Penurunan CO_2 Biogas dengan Metoda Adsorpsi Menggunakan Zeolit Alam

Tina Mulya Gantina[1] dan Dea Farhani[1]
Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung,Indonesia
email : tina.gantina@polban.ac.id

Abstrak

Biogas adalah suatu bentuk energi alternatif yang dapat diperoleh dari proses degradasi anaerobik bahan organik. Kehadiran karbondioksida (CO_2) yang cukup tinggi dalam biogas perlu diturunkan bahkan kalo bisa dihilangkan sehingga konsentrasi metana (CH_4) biogas meningkat, yang berarti nilai kalor dan kualitas biogas meningkat. Terdapat beberapa metode pemurnian biogas, antara lain penyerapan fisikokimia, pressure swing adsorption (PSA), pemisahan membran, pemisahan kriogenik, dan penggunaan teknologi biologis, yang pada setiap metoda mempunyai karakteristik masing-masing. Pada penelitian ini diusulkan penurunan CO_2 biogas dilakukan dengan menggunakan metode adsorpsi dengan menggunakan bahan zeolit alam, yang diharapkan dapat menghasilkan efektivitas pemisahan CO_2 biogas yang cukup besar. Target khusus dari penelitian ini adalah mengetahui efektivitas zeolit dalam pengurangan gas CO_2 biogas dengan parameter operasi seperti laju biogas. Metoda penelitian, meliputi: disain dan pembuatan alat kolom zeolit, penyiapan dan uji kebocoran alat, penyiapan sample biogas, penentuan komposisi biogas awal, uji coba absorpsi CO_2 biogas, penampungan dan penentuan komposisi biogas hasil uji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa zeolit alam dapat digunakan sebagai adsorben untuk memisahkan kandungan CO_2.dari biogas, dengan persentase adsorpsi terbesar 36,38% terjadi pada kolom 120 cm dengan laju alir biogas sebesar 1,1 liter/menit sedangkan pada kolom 60 cm yaitu 32,05 %. Persentase peningkatan CH_4 terbesar yaitu sebesar 31,57% terjadi pada kolom 120 cm dengan laju alir biogas sebesar 1,3 liter/menit, sedangkan pada kolom 60 cm dengan laju alir biogas yang sama yaitu 24.82%. Efektivitas zeolit terbesar pada kolom 120 cm yaitu 99,72%, sedangkan pada kolom 60 cm sebesar 87,85%.

Kata Kunci: Zeolit alam, adsorpsi, efektivitas, karbon dioksida, metana

I. PENDAHULUAN

Biogas adalah salah satu bioenergi yang termasuk produk energi terbarukan. Sesuai dengan Rencana Induk Penelitian (RIP) Jurusan Teknik Konversi Energi-Politeknik Negeri Bandung periode tahun 2020-2024, pengkajian dan pengembangan produksi biogas juga merupakan salah satu topik penelitian yang masuk ke dalam road map penelitian Kelompok Bidang Keahlian (KBK) Manajemen dan Konservasi Energi.

Secara umum, komposisi biogas terdiri dari 50-70% metana (CH_4), 25-45% karbon dioksida (CO_2), sisanya merupakan gas dalam jumlah kecil termasuk H2S [1] [2] [3]. Komponen utama dengan kandungan energi yang relatif tinggi adalah CH_4 yang dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran. Namun, persentase metana biogas relatif rendah karena terdapat gas CO_2 yang cukup tinggi. Hal ini dapat menjadi masalah terutama jika digunakan sebagai bahan bakar genset atau mesin pembakaran dalam, karena sifat CO_2 yang dapat mengurangi nilai panas, mengganggu proses pembakaran, dan bersifat korosif.

Terdapat beberapa metode pemurnian biogas, antara lain penyerapan fisikokimia, pressure swing adsorption (PSA), pemisahan membran, pemisahan kriogenik, dan penggunaan teknologi biologis [4][19][24]. Karena metode pemurnian ini memiliki karakteristik masing-masing, teknologi yang sesuai harus dipilih dengan mempertimbangkan efisiensi pemurnian, kondisi operasional, investasi, dan biaya perawatan [5]. PSA dan wet scrubbing atau water scrubbing sangat populer. Namun, proses PSA lebih kompleks dibandingkan dengan water scrubbing [6], karena terdapat kesulitan operasi PSA dalam mengendalikan suhu dan tekanan tinggi sehingga membatasi penerapan metode ini pada skala yang lebih luas [7]. Water scrubbing tekanan tinggi adalah teknologi paling layak secara komersial karena kesederhanaan dan keandalan kinerja [8]. Namun, terdapat kelemahan pada water scrubbing tekanan terutama dalam hal biaya listrik spesifik yang cukup tinggi yaitu 0,34 kWh m-3 biogas mentah [9], serta menghasilkan limbah cair yang memerlukan proses treatment lanjutan.

Metode pemurnian dengan membran membutuhkan tekanan yang besar (sekitar 20-45 bar) untuk menekan biogas, selain itu harga membran relatif mahal. Pemurnian secara kriogenik merupakan metoda yang rumit jika dibandingkan dengan metode yang lainnya. Dengan metode kriogenik, biogas harus ditekan hingga mencapai tekanan 80 bar. Proses kompresi ini berjalan secara multistage dengan intercooler, biogas bertekanan kemudian dikeringkan untuk menghindari terjadinya pembekuan selama proses pendinginan berlangsung. Kemudian biogas didinginkan oleh chiller dan heat exchanger hingga – 45 ^oC, CO_2 yang terkondensasi dihilangkan di dalam separator [23].

Pada metoda adsorpsi, material yang digunakan sebagai adsorbent umumnya berpori[10]. Salah satu adsorbent padat yang berpotensi untuk memurnikan metana adalah zeolit. Zeolit memiliki stabilitas yang tinggi terhadap asam dan panas. Struktur zeolit dapat melakukan adsorpsi dan absorbsi terhadap senyawa H_2O, CO_2, SO_2, H_2S [11]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada kondisi tekanan atmosfer menghasilkan persentase penghilangan CO_2 terbesar (76,8%) pada zeolit alam ukuran mesh terbesar (60 mesh) [12] [13]. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, persentase penyerapan CO_2 masih dapat ditingkatkan lagi dengan cara memperpanjang waktu kontak gas dengan adsorbent zeolite, yang salah satu caranya dengan memperpanjang dimensi kolom zeolite.

Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan penyerapan CO_2 biogas dengan menggunakan zeolit alam, dengan ketinggian kolom zeolit yang diperpanjang. Hasil dari penelitian ini diharapkan diperoleh efektivitas penyerapan CO_2 biogas dan peningkatan gas CH_4 yang cukup besar.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini adalah

a. Perencanaan dan desain kolom adsorrpsi

Perencanaan dan desain kolom adsorpsi zeolit untuk mengurangi jumlah atau konsentrasi CO_2 dalam biogas, sekaligus meningkatkan konsentrasi CH_4 biogas. Desain dan dimensi alat bergantung pada kapasitas biogas yang akan diuji dan kontinyuitas biogas plant. Pemilihan zeolit didasarkan pada ukuran pori zeolit yang harus disesuaikan dengan ukuran partikel gas yang akan dihilangkan.

b. Pembuatan kolom adsorpsi zeolit

Pembuatan alat kolom adsorpsi zeolit sesuai dengan ukuran yang telah direncanakan.

c. Aktivasi Zeolit Secara Fisika

Aktivasi zeolit secara fisika adalah suatu proses pemanasan pada zeolit yang dilakukan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi zeolit.

d. Uji Kebocoran Alat

Uji kebocoran alat adalah proses yang dilakukan untuk mengetahui kebocoran pada alat. Cara yang dilakukan dalam uji kebocoran yaitu dengan cara mengalirkan biogas pada alat dan mengecek pada bagian-bagian alat,apakah terjadi kebocoran atau tidak.

e. Pengujian Alat

Pengujian alat adalah proses untuk mengetahui kemampuan dan keberhasilan alat dalam mengadsorpsi CO_2, sekaligus meningkatkan konsentarasi CH_4 biogas beberapa parameter pengujian.

f. Pengujian dan Analisis Data

Komposisi biogas (CO_2, CH_4, O_2, N_2) sebelum dan setelah melewati adsorbent zeolit diuji di Laboratorium Teknologi X Departemen Teknik Kimia ITB dengan menggunakan gas kromatografi. Selanjutnya dilakukan analisis terhadap data yang diperoleh.

II.1 Penentuan dimensi kolom zeolit

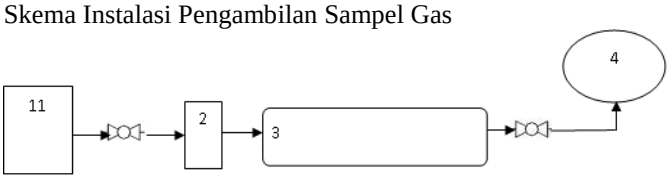
Penentuan dimensi kolom merujuk pada penelitian [13] dengan volume kolom 2,43 liter, diameter kolom 4 inci dan tinggi kolom 30 cm. Dengan hipotesis bahwa peningkatan waktu kontak dapat dilakukan dengan memperpanjang tinggi kolom, maka dalam penelitian ini perancangan kolom dibuat dengan volume yang sama yaitu 2,43 liter namun dengan diameter kolom yang lebih kecil, sehingga tinggi kolom menjadi lebih panjang. Dari hasil perhitungan dengan volume yang sama, dengan menggunakan diameter kolom 2 inci, diperoleh tinggi kolom 120 cm. Selain itu dibuat juga variasi kolom dengan tinggi 60 cm.

II.2 Pemilihan Zeolit dan Aktivasi Zeolit

Zeolit yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan zeolit alam. Pemilihan zeolit ini mengacu pada ketersediaannya terutama di Indonesia cukup melimpah dan harga yang murah.

Proses aktivasi zeolit dapat dilakukan dengan 2 cara, yang pertama yaitu secara fisika melalui kalsinasi dan secara kimia melalui pencucian asam atau basa. Proses kalsinasi bertujuan untuk menguapkan air yang terperangkap di dalam pori-pori kristal zeolit, sehingga luas permukaannya bertambah (Khairinal, 2000) [16]. Proses kalsinasi zeolit dikontrol, karena pemanasan yang berlebihan kemungkinan akan menyebabkan zeolit tersebut rusak. Proses pemanasan (kalsinasi) dilakukan pada suhu 200°C-375°C selama 3-4 jam (Suwardi 2000) [24]. Dalam penelitian ini dilakukan proses aktivasi dengan secara fisika. Zeolit dipanaskan dalam oven listrik dengan suhu 200°C selama 3 jam.

Skema Instalasi Pengambilan Sampel Gas



Gambar 1. Skema instalasi pengujian alat

Keterangan:
1 = Biogas
2 = Rotameter
3 = Kolom adsorber
4 = Gas output storage

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

III.1 Data Hasil Pengujian

Data dari hasil pengujian yaitu berupa kandungan biogas sebelum adsorpsi dan setelah adsorpsi. Data di bawah ini merupakan data kandungan hasil uji sampel biogas dengan menggunakan gas kromatografi. Dalam penelitian ini, pengambilan data dilakukan dengan perlakuan yang berbeda yaitu dengan variasi laju alir dan tinggi kolom. Ada lima variasi laju alir dalam penelitian ini, yaitu 1,1 liter/menit, 1,2 liter/menit, 1,3 liter/menit, 1,4 liter/menit, dan 1,5 liter/menit. Dan untuk tinggi kolom yaitu 120 cm dan 60 cm. Pada saat pengujian alat, kondisi kolom yaitu pada kondisi horizontal artinya biogas mengalir secara horizontal.

III.2 Data Kandungan Biogas Pada Kolom 60 cm

Pada Tabel 1. menampilkan kandungan biogas sebelum dan sesudah adsorpsi serta efektivitas zeolit pada kolom dengan tinggi 60 cm.

Tabel 1. Data kandungan biogas pada kolom 60 cm.

No	Laju Alir (liter/menit)	Komposisi (% volume)					Efektivitas (%)
		CO_2	N_2	CH_4	O_2	H_2	
1	Biogas Awal	36.48	8.52	52.51	2.47		
2	1.1	4.43	17.46	77.32		0.77	87.86
3	1.2	23.84	13.31	62.84			34.65
4	1.3	28.56	21.38	50.05			21.71
5	1.4	30.55	20.1	49.34			16.25
6	1.5	31.42	18.75	49.18		0.64	13.87

Pada Tabel 1. terlihat bahwa efektivitas zeolit terbesar yaitu 87,86 % terjadi pada saat laju alir biogas sebesar 1,1 liter/menit dan efektivitas zeolit terkecil yaitu 13,87 % terjadi pada saat laju alir biogas sebesar 1,5 liter/menit. Efektivitas zeolit mengalami penurunan karena disebabkan kadar CO2 yang terus meningkat setelah dilakukan proses adsorpsi. Kadar CO_2 pada saat pengambilan data pertama yaitu 4,43 % kemudian mengalami peningkatan hingga mencapai 31,42 % pada saat pengambilan data terakhir. Hal tersebut menunjukkan bahwa zeolit mengalami penurunan performansi penyerapan disebabkan karena rongga-rongga kosong yang terdapat pada zeolit sudah mulai terisi oleh

adsorbat yaitu CO_2. Sehingga, jika rongga-rongga tersebut sudah terisi penuh maka zeolit tidak bisa menyerap CO_2 lagi.

Pengaruh dari semakin meningkatnya kadar CO_2 yaitu membuat kadar CH_4 semakin menurun. Pada saat pengambilan data pertama, nilai kadar CO_2 yaitu 4,43 % dan untuk nilai kadar CH_4 yaitu 77,32 %. Nilai kadar CO2 kemudian terus mengalami peningkatan hingga mencapai 31,42 %. Namun, seiring dengan meningkatnya kadar CO_2 ternyata nilai kadar CH_4 terus mengalami penurunan hingga mencapai 49,18 % pada saat pengambilan data terakhir.

III.3 Data Kandungan Biogas Pada Kolom 120 cm

Pada Tabel 2 menjelaskan tentang kandungan biogas sebelum dan sesudah adsorpsi serta efektivitas zeolit pada kolom 120 cm.

Tabel 1. Kandungan biogas kolom 120 cm.

No	Laju Alir (liter/menit)	Komposisi (% volume)					Efektivitas (%)
		CO_2	N_2	CH_4	O_2	H_2	
1	Biogas Awal	36.48	8.52	52.51	2.47		
2	1.1	0.1	29.29	70.6			99.72
3	1.2	1.65	56.46	41.88			95.47
4	1.3	2.11	13.81	84.07			94.21
5	1.4	2.21	17.45	74.71	5.61		93.94
6	1.5	21.93	17.68	60.37			39.88

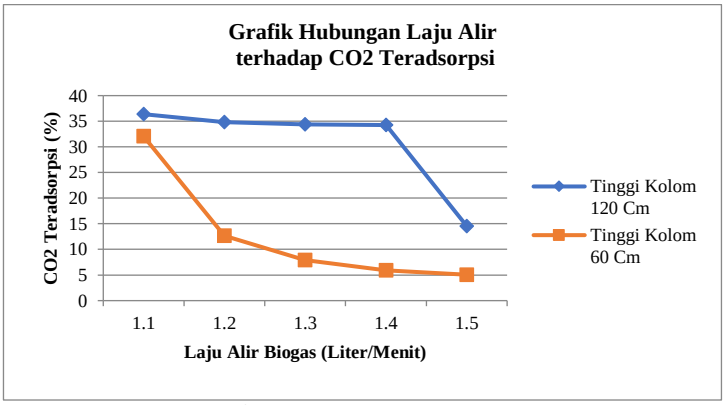
Dari data di atas dapat diketahui bahwa efektivitas zeolit terbesar yaitu 99,72 % terjadi pada saat pengambilan data pertama dengan laju alir biogas sebesar 1,1 liter/menit dan efektivitas zeolit terkecil yaitu 39,88 % terjadi pada saat pengambilam data terakhir dengan laju alir biogas sebesar 1,5 liter/menit. Efektivitas zeolit mengalami penurunan nilai yang disebabkan oleh kadar CO_2 setelah adsorpsi yang terus mengalami peningkatan. Kadar CO_2 pada saat pengambilan data pertama yaitu 0,1 % kemudian mengalami peningkatan hingga mencapai 21,93 % pada saat pengambilan data terakhir. Hal tersebut menunjukkan bahwa zeolit mengalami penurunan performansi penyerapan disebabkan karena rongga-rongga kosong yang terdapat pada zeolit sudah mulai terisi oleh adsorbat yaitu CO_2. Sehingga, jika rongga-rongga tersebut sudah terisi penuh maka zeolit tidak bisa menyerap CO_2 lagi.

Pengaruh dari semakin meningkatnya kadar CO_2 yaitu membuat kadar CH_4 semakin menurun. Pada saat pengambilan data pertama, nilai kadar CO2 yaitu 0,1 % dan untuk nilai kadar CH_4 yaitu 70,6 %. Nilai kadar CO_2 kemudian terus mengalami peningkatan hingga mencapai 21,93 %. Pada saat pengambilan data kedua, ternyata nilai kadar CH_4 mengalami penurunan yang cukup signifikan hingga mencapai 41,88 %.

Namun, pada pengambilan data kedua ini nilai kandungan lain yaitu N_2 mengalami peningkatan yang cukup besar mencapai 56,46 % sehingga mempengaruhi komposisi biogas. Pada saat pengambilan data ketiga, nilai kadar CH_4 mengalami peningkatan yang cukup signifikan yaitu 84,07 %. Hal tersebut terjadi karena kadar N_2 mengalami penurunan hingga mencapai 13,81 %. Pada data keempat dan kelima, nilai kadar CH4 mengalami penurunan hingga mencapai 60,37 % dikarenakan meningkatnya kadar CO_2 yang mencapai nilai 21,93%.

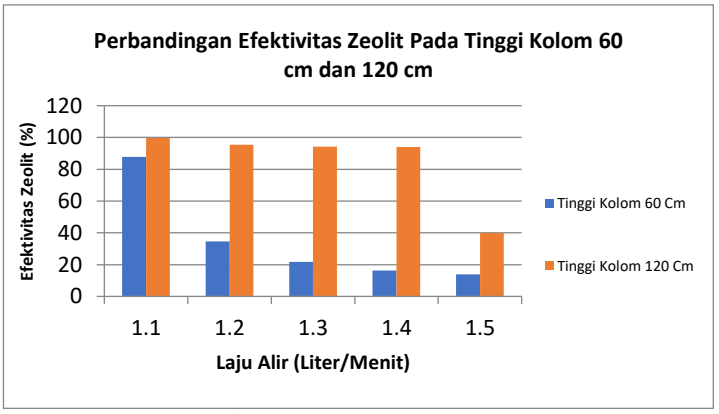
III.4 Laju Alir Biogas terhadap CO_2 Teradsorpsi

Pada Gambar 2 menunjukkan hubungan antara laju alir biogas terhadap persentase CO2 teradsorpsi untuk tinggi kolom 120 cm dan 60 cm. Dari Gambar 4.1, dapat diketahui bahwa persentase CO2 teradsorpsi tertinggi untuk kedua kolom yaitu pada laju alir biogas 1,1 liter/menit sedangkan untuk nilai terkecil yaitu pada laju alir biogas 1,5 liter/menit. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa jika laju alir semakin besar nilainya maka nilai persentase CO_2 teradsorpsi akan semakin kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses adsorpsi mengalami penurunan penyerapan seiring semakin besarnya nilai laju alir. Dalam pengujian ini, diperoleh hasil yang menunjukkan nilai CO_2 teradsorpsi pada kolom dengan tinggi 120 cm memiliki nilai yang lebih baik dari setiap pengambilan data dibandingkan dengan tinggi kolom 60 cm. Nilai CO_2 teradsorpsi tertinggi pada kolom 120 cm yaitu 36,38% sedangkan pada kolom 60 cm hanya mencapai 32,05%. Kolom 120 cm memiliki nilai CO_2 teradsorpsi yang lebih baik karena pada kolom 120 cm jumlah adsorbennya lebih banyak daripada kolom 60 cm. Selain itu, dengan ukuran yang lebih tinggi menyebabkan waktu kontak biogas dengan adsorben akan lebih lama dibandingkan dengan kolom 60 cm sehingga proses adsorpsi yang terjadi akan lebih baik.



Gambar 2. Grafik hubungan laju alir terhadap CO_2 teradsorpsi

Perbandingan Efektivitas Zeolit pada Tinggi Kolom 60 cm dengan Tinggi Kolom 120 cm.



Gambar 3. Perbandingan efektivitas zeolit tinggi kolom 60 Cm dengan tinggi kolom 120 Cm

Pada Gambar 3 menunjukkan perbandingan efektivitas zeolit pada tinggi kolom 60 cm dengan tinggi kolom 120 cm. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa efektivitas tertinggi yaitu pada kolom 120 cm dengan nilai 99,72 % sedangkan untuk nilai efektivitas pada kolom 60 cm hanya mencapai 87,85%. Dari setiap pengambilan sampel dengan laju aliran yang berbeda, pada kolom 120 cm selalu memiliki efektivitas yang lebih tinggi daripada kolom 60 cm. Hal tersebut terjadi karena pada kolom 120 cm memiliki jumlah isian zeolit yang lebih banyak yaitu 2,44 kg sedangkan pada kolom 60 cm hanya 1,13 kg sehingga dengan jumlah adsorben yang lebih banyak tersebut menyebabkan jumlah adsorbat yang

teradsorpsi pun menjadi lebih banyak. Selain itu, dengan tinggi kolom 120 cm maka waktu kontak adsorbat dengan adsorben akan lebih lama dibandingkan dengan tinggi kolom 60 cm sehingga proses adsorpsi yang terjadi lebih baik.

III.5 Efektivitas Penelitian dengan Sebelumnya

Tabel 3. Perbandingan efektivitas dengan penelitian sebelumnya

No	Penelitian	Efektivitas (%)
1	(Ahmad, 2013)	46,1
2	Tinggi kolom 60 cm	87,86
3	Tinggi kolom 120 cm	99,72

Pada Tabel 3 menunjukkan perbandingan efektivitas penyerapan zeolit dari penelitian sebelumnya (Ahmad, 2013) dengan penelitian ini. Pada penelitian sebelumnya [13], ukuran kolom yaitu tinggi 30 cm dan lebar 4 inci dengan jumlah isian zeolit 1 kg. Dengan ukuran kolom dan jumlah isian zeolit tersebut, didapatkan efektivitas sebesar 46,1 %. Pada penelitian ini, ada dua ukuran kolom yang dibuat yaitu ukuran kolom dengan tinggi 60 cm lebar 2 inci dan ukuran kolom dengan tinggi 120 cm lebar 2 inci. Jumlah isian zeolit pada setiap kolom yaitu diisi penuh. Massa zeolit pada kolom 60 cm yaitu 1,13 kg dan pada kolom 120 cm yaitu 2,44 kg. Dengan ukuran kolom dan jumlah isian zeolit tersebut, pada kolom 60 cm didapatkan nilai efektivitas sebesar 87,86 % dan pada kolom 120 cm sebesar 99,72 %. Dari data tersebut, dapat diketahui bahwa efektivitas zeolit pada penelitian ini lebih baik daripada penelitian sebelumnya (Ahmad, 2013). Hal tersebut menunjukkan bahwa proses adsorpsi yang terjadi pada kolom 60 cm dan 120 cm lebih baik jika dibandingkan dengan penelitian (Ahmad, 2013) dengan tinggi kolom 30 cm. Pengaruh dari ukuran tinggi kolom yaitu mempengaruhi waktu kontak adsorbat dengan adsorben dan mempengaruhi jumlah isian zeolit sebagai adsorben. Semakin lama waktu kontak adsorbat dengan adsorben maka proses adsorpsi yang terjadi akan semakin baik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pengujian, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Zeolit alam dapat digunakan sebagai adsorben untuk memisahkan CO_2 dari biogas.
2. Persentase CO_2 teradsorpsi terbesar yaitu 36,38% terjadi pada tinggi kolom 120 cm dengan laju alir biogas sebesar 1,1 liter/menit sedangkan nilai terbesar pada tinggi kolom 60 cm dengan laju alir yang sama yaitu 32,05 %.
3. Persentase peningkatan CH_4 terbesar yaitu pada tinggi kolom 120 cm sebesar 31,57% pada laju alir biogas sebesar 1,3 liter/menit sedangkan pada kolom 60 cm yaitu 24,82%.
4. Efektivitas zeolit terbesar terjadi pada tinggi kolom 120 cm yaitu 99,72%, sedangkan pada tinggi kolom 60 cm yaitu 87,85%.
5. Semakin tinggi kolom dan semakin kecil laju aliran biogas maka persentase CO_2 teradsorpsi dan efektivitas zeolit dalam menyerap CO_2 semakin besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Program Penelitian DIPA Pusat Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bandung tahun 2020, atas bantuan dana yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Meynell P J 1998 Methane: Planning a Digester (Clarington: Schocken)
[2] Goswani, R., Chattopadhyay, P., Shome, A., Banerjee, S.N., Chakraborty, A.K., Mathew, A.K., Chaudhury, S., 2016. An overview of physico-chemical mechanisms of biogas production by microbial communities: a step towards sustainable waste management. Biotech 6, 72-84.
[3] Qiang H, Langa D-L, Li Y-Y, 2012. High-solid mesophilic methane fermentation of food waste with an emphasis on iron, cobalt, and nickel requirements. Bioresour Technol 103:21–27
[4] Paolo, R., Andrea, L., Pierluigi, L., 2017. Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogas upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel. Renewable Energy 102, 417-432.
[5] Olumide W A, Yaqian Z, Ange N, Doan P M, Nathalie L 2017 Waste and Biomass Valorization, 8 267-283
[6] Rafael, M.S., Geovane, R.F., Hugo, R.P., Jailton, F.N., Ana, P.S.M., Antonio, E.B.T., Diana, C.S.A., Moises, B-N., 2017. Carbon dioxide capture by pressure swing adsorption. Energy Procedia 114, 2182-2192
[7] Shang, G., Shen, G., Wang, T., Chen, Q., 2012. Effectiveness and mechanism of hydrogen sulphide adsorption by camphor-derived biochars. Journal of the Air and Waste Management Association 62, 873-879.
[8] Karim, G., Fatima, Z.B.F., 2018. Power to methane: a state of the art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 81, 433-446.
[9] Cozma P, Wukovits W, Mămăligă I, Friedl A, Gavrilescu M, 2013. Analysis and modelling of the solubility of biogas components in water for physical absorption processes, Environment Engineering Management Journal, (EEMJ) 1:147–162
[10] J.H.C Van Hooff. Techniques of Zeolit Characterization.
[11] Weitkamp, J. dan L. Puppe. 1999. Catalysis and Zeolits Fundamentals and Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg : Jerman.
[12] Anggreini, dkk. 2012. Penurunan Kadar CO2 dan H2S pada Biogas dengan Metode Adsorpsi Menggunakan Zeolit Alam. Institute Teknologi Sepuluh November : Surabaya.
[13] Ahmad Y, Bambang D A, dan Wahyunanto A N. 2013. Pengaruh Ukuran Zeolit Terhadap Penyerapan Karbondioksida Pada Aliran Biogas. Universitas Brawijaya Malang : Malang.
[14] Wahyuni, Sri, 2009. Biogas, Penerbit: Penebar Swadaya, Depok. http://www.fuelinjectedford.com/page41.html, Diakses tgl. 20 Febb 2018
[15] Praxair, 2016, Material Safety Data sheet : Methane. Praxair Canada Inc.
[16] Sukmana, R. Widya, 2011. Biogas dari Limbah Ternak. Penerbit NUANSA, Bandung
[17] Simanjuntak, Mangontang. 2002. Penggunaan Zeolit dalam Bidang Pertanian. Institut Pertanian Bogor : Bogor.
[18] Vaughan, D. 1978. Properties of Natural Zeolites. Pergamon Press : Oxford.
[19] A. Srichat, R. Suntivarakorn, and K. Kamwilaisak, "A Development of Biogas Purification System Using Calcium Hydroxide and Amine Solution," Energy Procedia, vol. 138, pp. 441–445, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.196.
[20] A. Alonso-Vicario et al., "Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites," Microporous Mesoporous Mater., vol. 134, no. 1–3, pp. 100–107, 2010, doi: 10.1016/j.micromeso.2010.05.014.
[21] Y. Jiang et al., "Simultaneous biogas purification and CO2 capture by vacuum swing adsorption using zeolite NaUSY," Chem. Eng. J., vol. 334, pp. 2593–2602, 2018, doi: 10.1016/j.cej.2017.11.090.
[22] S. K. Wahono, Hernawan, A. Kristiani, S. Tursiloadi, and H. Abimanyu, "Characterization and utilization of gunungkidul natural zeolite for bioethanol dehydration," Energy Procedia, vol. 47, pp. 263–267, 2014, doi: 10.1016/j.egypro.2014.01.223.
[23] A. M. Yousef, W. M. El-Maghlany, Y. A. Eldrainy, and A. Attia, "New approach for biogas purification using cryogenic separation and distillation process for CO2 capture," Energy, vol. 156, pp. 328–351, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.05.106.
[24] Y. Zhao, G. Guo, S. Sun, C. Hu, and J. Liu, "Co-pelletization of microalgae and fungi for efficient nutrient purification and biogas upgrading," Bioresour. Technol., vol. 289, no. May, 2019, doi: 10.1016/j.biortech.2019.121656.