

## ANALISA KINERJA PENGEMBANGAN DESAIN POSISI RUANG BAKAR MIKROTURBIN GAS

Eko Prasetyo<sup>1</sup>, Rudi Hermawan<sup>1</sup>, Erlanda Augupta Pane<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Srengseng Sawah, Jagakarsa - Jakarta, 12640, Indonesia

\*E-mail koresponden: erlanda.pane@univpancasila.ac.id

Diterima: 25 Mei 2021

Direvisi: 23 Juli 2021

Disetujui: 17 Desember 2021

### ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk melakukan pengembangan desain mikroturbin gas dengan memaksimalkan posisi ruang bakar, dimana merubah posisi ruang bakar dalam bentuk vertikal menjadi horizontal dan dalam kondisi satu poros dengan komponen kompresor dan turbin gas. Metode penelitian yang digunakan adalah melakukan perhitungan perubahan posisi ruang bakar dari posisi vertikal menjadi horizontal, dan analisis termodinamika dengan menggunakan siklus Brayton baik dalam kondisi ideal maupun aktual. Hasil penelitian ini dapat dijelaskan bahwa dengan desain yang baru menghasilkan suhu keluar ruang bakar atau suhu masuk turbin gas sebesar 1242 K dan suhu keluar turbin gas sebesar 870 K. Kondisi ini menghasilkan efisiensi thermal sebesar 27.35 %. Perubahan posisi ruang bakar menjadi posisi horizontal pada pengembangan desain mikroturbin gas, dapat disimpulkan mampu meningkatkan kinerja desain mikroturbin gas.

**Kata kunci:** Horizontal, Mikroturbin Gas, Ruang bakar, Suhu, Tekanan.

### ABSTRACT

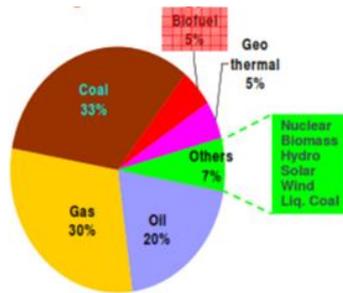
This research was conducted to develop a gas microturbine design by optimizing the position of the combustion chamber, which changes the position of the combustion chamber from vertical to horizontal and in a single axis with compressor and turbine components. The research method used is to calculate the change in the position of the combustion chamber from a vertical to a horizontal position, and thermodynamic analysis using the Brayton cycle in both ideal and actual conditions. The results of this research can be explained that the new design produces an outlet temperature of the combustion chamber or a gas turbine inlet temperature of 1242 K and a gas turbine outlet temperature of 870 K. This condition results in a thermal efficiency of 27.35%. Changing the position of the combustion chamber to a horizontal position in the development of gas microturbine designs can be concluded that can improve the performance of gas microturbine designs.

**Keywords:** Combustion Chamber, Horizontal, Micro Gas Turbine, Pressure, Temperature.

### PENDAHULUAN

Kebutuhan energi selalu mengalami peningkatan seiring dengan adanya peningkatan jumlah populasi manusia serta aktivitas manusia, yang mana kondisi ini menyebabkan penurunan ketersediaan bahan bakar sebagai sumber energi. Umumnya, bahan bakar yang digunakan untuk sumber energi berasal dari bahan bakar konvensional yang terdiri dari bahan bakar minyak bumi, gas bumi, dan batu bara. Namun, kondisi

penurunan bahan bakar konvensional dapat diperbaiki dengan memanfaatkan bahan bakar yang berasal dari energi baru terbarukan, dimana kegiatan tersebut juga mendukung kebijakan pemerintah mengenai pemanfaatan energi baru terbarukan sesuai dengan Dekrit Presiden No. 5 Tahun 2006 yang dapat ditunjukkan pada Gambar 1 (Hermawan *et al.*, 2017)



**Gambar 1.** Target konsumsi energi 2025 Indonesia (Hermawan *et al.*, 2017)

Berdasarkan Gambar 1 dapat dijelaskan bahwa Indonesia merencanakan pemanfaatan sumber bahan bakar dari energi baru terbarukan sekitar 17% pada tahun 2025. Teknologi mikro turbin merupakan salah satu teknologi yang menjanjikan untuk pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai sumber energi yang dapat digunakan untuk kegiatan masyarakat dalam skala mikro. Teknologi mikro turbin yang digunakan memiliki beberapa jenis antara lain mikroturbin hidro, mikroturbin uap, dan mikroturbin gas (Rahman and Malmquist, 2016). Penelitian ini menggunakan teknologi mikroturbin gas, dikarenakan teknologi tersebut mampu menghasilkan daya listrik dengan kapasitas rendah, mudah diinstalasi dan dioperasikan, menghasilkan sedikit buangan emisi, memiliki rasio ekspansi tekanan yang tinggi, serta tingkat panas yang dihasilkan tinggi (Siswantara *et al.*, 2015; Enagi, Al-attab and Zainal, 2017). Bahan bakar yang digunakan pada mikroturbin gas menggunakan bahan bakar *Liquid Petroleum Gases* (LPG), dimana gas ini memiliki kelebihan antara lain merupakan hasil pertama yang ditemukan saat proses pengeboran minyak bumi dan harga komersialnya lebih rendah sekitar 40-60% dibandingkan dengan senyawa hidrokarbon yang lainnya (Olawale *et al.*, 2020). Selain itu, LPG memiliki persentase emisi gas buang yang rendah sehingga LPG menjadi salah satu tipe bahan bakar yang ramah lingkungan (Luthfi *et al.*, 2018). Kelebihan-kelebihan yang dimiliki oleh LPG tersebut dapat membantu dalam hal kinerja optimal mikroturbin gas.

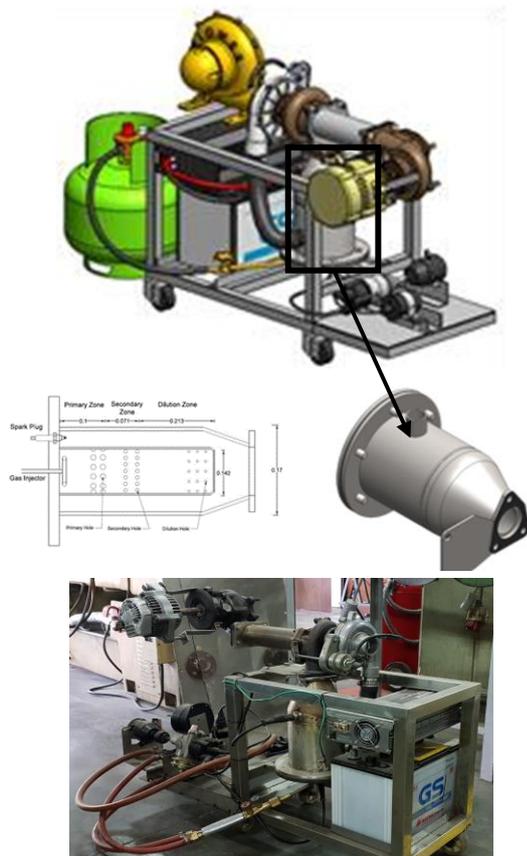
Mikroturbin gas memiliki tiga komponen penyusun antara lain kompresor, ruang bakar, dan turbin gas. Kinerja dari mikroturbin gas tergantung dari kondisi sistem kontrol *input* bahan bakar dan udara dengan memperhatikan rasio massa antara kedua bahan tersebut, tipe

bahan bakar, dan waktu proses pembakaran selama di dalam ruang bakar (Kusnadi and Taryana, 2016). Ketiga faktor tersebut mampu membuat prinsip kerja dari mikroturbin gas menjadi optimal. Adapun penjelasan mengenai prinsip kerja dari mikroturbin gas tersebut adalah aliran udara yang berasal dari lingkungan masuk ke dalam bagian kompresor, dimana di dalam kompresor tersebut aliran udara akan dimampatkan sehingga dapat meningkatkan suhu aliran udara dan tekanan aliran udara tersebut, dimana tekanan aliran udara dapat meningkat sebesar 3-5 kali dibandingkan dengan tekanan aliran udara yang masuk ke dalam kompresor (Xiao *et al.*, 2017). Aliran udara dengan tekanan yang tinggi tersebut kemudian masuk ke dalam ruang bakar; dimana di dalam ruang bakar terjadi reaksi pembakaran antara aliran udara yang berasal dari kompresor dengan aliran gas LPG yang disemprotkan melalui *nozzle* ke dalam ruang bakar. Proses pembakaran di dalam ruang bakar mikro turbin gas memiliki prinsip yang sama dengan proses pembakaran di dalam motor bakar. Senyawa hidrokarbon yang terdapat di dalam kandungan gas LPG bereaksi dengan senyawa oksigen yang berasal dari aliran udara sehingga membentuk senyawa (*hidrolisasi*) yang kemudian terpecah pada saat proses pembakaran (Rosid, 2016).

Proses reaksi pembakaran antara udara dengan gas LPG mampu meningkatkan suhu dan tekanan reaksi, dimana suhu hasil reaksi pembakaran sebesar 925 - 1300°C, dan tekanan reaksi menjadi sebesar 4.5 kali dibandingkan sebelum proses reaksi dengan kondisi keefektifan proses perpindahan panas mencapai persentase sebesar 90% (Vick, 2012). Setelah proses reaksi yang terjadi di ruang bakar, maka aliran gas mampu bakar tersebut memasuki bagian komponen turbin. Kondisi suhu aliran gas mampu bakar tersebut di dalam turbin memiliki besaran 925-948°C (saat kondisi masuk) dan 644-650°C (saat kondisi keluar) (Mansouri *et al.*, 2014). Aliran gas mampu bakar tersebut di dalam turbin berfungsi untuk menggerakkan sudu-sudu turbin dan menghasilkan daya pada poros turbin, yang mana dikarenakan sudu-sudu turbin memiliki satu poros dengan generator, maka daya pada poros turbin dimanfaatkan oleh generator untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik tersebut dapat

dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk kegiatan masyarakat sehari-hari.

Beberapa penelitian sebelumnya telah melakukan penelitian mengenai perancangan desain dan manufaktur mikroturbin gas tersebut antara lain mikroturbin gas yang dirancang oleh Budi Yulianto dan Mashuri (Mashuri, 2017; Yulianto, 2017). Desain mikroturbin gas pada penelitian sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2 dapat dijelaskan bahwa penelitian sebelumnya memiliki kekurangan pada kinerja mikroturbin gas, yang disebabkan posisi yang kurang optimal pada posisi ruang bakar. Komponen ruang bakar merupakan komponen yang penting untuk penentuan kualitas dan kuantitas gas sebelum memasuki turbin. Posisi yang kurang optimal pada posisi ruang bakar, menyebabkan aliran fluida gas yang keluar dari ruang bakar tidak dapat memutar sudu-sudu turbin gas.



**Gambar 2.** Desain mikroturbin gas penelitian sebelumnya (Mashuri, 2017; Yulianto, 2017)

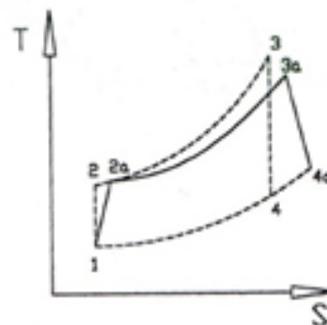
Oleh karena itu, dalam penelitian ini melakukan perubahan perancangan posisi ruang bakar mikroturbin gas tersebut dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja dari

mikroturbin gas tersebut. Metode penelitian yang dilakukan untuk penelitian ini antara lain melakukan analisis kinerja termodinamika dari perubahan posisi ruang bakar tersebut, baik dalam kondisi ideal maupun kondisi aktual.

## METODE PENELITIAN

Perancangan perubahan posisi pada bagian ruang bakar merupakan proses pengembangan dari desain mikroturbin gas sebelumnya. Kondisi ini dilakukan, karena adanya kekurangan kinerja mikroturbin gas yang ditemukan pada desain sebelumnya. Selain proses perancangan posisi ruang bakar, analisis termodinamika juga merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kinerja dari mikroturbin gas tersebut, oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk melakukan analisis termodinamika pada ruang bakar mikroturbin gas yang terbaru dengan kondisi posisi ruang bakar yang optimal.

Analisis termodinamika yang dilakukan terhadap pengembangan desain ruang bakar mikroturbin gas melalui dua tahapan yaitu analisis termodinamika berdasarkan siklus *Brayton* dalam keadaan ideal (teoritis), dan analisis termodinamika berdasarkan siklus *Brayton* dalam keadaan aktual (berdasarkan data pada studi lapangan). Kondisi ideal dan aktual dari siklus *Brayton* dapat dilihat pada Gambar 3. Pada kedua kondisi tersebut memerlukan beberapa data parameter awal, dimana data tersebut dapat mempengaruhi kinerja di komponen ruang bakar.



**Gambar 3.** Diagram T-S siklus *Brayton* ideal dan aktual

Berikut ini merupakan data parameter yang dibutuhkan untuk proses analisis termodinamika, antara lain:

*Specific Heat* : 500 kJ/kg

Properti aliran udara

Cp : 1.093 kJ/kgK  
 Cv : 0.806 kJ/kgK  
 R : 0.287  
 K : 1.357

Aliran Udara Masuk  
 Suhu masuk kompresor (T<sub>1</sub>) : 303 K  
 Tekanan masuk kompresor (P<sub>1</sub>) : 100 kPa

Aliran Udara Keluar  
 Suhu keluar kompresor (T<sub>2</sub>) : 533 K  
 Tekanan keluar kompresor (P<sub>2</sub>) : 400 kPa

Heat Higher Value (HHV) LPG : 51000 kJ/kg

Komposisi gas LPG

CH<sub>4</sub> : 93.8 %  
 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> : 3.9 %  
 C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : 1.5 %  
 N<sub>2</sub> : 0.8 %

Komposisi Aliran Udara

N<sub>2</sub> : 79 %  
 O<sub>2</sub> : 21 %

Berdasarkan data parameter tersebut maka, proses perhitungan yang dapat digunakan untuk perhitungan analisis termodinamika pada perancangan mikroturbin gas antara lain

#### A. Efisiensi Kompresor

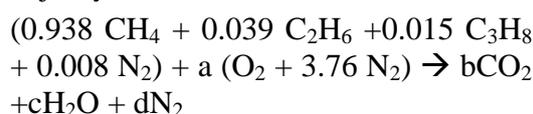
Efisiensi komponen kompresor dipengaruhi oleh kondisi suhu dan tekanan yang masuk serta keluar dari bagian kompresor. Perhitungan efisiensi kompresor dapat menggunakan Persamaan 1 dan 2.

$$T_{2s} = T_1 \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (1)$$

$$\mu_c = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

#### B. Mass Flow Rate Aliran Bahan Bakar

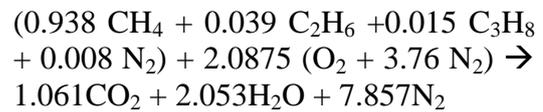
Parameter *mass flow rate* aliran bahan bakar merupakan aliran massa dari pencampuran antara bahan bakar gas LPG dan aliran udara. Kondisi reaksi kimia yang terjadi yaitu



Berdasarkan persamaan reaksi kimia pembakaran antara bahan bakar gas LPG dan aliran udara, maka didapatkan konstanta pada variabel a, b, c, dan d antara lain:

a : 2.0875  
 b : 1.061  
 c : 2.053  
 d : 7.857

Sehingga, persamaan reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar gas LPG dan aliran udara yang terbaru yaitu



#### C. Laju aliran total (Laju aliran bahan bakar dan udara)

Laju aliran total merupakan laju aliran pada gas LPG dan aliran udara. Kondisi rasio antara mol udara dan bahan bakar, serta molekul atom relatif antara udara dan bahan bakar dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3 dan 4.

$$\overline{AF} = \frac{\text{mol}_{\text{udara}}}{\text{mol}_{\text{bahanbakar}}} \quad (3)$$

$$AF = \overline{AF} \times \frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahanbakar}}} \quad (4)$$

Asumsi 1 generator mikroturbin gas menggunakan aliran bahan bakar sebesar 400000 SCFD (*Square Cubic Feet Day*), maka untuk mencari laju aliran bahan bakar (M<sub>f</sub>) dapat menggunakan Persamaan 5.

$$M_f = \frac{400000}{2.204 \times \frac{1}{M_{\text{bahanbakar}}} \times 24 \times 379.48} \quad (5)$$

Sedangkan untuk menghitung laju aliran udara (M<sub>u</sub>) dapat menggunakan Persamaan 6.

$$M_u = AF \times M_f \quad (6)$$

Sehingga laju aliran total didapatkan dengan menggunakan Persamaan 7.

$$M_{\text{total}} = M_f + M_u \quad (7)$$

#### D. Laju Aliran Panas (Q<sub>in</sub>)

Laju aliran panas dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 8.

$$Q_{in} = M_f \times Q_{HV} \times \mu_c \quad (8)$$

#### E. Temperatur Masuk dan Keluar Turbin (T<sub>3</sub> & T<sub>4</sub>)

Temperatur aliran gas yang masuk ke dalam turbin dan keluar turbin dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 9 dan 11

$$T_3 = \frac{Q_{in}}{\dot{m}_t \cdot C_p} + T_2 \quad (9)$$

$$T_{4s} = T_3 \cdot \left( \frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (10)$$

$$T_4 = T_3 - (\mu_T) \cdot (T_3 - T_{4s}) \quad (11)$$

#### F. Kerja bersih ( $W_{net}$ )

Kerja bersih merupakan kerja total yang dilakukan oleh mikroturbin gas, dimana dalam perhitungannya dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan 12,13, dan 14.

$$W_{C,in} = \dot{m}_a \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (12)$$

$$W_{T,out} = \dot{m}_t \cdot C_p \cdot (T_3 - T_4) \quad (13)$$

$$W_{net} = W_{T,out} - W_{C,in} \quad (14)$$

#### G. Efisiensi Total Mikroturbin Gas

Efisiensi kinerja dari mikroturbin gas, dapat dihitung dengan Persamaan 15.

$$\mu_{total} = \frac{W_{C,in}}{W_{T,out}} \times 100\% \quad (15)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan perubahan posisi ruang bakar pada desain mikroturbin gas yang terbaru, dimana posisi ruang bakar tersebut dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4 dapat dijelaskan, bahwa kondisi posisi ruang bakar memiliki posisi yang satu poros dengan komponen kompresor dan turbin gas dan memiliki arah horizontal, jika dibandingkan dengan posisi ruang bakar di desain sebelumnya pada Gambar 2, dimana posisi sebelumnya ruang bakar berada di bawah komponen kompresor dan turbin gas serta dalam keadaan vertikal.

Kondisi posisi ruang bakar pada desain vertikal sebelumnya menyebabkan aliran udara yang berasal dari kompresor bergerak ke arah bawah menuju ruang bakar, yang kemudian terjadi proses reaksi pembakaran dengan aliran gas LPG. Hasil reaksi pembakaran antara aliran udara dengan gas LPG menghasilkan aliran gas mampu bakar yang bergerak secara

vertikal ke atas menuju komponen turbin gas. Kondisi aliran gas mampu bakar yang bergerak secara vertikal menuju turbin gas, menyebabkan terjadinya penurunan tekanan dan penurunan suhu akibat adanya *pressure losses* dari tumbukan terhadap sisi-sisi permukaan bagian penghubung antara ruang bakar dengan turbin gas, sehingga aliran gas mampu bakar pada saat masuk ke dalam turbin gas menyebabkan kurangnya tekanan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin gas.

Kekurangan kinerja yang dihasilkan dari kondisi tersebut, diperbaiki dengan perubahan kondisi posisi ruang bakar dalam kondisi horizontal dan satu poros dengan komponen yang lain. Kondisi posisi ruang bakar secara horizontal dan satu poros dengan komponen kompresor dan turbin gas, menyebabkan pemanfaatan aliran gas mampu bakar sebagai hasil reaksi menjadi optimum. Hal ini dapat terjadi dikarenakan aliran udara yang memiliki suhu dan tekanan optimal dari kompresor, kemudian mengalami proses reaksi pembakaran dengan aliran gas LPG di ruang bakar yang menghasilkan aliran gas mampu bakar, dimana aliran gas mampu bakar tersebut dimanfaatkan secara langsung oleh komponen turbin gas untuk menggerakkan sudu-sudu turbin gas karena satu poros tanpa mengalami pergerakan aliran gas mampu bakar yang menyebabkan terjadi penurunan tekanan (*pressure losses*) untuk menggerakkan sudu-sudu turbin.



**Gambar 4.** Desain Mikroturbin Gas Baru

Hasil analisis posisi ruang bakar yang terbaru dengan posisi ruang bakar sebelumnya, dapat dilihat pada data Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil perbandingan analisis termodinamika pada mikroturbin gas

A. Kondisi Ideal		Desain Mikroturbin Gas-		
No	Data Parameter	Budi Yulianto	Mashuri	Sekarang
1	Suhu udara masuk <i>compressor</i> ( $T_1$ )	309 K	309 K	303 K
2	Tekanan atmosfer masuk <i>compressor</i> ( $P_1$ )	100 kPa	100 kPa	100 kPa
3	Suhu gas masuk turbin ( $T_3$ )	223 K	1223 K	1223 K
4	Suhu udara keluar <i>compressor</i> ( $T_2$ )	688 K	318 K	533 K
5	Kerja <i>compressor</i> ideal ( $W_k$ ideal)	391.16 kJ/kg	8.544 kJ/kg	15.07 kJ/kg
6	Panas ideal ( $Q_{in}$ ideal)	604.45 kJ/kg	987.073 kJ/kg	986.57 kJ/kg
7	Suhu gas keluar turbin ( $T_4$ )	549.3 K	660.4 K	617.73 K
8	Kerja turbin ideal ( $W_T$ ideal)	750.25 kJ/kg	633.95 kJ/kg	679.18 kJ/kg
9	Panas keluar turbin	361.66 kJ/kg	361.66 kJ/kg	375.97 kJ/kg
10	Efisiensi thermal ideal	59.4%	63.4 %	67.3 %
B. Kondisi Aktual		Desain Mikroturbin Gas-		
No	Data Parameter	Budi Yulianto	Mashuri	Sekarang
1	Suhu gas masuk turbin ( $T_3$ )	1223 K	1223 K	1242 K
2	Aliran massa udara masuk <i>compressor</i>	0.0233 – 0.18 m <sup>3</sup> /s	0.0233 – 0.18 m <sup>3</sup> /s	1.596 m <sup>3</sup> /s
3	Suhu udara masuk <i>compressor</i> ( $T_1$ )	309 K	309 K	304.9 K
4	Tekanan udara masuk <i>compressor</i> ( $P_1$ )	100 kPa	100 kPa	100 kPa
5	Suhu udara keluar <i>compressor</i> ( $T_2$ )	321 K	318 K	320 K
6	Tekanan udara keluar <i>compressor</i> ( $P_2$ )	240 kPa	280 kPa	260 kPa
7	Suhu gas keluar turbin ( $T_4$ )	545.4 K	911.044 K	870 K
8	Tekanan gas keluar turbin	100 kPa	100 kPa	100 kPa
9	Kerja aktual <i>compressor</i>	14.1 kJ/kg	9.2 kJ/kg	0.559 kJ/kg
10	Kerja aktual turbin	141.8 kJ/kg	352.024 kJ/kg	15.13 kJ/kg
11	Tekanan aktual ruang bakar	209 kPa	268 kPa	240 kPa
12	Panas aktual masuk ruang bakar	392.5 kJ/kg	986.233 kJ/kg	382 kJ/kg
13	Kerja bersih	127.7 kJ/kg	342.8 kJ/kg	265 kJ/kg
14	Efisiensi thermal aktual	32.5 %	34.8 %	27.35 %

Berdasarkan data pada Tabel 1, dapat dijelaskan bahwa kondisi posisi ruang bakar

yang terbaru menyebabkan suhu hasil reaksi pembakaran yang masuk ke dalam turbin gas ( $T_3$ ) sebesar 1242 K, yang memiliki besaran lebih tinggi dibandingkan dengan besaran suhu  $T_3$  yang dihasilkan pada dua buah desain mikroturbin gas sebelumnya, dengan kondisi suhu yang tinggi ini dengan penambahan kondisi posisi satu poros, maka aliran gas mampu bakar tersebut dapat dimanfaatkan secara optimal oleh turbin gas untuk menggerakkan sudu-sudu turbin gas. Hal ini terbukti dengan kondisi suhu keluar dari turbin gas ( $T_4$ ) yaitu sebesar 870 K. Berdasarkan hal tersebut maka dihasilkan efisiensi *thermal* secara aktual sebesar 27.35 %. Hasil efisiensi yang lebih rendah ini, diakibatkan adanya *losses* yang terjadi pada aliran gas mampu bakar terhadap sisi-sisi permukaan di dalam komponen turbin gas setelah dimanfaatkan untuk menggerakkan sudu-sudu turbin gas.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dijelaskan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa perubahan posisi ruang bakar pada desain mikroturbin gas, yang berawal dalam kondisi vertikal menjadi horizontal dan satu poros dengan komponen kompresor dan turbin gas, mampu memanfaatkan aliran gas mampu bakar secara optimal untuk menggerakkan sudu-sudu turbin dalam menghasilkan energi listrik. Efisiensi *thermal* yang dihasilkan sedikit lebih rendah dibandingkan dengan desain sebelumnya, dikarenakan adanya *losses* yang terjadi pada aliran gas mampu bakar terhadap sisi-sisi permukaan di dalam komponen turbin gas.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para laboran Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila yang telah membantu proses penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Enagi, I. I., Al-attab, K. A. and Zainal, Z. A. 2017. *Combustion Chamber Design and Performance for Micro Gas Turbine Application*. Fuel Processing Technology, 166 : 258–268. doi: 10.1016/j.fuproc.2017.05.037.
- Hermawan, R. et al. 2017. *Analisa Perancangan Ruang Bakar Pada Pembangkit Listrik Mikro Turbin Gas*

- Bahan Bakar LPG*. in Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi. Jakarta, pp. 1–12.
- Kusnadi, K. and Taryana, T. 2016. *Usulan Waktu Penggantian Optimum Komponen Mesin Gas Engine (Prechamber Gas Valve) Dengan Model Age-Based Replacement di PT. XYZ*. Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta, 8(1): 45–52. doi: 10.24853/jurtek.8.1.45-52.
- Luthfi, M. et al. 2018. *Uji Komposisi Bahan Bakar dan Emisi Pembakaran Pertalite dan Premium*. Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta, 10(1): 67–72. doi: 10.24853/jurtek.10.1.67-72.
- Mansouri, M. et al. 2014. *Micro Gas Turbine Configurations with Carbon Capture-Performance Assessment using a Validated Thermodynamic Model*. Applied Thermal Engineering, 73(1): 170–182. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.043.
- Mashuri. 2017. *Analisa Termodinamika Pembangkit Listrik Mikro Turbin Gas Kapasitas 3 kW*. Universitas Pancasila.
- Olawale, D. et al. 2020. *Evaluation of Emission Indices and Air Quality Implications of Liquefied Petroleum Gas Burners*. Heliyon, 6(8):1–6. doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04755.
- Rahman, M. and Malmquist, A. 2016. *Modeling and Simulation of an Externally Fired Micro-Gas Turbine for Standalone Polygeneration Application*. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 138(11):1–15. doi: 10.1115/1.4033510.
- Rosid, R. 2016. *Analisa Proses Pembakaran Pada Motor Bensin 113.5 cc Dengan Simulasi ANSYS*. Jurnal Teknologi Universitas Muhammadiyah Jakarta, 8(2):89–93. doi: 10.24853/jurtek.8.2.89-93.
- Siswantara, A. . et al. 2015. *Analisis unjuk kerja sistem turbin gas mikro bioenergi proto x-3 berbahan bakar LPG*. in Seminar Nasional Teknik Mesin. Banjarmasin, pp. 1–8.
- Vick, M. 2012. *High Efficiency Recuperated Ceramic Gas Turbine Engines for Small Unmanned Air Vehicle Propulsion*. Imperial College London.
- Xiao, G. et al. 2017. *Recuperators for Micro Gas Turbines : A Review*. Applied Energy, 197: 83–99. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.03.095.
- Yulianto, B. 2017. *Analisa Ruang Bakar Pada Pembangkit Listrik Mikro Turbin Gas Kapasitas 3 kW*. Universitas Pancasila.

