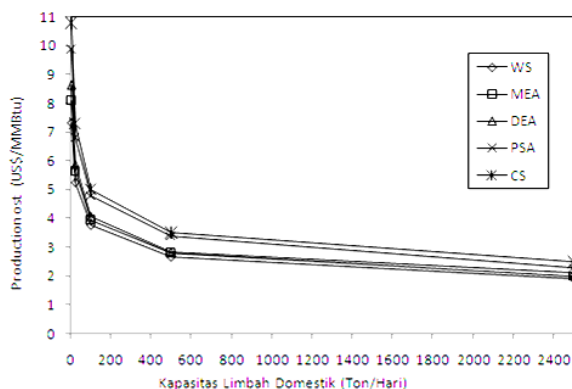
Gambar 5. Perbandingan fixed capital investment pada kap. limbah 4 ton/hari.

Perhitungan nilai fixed capital investment (FCI) juga melibatkan proses produksi biogas yang diperoleh FCI produksi biogas/kapasitas untuk berbagai kapasitas scale-up limbah domestik dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar 6 menunjukkan bahwa peningkatan jumlah kapasitas limbah diatas 100 ton/hari menyebabkan penurunan kurva FCI/kapasitas yang tidak begitu signifikan.

Perhitungan kemudian dilanjutkan untuk memperoleh Nilai FCI/kapasitas dan nilai total capital investment (TCI)/yield methane terhadap kapasitas scale-up dari 4-2.500 ton/hari untuk proses produksi dan berbagai metode pemurnian biogas yaitu water scrubber (WS), chemical absorption-MEA, chemical absorption-DEA, pressure swing adsorption (PSA) dan cryogenic separation (CS) sehingga diperoleh nilai production cost seperti terlihat pada Gambar 7.



Gambar 6. Hubungan FCI/kapasitas limbah domestik terhadap kapasitas scale-up limbah.



Gambar 7. Nilai *production cost* berbagai metode pemurnian biogas terhadap kapasitas limbah domestik.

Harga gas alam berkisar antara 10 US\$/MMBtu (www.indexmundi.com, tanggal akses 12 Desember 2012). Pada Gambar 7 dapat dilihat nilai *production cost* dengan kapasitas limbah diatas 20 ton/hari ( $7500\text{Nm}^3$  biogas/hari), sudah terdapat dalam *range* harga gas alam. Sehingga dapat disimpulkan kapasitas minimum yang ekonomis untuk pemurnian biogas adalah 100 ton/hari ( $7.500\text{Nm}^3$  biogas/hari).

Nilai *sensitivity analysis* dari variasi komposisi gas 30-70 %  $\text{CH}_4$  menghasilkan perubahan nilai L/G pada menara *absorber* berkisar antara 0,005-0,025; variasi harga limbah dari penurunan 100% sampai dengan kenaikan 100% menghasilkan perubahan nilai *production cost* antara 3-8 US\$/MMBtu; variasi perubahan *finances* 0-15 % menghasilkan perubahan nilai *production cost* antara 2-14 US\$/MMBtu.

### Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan diperoleh kesimpulan bahwa pemurnian biogas hingga komposisi 95 %  $\text{CH}_4$  (setara gas alam kualitas *pipeline*), akan bernilai ekonomis jika kapasitas limbah minimum 100 ton/hari. Metode

pemurnian biogas yang paling murah adalah menggunakan *water scrubber*. Nilai *sensitivity analysis* yang paling dominan adalah nilai variasi komposisi gas 30-70 %  $\text{CH}_4$  dan variasi *finances* antara 0-15 %.

### Daftar Lambang

C	: Annual Cash Flow
C/N	: Rasio Karbon/Nitrogen
COD	: Chemical Oxygen Demand (mg/l)
CS	: Cryogenic Separation
DEA	: Di Ethanol Amine
DCFRR	: Discounted Cash Flow Rate of Return
FCI	: Fixed Capital Investment, US\$
HRT	: Hydraulic Retention Time (hari)
L/G	: Perbandingan Laju Solven (L, $\text{m}^3/\text{jam}$ ) terhadap Laju Biogas (G, $\text{m}^3/\text{jam}$ )
MEA	: Mono Ethanol Amine
MMBtu	: Million Metric British Thermal Units
NPV	: Net Present Value
PSA	: Pressure Swing Adsorption
SV	: Salvage Value
TS	: Total Solid (mg/l)
V Digester	: Volum Digester ( $\text{cm}^3$ )
V $\text{H}_2\text{S}$ -Rem	: Volum Kolom Adsorpsi Menggunakan Iron Oxide ( $\text{cm}^3$ )
V PSA	: Volum Kolom Adsorpsi Menggunakan Pressure Swing Adsorption ( $\text{cm}^3$ )
VS	: Volatile Solid (mg/l)
WS	: Water Scrubber
WC	: Working Capital, US\$

### Daftar pustaka

- Cahyari K, and Putra, R. A., 2010, Design of Biogas Plant From Fruit Market Waste in Indonesia
- Cavenati, S.; Grande, C.A.; Rodrigues, A.E, 2004, Adsorption Equilibrium of Methane, Carbon Dioxide and Nitrogen on Zeolite 13X at High Pressures. J. Chem. Eng. Data, Vol. 49, No. 4, (June 2004), pp 1095-1101, ISSN 0021-9568.
- Deublein D., and Steinhauser A., 2008, Biogas From Waste and Renewable Resources an Introduction. Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA
- Graaf D., dan Fendler R., 2010, Biogas Production in Germany. Federal Environment Agency. Dessau-Rosslau, p 29
- Jönsson O, 2004, Biogas Upgrading dan Use as Transportation Fuel, Swedish gas Centre, Malmoe, Sweden

- Mahomed, 2010, Design and Development Software Tool For Techno Economic Assessment.
- Peters, M.S., Timmerhaus, K.D., and West, R.E., 2003, Plant Design and Economics for Chemical Engineering, 5 ed., McGraw-Hill Companies, Inc., New York.
- Rousta K, 2008, Municipality Solid Waste Management : An Evaluation on the Boras System, University College of Boras, Sweden
- Ryckebosch E., Drouillon M., dan Vervaeren H., 2011. Techniques For Transformation Biogas To Biomethane, Biomass and Bioenergy Journal, Belgium
- Syamsiah S dkk, 2011, Final Report Demonstration Project Biogas from fruit wastes in Indonesia
- Turton, R., Bailie, R.C., Whiting, W.B., Shaeiwitz, J.A. 2003. Analysis, synthesis, and design of chemical processes. 2nd ed. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey.
- Wellinger, A., Lindberg, A., 2001, Biogas Upgrading and Utilisation, IEA Bioenergy  
[www.alibaba.com](http://www.alibaba.com) tanggal akses 15 April 2012  
[www.matche.com](http://www.matche.com) tanggal akses 15 April 2012  
[www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com) tanggal akses 12 Desember 2012