

## Pemanfaatan Biogas sebagai Sumber Energi Penghasil Energi Pendinginan, Energi Listrik dan Energi Pemanasan - Studi Fisibilitas

Luga Martin Simbolon\*, Muhammad Arman, Susilawati<sup>1</sup>  
Jurusan Teknik Refrigerasi & Tata Udara, Politeknik Negeri Bandung  
Jl. Gegerkalong Hilir Ciwaruga, Bandung 40559, Indonesia

\*E-mail: lugamartin@polban.ac.id

Diajukan: 25-09-2022; Diterima: 20-08-2023; Diterbitkan: 21-08-2023

### Abstrak

Walaupun menjadi salah satu sumber polusi yang cukup tinggi, penggunaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi masih menjadi yang dominan jika dibandingkan dengan jenis sumber energi yang lain. Selain itu, permasalahan yang terjadi saat ini adalah produksi bahan bakar fosil tidak sebanding dengan permintaan yang terus meningkat. Guna menurunkan dampak negatif dari penggunaan bahan bakar fosil, penggunaan energi yang ramah lingkungan terus dikembangkan, salah satunya adalah yang digunakan pada penelitian saat ini, yaitu pemanfaatan biogas sebagai sumber energi pendinginan, energi listrik dan energi pemanasan atau yang dikenal dengan *trigeneration energy*. Metoda yang digunakan adalah dengan cara memanaskan fluida dengan bahan bakar biogas, lalu fluida panas dialirkan ke sistem refrigerasi sistem absorpsi dan sistem pembangkit listrik TEG (*thermoelectric generator*). Berdasarkan hasil perhitungan, pemanasan fluida menggunakan biogas membutuhkan energi sebesar 615 watt. Kemudian besaran energi ini digunakan untuk sistem pendingin absorpsi dan TEG yaitu berturut-turut 70 dan 397 watt. Sisa energi sebesar 148 watt dapat digunakan untuk energi pemanasan. Ketika energi pemanasan tidak digunakan, maka energi dari fluida panas (615 watt) dapat seluruhnya digunakan atau di maksimalkan untuk pembangkitan energi pendinginan dan energi listrik.

**Kata kunci:** biogas; *trigeneration*; sistem absorpsi; *thermoelectric generator*

### Abstract

*Despite the fact that being sources of high pollution, the use of fossil fuels as an energy source is predominant when compared to other types of energy sources. In addition, the current problem is that the demand of fossil fuels is much higher than the supply. To reduce the negative impact of the use of fossil fuels, the use of environmentally friendly energy continues to be developed, one of which is used in current research, namely biogas, that is used as a source of cooling energy, electrical energy, and heating energy (trigeneration energy). The method used is by heating the fluid with biogas fuel, then the hot fluid is flowed to the absorption system refrigeration system and the TEG (thermoelectric generator) power generation system. Based on the calculation results, heating the fluid using biogas requires 615 watts of energy. Then this amount of energy is used for the absorption cooling system and TEG, namely 70 and 397 watts respectively. The remaining 148 watts of energy can be used for heating energy. When heating energy is not used, the energy from the hot fluid (615 watts) can be fully utilised or maximized for the generation of cooling energy and electrical energy.*

**Keywords:** biogas; *trigeneration*; absorption system; *thermoelectric generator*

### 1. Pendahuluan

Ada beberapa sumber energi yang dimanfaatkan secara global, seperti bahan bakar fosil, tenaga nuklir, dan energi terbarukan. Menurut biro statistik internasional, dunia sangat bergantung pada bahan bakar fosil [1]. Penggunaan bahan bakar fosil mencapai 78,4% pada tahun 2012. Sebaliknya, penggunaan energi terbarukan hanya 19%. Sisanya menggunakan energi nuklir [2].

Produksi bahan bakar fosil tidak dapat memenuhi permintaan yang terus meningkat. Dalam bukunya *Renewable Energy Technologies*, Dr. Z. Dehouce menyatakan bahwa kebutuhan dunia akan bahan bakar fosil akan terus meningkat sementara produksinya akan terus menurun. Pada tahun 2015 terjadi kesenjangan antara permintaan dan penawaran yang mencapai sekitar 50 Mb/d (Juta barel per hari) [3]. Lebih lanjut, Dr. Z. Dehouce menyatakan bahwa peningkatan penggunaan bahan

bakar fosil berarti peningkatan jumlah gas emisi CO<sub>2</sub>. Gambar 3 menunjukkan bahwa emisi gas CO<sub>2</sub> akan melewati level 15 gigaton di sektor pembangkit listrik pada tahun 2030 [3]. Akibatnya, CO<sub>2</sub>, bersama dengan gas lain seperti CH<sub>4</sub>, CFC<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> dan NO<sub>x</sub> yang menghasilkan efek rumah kaca, akan membawa dampak besar terhadap perubahan iklim. Oleh karena itu, peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> harus dibatasi.

Salah satu cara untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat sekaligus mengurangi emisi gas buang CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> adalah dengan memaksimalkan produksi energi terbarukan. Di Inggris, produksi energi terbarukan pada sektor pembangkit listrik meningkat dari tahun 1990 hingga 2008. Beberapa negara Eropa juga menargetkan peningkatan produksi energi terbarukan mereka. Negara-negara Eropa memiliki target rata-rata untuk meningkatkan 20% produksinya menjadi energi final [3].

Energi terbarukan seperti tenaga angin, energi matahari, pasang surut air laut, biomassa dan biogas telah digunakan sejak tahun 1990, dan ada studi terus menerus yang dilakukan dalam hal ini. Dalam ulasannya, A. Zahedi (2010) menyatakan bahwa pemerintah harus mengambil inisiatif untuk mendukung studi energi terbarukan. Ia juga menambahkan, negaranya berpotensi menjadi market leader energi surya, khususnya dalam studi photo voltaic (PV) [4].

Biogas merupakan sumber energi alternatif dan dapat dihasilkan dari hampir semua biomassa yang dapat terdegradasi. Sebuah studi yang dilakukan oleh Hosseini (2013), Studi Kelayakan Produksi Biogas dari Limbah Industri Kelapa Sawit, mengungkapkan bahwa mekanisme terbaik untuk menghasilkan biogas adalah dengan menggunakan tangki tertutup [5]. Studi lain oleh J. Havukainen (2014) mengevaluasi beberapa metode untuk menunjukkan kinerja produksi biogas. Studi mengungkapkan evaluasi kinerja energi dari produksi biogas dengan menggunakan metode estimasi [6].

Biogas dapat langsung digunakan sebagai bahan bakar untuk pembakaran atau dapat dikombinasikan dengan energi lain (dikenal dengan istilah hybrid). Seperti yang dilakukan oleh Rahman Md. M, dkk, sistem hybrid yang digunakan adalah kombinasi antara biogas dan energi matahari yang akan digunakan untuk memasak dan listrik [7]. Selain sistem hybrid, seperti yang dilakukan oleh Jeong C., juga dimungkinkan untuk menggabungkan biogas dan hidrogen sebagai bahan bakar untuk generator mesin gas percikan api. Penambahan konsentrasi hidrogen hingga 15% ke dalam biogas menghasilkan peningkatan efisiensi generator sebesar 29,26% [8].

Penggunaan generator listrik sebagai pembangkit energi listrik juga dapat dipadukan dengan beberapa fungsi seperti sebagai pendingin atau pemanas. Kombinasi tersebut dikenal sebagai tri-generation atau Combine Cooling Heating and Power (CCHP). Pada tahun 2009, Savvas Tassou bersama Ge YT melakukan evaluasi kinerja sistem trigenerasi dengan menggunakan turbin mikro sebagai penggerak utama dan pendingin absorpsi sebagai mesin pendingin yang menggunakan limbah panas dari turbin mikro sebagai sumber energinya [9]. Kinerja tersebut ditunjukkan dengan nilai Primary Energy Ret (PER) yang merupakan perbandingan antara jumlah energi bahan bakar yang dibutuhkan dengan total energi listrik dan kapasitas pendinginan yang dihasilkan.

Tassou juga meninjau perangkat tri-generation sebagai teknologi baru untuk aplikasi makanan dan pendinginan [10]. Salah satu masalah yang mungkin muncul dari penggunaan tri-generation adalah bahwa perbedaan harga antara listrik dari grid dan bahan bakar yang digunakan dalam sistem tri-generation tidak terlalu tinggi sehingga sulit untuk mengevaluasi penghematan energi dengan menggunakan sistem. Isu harga BBM bisa diminimalisir dengan mengganti turbin mikro sebagai penggerak utama dengan gas dari limbah rumah tangga.

Energi terbarukan yang umum digunakan adalah energi matahari, tenaga angin, pembangkit listrik tenaga air, biofuel dan biomassa. Dalam bukunya *Biogas from Waste and Renewable Resources*, Dieter Dublin dan Angelika Steinhauser menjelaskan bahwa semua biomassa yang difermentasi dapat digunakan sebagai sumber energi [11]. Lebih lanjut, penelitian yang dilakukan di Siprus oleh Nicoletta Kythreotou, Savvas A. Tassou dan Georgios Florides pada tahun 2012

menyimpulkan bahwa banyak limbah biodegradable seperti limbah pertanian, industri sayuran dan buah-buahan, rumah potong hewan dll, berpotensi menghasilkan energi yang dapat diubah menjadi energi panas dan listrik [12].

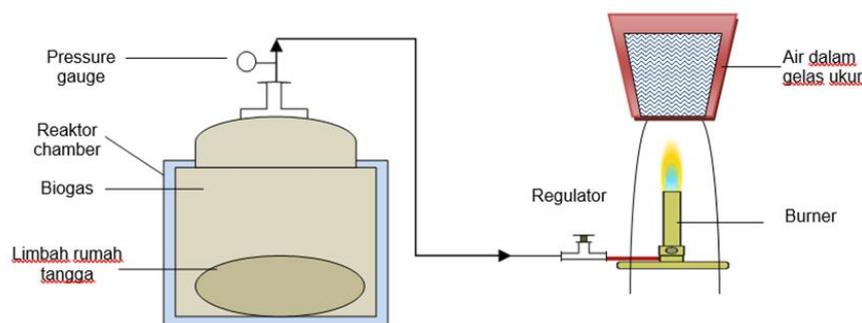
Saat ini, biogas yang paling umum adalah biogas yang dihasilkan dari kotoran hewan. Kotoran sapi sudah umum digunakan sehingga banyak peternak sapi membangun instalasi untuk menghasilkan biogas. Penggunaan kotoran hewan untuk menghasilkan biogas hanya terbatas pada mereka yang memiliki ternak, seperti sapi, babi, domba dll. Namun, karena biogas dapat dihasilkan dari semua biomassa yang difermentasi, limbah rumah tangga berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit biogas.

Biogas hasil fermentasi dapat kategorikan sebagai sumber bahan bakar yang dapat diperbaharui. Dengan nilai kalor tertentu, biogas dapat dikonversi menjadi sumber energi bentuk lain, diantaranya adalah dengan dilakukan proses pembakaran untuk menghasilkan energi panas. Terdapat suatu sistem *trigeneration energy* (pembangkit tiga jenis energi) yang dapat memanfaatkan energi panas sebagai sumber energi atau penggerakannya. Pemanfaatan panas dari hasil pembakaran biogas sebagai sumber energi Trigeneration masih terus dikembangkan, aspek-aspek pengaruh seperti sumber biogas, jenis peralatan penukar dan persentasi jumlah kalor pada tiap peralatan masih dapat dijadikan *research gap* [13].

Limbah rumah tangga yang difermentasi akan menghasilkan biogas yang nantinya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Penelitian ini merupakan upaya untuk memanfaatkan energi yang dihasilkan dari fermentasi limbah rumah tangga untuk diubah menjadi energi lain. Dengan kata lain, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan energi dari limbah rumah tangga untuk kemudian digunakan sebagai pembangkit listrik dan pendinginan. Topik penelitian ini diharapkan dapat mendukung perkembangan teknologi di bidang energi dan khususnya untuk menghemat konsumsi energi di kawasan pemukiman.

## 2. Material dan metodologi

Pada perencanaan awal, dilakukan sebagai berikut. Pertama, massa limbah rumah tangga yang akan difermentasi dalam reaktor chamber akan ditentukan (seperti yang ditunjukkan pada gambar 1). Saat tekanan dalam pengukur meningkat (regulator tertutup), gas (biogas) dihasilkan. Ketika tekanan berhenti meningkat, katup regulator dibuka dan gas masuk ke burner. Api kemudian dinyalakan untuk memanaskan air dalam gelas ukur. Pemanasan air akan menghasilkan estimasi jumlah energi yang dihasilkan oleh biogas. Besaran energi tersebut kemudian digunakan untuk menentukan satuan energi yang akan digunakan dalam sistem trigenerasi. Beberapa alat ukur seperti termometer digital, wattmeter dan timer digunakan untuk mengukur kinerja sistem.



**Gambar 1.** Skematik pengujian kandungan energi pada biogas

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kalor pemanasan air adalah sebagai berikut:

$$Q_w = \frac{mw}{s} \times cpw \times \Delta t \quad (1)$$

Dimana:

- $Q_w$  : kalor pemanasan air [kW]
- $m_w$  : massa air [kg]
- $cp_w$  : kalor spesifik air [kJ/kg.°C]  
(nilai yang digunakan pada perhitungan adalah 4,2 kJ/kg.°C )
- $\Delta t$  : Perbedaan temperatur air sebelum dan sesudah dipanaskan [°C]
- $s$  : Waktu yang diperlukan untuk memanaskan air [detik]

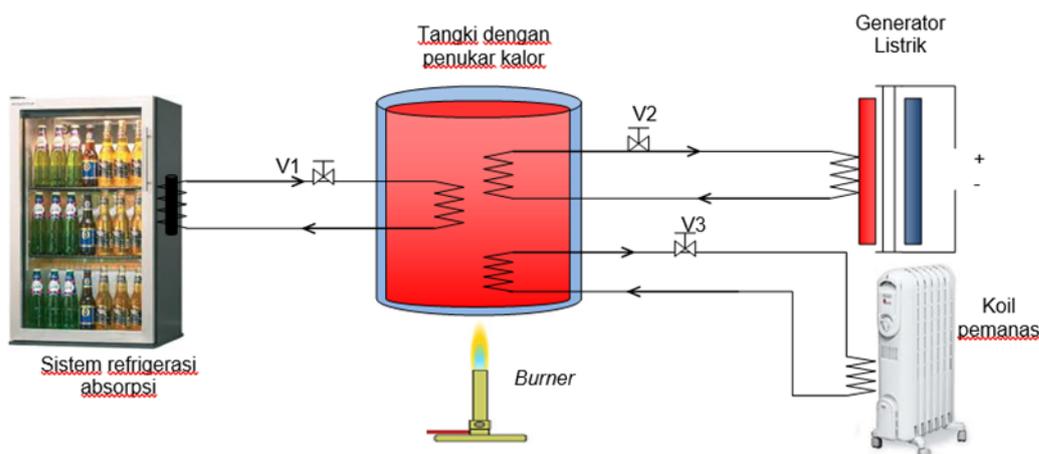
Pengujian yang dilakukan selanjutnya adalah pengujian performansi sistem pemanas air biogas yang dihubungkan dengan sistem trigeneration (gambar 2). Trigeneration energi (pembangkitan tiga energi) yang dihasilkan dengan memanfaatkan energi panas dari air adalah energi pendinginan, energi listrik dan energi pemanasan. Keseimbangan energi dari sistem ini dapat diwakilkan oleh persamaan (2).

$$Q_w = E_c + E_e + E_p \tag{2}$$

Dimana:

- $Q_w$  : kalor pemanasan air [kW]
- $E_c$  : Energi pendinginan [kW]
- $E_e$  : Energi listrik [kW]
- $E_p$  : Energi pemanasan [kW]

Burner akan memanaskan tangki terlebih dahulu (Valve 1, valve 2 dan valve 3 tertutup). Suhu maksimum adalah suhu untuk memanaskan mesin kulkas absorpsi. Ketika temperatur fluida di dalam tangki tercapai maka valve 1 akan terbuka karena akan membutuhkan waktu yang lama bagi mesin pendingin absorpsi untuk melakukan proses pendinginan. Ketika suhu di evaporator mesin kulkas semakin rendah, katup 2 dan katup 3 dibuka. Setelah sistem trigenerasi berjalan, dilakukan pengukuran untuk melihat kinerjanya.



Gambar 2. Skematik pengujian tri-generation energy

Data yang diperoleh dari proses pengukuran dikumpulkan untuk mendapatkan informasi yang dibutuhkan. Untuk mengetahui besarnya energi yang diserap pada mesin refrigerasi diperlukan data penurunan suhu serta waktu yang diperlukan untuk penurunan suhu tersebut. Hal yang sama dilakukan untuk koil pemanas, yaitu data kenaikan suhu. Pada generator listrik, beban listrik seperti resistor atau LED (Light Emitting Diode) diperlukan untuk mengukur daya yang

dihasilkan. Tenaga listrik dibangkitkan dengan cara mengukur arus, resistansi dan tegangan listrik. Total ketiga energi tersebut akan menghasilkan jumlah yang nantinya digunakan untuk menganalisis kinerja sistem tri-generation.

### 3. Hasil dan pembahasan

#### 3.1 Kalor Pemanasan Air

Hasil produksi biogas yang dilakukan pada penelitian kali ini tidak dapat digunakan. Walaupun debit aliran biogas menuju burner sudah besar, proses pembakaran biogas tidak terjadi. Besar kemungkinan kandungan uap air dan CO<sub>2</sub> pada biogas cukup tinggi, sehingga menghalangi terjadinya proses pembakaran. Sebagai alternatif, proses pemanasan air dilakukan dengan menggunakan kompor gas portable (gambar 3). Pemanasan air dilakukan beberapa kali dengan variasi nyala api, hal ini dilakukan untuk memperoleh nilai rata-rata energi yang diterima oleh air. Dengan menggunakan persamaan (1) maka diperoleh energi rata-rata yang akan digunakan pada proses trigeneration (tabel 1).



**Gambar 3.** Penggantian sistem pembakaran biogas dengan kompor portable

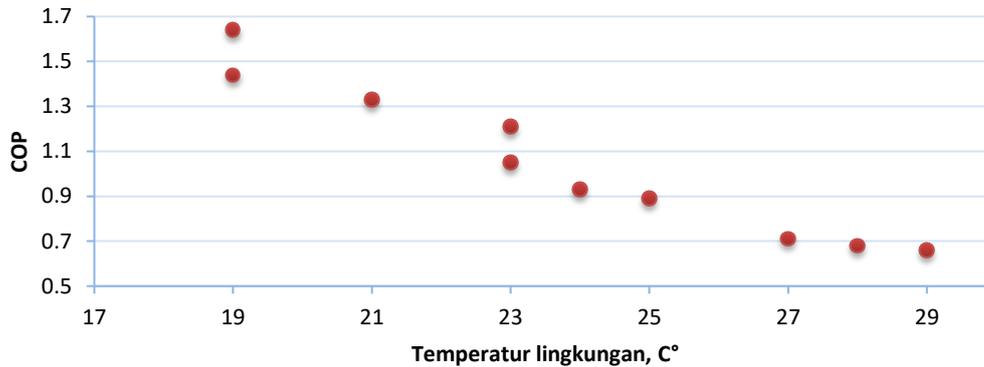
**Tabel 1.** Kalor Pemanasan Air

Nyala api	Massa air (kg)	Temperatur air awal (°C)	Temperatur air akhir (°C)	Waktu pemanasan (detik)	Kalor air (kW)
Posisi knop 1	0,331	25,6	71	86	0,734
			91	130	0,699
			99	151	0,676
Posisi knop 2	0.332	31,2	53	61	0,498
			74	130	0,459
			99	319	0,296
Posisi knop 3	0.363	30,1	71	77	0,809
			93	133	0,721
			99	163	0,644
<b>Rata-rata</b>					<b>0,615</b>

#### 3.2 Trigeneration Energi

Energi pendinginan yang dihasilkan diperoleh dari sistem refrigerasi jenis absorpsi cooler (gambar 5). Sistem absorpsi ini menggunakan energi panas sebagai penggerakannya (energi input), yang besarnya adalah 70 watt. Jenis sistem refrigerasi absorpsi mempunyai nilai performansi (COP) berkisar antara 0,7-1 [14-16]. Akan tetapi pada pengujiannya, COP yang dapat dicapai berkisar antara 0,66 hingga 1,64. Karena pendinginan bagian kondenser sistem ini menggunakan sistem alami,

maka temperatur lingkungan sangat berperan dalam menentukan nilai COP. Pengaruh nilai COP terhadap lingkungan dapat dilihat pada gambar 4, dimana COP akan naik ketika temperatur lingkungan turun.



**Gambar 4.** Pengaruh temperatur terhadap COP

Pembangkitan Energi listrik diperoleh dari pembangkit jenis *Thermoelectric Generator* (TEG), dimana perbedaan temperatur akan diubah oleh semiconductor thermoelectric menjadi beda potensial. Pada penelitian ini, TEG yang digunakan ada 4 keping (gambar 6) dan beda potensial yang dihasilkan tiap keping dapat mencapai 1,2 Vdc, dan menjadi 4,8 Vdc jika disusun secara seri. Dengan menambahkan resistor 1 kOhm, daya output yang dapat dihasilkan TEG adalah  $23 \times 10^{-3}$  watt. Nilai ini akan meningkat berbanding lurus dengan jumlah kepingnya. Besar energi input yang dibutuhkan untuk menghasilkan beda temperatur pada TEG adalah berkisar antara 286-397 watt. Untuk perhitungan kesetimbangan energi, digunakan nilai yang terbesar.



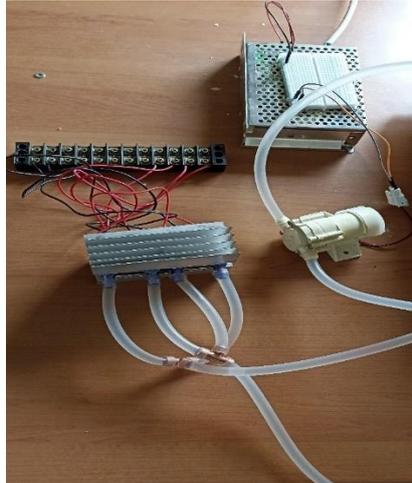
**Gambar 5.** Sistem Refrigerasi Jenis Absorpsi

Sedangkan besarnya energi panas yang masih dapat digunakan, diperoleh dengan cara menghitung sisa energi dari kalor pemanasan air. Dengan memodifikasi persamaan (2), maka Energi pemanasan yang dihasilkan adalah:

$$E_p = Q_w - E_c - E_e = 615 - 70 - 397 = 148 \text{ watt}$$

Energi pemanasan ini masih dapat digunakan untuk sistem pemanas lainnya, seperti pemanas air untuk kebutuhan mandi atau untuk sistem pencucian dan pembilasan. Jika Energi pemanasan tidak digunakan, dapat dikembalikan ke sistem

pemanas air (sumber) sehingga penggunaan bahan bakar atau biogas dapat dihemat dan dapat dimaksimalkan pemanfaatannya hanya untuk energi pendinginan dan energi listrik.



**Gambar 6.** Sistem Pembangkit Listrik Jenis TEG

#### 4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan, dapat diketahui bahwa dalam pembuatan biogas menggunakan sampah rumah tangga masih diperlukan investigasi lanjutan guna mengetahui unsur-unsur penghalang yang menyebabkan tidak terjadinya proses pembakaran. Jika melihat dari substitusi biogas dengan kompor gas, sistem pemanfaatan panas untuk *trigeneration energy* dapat dilakukan dengan baik. Terlepas dari nilai COP dan tegangan TEG yang kecil, sistem trigeneration dapat dikembangkan dengan mempertimbangkan aspek-aspek seperti penggunaan fluida kerja pada sistem pemanasan, jumlah kepingan pada sistem TEG dan pemaksimalan pemanfaatan energi yang disesuaikan dengan kebutuhannya, terutama kebutuhan energi pada sektor rumah tangga.

#### Ucapan terima kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung atas dukungan secara finansial melalui skema Penelitian Mandiri. Peneliti juga mengucapkan apresiasi kepada Jurusan Teknik Refrigerasi dan Tata Udara atas fasilitas sarana dan prasarana selama penelitian ini berlangsung.

#### Daftar pustaka

- [1] Wang W, Fan LW, Zhou P. Evolution of global fossil fuel trade dependencies. *Energy*. 2022 Jan 1; 238:121924.
- [2] REN21. Renewables 2014: global status report. [www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014\\_full%20report\\_low%20res.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf) [Diakses pada tanggal 15 Juni 2023].
- [3] Dehouce, Z. Renewable Energy Technologies, Presentation Module: ME 5521-ME3301. Brunel University Copyright, London, The UK; 2009.
- [4] Zahedi, A. Australian renewable energy progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010; 14(8): p. 2208-2213.
- [5] Hosseini, S. E., Wahid, M. A. Feasibility study of biogas production and utilization as a source of renewable energy in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013; 19: p. 454-462.

- [6] Havukainen, J., Uusitalo, V., Niskanen, A., Kapustina, V., Horttanainen, M. Evaluation of methods for estimating energy performance of biogas production. *Renewable energy*. 2014; 66: p. 232-240.
- [7] Rahman, Md. M. Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: a potentially viable option in rural areas of developing countries. *Renewable Energy*. 2014; 68: pp.35-45.
- [8] Jeong, C. Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas-hydrogen blends. *Hydrogen Energy*. 2009; 34: pp. 9620-9627.
- [9] Ge, Y.T., Tassou, S.A., Chaer, I., Suguartha, N. Performance Evaluation of A Tri-generation System With Simulation and Experiment'. *Applied Energy*. 2009; 86: pp. 2317-2326.
- [10] Tassou, S. A., Lewis, J. S., Ge, Y. T., Hadawey, A., Chaer, I. A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*. 2010; 30 (4): pp. 263-276.
- [11] Deublein, D., Steinhauser A. *Biogas from waste and renewable resources, An Introduction*. 2nd edn. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Boschstr, Germany; 2011.
- [12] Kythreotou, N., Tassou, S.A., Florides, G. An assesment of the biomass potential of cyprus for energy production. *Energy*. 2012; 47: pp.253-261.
- [13] Agonafer TD, Eremed WB, Adem KD. Biogas-based trigeneration system: a review. *Results in Engineering*. 2022 Jul; 2:100509.
- [14] Liu X, Li J, Hou K, Wang S, He M. New environment friendly working pairs of dimethyl ether and ionic liquids for absorption refrigeration with high COP. *International Journal of Refrigeration*. 2022 Feb 1; 134: pp. 159-167.
- [15] Srihirin P, Aphornratana S, Chungpaibulpatana S. A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*. 2001 Dec 1;5(4): pp. 343-72.
- [16] Mukhtar HK, Ghani S. Hybrid ejector-absorption refrigeration systems: a review. *Energies*. 2021 Oct 13; 14(20): 6576.