

## DESAIN DAN ANALISIS NUMERIK RUANG BAKAR BRIKET SAMPAH ANORGANIK UNTUK PENGAPLIKASIAN PADA MIKROTURBIN GAS

### Erlanda Augupta Pane

Tenaga Pengajar (Dosen)  
Universitas Pancasila  
Jurusan Teknik Mesin  
erlanda.pane@univpancasila.ac.id

### Eko Prasetyo

Tenaga Pengajar (Dosen)  
Universitas Pancasila  
Jurusan Teknik Mesin  
ekoprasyo@univpancasila.ac.id

### Rudi Hermawan

Tenaga Pengajar (Dosen)  
Universitas Pancasila  
Jurusan Teknik Mesin  
hermawanrudi73@gmail.com

### David Hansen Gouwin

Mahasiswa S1  
Universitas Pancasila  
Jurusan Teknik Mesin  
hansengouwin23@yahoo.co.id

*The utilization of briquettes as a source of electricity generation is still low due to the briquette characteristics that have high moisture content. This research analyzes the briquette's potential as a source of electrical energy by utilizing its syngas with microturbine gas. The high quality of syngas can be reached by the optimal combustion chamber design. Therefore, the research aim is to be able to design the optimum combustion chamber for the briquette combustion process to generate the syngas. This research method uses two steps, i.e., the design of the combustion chamber and numerical analysis of the briquette combustion process through Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. Numerical analysis of the combustion process using three types of briquettes with different inorganic waste compositions, i.e., K1 type, K2 type, and K3 type. The research results explain the optimum design of the combustion chamber with a total length dimension of 220 mm, an inlet fuel section, and combustion chamber-syngas pipeline diameter of 50 mm and 75 mm, respectively. In addition, the dimensions of the primary air holes are 7 mm, and the secondary air holes are 5 mm. Type K1 briquettes are capable of producing syngas (kg/s) consisting of  $6.9 \times 10^{-13}$  CO,  $3.04 \times 10^{-31}$  H<sub>2</sub>, and  $1.8 \times 10^{-20}$  CH<sub>4</sub>. That syngas composition includes in the criteria of syngas in the microturbines gas that produce electric power of 2.3-2.5 kW. The conclusions explain that the combustion chamber can be added to the microturbine gas component, and K1 type briquette can be a solid fuel.*

**Keywords:** Briquette, CFD, Combustion Chamber, Inorganic Waste, Syngas

## 1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan sumber energi baru terbarukan merupakan kunci utama dalam keberlanjutan kehidupan sosial manusia saat ini, disamping masih adanya pemanfaatan sumber energi konvensional yang berasal dari minyak bumi, gas bumi, dan batu bara [1]. Dampak negatif yang dihasilkan dari pemanfaatan sumber energi konvensional terhadap ekosistem lingkungan dalam bentuk emisi gas rumah kaca (GHGs) sebagai hasil proses pembakaran yang menyebabkan pemanasan global, perubahan iklim global, dan kenaikan permukaan air laut menjadi alasan terhadap pentingnya pemanfaatan sumber energi baru terbarukan [2]. Selain itu, karakteristik sumber energi baru terbarukan yang memberikan kondisi energi bersih tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca (GHGs) menjadi alasan juga untuk proses transisi dari pemanfaatan sumber energi konvensional menuju ke sumber energi baru terbarukan [3]. Kondisi ini didukung dengan adanya target pemanfaatan sumber energi baru terbarukan sebesar 20-25% yang terjadi pada tahun 2025 [4].

Briket merupakan produk dari pemanfaatan sumber energi baru terbarukan yang salah satunya berasal dari sampah organik dan sampah anorganik melalui proses densifikasi. Produk sampah yang semakin

meningkat setiap tahunnya, yang mana produk sampah pada tahun 2016 telah mencapai 2010 juta ton dan diprediksi semakin meningkat pada tahun 2050 yaitu sebesar 3400 juta ton [5], serta faktor pengelolaan sampah yang sebatas dalam proses pembuangan dan pembakaran di lingkungan terbuka dengan persentase proses sebesar 50-75% dan menimbulkan dampak negatif dalam bentuk polusi udara dengan persentase sebesar 52.83% [5,6] menguatkan asumsi bahwa diperlukan adanya proses pengelolaan yang tepat terhadap sampah tersebut, terutama dalam pemanfaatannya sebagai sumber energi baru terbarukan dalam bentuk bahan bakar padat. Umumnya produk briket berasal dari sampah organik sebagai bahan baku sedangkan sampah anorganik dijadikan sebagai bahan pelengkap dalam proses densifikasi. Namun, pada kondisi saat ini produk briket diutamakan dapat lebih memanfaatkan sampah anorganik sebagai bahan baku utama briket karena sampah anorganik lebih sulit mengalami proses degradasi secara alamiah dibandingkan dengan sampah organik akibat adanya komposisi penyusun sampah yang berasal dari bahan dengan sifat plastik (*polyethylene dan polypropylene*) [7]. Beberapa penelitian sebelumnya juga membuktikan bahwa meskipun sampah anorganik hanya sebagai bahan pelengkap penyusun briket, namun potensinya sangat besar jika dijadikan sebagai bahan baku utama dikarenakan sampah anorganik mampu meningkatkan nilai kalor briket mencapai 10 – 33.56 MJ/kg [8–10]. Produk briket memiliki beberapa kelebihan antara lain mudah dibakar, memiliki nilai densitas dan nilai kalor yang tinggi (per satuan volume), kelembapan rendah, suhu nyala api homogen dan rata, mudah disimpan, tidak mudah pecah dan solid, nyala bakar cukup lama, tidak menghasilkan jelaga, dan biaya cukup murah [11–14].

Berdasarkan kelebihan yang dimiliki oleh briket tersebut beberapa aplikasi penggunaan briket difokuskan sebagai bahan bakar tungku biomassa dalam skala rumah tangga sebagai pengganti bahan bakar *Liquid Petroleum Gases* (LPG) dikarenakan biaya konsumsi energi yang lebih murah [15]. Selain itu, pemanfaatan briket sebagai salah satu bahan pupuk tanaman pertanian juga mampu meningkatkan produksi panen lebih dari 30% dan efisiensi dalam pemakaian nutrisi ke dalam tanaman pertanian sebesar 66% [16]. Namun, pemanfaatan briket sebagai sumber panas dan daya listrik sepenuhnya belum terlalu banyak digunakan oleh masyarakat umum. Kondisi ini didukung dengan persentase penggunaannya lebih rendah jika dibandingkan dengan limbah biomassa hasil dari proses torefaksi yang disebabkan oleh karakteristik produk torefaksi lebih kering jika dibandingkan dengan karakteristik produk briket yang memiliki kadar air tinggi [17,18]. Selain itu, diketahui juga bahwa penggunaan briket sebagai bahan bakar untuk sumber daya listrik lebih boros bila dibandingkan dengan produksi energi listrik yang dihasilkan dari pembangkit listrik tersebut [19], dan adapun juga jika dalam kondisi massa briket yang digunakan tetap, maka konsumsi laju aliran udara yang digunakan dalam proses produksi energi listrik sangat boros dari 40 Nm<sup>3</sup>/jam menuju 400 Nm<sup>3</sup>/jam (10 kali lipat) hanya untuk meningkatkan daya listrik dari 18kW menuju 23 kW [20]. Perlu diketahui bahwa sebagian besar aplikasi produk briket yang dijelaskan sebelumnya menggunakan briket dengan bahan baku penyusun utamanya adalah sampah organik. Berdasarkan kelemahan yang ditemukan pada saat pengaplikasian briket sampah organik sebagai sumber daya listrik tersebut, maka penelitian ini menggunakan produk briket sampah anorganik sebagai pengganti briket sampah organik dan sebagai sumber daya listrik dengan melalui teknologi mikroturbin gas. Pemanfaatan mikroturbin gas sebagai media pembangkit listrik dalam penelitian ini dikarenakan media tersebut dapat dengan mudah dimanfaatkan untuk sumber daya listrik skala rumah tangga karena ukuran dimensinya yang kecil, kompak dan solid. Selain itu, mikroturbin gas memiliki rasio daya listrik terhadap massa bahan bakar mikroturbin gas yang tinggi, tingkat energi panas yang tinggi, level emisi gas buang yang rendah, biaya operasional dan perawatan yang rendah, dan fleksibel terhadap bahan bakar yang digunakan pada mikroturbin gas [21]. Umumnya daya listrik yang dihasilkan oleh mikroturbin gas memiliki range antara 25-500 kW [22], sehingga dengan kondisi tersebut dan digabungkan dengan potensi dari produk briket anorganik yang dapat meningkatkan nilai kalor briket diharapkan dapat menghasilkan daya listrik yang optimum.

Pemanfaatan potensi briket sampah anorganik dalam sistem mikroturbin gas dilakukan melalui pemanfaatan gas mampu bakar yang dihasilkan dari proses pembakaran briket sampah anorganik. Gas mampu bakar tersebut harus memiliki komposisi antara lain gas Hidrogen (H<sub>2</sub>), gas Karbon Monoksida (CO), dan gas Metana (CH<sub>4</sub>). Beberapa penelitian sebelumnya menjelaskan bahwa dengan persentase gas hidrogen sebesar 0.6-0.8% dari total volume gas mampu bakar, dan persentase gas karbon monoksida sebesar 1-3% dari total volume gas mampu bakar dapat menghasilkan daya listrik sebesar 30 kW pada mikroturbin gas [23]. Selain itu, dengan kandungan senyawa karbon sebesar 66.7%, senyawa oksigen sebesar 19.6%, dan senyawa hidrogen sebesar 7.5% mampu menghasilkan daya listrik sebesar 30kW [24]. Tingginya kualitas gas mampu bakar yang digunakan dalam mikroturbin gas tersebut tidak terlepas dari pengaruh desain optimum ruang bakar briket dalam melakukan proses pembakaran dan degradasi komponen penyusun briket yang salah satunya adalah gas mampu bakar [25]. Desain ukuran dimensi ruang bakar yang optimum diperhitungkan dari analisis zat terbang (*volatile matter*) yang merata, suplai oksigen yang mencukupi, laju

aliran gas mampu bakar yang dihasilkan, kebutuhan massa aliran udara-bahan bakar, material penyusun ruang bakar, dan kestabilan api pembakaran [26,27]. Oleh karena itu, penelitian ini melakukan perancangan desain ruang bakar, dan analisis proses pembakaran di dalam desain ruang bakar yang optimal. Metode penelitian yang dilaksanakan dalam penelitian ini meliputi tahapan perancangan dan analisis numerik proses pembakaran briket pada bagian ruang bakar. Tahap perancangan ruang bakar didasarkan pada parameter rasio bahan bakar dan udara ( $A/F_{ratio}$ ) yang masuk ke dalam ruang bakar dan kebutuhan gas mampu bakar dalam teknologi mikroturbin gas. Analisis proses pembakaran briket pada ruang bakar dilakukan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dengan menganalisis komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan, penyebaran suhu, laju aliran massa bahan bakar, dan laju aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar. Adapun karakteristik briket sampah anorganik yang digunakan sebagai data parameter dalam proses analisis numerik ruang bakar mempertimbangkan komposisi dari uji *ultimate* dan uji *proximate*. Tujuan penelitian ini adalah mampu membuat desain optimum ruang bakar briket anorganik untuk proses pembakaran briket dalam menghasilkan komposisi gas mampu bakar yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan daya listrik pada mikroturbin gas. Nilai keterbaruan yang diangkat dalam penelitian ini adalah memanfaatkan briket sampah anorganik sebagai sumber baru energi baru terbarukan.

## 2. METODE DAN BAHAN

Metode penelitian yang dilakukan melalui dua tahapan yaitu perancangan desain ruang bakar untuk proses pembakaran briket sampah anorganik, dan analisis numerik proses pembakaran briket di dalam ruang bakar melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Desain rancangan ruang bakar dibentuk untuk mengalami proses pembakaran secara sempurna untuk menghasilkan gas mampu bakar yang dapat dimanfaatkan oleh mikroturbin gas. Oleh karena itu, desain ruang bakar tersebut harus mengacu terhadap kapasitas gas mampu bakar yang dimanfaatkan untuk proses pembangkit listrik pada mikroturbin gas. Umumnya, daya mikroturbin gas sebesar 60 kW membutuhkan kapasitas gas mampu bakar sebesar 0.0096 kg/s [28]; sedangkan daya mikroturbin gas sebesar 2.3-2.5 kW membutuhkan kapasitas gas mampu bakar sebesar 0.00032-0.00048 kg/s [29]. Kapasitas gas mampu bakar tersebut dapat dicapai dengan kondisi karakteristik briket sampah anorganik dan kondisi aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar secara optimal.

Analisis karakteristik briket sampah anorganik dilakukan dengan memperhatikan ukuran dimensi bahan bakar yang masuk ke dalam ruang pembakaran, dimana ukuran dimensi bahan bakar harus seragam. Ukuran dimensi yang seragam membuat nyala api pembakaran yang rata, mengurangi emisi polutan, serta suhu dan waktu pembakaran yang rata [30]. Selain itu, rasio bahan bakar antara komponen *fixed carbon* dengan *volatile matter* diijinkan memiliki nilai rasio optimal sebesar 2, yang mana kondisi ini diperlukan untuk kemudahan dalam pembakaran dan menghindari permasalahan saat penyalaan api [31]. Komposisi sampah anorganik yang digunakan juga harus memiliki kandungan senyawa karbon yang lebih dari 30%, yang mana dengan kadar tersebut dapat membuat peningkatan laju pembakaran, dan nilai kalor briket tersebut [30]. Nilai senyawa karbon yang lebih dari 30% pada sampah anorganik terdapat pada jenis sampah kertas, botol plastik, plastik bungkus, dan *styrofoam* [32]. Berdasarkan kondisi tersebut, maka komposisi sampah anorganik yang dimanfaatkan untuk proses densifikasi dalam pembuatan briket dapat ditentukan dan dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1:** Komposisi sampah anorganik pada briket

NO	KOMPOSISI BAHAN (%)				KODE
	KERTAS	PLASTIK BOTOL	PLASTIK BUNGKUS	STYROFOAM	
1	60	20	10	10	K1
2	40	30	20	10	K2
3	30	40	20	10	K3

Komposisi briket yang telah ditentukan tersebut, dilakukan proses pembuatan briket dengan mengambil bentuk silinder. Penggunaan briket silinder dalam penelitian ini disebabkan oleh karakteristik briket silinder yang memiliki nilai uji *ultimate* dan *proximate* yang tinggi, nilai densitas yang tinggi pada saat proses karbonisasi, meningkatkan laju nyala api, dan mempercepat efisiensi devolatilisasi briket [30,33]. Hasil pengujian *ultimate* dan pengujian *proximate* pada jenis briket tersebut dapat dilihat pada data Tabel 2.

**Tabel 2:** Hasil Pengujian Briket Sampah Anorganik

NO	KODE BRIKET	UJI ULTIMATE (%)	UJI PROXIMATE (%)
1	K1	Karbon: 49.7% Hidrogen: 5.8%	<i>Fixed Carbon</i> : 7.6% <i>Volatile Matter</i> : 90.1%

NO	KODE BRIKET	UJI ULTIMATE (%)	UJI PROXIMATE (%)
		Oksigen: 44.3%	Moisture Content: 1.0%
		Nitrogen: 0.2%	Ash Content: 1.3%
2	K2	Karbon: 48.23%	Fixed Carbon: 10.03%
		Hidrogen: 5.39%	Volatile Matter: 83.18%
		Oksigen: 45.96%	Moisture Content: 2.89%
		Nitrogen: 0.42%	Ash Content: 3.9%
3	K3	Karbon: 34.13%	Fixed Carbon: 24.25%
		Hidrogen: 21.88%	Volatile Matter: 21.67%
		Oksigen: 43.3%	Moisture Content: 27.87%
		Nitrogen: 0.69%	Ash Content: 26.21%

Setelah mengetahui kondisi karakteristik briket yang digunakan dalam penelitian ini, maka kondisi aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar juga perlu diperhitungkan. Sistem aliran udara menggunakan sistem konveksi paksa, dimana metode ini menggunakan sumber luar yang berasal dari blower untuk mendistribusikan aliran udara ke dalam ruang bakar. Pemanfaatan sistem konveksi paksa dikarenakan sistem ini tidak tergantung terhadap perbedaan suhu fluida yang menyebabkan adanya efek *buoyancy* dan fenomena kavitasi yang berbahaya untuk proses pendistribusian aliran udara [34], serta juga dapat menghemat waktu proses pembakaran [35]. Aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar tersebut membawa kandungan senyawa hidrogen (H) dan oksigen (O), sehingga untuk menentukan laju alirannya juga berdasarkan terhadap kondisi parameter rasio H/C dan O/C. Rasio H/C dan O/C dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran bahan bakar, dan mengurangi produk karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), kadar air, dan asap selama proses pembakaran berlangsung [36,37]. Adapun juga, proses pengumpanan bahan bakar briket ke dalam ruang pembakaran menggunakan sistem *batch*, dimana sistem ini bekerja dengan proses mengumpan bahan bakar dalam satu kali untuk proses pembakaran satu siklus yang dilakukan sama untuk proses berikutnya.

### 2.1 Desain Ruang Bakar Briket

Proses desain ruang bakar dilakukan setelah mengetahui kondisi karakteristik briket sampah anorganik, kondisi aliran udara, dan kebutuhan kapasitas gas mampu bakar pada mikroturbin gas yang telah dijelaskan sebelumnya. Desain ruang bakar yang dirancang meliputi tiga bagian yaitu ruang pembakaran, lubang udara, dan bagian *outlet* ruang bakar sebagai saluran gas mampu bakar menuju bagian pengumpanan di dalam mikroturbin gas. Penelitian ini menggunakan kapasitas gas mampu bakar sebesar 0.00032-0.00048 kg/s, untuk menyesuaikan daya listrik yang dihasilkan pada mikroturbin gas dengan *range* sebesar 2.3-2.5 kW [29], untuk penerapan pada skala rumah tangga. Berdasarkan kapasitas gas mampu bakar yang dihasilkan sebesar 0.00032-0.00048 kg/s tersebut, maka untuk perhitungan desain pada bagian ruang bakar, lubang udara, dan saluran gas mampu bakar yaitu:

#### A. Ruang Pembakaran

Bentuk ruang pembakaran yang digunakan berupa silinder kerucut potong, yang mana desain ruang bakar tersebut menggunakan rumus Persamaan 1 [38].

$$d^2 (isi\_silinder) = d^2 \cdot (\pi \cdot r^2 \cdot L) = 0 \tag{1}$$

$$\pi \cdot r^2 \cdot L = \frac{Q_{gas}}{\rho_{briket}} \tag{2}$$

#### B. Lubang Udara

Kebutuhan aliran udara pada ruang bakar menggunakan parameter rasio antara H/C dan O/C yang dapat membantu dalam penentuan efisiensi pembakaran [36], sehingga rumus yang digunakan untuk kebutuhan udara dapat dilihat pada Persamaan 3 sampai dengan Persamaan 6 [39].

$$W_o = 2.67C + 8 \left[ H - \frac{O}{8} \right] + S \tag{3}$$

$$Ath = 11.47C + 34.28 \left[ H + \frac{O}{8} \right] + 4.31S \tag{4}$$

$$Aa = x \cdot Ath \tag{5}$$

$$q = \frac{Aa}{\rho_{udara}} \tag{6}$$

Setelah mengetahui kondisi aliran udara yang dibutuhkan untuk proses pembakaran briket sampah anorganik, maka luas area dimensi dari lubang udara dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 7 sampai dengan Persamaan 12 [39].

$$M_{t(x)} = q \cdot x \tag{7}$$

$$Fa = \bar{R} \cdot [Ft + M_{t(x)}] \tag{8}$$

$$V_{ko} = Fa / \rho_{gas} \tag{9}$$

$$V_{tm} = \frac{V_{ko} \cdot T_k}{T_o} \tag{10}$$

$$V = 4.48 \cdot \sqrt{\frac{h \cdot (T_g - T_\infty)}{273 + T_\infty}} \cdot C \tag{11}$$

$$A_{lubang} = \frac{V_{tm}}{V} \tag{12}$$

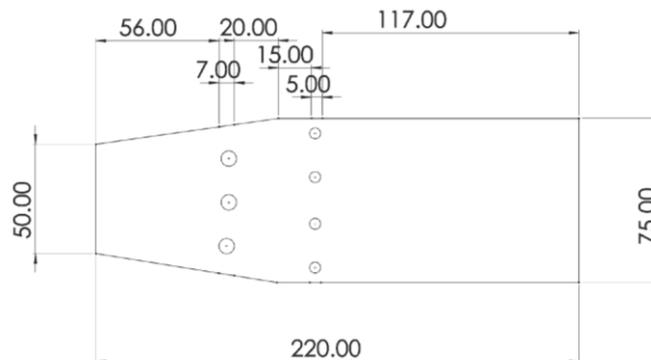
### C. Saluran Gas Mampu Bakar (Bagian *Outlet* Ruang Bakar)

Desain saluran gas mampu bakar memiliki fungsi untuk dapat menyalurkan gas mampu bakar ke dalam bagian pengumpan gas mampu bakar di dalam mikroturbin gas. Rumus desain saluran gas mampu bakar tersebut dapat dilihat pada Persamaan 13 dan Persamaan 14 [39].

$$\dot{m}_a = CA \cdot \left(\frac{P}{RS}\right) \cdot \left(\frac{1}{Th}\right) \cdot \sqrt{2gh \cdot \left(\frac{T_h - T_{amb}}{T_{amb}}\right)} \tag{13}$$

$$D = \sqrt{\frac{L}{\frac{1}{4}\pi}} \tag{14}$$

Berdasarkan persamaan desain ruang bakar tersebut, maka dapat dihasilkan rancangan ruang bakar untuk proses pembakaran briket. Desain rancangan ruang bakar untuk proses pembakaran briket sampah anorganik memiliki ukuran dimensi panjang sebesar 220 mm, dengan ukuran dimensi pada sisi *inlet* bahan bakar sebesar 50 mm, dan sisi ruang bakar utama bersamaan dengan bagian *outlet* ruang bakar sebesar 75 mm, yang mana sisi *outlet* dari ruang bakar juga menjadi sebagai bagian saluran gas mampu bakar ke bagian pengumpanan gas mampu bakar di dalam mikroturbin gas. Ukuran dimensi lubang udara pada ruang bakar memiliki dua ukuran dimensi yang masing-masing diperuntukkan untuk lubang udara *primary air holes* dan *secondary air holes* yakni sebesar 7 mm, dan 5 mm. Hasil gambaran desain ruang bakar tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1:** Desain ruang bakar briket sampah anorganik

## 2.2 Analisis Numerik Desain Ruang Bakar Briket

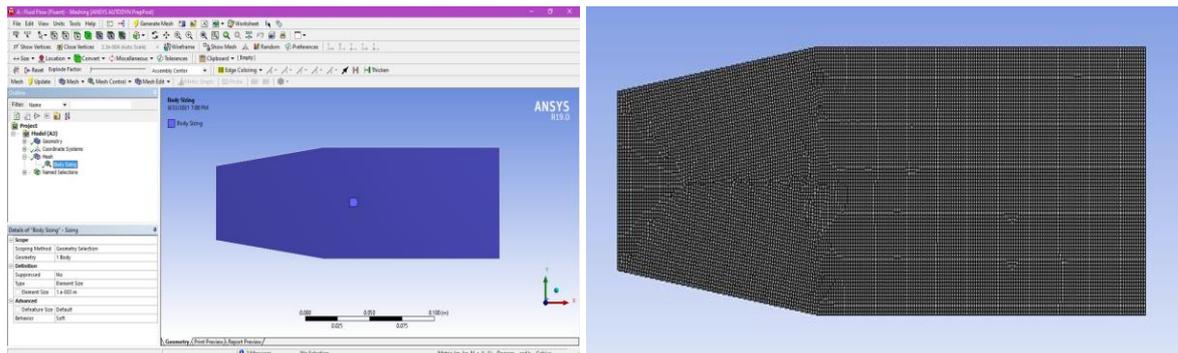
Desain ruang bakar briket sampah anorganik yang telah dirancang, kemudian dilakukan proses

analisis numerik dengan menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Proses simulasi dilakukan setelah proses *meshing* desain ruang bakar briket sampah anorganik, dimana pengaturan proses *meshing* desain ruang bakar dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3:** Sistem pengaturan proses *meshing* desain ruang bakar

NO	KOMPONEN	KETERANGAN
1	<i>Element Order</i>	<i>Linear</i>
2	<i>Size Function</i>	<i>Adaptive</i>
3	<i>Relevance Center</i>	<i>Fine</i>
4	<i>Element Size</i>	<i>Default</i>
5	<i>Mesh Defeaturing</i>	<i>Yes</i>
6	<i>Defeature Size</i>	<i>Default</i>
7	<i>Transition</i>	<i>Slow</i>
8	<i>Initial Size Speed</i>	<i>Assembly</i>
9	<i>Span Angle Center</i>	<i>Fine</i>
10	<i>Bounding Box Diagonal</i>	0.232430 m
11	<i>Average Surface Area</i>	1.5463e-002 m <sup>2</sup>

Berdasarkan data Tabel 3 dapat dijelaskan bahwa proses *meshing* pada desain ruang bakar menggunakan model *dynamic meshing* dalam kondisi *smoothing* sehingga menciptakan setiap komponen *cell meshing* desain memiliki bentuk tetrahedral. Penggunaan *dynamic mesh* dikarenakan model tersebut bekerja pada setiap *cell* interior dengan menyesuaikan posisi *node* untuk meningkatkan kualitas *cell*, tanpa mempengaruhi jumlah *node* dan konektivitasnya, sehingga membuat waktu proses komputasi ataupun iterasi desain berjalan dalam kondisi rendah, dan teliti [40,41]. Hasil proses *meshing* desain ruang bakar dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2:** Hasil *meshing* desain ruang bakar briket sampah anorganik

Hasil *meshing* desain ruang bakar kemudian dilanjutkan dengan proses simulasi CFD yang bertujuan untuk menganalisis proses pembakaran ketiga tipe jenis briket yang telah dijelaskan pada Tabel 2 di dalam desain ruang bakar yang optimal. Analisis simulasi CFD mengaplikasikan sistem algoritma sederhana dalam desain ruang bakar dengan model *Steady-State Governing Equation* [42]. Secara teori, umumnya proses simulasi CFD pembakaran yang melibatkan model aliran turbulente dan reaksi kimia antara gas mampu bakar dan aliran udara menggunakan model RANS (*Reynolds-Averaged Navier Stokes*) yang diselesaikan dengan persamaan FEM (*Finite Element Method*) dan sistem algoritma SIMPLE dikarenakan memiliki perhitungan komputasi yang lebih sederhana dibandingkan dengan model yang lain [28]. Selain model RANS, terdapat juga model *mass conservation*, *momentum conservation*, *energy conservation*, dan model *species conservations* serta model *finite-rate/eddy-dissipation rates* untuk laju aliran gas mampu bakar [43]. Persamaan-persamaan perhitungan simulasi CFD tersebut dapat disajikan dalam Tabel 4.

**Tabel 4:** Persamaan model *Steady-State Governing Equations* proses pembakaran briket

NO	PERSAMAAN	SUMBER
1	$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + S_i \quad (15)$	[43]

NO	PERSAMAAN	SUMBER
Dimana,	$\bar{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (16)$	
	$S_i = - \left( \frac{\mu}{a} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho  v_i  v_i \right) \quad (17)$	
<p>Dikarenakan menggunakan sistem RANS, maka kondisi aliran berupa aliran turbulensi dengan menggunakan sistem <i>standard</i> berlandaskan model aliran turbulensi <i>compressible k-ε realizable</i> yaitu dengan model</p>	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + G_k - \rho \varepsilon \quad (18)$	
	$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \quad (19)$	
2	<p><i>Mass Conservation Equation</i></p> $\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g) = \sum_{n=1}^{N_g} R_{gn} \quad (20)$	[44]
3	<p><i>Momentum Conservation Equation</i></p> $\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g u_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g u_g) = \nabla \cdot \bar{S}_g + \rho_g \varepsilon_g g - \sum_{m=1}^M I_{gm} \quad (21)$	
	<p>Dimana,</p> $\bar{S}_g = -P_g \bar{I} + \bar{\tau} \quad (22)$	[44]
	$\bar{\tau} = \mu_{g,eff} \left[ \nabla u_g + (\nabla u_g)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u_g) I \right] \quad (23)$	
	$\mu_{g,eff} = \mu_g + \mu_t = \mu_g + \rho_g C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (24)$	
4	<p><i>Transportation Conservation Equation</i></p> $\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g k) = \nabla \cdot \left( \varepsilon_g \left( \mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \varepsilon G_k - \varepsilon_g \rho_g \varepsilon \quad (25)$	[44]
	$\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g \varepsilon) = \nabla \cdot \left( \varepsilon_g \left( \mu_g + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right) + \varepsilon_g \frac{\varepsilon}{k} (C_{s1} G_k - C_{s2} \rho_g \varepsilon) \quad (26)$	
5	<p><i>Energy Conservation Equation</i></p> $\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g C_{p,g} T_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g C_{p,g} T_g u_g) = \nabla \cdot (\varepsilon_g K_g \nabla T_g) + Q_{gp} - \Delta H_{\gamma_g} + \gamma_{R_g} (T_{R_g}^4 - T_g^4) \quad (27)$	[44]
6	<p><i>Species Conservation Equation</i></p> $\frac{\partial (\varepsilon_g \rho_g X_n)}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g u_g X_n) = \nabla \cdot (\varepsilon_g \rho_g D_n \nabla X_n) + R_{gn} \quad (28)$	
	<p>Dimana,</p> $R_{gn} = \frac{1}{V_C} \sum_{i=1}^{N_p} R_{gn}^i \quad (29)$	[44]

NO	PERSAMAAN	SUMBER
	$\rho_g = \frac{P_g M_g}{RT_g}$	(30)
7 a.	<i>Finite-rate reaction kinetic</i>	
	$k = AT^n e^{-E/RT}$	(31)
b.	<i>Eddy-dissipation model</i>	
	$R_{A,i,r} = v_i' M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_{\square}}{v_{\square,r}' M_{w,\square}} \right)$	(32) [43]
	$R_{AB,i,r} = v_i' M_{w,i} AB \rho \frac{\varepsilon \sum_P Y_P}{\sum_j v_{j,r}' M_{w,j}}$	(33)

Selain menentukan persamaan model perhitungan yang digunakan dalam simulasi CFD proses pembakaran briket di dalam ruang pembakaran, kondisi analisis reaksi heterogen dan homogen kimia briket dengan tiga komposisi (Tabel 2) yang terjadi di dalam ruang bakar ditentukan juga dengan tujuan untuk mengevaluasi hasil komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan antara lain gas hidrogen (H<sub>2</sub>), gas karbon monoksida (CO), dan gas metana (CH<sub>4</sub>). Reaksi kimia tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.

**Tabel 5:** Reaksi heterogen dan homogen pembakaran briket dalam ruang pembakaran

REAKSI KIMIA	SUMBER	A	E <sub>a</sub> (J/kmol)	SUMBER
a. Reaksi Heterogen				
Briket Tipe 1 (Reaksi 1):				
$C_{1.13}H_{1.87}O_{0.9}N_{0.046} + 1.15 O_2 \rightarrow 1.13 CO_2 + 0.93 H_2O + 0.0023 N_2$		$2.119 \times 10^{11}$	$2.027 \times 10^8$	
Briket Jenis 2 (Reaksi 1):				
$C_{1.04}H_{1.79}O_{0.96}N_{0.01} + 1.01 O_2 \rightarrow 1.04 CO_2 + 0.89 H_2O + 0.005 N_2$		$2.119 \times 10^{11}$	$2.027 \times 10^8$	
Briket Jenis 3 (Reaksi 1):				
$C_{0.56}H_{7.66}O_{0.87}N_{0.1} + 2.04 O_2 \rightarrow 0.56 CO_2 + 3.83 H_2O + 0.054 N_2$		$2.119 \times 10^{11}$	$2.027 \times 10^8$	
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	(Reaksi 2)	[42,45]	8.268	$1.882 \times 10^8$ [43]
$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	(Reaksi 3)	[42,45]	$1.00 \times 10^{11}$	$4.20 \times 10^7$ [43]
b. Reaksi Homogen				
$CH_4 + 1.5 O_2 \rightarrow CO + 2 H_2O$	(Reaksi 4)	[46]	$5.012 \times 10^{11}$	$2.00 \times 10^8$ [43]
$CO + 0.5 O_2 \rightarrow CO_2$	(Reaksi 5)	[46]	$4.40 \times 10^{11}$	$1.2552 \times 10^8$ [43]
$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	(Reaksi 6)	[46]	2.78	$1.26 \times 10^7$ [43]
$H_2 + 0.5 O_2 \rightarrow H_2O$	(Reaksi 7)	[46]	$1.00 \times 10^{14}$	$4.20 \times 10^7$ [43]

Sebagai data tambahan, diinformasikan juga untuk parameter *boundary conditions* yang digunakan pada proses simulasi proses pembakaran pada ruang bakar briket sampah anorganik yang dapat dilihat pada data Tabel 6.

**Tabel 6:** Kondisi *boundary* model simulasi ruang bakar

PARAMETER (UNIT)	NILAI
Aliran laju massa briket (kg/s)	0.005
Aliran laju udara <i>primary</i> (m/s)	0.05

PARAMETER (UNIT)	NILAI
Aliran laju udara <i>secondary</i> (m/s)	0.03
Suhu masuk massa briket (C)	30
Suhu masuk udara (C)	30
Suhu dinding ruang bakar (C)	350
Tekanan udara keluar (Pa)	0

Kondisi hasil simulasi CFD tersebut didapatkan dalam bentuk suhu pembakaran, kecepatan aliran massa dan udara di dalam ruang bakar, serta komposisi persentase gas mampu bakar antara lain gas hidrogen ( $H_2$ ), gas karbon monoksida (CO), dan gas metana ( $CH_4$ ). Hasil parameter tersebut kemudian dibandingkan antara ketiga jenis briket (Tabel 2) untuk mendapatkan model pembakaran yang optimal dalam desain ruang bakar tersebut.

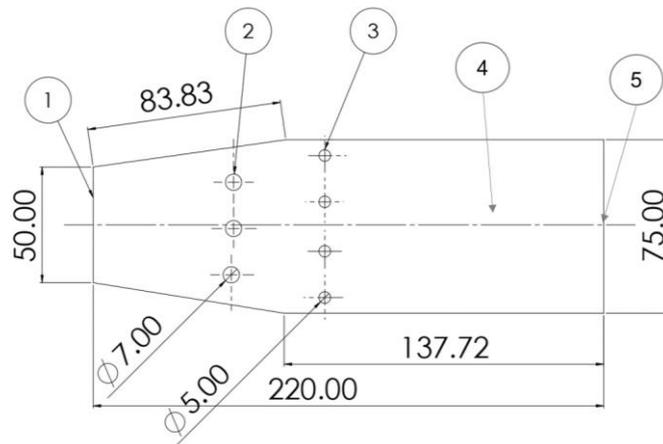
### 3. HASIL DAN DISKUSI

Briket merupakan salah satu sumber energi baru terbarukan dalam bentuk bahan bakar padat yang dapat dimanfaatkan untuk tungku biomassa dalam skala rumah tangga, sebagai pupuk organik untuk bidang pertanian, dan sebagai sumber energi listrik. Namun, pemanfaatan briket sebagai sumber energi listrik masih memiliki kelemahan dalam bentuk penggunaan kuantitas bahan bakar briket yang tinggi dikarenakan karakteristik briket yang tidak kering jika dibandingkan dengan bahan bakar yang berasal dari proses torefaksi. Adapun bahan baku briket yang dimanfaatkan tersebut berasal dari limbah biomassa ataupun limbah sampah organik sehingga diperlukan adanya proses lanjutan untuk mengeringkan bahan bakar briket sampah organik tersebut jika digunakan untuk sumber energi listrik yang juga dapat mempengaruhi biaya operasional pembangkit energi listrik tersebut. Penelitian ini menggunakan briket yang berasal dari sampah anorganik sebagai pengganti briket sampah organik dikarenakan sampah anorganik memiliki karakteristik lebih kering jika dibandingkan dengan briket sampah organik. Selain itu, potensi sampah anorganik sebagai sumber energi baru terbarukan dalam kemampuannya untuk meningkatkan nilai kalor briket mencapai 10 – 33.56 MJ/kg [8–10] menjadi ide dasar dalam pemanfaatan briket sampah anorganik untuk digunakan sebagai sumber energi listrik.

Penelitian ini memanfaatkan potensi briket sampah anorganik sebagai sumber energi listrik menggunakan teknologi mikroturbin gas. Potensi briket sampah anorganik yang dimanfaatkan tersebut digunakan dalam bentuk produk gas mampu bakar yang optimal masuk ke dalam mikroturbin gas. Produk gas mampu bakar dengan kualitas yang baik dipengaruhi dari proses reaksi pembakaran yang optimal di dalam ruang bakar. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki tujuan untuk merancang suatu desain ruang bakar yang optimal untuk proses pembakaran briket sampah anorganik sehingga menghasilkan gas mampu bakar dengan kualitas yang baik dan dapat memenuhi kebutuhan teknologi mikroturbin gas. Ruang bakar merupakan suatu tempat yang penting terhadap proses konversi suatu bahan bakar padat melalui proses pembakaran untuk menghasilkan produk dalam bentuk gas mampu bakar maupun bahan bakar cair, yang mana bahan bakar tersebut dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik maupun sebagai bahan bakar motor bakar baik dalam kondisi statis maupun dinamis. Desain ruang bakar dirancang dengan memperhatikan rasio antara laju aliran massa bahan bakar yang masuk beserta dengan laju aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar, sehingga tercipta rasio massa bahan bakar dan aliran udara yang ideal untuk menghasilkan proses pembakaran secara sempurna. Selain itu, desain ruang bakar juga memperhatikan kebutuhan gas mampu bakar yang dibutuhkan oleh mikroturbin gas, yang mana penelitian ini menggunakan teknologi mikroturbin gas dengan daya listrik sebesar 2.3-2.5 kW untuk diaplikasikan dalam skala rumah tangga.

Desain ruang bakar yang dirancang memiliki tiga bagian utama antara lain bagian *inlet* bahan bakar (1), lubang udara (*primary* (2) dan *secondary* (3)), dan bagian ruang bakar utama (4) yang digabung dengan *outlet* ruang bakar sebagai saluran gas mampu bakar (5) menuju mikroturbin gas. Bagian *inlet* bahan bakar (1) berfungsi sebagai tempat memasukkan bahan bakar briket sampah anorganik ke dalam bagian ruang bakar utama. Proses pemasukkan bahan bakar menggunakan sistem *batch*, yang mana sistem ini menggunakan sistem memasukkan bahan bakar untuk mengalami proses pembakaran sekali, dan kemudian dilanjutkan dengan memasukkan bahan bakar briket kembali untuk mengalami proses pembakaran selanjutnya. Bagian ruang bakar utama (4) berfungsi sebagai tempat proses pembakaran bahan bakar secara sempurna untuk menghasilkan gas mampu bakar. Bagian lubang udara dibagi menjadi dua bagian yakni *primary air holes* (2) dan *secondary air holes* (3), yang mana masing-masing lubang udara tersebut berfungsi untuk mengalirkan aliran udara primer, dan mengalirkan aliran udara sekunder. Aliran udara primer tersebut berguna untuk meningkatkan suhu pembakaran terhadap briket sampah anorganik sehingga terjadi proses pembakaran sempurna antara bahan bakar dengan aliran udara, dan aliran udara sekunder tersebut berguna

untuk menurunkan sedikit suhu pembakaran briket sampah anorganik dengan tujuan untuk mencegah penurunan komposisi massa gas mampu bakar yang didistribusikan ke dalam mikroturbin gas. Hal ini diperlukan karena apabila terjadi peningkatan suhu di sekitaran lubang udara *secondary* yang lebih tinggi akan menyebabkan terjadi pembakaran secara dini gas mampu bakar yang dihasilkan sebelum didistribusikan ke dalam mikroturbin gas. Saluran gas mampu bakar (5) berfungsi untuk mengalirkan gas mampu bakar menuju mikroturbin gas. Desain ruang bakar yang dirancang dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.

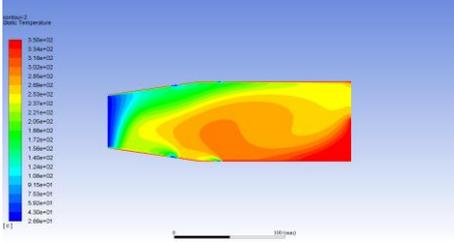
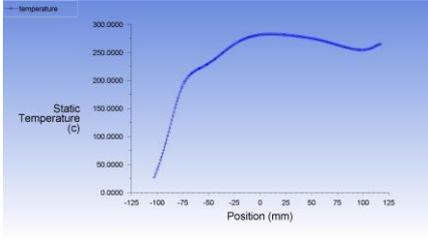
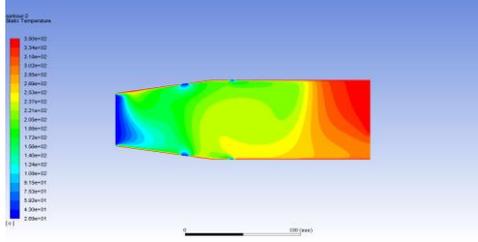
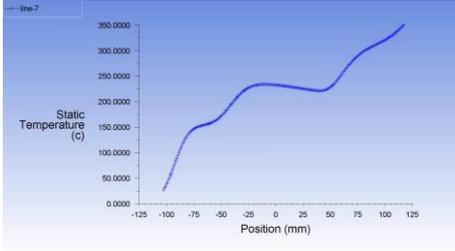
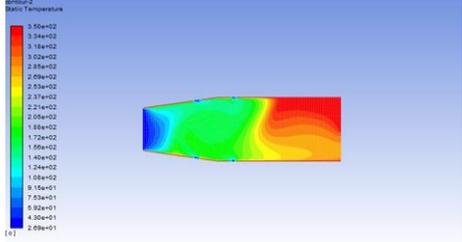
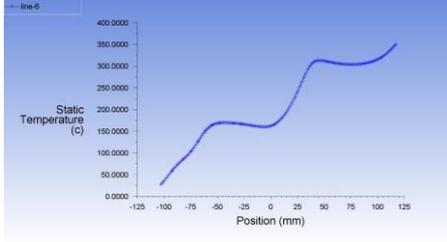


**Gambar3:** Desain ruang bakar briket sampah anorganik

Berdasarkan Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa desain ruang bakar memiliki ukuran dimensi dengan panjang total sebesar 220 mm, untuk bagian *inlet* bahan bakar dan ruang bakar yang digabungkan dengan saluran gas mampu bakar memiliki ukuran diameter masing-masing sebesar 50 mm, dan 75 mm. Ukuran dimensi diameter lubang udara yang terdiri dari bagian *primary air holes* dan bagian *secondary air holes* masing-masing sebesar 7 mm, dan 5 mm. Desain ruang bakar yang telah dirancang tersebut, kemudian dilanjutkan dengan melakukan simulasi reaksi pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar menggunakan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Analisis simulasi CFD ini bertujuan untuk menganalisis kinerja dari ruang bakar yang didesain dan menentukan potensi briket sampah anorganik yang sesuai untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik pada teknologi mikroturbin gas.

Proses simulasi reaksi pembakaran yang dilakukan di dalam desain ruang bakar menggunakan bahan bakar briket sampah anorganik sebanyak tiga jenis, yang mana masing-masing briket memiliki komposisi penyusun yang berbeda satu sama lain. Briket jenis pertama (K1) memiliki persentase komposisi penyusun antara lain kertas sebesar 60%; botol plastik sebesar 20%; plastik bungkus sebesar 10%; dan *styrofoam* sebesar 10%. Briket jenis kedua (K2) memiliki persentase komposisi penyusun antara lain kertas sebesar 40%; botol plastik sebesar 30%; plastik bungkus sebesar 20%; dan *styrofoam* sebesar 10%. Briket jenis ketiga (K3) memiliki persentase komposisi penyusun antara lain kertas sebesar 30%; botol plastik sebesar 40%; plastik bungkus sebesar 20%; dan *styrofoam* sebesar 10%. Hasil simulasi reaksi pembakaran dari ketiga jenis briket sampah anorganik tersebut meliputi parameter suhu, kecepatan aliran udara dan massa bahan bakar, komposisi gas mampu bakar yang terdiri dari gas karbon monoksida (CO), gas hidrogen (H<sub>2</sub>), dan gas metana (CH<sub>4</sub>), dan reaksi pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar. Parameter suhu pembakaran briket yang terdapat di dalam ruang bakar menentukan proses pembakaran briket sampah anorganik secara sempurna untuk menghasilkan produk bahan bakar dalam bentuk produk gas mampu bakar. Proses pembakaran secara sempurna dipengaruhi oleh rasio antara laju aliran massa bahan bakar dan laju aliran udara yang optimal untuk mengalami proses pembakaran. Suhu reaksi pembakaran dari ketiga buah jenis briket tersebut dapat dilihat pada data Tabel 7.

**Tabel 7:** Suhu pembakaran dan laju aliran pada proses pembakaran briket di ruang pembakaran.

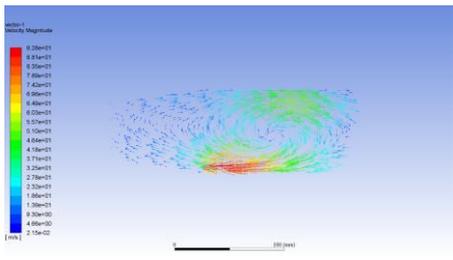
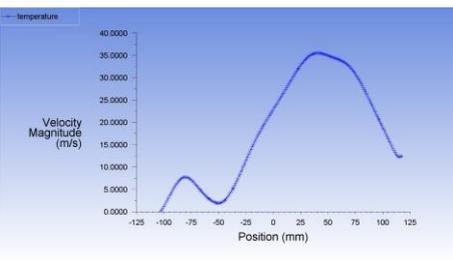
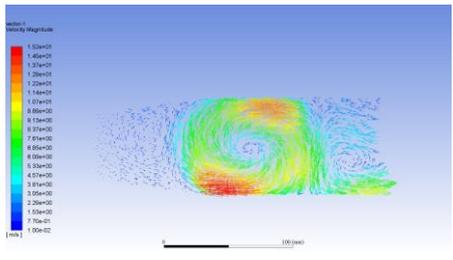
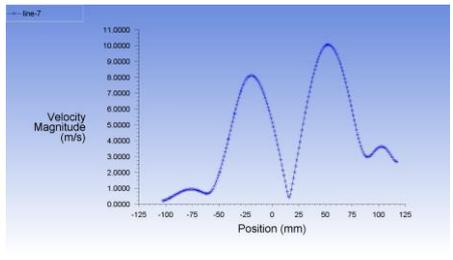
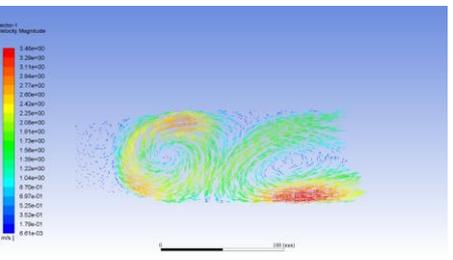
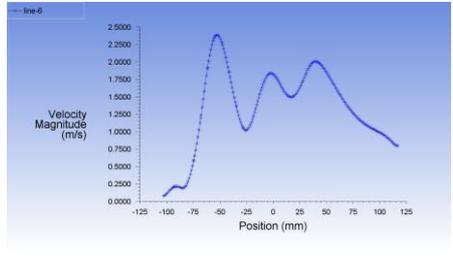
SUHU PEMBAKARAN	GRAFIK SUHU PEMBAKARAN	KODE JENIS BRIKET
		K1
		K2
		K3

Data Tabel 7 menjelaskan bahwa proses pembakaran briket yang terjadi di dalam ruang bakar memiliki suhu pembakaran briket sampah anorganik pada suhu sebesar 350°C. Kenaikan suhu pembakaran pada setiap jenis briket memiliki pola kenaikan suhu yang berbeda satu sama lain. Suhu proses pembakaran briket K1 mengalami kenaikan suhu pembakaran setelah aliran massa bahan bakar briket melewati posisi lubang udara primer (*primary air holes*), yang mana dengan aliran udara primer tersebut terjadi proses pembakaran yang terletak di posisi tengah ruang bakar. Hasil pembakaran yang terjadi antara aliran udara dan aliran massa bahan bakar tersebut berupa gas mampu bakar memiliki kondisi suhu pembakaran yang stabil sampai mencapai posisi lubang udara sekunder (*secondary air holes*), dimana dengan adanya aliran udara sekunder menyebabkan adanya penambahan aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar, sehingga menyebabkan penurunan sedikit suhu gas mampu bakar dari 350°C menuju suhu 300°C. Akan tetapi, dengan kondisi aliran udara yang stabil masuk ke dalam ruang bakar, menyebabkan kondisi suhu gas mampu bakar menjadi normal kembali ke dalam kondisi suhu sebesar 350°C. Suhu proses pembakaran briket K2 juga mengalami kenaikan suhu pembakaran setelah melewati lubang udara primer (*primary air holes*), namun kondisi suhu pembakaran hanya mencapai pada suhu sebesar 250°C, diakibatkan proses pembakaran melibatkan aliran udara dengan komposisi *ultimate* briket K2 yang mengandung komposisi oksigen sedikit lebih banyak dibandingkan dengan briket K1 yakni sebesar 45%, sehingga proses reaksi kimia pembakaran antara senyawa karbon dengan aliran udara tidak terjadi secara sempurna. Kondisi pembakaran yang tidak sempurna tersebut tertutup dengan adanya lubang udara sekunder (*secondary air holes*) untuk membantu proses pembakaran terhadap komposisi karbon yang tersisa dan tidak terbakar pada proses pembakaran yang terjadi setelah lubang udara primer dari briket K2 tersebut, sehingga suhu pembakaran mulai meningkat setelah melewati lubang udara sekunder, dan proses pembakaran terjadi pada bagian ujung *outlet* ruang bakar tersebut dengan suhu pembakaran mencapai suhu sebesar 350°C.

Suhu proses pembakaran briket K3 juga memiliki kenaikan suhu yang sama dengan suhu proses pembakaran yang terjadi pada briket K1 dan briket K2. Pola grafik kenaikan suhu pembakaran pada briket K3 sama dengan pembakaran pada briket K2, namun dengan kondisi kandungan karbon yang lebih sedikit yakni sebesar 34% jika dibandingkan dengan kandungan oksigen yaitu sebesar 43% di dalam komposisi briket sampah anorganik K3. Kondisi ini menyebabkan proses pembakaran yang terjadi setelah melewati

lubang udara primer (*primary air holes*) memiliki suhu pembakaran rendah yaitu sebesar 200° C dan proses pembakarannya dalam kondisi tidak sempurna, kemudian dengan bantuan aliran udara yang berasal dari lubang udara sekunder (*secondary air holes*) menyebabkan proses pembakaran menjadi sempurna sehingga suhu gas mampu bakar yang didapatkan sebesar 350°C. Berdasarkan data Tabel 7 juga dijelaskan bahwa pola suhu pembakaran pada briket K1 terletak di bagian tengah ruang bakar, sedangkan untuk pola suhu pembakaran pada briket K2 dan K3 terletak pada bagian *outlet* dari ruang bakar tersebut. Suhu pembakaran yang terjadi di dalam ruang bakar tidak terlepas dari pengaruh aliran udara dan aliran massa bahan bakar yang masuk ke dalam ruang bakar. Setiap reaksi pembakaran pada setiap jenis briket baik jenis briket K1, K2, dan K3 memiliki pola aliran udara dan aliran massa bahan bakar yang berbeda satu sama lain. Pola kecepatan aliran udara dan data aliran massa bahan bakar dapat dilihat pada data Tabel 8 dan Tabel 9.

**Tabel 8:** Kecepatan aliran dalam ruang pembakaran

POLA KECEPATAN ALIRAN	GRAFIK KECEPATAN ALIRAN	KODE JENIS BRIKET
		K1
		K2
		K3

Data Tabel 8 dapat menjelaskan bahwa kondisi aliran udara pada proses pembakaran briket K1 terpusat pada bagian tengah ruang bakar. Kondisi ini menyebabkan proses pembakaran briket sampah anorganik secara sempurna terjadi di bagian tengah ruang bakar, dengan bantuan aliran udara yang berasal dari aliran udara primer, sedangkan aliran udara sekunder diperlukan untuk mempertahankan kondisi suhu gas mampu bakar yang dihasilkan dari proses reaksi pembakaran. Berdasarkan kondisi seperti ini, menyebabkan komposisi gas mampu bakar antara lain gas karbon monoksida (CO), gas hidrogen (H<sub>2</sub>), dan gas metana (CH<sub>4</sub>) yang dibutuhkan oleh mikroturbin gas dapat tetap terjaga untuk didistribusikan melalui saluran gas mampu bakar.

Kondisi aliran udara pada proses pembakaran briket K2 memiliki kondisi yang tidak berbeda jauh dengan kondisi aliran udara pada proses pembakaran briket K1, namun sedikit berbeda dengan adanya pola tambahan aliran udara yang terdapat di ujung *outlet* ruang bakar. Kondisi ini menjelaskan suatu aksi-reaksi yang diberikan oleh aliran udara sekunder terhadap komposisi karbon yang tidak terbakar pada proses pembakaran di bagian lubang udara primernya, sehingga proses pembakaran sepenuhnya mulai terjadi menjelang bagian *outlet* bagian ruang bakar tersebut. Kondisi ini dapat mengganggu kondisi komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan dari proses pembakaran briket K2 ini. Penurunan kondisi aliran udara yang terdapat di dalam grafik aliran udara pada proses pembakaran briket K2 terjadi disebabkan oleh aliran udara primer yang masuk melalui lubang udara primer (*primary air holes*) telah mengalami proses pembakaran dengan komposisi karbon dan oksigen yang dikandung oleh briket K2 tersebut, namun tidak semuanya

kandungan karbon terbakar secara sempurna setelah melewati lubang udara primer. Sehingga, terjadi peningkatan aliran udara pada kondisi di bagian lubang udara sekunder untuk melakukan proses pembakaran terhadap komposisi karbon yang belum terbakar dari proses pembakaran pertama sebelumnya.

Kondisi aliran udara pada proses pembakaran briket K3 memiliki kondisi yang berbeda jika dibandingkan dengan kedua kondisi aliran udara pada proses pembakaran briket tipe K1 dan K2, dimana kondisi pola aliran udara terjadi pada bagian lubang udara primer, dan lubang udara sekunder. Hal ini didukung dengan pola yang dapat terlihat dengan jelas secara fluktuatif dari grafik aliran udara yang masuk ke dalam ruang bakar. Kondisi ini terjadi disebabkan oleh adanya pengaruh dari komposisi oksigen yang banyak dikandung pada briket K3, sehingga dapat dikatakan suasana kondisi proses pembakaran di dalam ruang bakar memiliki kondisi kaya akan oksigen (*air-rich*) dibandingkan dengan kondisi senyawa karbon dari briket tersebut. Berdasarkan hal tersebut dapat dijelaskan bahwa proses pembakaran terhadap komposisi karbon yang terdapat di dalam briket K3 secara sempurna tidak berjalan dengan optimal jika dibandingkan dengan proses pembakaran pada kedua jenis briket sebelumnya. Kondisi aliran massa bahan bakar yang ditunjukkan oleh ketiga jenis briket dapat dilihat pada Tabel 9.

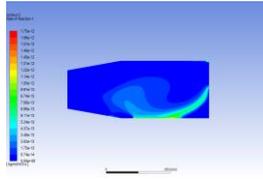
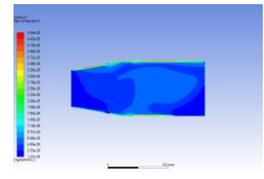
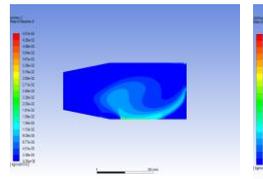
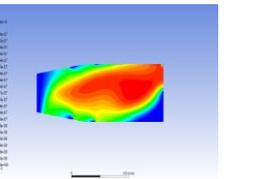
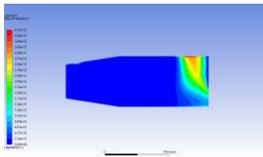
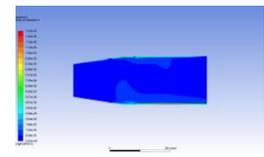
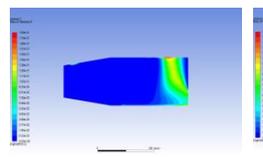
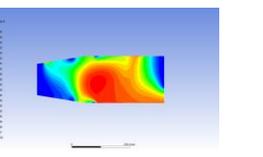
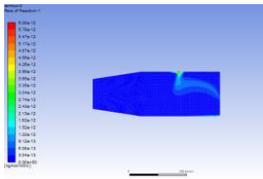
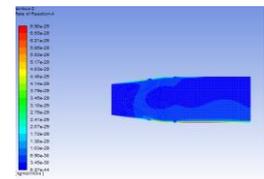
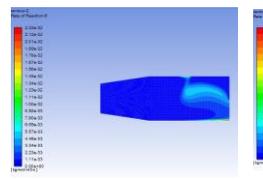
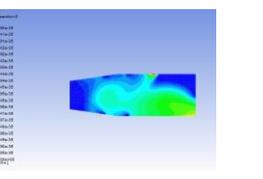
**Tabel 9:** *Mass flow rate* dan *Heat transfer rate* proses pembakaran briket sampah anorganik

PARAMETER	KUANTITAS	KODE JENIS BRIKET
<i>Net Mass Flow Rate</i>	0.00062 kg/s	K1
<i>Total Heat Transfer Rate</i>	2435241 Watt	
<i>Net Mass Flow Rate</i>	0.00067 kg/s	K2
<i>Total Heat Transfer Rate</i>	48400.3 Watt	
<i>Net Mass Flow Rate</i>	0.00067 kg/s	K3
<i>Total Heat Transfer Rate</i>	134564.1 Watt	

Berdasarkan data Tabel 9 dapat dijelaskan bahwa kondisi aliran massa bahan bakar (*net mass flow rate*) pada proses pembakaran briket sampah anorganik di dalam ruang bakar merupakan hasil massa sisa produk briket dari proses konversi briket sampah anorganik menjadi gas mampu bakar yang dimanfaatkan oleh mikroturbin gas. Briket K1, mampu membuat sisa bahan bakar yang tertinggal sebesar 0.00062 kg/s, sehingga dapat diartikan bahwa keseluruhan komponen penyusun bahan bakar briket mampu diubah ke dalam gas mampu bakar di dalam ruang bakar tersebut, sedangkan untuk kondisi briket sampah anorganik K2 dan K3 memiliki sisa bahan bakar yang tidak terkonversi menjadi gas mampu bakar sebesar 0.00067 kg/s. Kondisi sisa bahan bakar briket yang tidak terkonversi ke dalam gas mampu bakar tersebut dipengaruhi dari komposisi *proximate analysis* yang dimiliki oleh ketiga jenis briket yang ditunjukkan pada data Tabel 2, dimana faktor *fixed carbon* dan *volatile matter* yang menjadi faktor utama dalam proses konversi bahan bakar briket tersebut. Kondisi optimalisasi pemanfaatan bahan bakar briket untuk menjadi gas mampu bakar yang dapat dilihat dari sisa bahan briket sampah anorganik yang tidak ikut mengalami proses pembakaran juga berdampak pada kondisi *heat transfer rate* yang terjadi di dalam ruang bakar, dimana berdasarkan data pada Tabel 9 diketahui bahwa jenis briket K1 memiliki nilai *heat transfer rate* yang lebih tinggi dibandingkan dengan kedua jenis briket K2 dan K3. Kondisi ini, dapat dijelaskan bahwa reaksi pembakaran secara optimal terjadi pada saat proses pembakaran briket sampah anorganik K1.

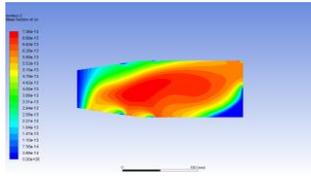
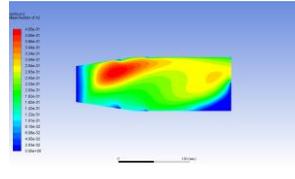
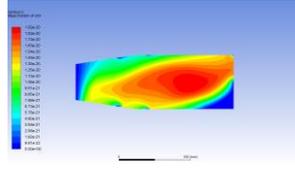
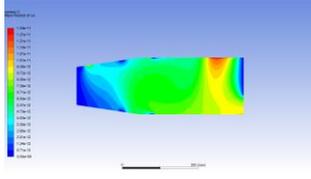
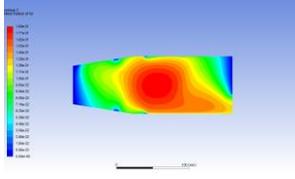
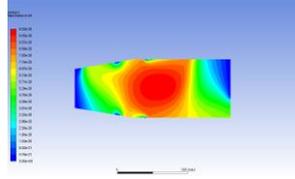
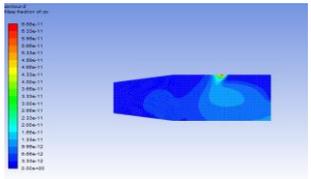
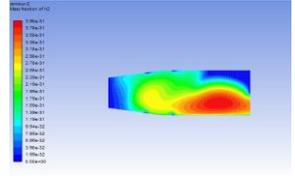
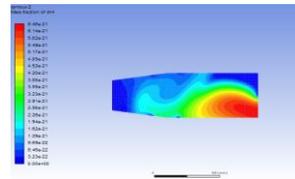
Reaksi kimia pembakaran briket sampah anorganik yang terjadi di dalam ruang bakar merupakan reaksi degradasi bahan bakar briket ke dalam bentuk gas mampu bakar, dan reaksi antara gas mampu bakar yang bereaksi dengan aliran udara yang membawa kandungan oksigen dan nitrogen ke dalam ruang bakar yang telah dijelaskan pada Tabel 5. Berikut ini merupakan kondisi posisi reaksi kimia pembakaran di dalam ruang bakar yang dapat dilihat pada Tabel 10.

**Tabel 10:** Reaksi kimia proses pembakaran briket sampah anorganik

REAKSI KIMIA KE-				KODE JENIS BRIKET
R1	R3	R4	R6	
				K1
				K2
				K3

Berdasarkan data pada Tabel 10 dapat dijelaskan bahwa proses reaksi pertama (R1) merupakan reaksi yang dilakukan untuk proses degradasi briket sampah anorganik menjadi gas mampu bakar, reaksi ketiga (R3) merupakan reaksi yang dilakukan untuk menghasilkan gas mampu bakar jenis metana ( $CH_4$ ), reaksi keempat (R4) merupakan reaksi yang dilakukan untuk menghasilkan gas mampu bakar jenis karbon monoksida ( $CO$ ), dan reaksi keenam (R6) merupakan reaksi yang dilakukan untuk menghasilkan gas mampu bakar jenis hidrogen ( $H_2$ ). Tipe briket K1 mengalami reaksi proses degradasi bahan bakar briket (R1) tepat berada di posisi tengah ruang bakar setelah aliran massa briket melewati lubang udara primer (*primary air holes*). Reaksi R3 dan R4 terjadi juga di bagian posisi tengah ruang bakar setelah proses degradasi bahan bakar briket terjadi (R1), sedangkan untuk R6 terjadi di bagian setelah lubang udara sekunder (*secondary air holes*). Tipe briket K2 mengalami proses degradasi bahan bakar briket (R1) terjadi di bagian setelah lubang udara sekunder (*secondary air holes*), yang mana hal ini disebabkan oleh sebagian besar komposisi karbon baru mulai terbakar setelah mendapatkan aliran udara dari lubang udara sekunder (*secondary air holes*). Reaksi R3 terjadi di bagian atas dan bawah ruang bakar dekat dengan bagian lubang udara primer dan lubang udara sekunder, yang mana pada peristiwa reaksi R3, terjadi pembakaran pada komposisi karbon briket yang sangat sedikit sehingga dengan proses pembakaran tersebut langsung terjadi proses reaksi R4. Kondisi reaksi R6 pada proses pembakaran briket K2 terjadi juga setelah melewati lubang udara sekunder (*secondary air holes*). Tipe briket K3 mengalami proses degradasi bahan bakar briket (R1) terjadi setelah bagian lubang udara sekunder, yang mana kondisi ini terjadi akibat komposisi karbon yang dimiliki oleh briket K3 lebih sedikit dibandingkan dengan komposisi oksigennya. Reaksi R3 dan reaksi R4 terjadi pada bagian sisi-sisi atas dan bawah ruang bakar, yang mana hasil proses reaksi R3 langsung mengalami proses reaksi R4. Kondisi posisi reaksi R6 sama seperti dengan kondisi pada briket K1 dan K2 yaitu terjadi di posisi setelah lubang udara sekunder (*secondary air holes*). Hasil produk reaksi kimia berupa gas mampu bakar yang terdiri dari gas karbon monoksida ( $CO$ ), gas hidrogen ( $H_2$ ), dan gas metana ( $CH_4$ ) dapat dilihat pada data Tabel 11.

**Tabel 11:** Massa Gas Mampu Bakar Hasil Proses Pembakaran Briket

KOMPOSISI GAS MAMPU BAKAR			KODE JENIS BRIKET
KARBON MONOKSIDA (CO)	HIDROGEN (H <sub>2</sub> )	METANA (CH <sub>4</sub> )	
			K1
			K2
			K3

Data Tabel 11 dapat diketahui bahwa komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan dari proses pembakaran briket K1 mendapatkan komposisi aliran gas mampu bakar karbon monoksida (CO) sebesar  $6.9 \times 10^{-13}$  kg/s, aliran gas mampu bakar hidrogen (H<sub>2</sub>) sebesar  $3.04 \times 10^{-31}$  kg/s, dan aliran gas mampu bakar metana (CH<sub>4</sub>) sebesar  $1.83 \times 10^{-20}$  kg/s. Pembakaran briket K2 mampu menghasilkan komposisi aliran gas mampu bakar karbon monoksida (CO) sebesar  $6.04 \times 10^{-13}$  kg/s, aliran gas mampu bakar hidrogen (H<sub>2</sub>) sebesar  $7.11 \times 10^{-32}$  kg/s, dan aliran gas mampu bakar metana (CH<sub>4</sub>) sebesar  $3.3 \times 10^{-20}$  kg/s. Pembakaran briket K3 mampu menghasilkan komposisi aliran gas mampu bakar karbon monoksida (CO) sebesar  $3.3 \times 10^{-13}$  kg/s, aliran gas mampu bakar hidrogen (H<sub>2</sub>) sebesar  $3.97 \times 10^{-32}$  kg/s, dan aliran gas mampu bakar metana (CH<sub>4</sub>) sebesar  $5.82 \times 10^{-21}$  kg/s. Hasil komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan dari proses pembakaran ketiga jenis briket tersebut dapat menjelaskan bahwa karakteristik briket K1 merupakan bahan bakar briket padat yang tepat dijadikan sebagai sumber energi baru terbarukan untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik pada teknologi mikroturbin gas. Hal ini disebabkan oleh persentase komposisi gas mampu bakar yang dihasilkan oleh briket K1 mendekati kebutuhan gas mampu bakar yang diperlukan oleh mikroturbin gas dengan daya listrik sebesar 2.3-2.5 kW yang diaplikasikan pada skala rumah tangga. Selain itu, dengan kondisi suasana suhu pembakaran dan aliran udara serta aliran massa bahan bakar yang mendukung akibat desain ruang bakar yang dirancang memiliki desain yang optimal mampu mengeluarkan potensi briket tipe K1 secara optimal untuk menghasilkan gas mampu bakar yang dimanfaatkan oleh mikroturbin gas. Hasil simulasi dari proses pembakaran briket sampah anorganik ini akan dijadikan sebagai data perbandingan untuk uji kinerja dari proses manufaktur rancangan desain ruang bakar tersebut.

#### 4. KESIMPULAN

Hasil penelitian ini menjelaskan tentang desain ruang bakar yang optimal untuk proses pembakaran briket sampah anorganik sehingga menghasilkan gas mampu bakar yang dapat dimanfaatkan oleh mikroturbin gas. Desain ruang bakar dibagi menjadi tiga bagian yaitu ruang bakar utama, lubang udara, dan saluran gas mampu bakar. Desain ruang bakar memiliki ukuran dimensi panjang total sebesar 220 mm, beserta dengan ukuran diameter untuk *inlet* bahan bakar, dan ruang bakar utama yang digabung dengan saluran gas mampu bakar masing-masing sebesar 50 mm dan 75 mm. Ukuran lubang udara di dalam ruang bakar dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian *primary air holes* dengan ukuran diameter sebesar 7 mm, dan bagian *secondary air holes* dengan ukuran diameter sebesar 5 mm. Analisis kinerja ruang bakar dilakukan dengan melakukan proses pembakaran briket dengan tiga buah komposisi yang berbeda melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Jenis briket K1 dengan komposisi penyusun kertas sebesar 60%, botol plastik sebesar 20%, plastik bungkus sebesar 10%, dan *styrofoam* sebesar 10% mampu menghasilkan gas mampu bakar yang lebih optimal dibandingkan dengan dua jenis briket yang lainnya. Jenis briket K1 dapat menghasilkan gas mampu bakar berupa gas CO sebesar  $6.9 \times 10^{-13}$  kg/s, gas H<sub>2</sub> sebesar  $3.04 \times 10^{-31}$  kg/s, dan gas CH<sub>4</sub> sebesar  $1.83 \times 10^{-20}$  kg/s.

<sup>20</sup> kg/s. Komposisi persentase gas mampu bakar tersebut juga masuk ke dalam kriteria kebutuhan gas mampu bakar yang digunakan pada mikroturbin gas untuk menghasilkan daya sebesar 2.3-2.5 kW untuk penerapan dalam skala rumah tangga. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa desain ruang bakar tersebut dapat ditambahkan pada komponen mikroturbin gas sebagai tempat ruang bakar briket, sedangkan pemanfaatan briket KI dapat menjadi sumber energi baru terbarukan dalam bentuk bahan bakar padat untuk pembangkit daya listrik mikroturbin gas.

## 5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan rasa terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Pancasila yang telah membantu sebagai penyumbang dana (*Funder*) dalam rangka Kegiatan Hibah Penelitian Internal Fakultas Teknik Universitas Pancasila yang tertuang pada Surat Nomor. 938/D/FTUP/VI/2021. Penulis juga mengucapkan rasa terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila yang telah menyediakan fasilitasnya sehingga penelitian ini dapat terlaksana sebaik mungkin.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] DAVIS, S.J, LEWIS, N.S, SHANER, M, AGGARWAL, S, ARENT, D, AZEVEDO, I.L, et al., "Net-zero emissions energy systems", *Science*, v. 360, pp. 1–9, 2018. <https://doi.org/10.1126/science.aas9793>.
- [2] WANG, Q., LI, S., PISARENKO, Z., "Heterogeneous effects of energy efficiency, oil price, environmental pressure, R&D investment, and policy on renewable energy – evidence from the G20 countries", *Energy*, v. 209, pp.1–13, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118322>.
- [3] AYAMOLOWO, O., MANDITEREZA, P., KUSAKANA, K., "Exploring the gaps in renewable energy integration to grid", *Energy Reports*, v. 6, pp. 992–999, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.086>.
- [4] MALAHAYATI, M., "Achieving renewable energies utilization target in South-East Asia: Progress, challenges, and recommendations", *The Electricity Journal*, v. 33, pp. 106736, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106736>.
- [5] SRIVASTAVA, V., GOEL, G., THAKUR, V.K., SINGH, R.P., FERREIRA DE ARAUJO, A.S., SINGH, P., "Analysis and advanced characterization of municipal solid waste vermicompost maturity for a green environment", *Journal of Environmental Management*, v. 255, pp. 109914, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109914>.
- [6] LEE, C.T., LIM, J.S., FAN, Y.V., LIU, X., FUJIWARA, T., KLEMEŠ, J.J., "Enabling low-carbon emissions for sustainable development in Asia and beyond", *Journal of Cleaner Production*, v. 176, pp. 726–35, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.110>.
- [7] BANU, J.R., SHARMILA, V.G., USHANI, U., AMUDHA, V., KUMAR, G., "Impervious and influence in the liquid fuel production from municipal plastic waste through thermo-chemical biomass conversion technologies - A review", *Science of the Total Environment*, v. 718, pp. 137287, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137287>.
- [8] BHOUMICK, M.C., SARKER, N.C., HASAN, M.M., ROY, B.K., "Conversion of Waste Plastic into Solid Briquette in Combination with Biomass: Bangladesh Perspective", *International Advanced Research Journal in Science, Engineering, and Technology*, v.3, n.3, pp.142–146, 2016. <https://doi.org/10.17148/iarjset.2016.3332>.
- [9] NWABUE, F.I., UNAH, U., ITUMOH, E.J., "Production and characterization of smokeless bio-coal briquettes incorporating plastic waste materials", *Environmental Technology & Innovation*, v. 8, pp. 233–45, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.02.008>.
- [10] SUWINARTI, W., AMIRTA, R., YULIANSYAH., "Production of high-calorie energy briquettes from bark waste, plastic and oil", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 144, p. 1–8, 2018. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/144/1/012034>.
- [11] AJITH, K.J., VINOTH, K.K., PETCHIMUTHU, M., IYAHRAJA, S., VIGNESH, K.D., "Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal", *Materials Today: Proceedings*, v. 45, pp. 857–861, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.918>.
- [12] AVELAR, N.V., REZENDE, A.A.P., CARNEIRO, A.C.O., SILVA, C.M., "Evaluation of briquettes made from textile industry solid waste", *Renewable Energy*, v. 91, pp. 417–424, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.075>.
- [13] WIBOWO, R., "Analisis Thermal Nilai Kalor Briket Ampas Batang Tebu dan Serbuk Gergaji", *Rekayasa Mesin*, v. 10, n.1, pp. 9–15, 2019. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2019.010.01.2>.
- [14] NUGRAHA, A., WIDODO, A., WAHYUDI, S., "Pengaruh Tekanan Pembriketan dan Persentase Briket Campuran Gambut dan Arang Pelepah Daun Kelapa Sawit terhadap Karakteristik Pembakaran

- Briquet", *Rekayasa Mesin*, v. 8, n.1, pp. 29–36, 2017. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2017.008.01.5>.
- [15] IFA, L., YANI, S., NURJANNAH, N., DARNENSIH, D., RUSNAENAH, A., MEL, M., et al., "Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste", *Heliyon*, v. 6, pp. e05009, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05009>.
- [16] ADU, G.R., AGYIN, B.S., TINDJINA, I., MANU, Y., SINGH, U., "Minimizing nutrient leaching from maize production systems in northern Ghana with one-time application of multi-nutrient fertilizer briquettes", *Science of the Total Environment*, v. 694, pp. 133667, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133667>.
- [17] ALANYA, R.S., BERGMAN, R.D., "Life-cycle impact and exergy based resource use assessment of torrefied and non-torrefied briquette use for heat and electricity generation", *Journal of Cleaner Production*, v. 233, pp. 918–931, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.298>.
- [18] BISEN, K.S., SHARMA, P., GUPTA, B., BAREDAR, P., "Development and experimental characterization of energy efficient poultry litter & plant weeds based briquettes (PLPWBB) by comparing with rice husk briquettes", *Materials Today: Proceedings*, v. 10, pp.1–5, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.130>.
- [19] JI, C., CHENG, K., NAYAK, D., PAN, G., "Environmental and economic assessment of crop residue competitive utilization for biochar, briquette fuel and combined heat and power generation", *Journal of Cleaner Production*, v. 192, pp.916–923, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.026>.
- [20] DING, L., YOSHIKAWA, K., FUKUHARA, M., KOWATA, Y., NAKAMURA, S., XIN, D., et al., "Development of an ultra-small biomass gasification and power generation system: Part 2. Gasification characteristics of carbonized pellets/briquettes in a pilot-scale updraft fixed bed gasifier", *Fuel*, v. 220, pp. 210–219, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.01.080>.
- [21] NOROOZIAN, R., ASGHARIAN, P., "Microturbine Generation Power Systems", *Distributed Generation Systems: Design, Operation and Grid Integration*, 1st ed., chapter 4, Oxford, United Kingdom, Butterworth-Heinemann, 2017, p. 149–219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804208-3.00004-2>.
- [22] ENAGI, I.I., AL-ATTAB, K.A., ZAINAL, Z.A., "Combustion Chamber Design and Performance for Micro Gas Turbine Application", *Fuel Processing Technology*, v. 166, pp. 258–268, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.05.037>.
- [23] OTHMAN, N.F., BOOSROH, M.H., "Effect of H<sub>2</sub> and CO contents in syngas during combustion using Micro Gas Turbine", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 32, pp. 1–6, 2016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/32/1/012037>.
- [24] KRÓL, D., POSKROBKO, S., GOŚCIK, J., "Micro cogeneration - Rich-methane gasifier and micro gas turbine", *E3S Web of Conferences*, v. 14, pp. 1–10, 2017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20171401024>.
- [25] AMARO, J., MENDIBURU, A.Z., CARVALHO, J.A., "Thermodynamic study of syngas combustion in gas microturbines with regeneration composed with metallic and ceramic materials", *Applied Thermal Engineering*, v. 157, pp. 113285, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.105>.
- [26] LIGUORI, V., "Biomass gas and solid waste gas lean premixed combustion in a 100 kWe MGT: A numerical investigation considering their H<sub>2</sub> percentage", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 40, pp. 25414–25427, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.043>.
- [27] SONG, A., ZHA, F., TANG, X., CHANG, Y., "Effect of the additives on combustion characteristics and desulfurization performance of cow dung briquette", *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, v. 143, pp.107585, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107585>.
- [28] Ajvad, M., Shih, HY., "Modeling syngas combustion performance of a can combustor with rotating casing for an innovative micro gas turbine", *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 45, n. 55, pp. 31188–31201, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.113>.
- [29] DU TOIT, M., ENGELBRECHT, N., OELOFSE, S.P., BESSARABOV, D., "Performance evaluation and emissions reduction of a micro gas turbine via the co-combustion of H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> fuel blends", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 39, pp.100718, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100718>.
- [30] GUO, Z., WU, J., ZHANG, Y., WANG, F., GUO, Y., CHEN, K., et al., "Characteristics of biomass charcoal briquettes and pollutant emission reduction for sulfur and nitrogen during combustion", *Fuel*, v. 272, pp. 117632, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117632>.
- [31] KHIARI, B., JEGUIRIM, M., BENNICI, S., LIMOUSY, L., "Char combustion", *Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications*, 1st ed., chapter 5, Amsterdam, Netherlands, Elsevier Inc, 2019, p. 147–185. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814893-8.00005-5>.
- [32] BAAWAIN, M., AL-MAMUN, A., OMIDVARBORNA, H., AL-AMRI, W., "Ultimate composition

- analysis of municipal solid waste in Muscat", *Journal of Cleaner Production*, v. 148, pp. 355–362, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.013>.
- [33] ZHUO, Y., XIE, Z., SHEN, Y., "Model study of carbonisation of low rank coal briquettes: Effect of briquettes shape", *Powder Technology*, v. 385, pp. 120–130, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.071>.
- [34] YUCE, B.E., PULAT, E., "Forced, natural and mixed convection benchmark studies for indoor thermal environments", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 92, pp. 1–14, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2018.02.003>.
- [35] MUGI, V., CHANDRAMOHAN, V., "Energy, exergy and economic analysis of an indirect type solar dryer using green chilli: A comparative assessment of forced and natural convection", *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 24, pp.100950, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100950>.
- [36] WANG, T., LI, Y., ZHI, D., LIN, Y., HE, K., LIU, B., et al., "Assessment of combustion and emission behavior of corn straw biochar briquette fuels under different temperatures", *Journal of Environmental Management*, v. 250, pp.109399, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109399>.
- [37] HAURISSA, J., RIUPASSA, H., "Analisa Konveksi Paksa (Pemaksaan Udara Masuk) pada Proses Pembakaran Briket Ampas Sagu", *Rekayasa Mesin*, v. 11, pp. 3, pp.339–45, 2020. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2020.011.03.5>.
- [38] OYEJIDE, O.J., OKWU, M.O., TARTIBU, L.K., "Adaptive design and development of a modular water hyacinth briquette stove", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, v. 41, pp.1–19, 2019. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1675808>.
- [39] BASU, P., "Biomass Combustion and Cofiring", *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*, 3rd ed., chapter 11, Cambridge, United Kingdom, Academic Press, 2018, p. 393–413. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00011-X>.
- [40] HE, Y., BAYLY, A.E., HASSANPOUR, A., FAIRWEATHER, M., MULLER, F., "Flow behaviour of an agitated tubular reactor using a novel dynamic mesh based CFD model", *Chemical Engineering Science*, v. 212, pp.115333, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.115333>.
- [41] SHIRZADI, M., TOMINAGA, Y., MIRZAEI, P.A., "Experimental and steady-RANS CFD modelling of cross-ventilation in moderately-dense urban areas", *Sustainable Cities and Society*, v. 52, pp.101849, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101849>.
- [42] GONZÁLEZ, W.A., PÉREZ, J.F., "CFD analysis and characterization of biochar produced via fixed-bed gasification of fallen leaf pellets", *Energy*, v.186, pp. 115904, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.115904>.
- [43] NGAMSIDHIPHONGSA, N., PONPESH, P., SHOTIPRUK, A., ARPORNWICHANOP, A., "Analysis of the Imbert downdraft gasifier using a species-transport CFD model including tar-cracking reactions", *Energy Conversion and Management*, v.213, pp.112808, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112808>.
- [44] WANG, S., LUO, K., FAN, J., "CFD-DEM coupled with thermochemical sub-models for biomass gasification: Validation and sensitivity analysis", *Chemical Engineering Science*, v. 217, pp. 115550, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115550>.
- [45] CHAURASIA, A., "Modeling of downdraft gasification process: Studies on particle geometries in thermally thick regime", *Energy*, v. 142, pp. 991–1009, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.093>.
- [46] LU, D., YOSHIKAWA, K., ISMAIL, T.M., ABD EL-SALAM, M., "Assessment of the carbonized woody briquette gasification in an updraft fixed bed gasifier using the Euler-Euler model", *Applied Energy*, v.220, pp.70–86, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.063>.