

**JURNAL TUGAS AKHIR
UNIVERSITAS TELKOM**

**PENGARUH POLA TIUP UDARA TERHADAP KINERJA KOMPOR GASIFIKASI
TIPE *DOWNDRAFT* DAN *UPDRAFT***

***THE INFLUENCE OF AIR BLOW PATTERNS TO THE PERFORMANCE ON THE
DOWNDRAFT AND UPDRAFT TYPE OF GASIFICATION STOVES***

Alsya Pratiwi¹, Drs. Suwandi, M.Si², Dr. Eng. Amaliyah, R. I .U., S.T., M.SI³

1,2,3 Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Telkom

1 AlsyaPratiwi@student.telkomuniversity.ac.id, 2 Suwandi@telkomuniversity.ac.id, 3

amaliyahriu@telkomuniversity.ac.id

Abstrak

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar merupakan solusi yang tepat untuk penanganan sumber energi fosil yang semakin menipis. Pada penelitian ini menggunakan kompor gasifikasi biomassa tipe *downdraft* dan *updraft* dengan bahan bakar (*wood pellet*) dan menggunakan metode Standar Nasional Indonesia (SNI 7926:2013) Tungku Biomassa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kinerja kompor gasifikasi dari dua variasi pola tiup udara yaitu *cyclone* dan *direct*. Pada penelitian ini menggunakan *gasifier* dengan ketinggian 20 cm serta memiliki lubang sebanyak 40 buah. Setiap pengujian dilakukan dengan empat variasi kecepatan (m/s), yaitu 4,5; 5; 5,4 dan 5,7 dan tiga variasi jumlah bahan bakar (gr), yaitu 400, 600 dan 800. Menurut Metode SNI, nilai efisiensi termal minimum adalah 20% dan nilai FCR maksimum adalah 1kg/jam. Hasil dari pengujian kompor gasifikasi tipe *updraft* dengan pola tiup udara *cyclone* memiliki kinerja yang lebih baik. Kompor gasifikasi tipe tersebut memiliki nilai efisiensi termal tertinggi yaitu 13,52%, FCR sebesar 1,64 kg/jam, persentase *char* yaitu 1,88%, waktu untuk mendidihkan air tercepat yaitu 562 detik (9,3 menit), laju kalor tertinggi yaitu 964,402 kkal/jam, suhu api maksimum yaitu 824,56°C, serta persentase warna api biru sebesar 30,38% dan warna api merah sebesar 40,32% pada kecepatan udara 5,4 m/s dan bahan bakar 800 gr.

Kata kunci : kompor gasifikasi; pola tiup udara; biomassa; *downdraft*; *updraft*; *cyclone*; *direct*; *wood pellet*.

Abstract

Utilization of biomass as a fuel is the right solution for handling the depleting fossil energy sources. In this study using type biomass gasification stoves *downdraft* and *updraft* with fuel (*wood pellet*) and using the Indonesian National Standard method (SNI 7926: 2013) Biomass Furnace. This study aims to determine the performance of the gasification stove from two variations of air blowing patterns, namely *cyclone* and *direct*. In this study, using a *gasifier* with a height of 20 cm and 40 holes. Each test was carried out with four variations of velocity (m/s), namely 4.5; 5; 5.4 and 5.7 and three variations of the amount of fuel (gr), namely 400, 600 and 800. According to the SNI Method, the minimum thermal efficiency value is 20 % and the maximum FCR value is 1 kg/hour. The results of testing type gasification stove *updraft* with air blow pattern *cyclone* have better performance. This type of gasification stove has the highest thermal efficiency value, namely 13.52 %, FCR of 1.64 kg/hour, percentage of *char* is 1.88 %, the fastest time to boil water is 562 seconds (9.3 minutes), the highest heat rate is 964.402 kcal/hour, the maximum fire temperature is 824.56 °C, and the percentage of blue flame color is 30,38 % and red flame color is 40,32 % at air velocity of 5.4 m/s and 800 gr of fuel.

Key words : gasification stove; air blow pattern; biomass; *downdraft*; *updraft*; *cyclone*; *direct*; *wood pellet*.

1. Pendahuluan

Indonesia memiliki luas hutan yaitu sebesar 884.950 km² dan berdasarkan Badan Pusat Statistika, Indonesia memproduksi kayu hutan sebesar 54.258.473 m³ pada tahun 2018 [23]. Kebutuhan energi bagi masyarakat kini semakin meningkat, sementara cadangan sumber energi yang sering digunakan seperti minyak dan gas semakin menipis. Peristiwa kasus tersebut menyebabkan masyarakat untuk memanfaatkan sumber energi lain. Salah satu cara untuk menanggulangnya dengan memanfaatkan energi alternatif yang berasal dari biomassa seperti limbah kayu. Limbah dari produksi kayu dapat membantu menyelesaikan masalah migas yang semakin menipis. Limbah kayu juga merupakan limbah biomassa yang berasal dari tumbuhan dan sumber energi yang dapat diperbarui.

Biomassa memiliki densitas energi yang rendah, permasalahan pada penyimpanan dan pengolahan, sehingga belum bisa digunakan secara langsung, maka perlu dibuat menjadi produk *pellet*. Produk *pellet* yang digunakan berasal dari campuran berbagai kayu seperti kayu jati, sengon, kaliandra dan sebagainya. Penggunaan gas mengakibatkan emisi CO₂ delapan kali lebih tinggi dibandingkan menggunakan *wood pellet* [1]. Berdasarkan Pusat Studi Kebijakan Publik (PUSKEPI) sejak tahun 2008 sampai Juli 2010 dalam pemakaian gas LPG telah terjadi 189 kasus ledakan [24], maka akan menimbulkan beberapa ancaman serius seperti, minimnya cadangan gas jika tidak ditemukan sumur gas yang baru, ketidakstabilan harga permintaan yang lebih besar daripada produksinya dan hasil pembakaran yang dapat mengakibatkan polusi gas rumah kaca. Oleh karena itu, perlu dikembangkan biomassa yang ramah lingkungan serta sumber daya alam yang tidak akan habis. *Wood pellet* dapat menggantikan penggunaan gas LPG dan dapat digunakan sebagai bahan bakar pada kompor gasifikasi (salah satu teknologi untuk kebutuhan memasak dalam rumah tangga).

Biomassa dapat dikonversikan menjadi sebuah energi dengan metode gasifikasi. Gasifikasi merupakan metode perubahan bahan bakar padat menjadi gas dengan menggunakan kompor gasifikasi. Ada beberapa tipe kompor gasifikasi, disini penulis

menggunakan kompor gasifikasi tipe *downdraft* yang memiliki prinsip kerja yaitu udara yang masuk ke dalam reaktor kemudian diarahkan ke bawah melewati bahan bakar pada ruang pembakaran dan akan dialirkan keluar menuju saluran keluaran pipa *gasifier* dan kompor gasifikasi tipe *updraft* yang memiliki prinsip kerja yaitu udara yang masuk ke reaktor kemudian diarahkan ke atas melewati bahan bakar pada ruang pembakaran [10]. Kompor gasifikasi tipe *downdraft* memiliki keunggulan yaitu waktu pengoperasian yang lama dan bahan bakar yang dapat diisi ulang tanpa menghentikan penyalaan. Demikian pula, keunggulan yang dimiliki kompor gasifikasi tipe *updraft*, yaitu tingkat pembakaran yang tinggi serta desain yang sederhana [10]. Kompor gasifikasi biomassa telah diteliti sebelumnya oleh Nasrul Ilminnafik pada tahun 2016, mengenai variasi AFR dengan menggunakan bahan bakar biomassa berupa sekam padi terhadap karakteristik api yang berfokus persentase warna api biru serta temperatur api tersebut. Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan AFR terbaik yaitu 1,62 dengan kenaikan suhu mencapai 750°C serta persentase warna api biru mencapai 100% dan lama api menyala lebih lama, yaitu sekitar 25 menit [2]. Penelitian oleh Chartika Fadilah pada tahun 2019 mengenai variasi pada biomassa dan variasi kecepatan aliran udara dengan menggunakan tipe *gasifier top lit updraft* menghasilkan temperatur api tertinggi sebesar 317°C, massa bahan bakar (pelet kayu sengon) 0,3 kgm/s pada kecepatan 4,5 m/s [3]. Kemudian penelitian yang dilakukan oleh Rizky Anggara pada tahun 2019 dengan menggunakan variasi jumlah lubang pada tungku pembakaran serta variasi kecepatan aliran udara, menunjukkan bahwa efisiensi termal tertinggi sebesar 13,55% pada variasi jumlah lubang 40 buah dengan kecepatan 3,5 m/s [4]. Penelitian yang dilakukan oleh Fitri Rahmadani (2020) dengan variasi AFR 2,4 pada kompor gasifikasi tipe *downdraft direct* menghasilkan efisiensi tertinggi yaitu sebesar 15% pada ketinggian *gasifier* 20 cm [15]. Selain biomassa dan kecepatan aliran udara, penyebaran api yang tidak stabil menyebabkan kinerja kompor menjadi berkurang, oleh karena itu pola tiup udara diharapkan dapat membuat

penyebaran api reaktor pada kompor gasifikasi dapat tersebar secara merata.

Untuk penelitian lebih lanjut akan membahas mengenai kinerja kompor gasifikasi tipe *downdraft* dan *updraft* yang dipengaruhi oleh pola tiup udara. Ada pun parameter yang dapat diuji pada kinerja kompor gasifikasi yaitu temperatur nyala api, lama waktu nyala api, lama waktu mendidihkan air, laju konsumsi bahan bakar, pola nyala api serta karakteristik api. Parameter tersebut dirancang untuk untuk mengetahui pola tiupan udara pada kinerja kompor gasifikasi terbaik. Penelitian ini diharapkan pelet kayu banyak digunakan sebagai bahan bakar pengganti migas, dapat mengurangi limbah kayu, menurunkan tingkat produksi arang, mengurangi emisi serta membuat kinerja kompor menjadi lebih baik dengan nyala api yang stabil.

2. Dasar Teori

2.1 Definisi Biomassa

Biomassa merupakan bagian dari tumbuhan atau hewan yang dapat digunakan sebagai bahan bakar padat atau diubah ke dalam bentuk gas untuk menghasilkan energi panas atau bahan bakar. Biomassa ialah campuran kompleks yang terdiri dari karbohidrat, lemak, protein dan lainnya. Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang nilai ekonomisnya rendah (El Basam dan Maegaard, 2004) [5].

Biomassa sangat cocok untuk dan dikelola karena ketersediaannya yang tinggi di Indonesia. Pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar alternatif merupakan solusi yang tepat untuk permasalahan penggunaan bahan bakar fosil. Dengan memanfaatkan energi biomassa ini banyak keuntungan dari segi lingkungan seperti, mengurangi bau tidak sedap, mengurangi dampak gas rumah kaca serta menanggulangi pencemaran lingkungan yang dapat mencemarkan beberapa penyakit. Pemanfaatan limbah jenis ini secara ekonomis akan sangat kompetitif seiring dengan kenaikan harga bahan bakar fosil.

Biomassa mengandung beberapa komponen penting dengan proporsi yang berbeda-beda, yaitu :

- a. Hemiselulosa
Sebagian besar terdiri dari gula (glukosa, xilosa, dan lainnya) dengan

perbandingan 20%-40% dan mengandung sedikit CH_4 [6].

- b. Selulosa
Merupakan polimer glukosa dengan rasio 40%-60%. Kandungan dari selulosa meliputi 49,3% O, 44,4% C DAN 6,2% H [6].
- c. Lignin
Molekul kompleks yang memiliki rasio 10%-25% [6].
- d. Air
Kadar air pada biomassa maksimum 20%, karena akan menyebabkan *heat loss* yang berlebihan dan memberikan beban pada tahap pengeringan.

2.2 Gasifikasi

Gasifikasi merupakan proses perubahan bahan bakar padat menjadi gas dengan menggunakan teknik pembakaran. Proses pembakaran yang terjadi menyebabkan reaksi termo-kimia dan menghasilkan CO , CO_2 , H_2 , H_2O dan CH_4 [10]. Gas yang dihasilkan dari teknik pembakaran memiliki nilai bakar dan dapat menghasilkan energi.

Gasifikasi biomassa merupakan proses penguraian bahan bakar organik secara termal untuk menghasilkan gas sintesis dengan penyuplaian oksigen yang terbatas [11]. Proses gasifikasi tersebut menghasilkan gas yaitu, CO_2 , NO_3 , CH_4 , H_2 . Terdapat empat proses dalam gasifikasi, seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.1 Proses Gasifikasi.

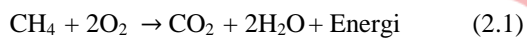
Pada gambar 2.1 dapat diuraikan, sebagai berikut :

1. Proses pengeringan (*drying*)
Kandungan air pada bahan bakar padat akan diuapkan oleh panas yang diserap melalui proses oksidasi. Temperatur pada proses ini adalah 100°C - 300°C yang bertujuan untuk mengurangi atau menghilangkan kelembaban pada biomassa.

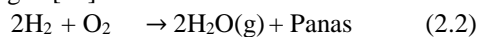
Melalui proses konveksi kadar air akan hilang, karena pada reaktor terjadi pemanasan udara yang bergerak mengeluarkan kandungan air [12].

2. Proses pirolisis

Merupakan proses penguraian bahan bakar pada temperatur tertentu dengan udara yang terbatas. Selama proses ini akan mengalami kenaikan temperatur, sehingga dapat mencapai 300°C-700°C. Hasil dari proses pirolisis akan menghasilkan tiga produk dengan fasa yang berbeda, yaitu produk cair berupa tar, produk gas berupa *producer gas* (CO, CO₂, H₂, H₂O dan CH₄) dan produk padat berupa arang [13]. Secara umum reaksi yang terjadi pada tahap ini adalah :



Reaksi pembakaran gas hidrogen dengan oksigen [14]:



3. Proses pembakaran atau oksidasi

Bahan bakar akan teroksidasi oleh oksigen dan udara. Proses ini menghasilkan panas (*eksoterm*) yang memanaskan lapisan karbon di bawahnya. Temperatur selama proses ini lebih dari 900°C serta akan memecah substansi tar.

Pada daerah pembakaran, sekitar 20% arang akan teroksidasi menjadi CO₂ dan H₂O dan 80% arang akan turun ke bawah, kemudian membentuk lapisan *reduction* dimana hampir seluruh karbon akan digunakan [12]. Reaksi yang terjadi pada proses ini sebagai berikut [14]:



4. Proses reduksi

Merupakan reaksi penyerapan panas (*endoterm*) dan terjadi reaksi kimia yang dapat digunakan untuk menghasilkan *flammable gas*. Proses ini terjadi pada temperatur 400°C-900°C dan menghasilkan gas bakar seperti H₂, CO dan CH₄ [10].

2.3 Reaktor Gasifikasi

Kompur gasifikasi adalah salah satu teknologi yang memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakar untuk keperluan memasak pada sektor rumah tangga. Reaktor gasifikasi dapat dibedakan berdasarkan arah aliran udara dan pola tiup udara.

Berikut uraian berdasarkan arah aliran udara :

1. Gasifikasi tipe *Updraft*

Pada tipe ini, ruang pembakaran terletak di bawah bahan bakar. Untuk menyuplai udara dan api penyalaan dilakukan di bagian bawah, sehingga gas panas yang dihasilkan mengalir ke atas melewati bahan bakar yang belum terbakar, sementara bahan bakar yang telah menjadi abu akan terus jatuh ke bawah. Penggunaan gasifikasi tipe *updraft* memiliki keunggulan, yaitu tingkat pembakaran yang tinggi, desain yang sederhana serta efisiensi termal atau panas yang baik [10].



Gambar 2.2 Gasifikasi Tipe *Updraft*.

2. Gasifikasi tipe *Downdraft*

Pada tipe ini, sumber panas terletak di bawah bahan bakar. Pada gambar di bawah ini terlihat aliran udara bergerak ke bagian bawah yaitu zona gasifikasi yang menghasilkan asap pirolisis, sehingga menyebabkan asap tersebut melalui zona gasifikasi yang panas. Hal ini menyebabkan tar yang terkandung dalam asap terbakar, sehingga reaktor tersebut menghasilkan gas yang bersih. Tar merupakan salah satu pengotor yang paling merugikan dan harus dihindari karena sifatnya yang dapat membuat kompor menjadi korosif. Kelebihan gasifikasi pada tipe ini adalah biayanya yang ekonomis, waktu operasi yang lebih lama dan bahan bakar yang dapat diisi ulang tanpa menghentikan penyalaan.



Gambar 2.3 Gasifikasi Tipe *Downdraft*.

3. Gasifikasi tipe *Crossdraft*

Pada tipe ini, aliran udara mengalir tegak lurus dengan arah gerak pada ruang pembakaran

untuk menghasilkan gas *pyrolysis*. Reaktor tipe ini juga memungkinkan operasi yang kontinu apabila memiliki sistem pengeluaran abu yang baik [10].



Gambar 2.4 Gasifikasi Tipe *Crossdraft*.

Berikut uraian berdasarkan pola tiup udara :

1. *Direct* (langsung)

Pola tiupan ini merupakan metode pola tiupan udara secara langsung. Udara yang berasal dari kipas langsung disalurkan ke dalam sistem pembakaran.

2. *Cyclone* (siklon)

Pola tiupan ini merupakan metode dengan pola tiupan udara secara tidak langsung, sebelum masuk ke ruang pembakaran, udara dari kipas akan disalurkan ke sebuah alat penampung. Kelebihan dari metode ini adalah dapat menghasilkan tinggi api yang merata, karena udara terdistribusi secara menyeluruh di ruang bakar.

2.4 Kompur Gasifikasi Biomassa

Pada penelitian ini, kompor biomassa memiliki komponen-komponen sebagai pendukung kompor, yaitu :

1. Reaktor/Ruang Pembakaran (*Gasifier*)

Sebagai tempat bahan bakar biomassa, sekaligus tempat terjadinya proses pembakaran dan gasifikasi.

2. Lubang Udara

Kompur gasifikasi biomassa memiliki dua jenis lubang udara, yaitu :

a. Lubang primer (Lubang pada Kipas)

Lubang tersebut berfungsi sebagai suplai udara yang berasal dari kipas dan membantu proses pembakaran gasifikasi, membantu proses pengeringan bahan bakar dan meningkatkan kinerja kompor gasifikasi.

b. Lubang sekunder (Lubang Reaktor/*Gasifier*)

Lubang ini berfungsi sebagai suplai udara yang berasal dari lingkungan untuk membantu proses gasifikasi.

3. *Burner*

Burner berfungsi sebagai tempat meletakkan panci atau wajan untuk memasak.

4. *Hopper*

Hopper berfungsi untuk mempermudah memasukkan bahan bakar.

5. *Ash Box*

Ash box berfungsi untuk menampung arang atau abu sisa pembakaran.

2.5 Parameter dan Perhitungan Kompur Gasifikasi

Terdapat beberapa parameter dari hasil pengujian kinerja gasifier kompor gasifikasi biomassa, sebagai berikut :

1. Waktu Mulai

Waktu dimana, mulainya penyalan api yang disebabkan oleh terbakarnya bahan bakar.

2. Waktu Operasi

Waktu dimana, ketika api menyala hingga padamnya api karena bahan bakar telah habis dan hanya arang atau abu yang tersisa.

3. Total Waktu Operasi

Total waktu operasi adalah dimana jumlah dari waktu mulai dan waktu operasi.

4. Persentase Warna Api

Persentase warna api dapat ditentukan dengan menggunakan *software MATLAB*. Gambar api yang telah diambil pada proses penelitian, kemudian dimasukkan ke dalam aplikasi *MATLAB* dan akan disajikan masing-masing warna dalam bentuk tabel. Rumus yang digunakan untuk menghitung persentase warna api sebagai berikut :

$$\% \text{api merah/biru} = \frac{\text{jumlah nilai api merah/biru}}{\text{jumlah nilai warna merah, hijau dan biru}} \times 100\% \quad (2.6)$$

5. Pola Api

Merupakan model atau bentuk api yang berada pada *gasifier*.

6. Suhu Api Maximum

Merupakan suhu tertinggi api pada *gasifier* yang berasal dari proses pembakaran gasifikasi.

7. Waktu Pendidihan

Merupakan waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan air dengan massa 1 kg dan diukur hingga suhu mencapai 100°C.

8. Laju Konsumsi Bahan Bakar (*FCR*)

Merupakan jumlah bahan bakar yang diperlukan selama kompor beroperasi. Semakin rendah nilai *FCR*, maka waktu kompor yang bekerja akan berlangsung lama. *FCR* dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$FCR = \frac{m \text{ bahan bakar (kg)}}{t \text{ (jam)}} \quad (2.10)$$

Dimana, *FCR*: laju konsumsi bahan bakar (kg/jam)

m bahan bakar: massa bahan bakar yang masuk (kg)

t: waktu operasi (jam)

9. Kalor Laten

Merupakan sejumlah energi yang diperlukan untuk merubah wujud suatu zat, baik dari padat menjadi cair dan cair menjadi gas. Kalor pada saat air mendidih dapat dicari dengan persamaan berikut ini :

$$Lh = M \times H_{fg} \quad (2.11)$$

Dimana, *Lh*: kalor laten (kkal)

M: massa uap air (kg)

H_{fg}: kalor laten air (540kkal/kg)

10. Kalor Sensibel

Merupakan jumlah energi yang diperlukan untuk meningkatkan suhu air. Kalor ini dihitung sebelum dan sesudah ketika suhu air mencapai suhu maksimum.

$$SH = M \times Cp \times (T_1 - T_0) \quad (2.12)$$

Dimana, *SH*: kalor sensibel (kkal)

M: massa air yang dididihkan (kg)

Cp: kalor spesifik air (1 kkal/kg.°C)

T₀: temperatur awal air (°C)

T₁: temperatur air mendidih (°C)

11. Laju Kalor

Merupakan laju perpindahan kalor untuk mengetahui kinerja kompor untuk menaikkan suhu dan menguapkan air selama periode waktu operasi. Semakin rendah laju perpindahan kalor, maka semakin lama waktu operasi.

$$Hr = \frac{Lh + Sh}{t} \quad (2.13)$$

Dimana, *Hr*: laju kalor (kkal/jam)

Sh: kalor sensibel (kkal)

Lh: kalor laten (kkal)

t: waktu operasi (jam)

12. Efisiensi Termal

Merupakan perbandingan antara jumlah energi kalor yang dibutuhkan untuk mendidihkan air dengan jumlah energi kalor yang terdapat pada bahan bakar. Semakin tinggi nilai efisiensi termal, maka kinerja kompor semakin baik, karena dapat mendidihkan air dengan cepat dengan bahan bakar seminimal mungkin.

$$Te = \frac{Sh + Lh}{Wf \times Hf} \times 100\% \quad (2.14)$$

Dimana, *Te*: efisiensi termal (%)

Sh: kalor sensibel (kkal)

Lh: kalor laten (kkal)

Wf: bahan bakar yang digunakan (kg)

Hf: nilai kalor bahan bakar (kkal/kg)

13. Persentase Char

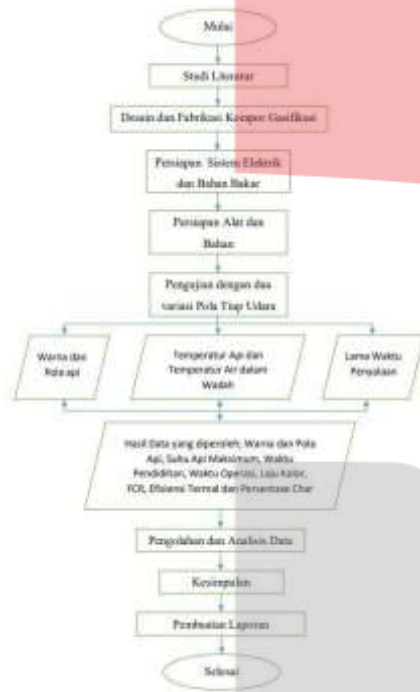
Persentase *char* dapat dihitung dengan cara membandingkan antara massa arang dengan massa bahan bakar dan dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\% Char = \frac{\text{massa arang (kg)}}{\text{massa bahan bakar (kg)}} \times 100\% \quad (2.15)$$

2.6 Metodologi Penelitian

Pengujian ini dilakukan di luar ruangan dengan menggunakan kompor gasifikasi tipe *downdraft* dan *updraft*. Kemudian memvariasikannya dengan variasi pola tiupan udara; *direct* dan *cyclone*

menggunakan kompor gasifikasi biomassa tipe *downdraft* dan *updraft*, empat variasi kecepatan aliran udara; 4,5 m/s, 5 m/s, 5,4 m/s dan 5,7 m/s, tiga variasi jumlah massa bahan bakar; 400 gr, 600 gr dan 800 gr, serta tinggi dan jumlah lubang *gasifier* yang sama untuk setiap kompor dengan menggunakan *wood pellet*. Pengujian kompor dilakukan dengan metode SNI 7926:2013 Tungku Biomassa. Adapun rancangan sistematik penelitian dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

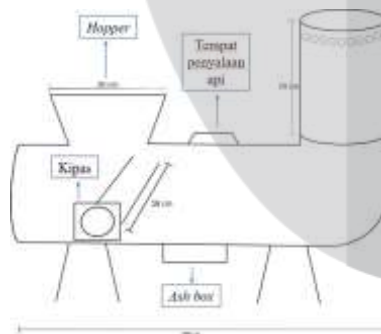


Gambar 2.5 Diagram Alur Penelitian

Kompor gasifikasi yang digunakan pada penelitian ini diantaranya, *downdraft cyclone*, *downdraft direct*, *updraft cyclone* dan *updraft direct*.

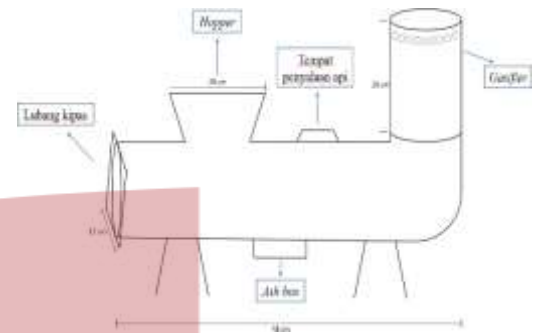
Berikut adalah desain tipe-tipe kompor gasifikasi secara umum :

- *Downdraft Cyclone*



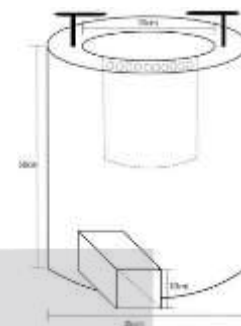
Gambar 2.6 Desain Kompor Gasifikasi *Downdraft Cyclone*

- *Downdraft Direct*



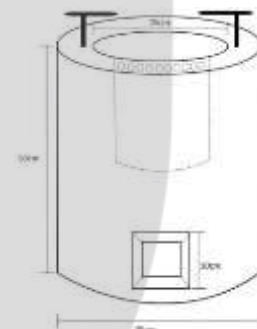
Gambar 2.7 Desain Kompor Gasifikasi *Downdraft Direct*

- *Updraft Cyclone*



Gambar 2.8 Desain Kompor Gasifikasi *Updraft Cyclone*

- *Updraft Direct*



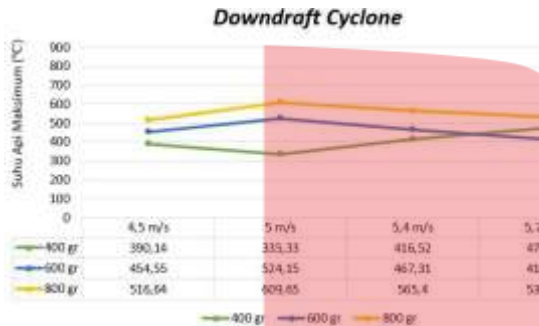
Gambar 2.9 Desain Kompor Gasifikasi *Updraft Direct*

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1 Pengujian Suhu Api Maksimum

Pada saat kecepatan aliran udara pada reaktor meningkat, temperatur nyala api semakin tinggi dan nyala api akan semakin besar. Karena dengan meningkatnya kecepatan udara, maka jumlah oksigen yang dibutuhkan pada tahap oksidasi juga semakin meningkat.

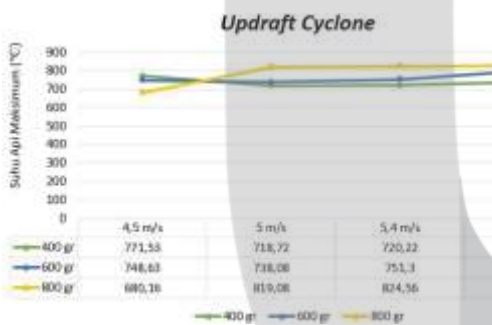
Hal ini juga menyebabkan waktu nyala berjalan efektif dan semakin singkat. Di bawah ini merupakan rangkuman data suhu api hasil eksperimen untuk pengujian pengaruh tipe kompor gasifikasi dan variasi pola tiup udara terhadap suhu api maksimum.



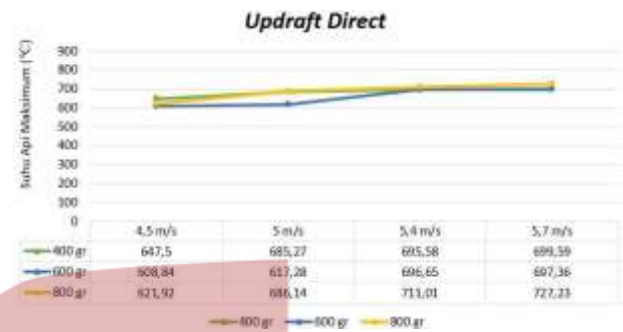
Gambar 3.1 Suhu Api Maksimum Pada Downdraft Cyclone



Gambar 3.2 Suhu Api Maksimum Pada Downdraft Direct



Gambar 3.3 Suhu Api Maksimum Pada Updraft Cyclone



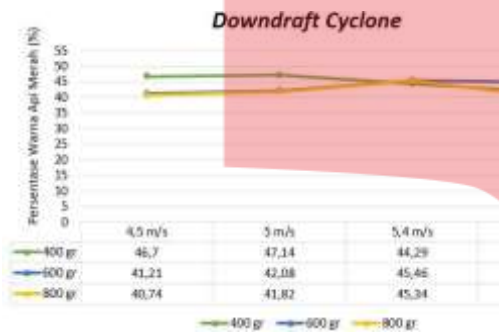
Gambar 3.4 Suhu Api Maksimum Pada Updraft Direct

Pada keempat gambar di atas menunjukkan, bahwa suhu api tertinggi yaitu pada kompor gasifikasi tipe *updraft* baik dengan pola tiup udara *cyclone* maupun *direct*. Hal ini disebabkan karena, tipe *updraft* memiliki desain yang sangat sederhana yaitu tempat bahan bakar yang berada pada bagian atas ruang bakar dan untuk suplai udara dilakukan pada bagian bawah kompor, sehingga gas panas yang dihasilkan dari pembakaran mengalir ke atas menuju bahan bakar. Suhu api tertinggi pada pola tiup udara *cyclone* yaitu pada kompor gasifikasi tipe *updraft* sebesar 827,55 °C dan pada pola tiup udara *direct* yaitu pada kompor gasifikasi tipe *updraft* sebesar 727,23 °C Serta menggunakan air sebanyak satu liter untuk setiap percobaan. Hal ini disebabkan karena perbandingan massa bahan bakar terhadap kecepatan aliran udara dapat dikatakan seimbang, karena menggunakan massa bahan bakar sebanyak 800 gr dengan kecepatan aliran udara yang maksimum yaitu 5,7 m/s sehingga kecepatan aliran udara yang tinggi berasal dari suplai udara primer dan dibantu oleh suplai udara sekunder yang berasal dari lingkungan akan menyebabkan udara dengan bahan bakar tercampur secara menyeluruh dan sempurna.

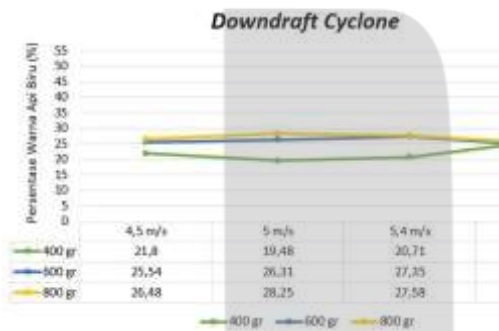
Sedangkan suhu api terendah pada pola tiup *cyclone* dan *direct* yaitu pada tipe kompor *downdraft* hanya mencapai masing-masing 335,33 °C dengan kecepatan aliran udara 5 m/s dan 476,35 °C dengan kecepatan aliran udara minimum yaitu 4,5 m/s. hal ini disebabkan karena minimnya bahan bakar yang digunakan yaitu 400 gr dan kurangnya suplai udara primer dan udara sekunder.

3.2 Warna dan Pola Api

Warna api merupakan hasil perpaduan dari jelaga, campuran udara (primer dan sekunder) dan volatile matter. Volatile mater atau zat terbang merupakan zat aktif yang dapat mempercepat proses pembakaran. Volatile matter sangat berpengaruh pada warna nyala api, semakin tinggi kandungan volatile matter pada bahan bakar maka nyala api akan semakin terang. Berikut di bawah ini persentase warna api merah dan biru.



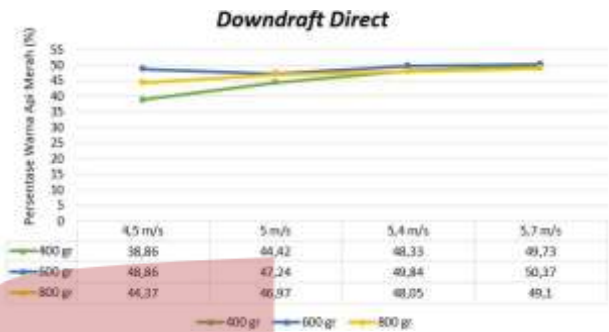
Gambar 3.5 Persentase Warna Api Merah Pada Downdraft Cyclone



Gambar 3.6 Persentase Warna Api Biru Pada Downdraft Cyclone

Percobaan pada kompor gasifikasi *downdraft cyclone* menghasilkan persentase warna api merah tertinggi sebesar 47,14%, massa bahan bakar sebanyak 400 gr dan kecepatan udara 5 m/s, sedangkan persentase warna api merah terendah sebesar 40,28%, massa bahan bakar sebanyak 800 gr, dengan kecepatan aliran udara 5,7 m/s.

Sedangkan untuk persentase warna api biru tertinggi sebesar 28,25% pada kecepatan aliran udara 5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 800 gr. Persentase warna api biru terendah sebesar 19,48% pada kecepatan aliran udara 5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr.

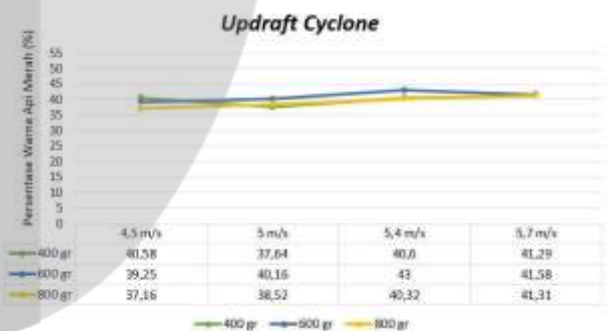


Gambar 3.7 Persentase Warna Api Merah Pada Downdraft Direct

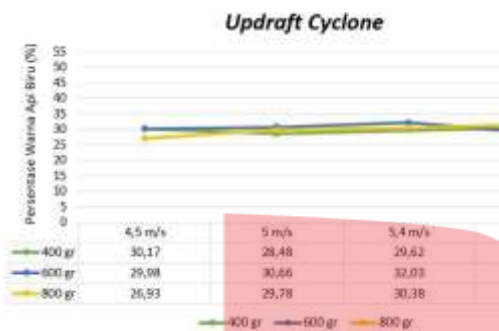


Gambar 3.8 Persentase Warna Api Biru Pada Downdraft Direct

Pada kompor gasifikasi *downdraft direct* menghasilkan persentase warna api merah tertinggi sebesar 50,37% pada kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 600 gr. Sedangkan persentase warna api merah terendah sebesar 38,86% pada kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar sebesar 400 gr. Kemudian untuk persentase warna api biru tertinggi sebesar 30,52%, massa bahan bakar sebanyak 600 gr, sedangkan persentase warna api biru terendah sebesar 15,07%, massa bahan bakar sebanyak 400 gr dengan kecepatan aliran udara masing-masing 5,7 m/s.



Gambar 3.9 Persentase Warna Api Merah Pada Updraft Cyclone



Gambar 3.10 Persentase Warna Api Biru Pada Updraft Cyclone

Pada kompor gasifikasi *updraft cyclone* menghasilkan persentase warna api merah tertinggi yaitu 43% pada kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan baka sebanyak 600 gr. Sedangkan persentase warna api merah terendah yaitu 37,16% pada kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 800 gr. Untuk persentase warna api biru tertinggi yaitu 32,03% pada kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 600 gr. Sedangkan persentase warna api biru terendah adalah 26,93% pada kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 800 gr.



Gambar 3.11 Persentase Warna Api Merah Pada Updraft Direct



Gambar 3.12 Persentase Warna Api Biru Pada Updraft Direct

Persentase warna api merah tertinggi untuk kompor gasifikasi *updraft direct* adalah 42,55% dengan kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr. Sedangkan persentase warna api merah terendah yaitu 38,42% pada kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 600 gr. Persentase warna api biru tertinggi pada kompor gasifikasi *updraft direct* yaitu sebesar 31,06% dengan kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr. Sedangkan persentase warna api biru terendah yaitu 24,34% dengan kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 600 gr.

Selain warna api, pola api juga mempengaruhi kinerja pada kompor gasifikasi. Berikut ini adalah pola api pada kompor gasifikasi.



Gambar 3.13 Pola Api Pada Downdraft Cyclone



Gambar 3.14 Pola Api Pada Downdraft Direct



Gambar 3.15 Pola Api Pada Updraft Cyclone

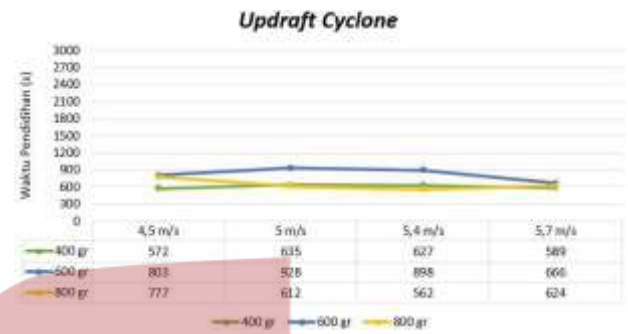


Gambar 3.16 Pola Api Pada *Updraft Direct*

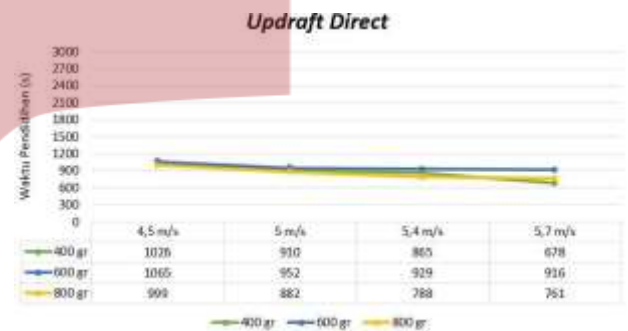
Dari Gambar 4.14 dan 4.16 bahwa variasi pola tiup udara *cyclone* menghasilkan penyebaran api secara merata, sehingga membentuk pola api tersebut tersebar secara menyeluruh serta memiliki tinggi dan warna nyala api yang merata, dikarenakan adanya turbulensi pada penyebaran aliran udara di ruang bakar. Sedangkan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.17 variasi pola tiup udara *direct* menghasilkan pola api dengan tinggi dan warna api yang tidak merata, dikarenakan penyebaran aliran udara terjadi secara langsung.

3.3 Waktu Pendidihan

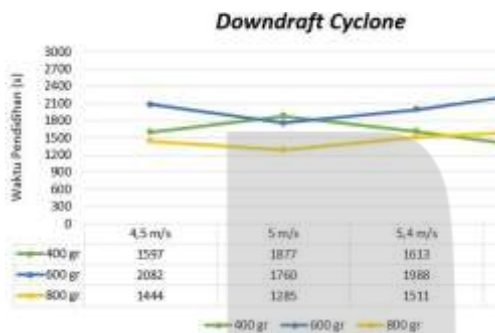
Temperatur pada reaktor mempengaruhi waktu untuk mendidihkan air, semakin tinggi temperatur reaktor maka temperatur pembakaran semakin tinggi.



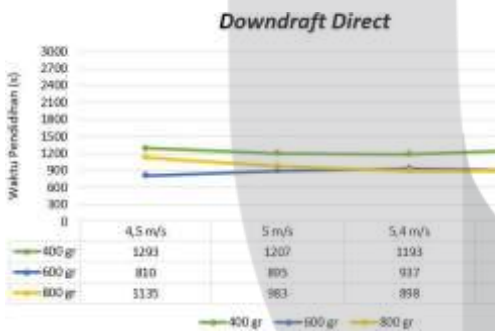
Gambar 3.19 Waktu Pendidihan Pada *Updraft Cyclone*



Gambar 3.20 Waktu Pendidihan Pada *Updraft Direct*



Gambar 3.17 Waktu Pendidihan Pada *Downdraft Cyclone*



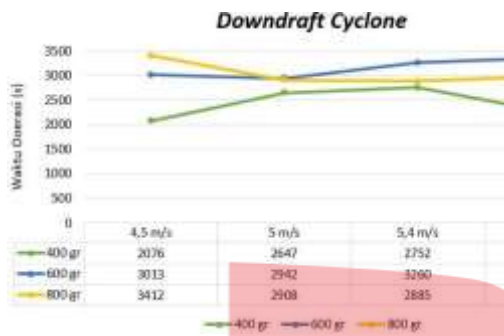
Gambar 3.18 Waktu Pendidihan Pada *Downdraft Direct*

Pada kondisi pola tiup udara *cyclone*, waktu tercepat untuk mendidihkan air yaitu pada kompor *updraft* yaitu sebesar 562 detik (9,3 menit) dengan kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 800 gr. Sedangkan kondisi pada pola tiup udara *direct*, waktu tercepat untuk mendidihkan air yaitu pada kompor *updrdat* sebesar 678 detik (11,3) menit dengan kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr.

Pada kondisi pola tiup udara *cyclone*, waktu terlama untuk mendidihkan air yaitu pada kompor *downdraft* sebesar 2319 detik (38,7 menit) dengan kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 600 gr. Sedangkan pada kondisi pola tiup udara *direct*, waktu terlama untuk mendidihkan air yaitu pada kompor *downdraft* sebesar 1293 detik (21,6 menit) dengan kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr.

3.4 Waktu Operasi

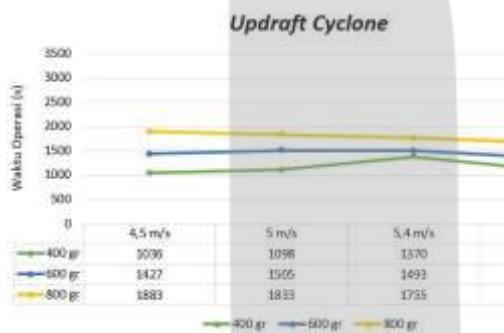
Pengujian waktu operasi dimulai ketika api mulai menyala hingga api padam. Di bawah ini merupakan hasil eksperimen untuk pengujian pengaruh tipe kompor gasifikasi dan variasi pola tiup udara terhadap waktu operasi



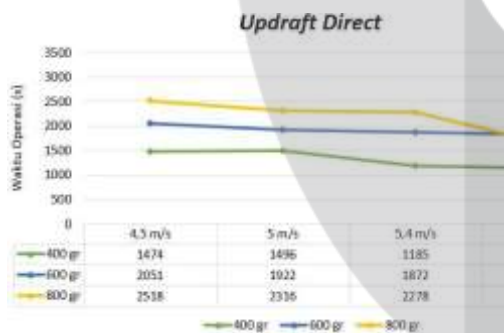
Gambar 3.21 Waktu Operasi Pada Downdraft Cyclone



Gambar 3.22 Waktu Operasi Pada Pola Tiup Udara Direct



Gambar 3.23 Waktu Operasi Pada Updraft Cyclone



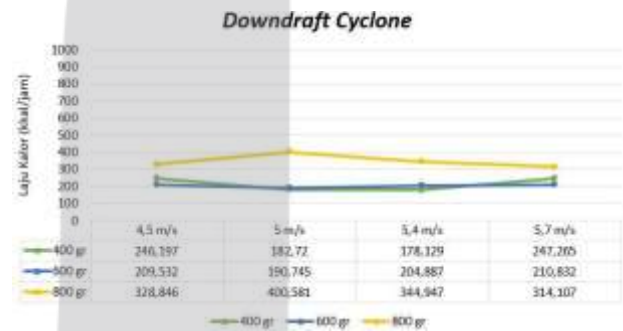
Gambar 3.24 Waktu Operasi Pada Updraft Direct

cyclone sebesar 3412 detik (56,8 menit) dengan kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan bahan bakar sebanyak 800 gr, maupun *direct* yaitu sebesar 2983 detik (49,7 menit) dengan kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan bahan bakar sebanyak 800 gr. Hal ini disebabkan karena massa bahan bakar yang semakin meningkat, maka proses pembakaran juga berlangsung lama sehingga lama nyala api juga semakin lama.

Sedangkan waktu operasi tercepat pada kompor gasifikasi tipe *updraft*, baik dengan pola tiup *cyclone* sebesar 1036 detik (17,2 menit) dengan kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan bahan bakar sebanyak 400 gr, maupun *direct* yaitu sebesar 1143 detik (19,1 menit) dengan kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan bahan bakar sebanyak 400 gr.

3.5 Laju Kalor

Laju kalor menunjukkan kemampuan kompor untuk meningkatkan suhu air serta menguapkan air selama waktu pengujian kompor gasifikasi beroperasi. Semakin tinggi laju perpindahan kalor maka semakin cepat waktu operasi untuk meningkatkan suhu dan menguapkan air.

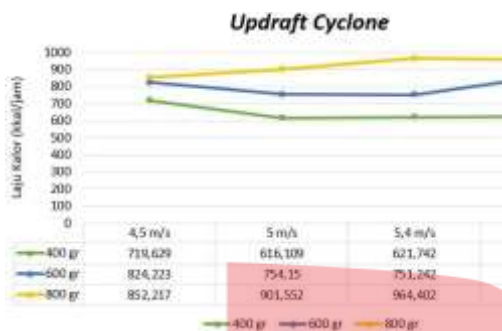


Gambar 3.25 Laju Kalor Pada Downdraft Cyclone



Gambar 3.26 Laju Kalor Pada Downdraft Direct

Waktu Operasi terlama pada kompor gasifikasi tipe *downdraft*, baik dengan pola tiup udara



Gambar 3.27 Laju Kalor Pada *Updraft Cyclone*



Gambar 3.28 Laju Kalor Pada *Updraft Direct*

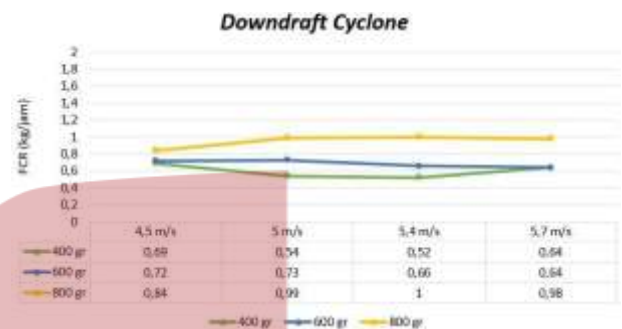
Laju kalor tertinggi untuk pola tiup udara *cyclone* yaitu pada kompor gasifikasi tipe *updraft* yaitu mencapai 964,402 kkal/jam dengan kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar 800 gr, sedangkan pada pola tiup udara *direct* yaitu pada kompor gasifikasi tipe *updraft* sebesar 917,734 kkal/jam dengan kecepatan aliran 5,7 m/s dan massa bahan bakar 800 gr.

Laju kalor terendah untuk pola tiup udara *cyclone* yaitu pada kompor gasifikasi tipe *downdraft* hanya mencapai 178,129 kkal/jam dengan kecepatan 5,4 m/s dan massa bahan bakar 400 gr, sedangkan pada pola tiup *direct* yaitu pada kompor gasifikasi tipe *downdraft* yaitu 222,196 kkal/jam dengan kecepatan 5 m/s dan massa bahan bakar 400 gr. Dari keempat gambar, terdapat data yang fluktuatif, hal ini disebabkan oleh udara dari lingkungan juga mempengaruhi dalam proses gasifikasi karena pengambilan data ini dilakukan di luar ruangan.

3.6 Laju Konsumsi Bahan Bakar (*Fuel Consumption Ratio/FCR*)

FCR merupakan banyaknya bahan bakar yang diperlukan selama kompor beroperasi. Berdasarkan SNI Tungku Biomassa 7926:2013,

bawha nilai FCR sebesar kurang dari atau sama dengan 1 kg/jam.



Gambar 3.29 FCR Pada *Downdraft Cyclone*



Gambar 3.30 FCR Pada *Downdraft Direct*



Gambar 3.31 FCR Pada *Updraft Cyclone*



Gambar 3.32 FCR Pada *Updraft Direct*

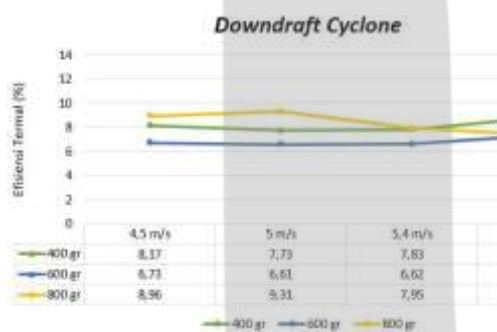
Laju konsumsi bahan bakar rata-rata tertinggi pada kompor gasifikasi tipe *updraft* mencapai 1,77 kg/jam pada pola tiup udara *direct* dengan

kecepatan aliran udara 5,7 m/s dan bahan bakar sebanyak 800 gr. Sedangkan laju konsumsi bahan bakar rata-rata terendah pada kompor gasifikasi tipe *downdraft* yaitu 0,52 kg/jam pada pola tiup udara *cyclone* dengan kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr. Kemudian FCR yang memiliki nilai 1 kg/jam yaitu kompor gasifikasi tipe *downdraft cyclone* dengan kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 800 gr.

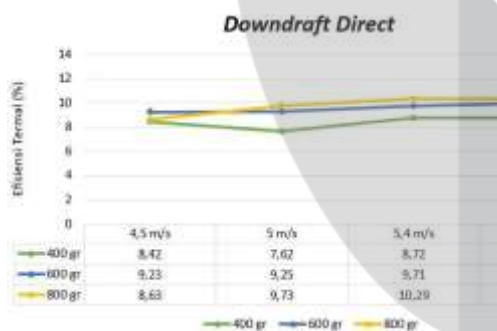
Pada keempat gambar menunjukkan bahwa banyaknya massa bahan bakar dengan kecepatan aliran udara tertentu mempengaruhi FCR, dimana semakin banyak bahan bakar yang digunakan maka akan memerlukan waktu yang lama untuk membakar bahan bakar tersebut, sehingga nilai FCR juga semakin meningkat.

3.7 Efisiensi Termal

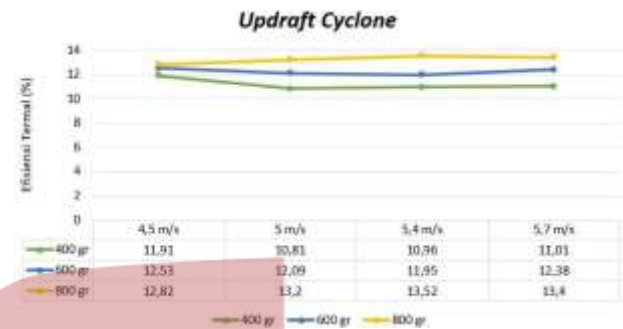
Kinerja kompor gasifikasi akan semakin baik jika nilai efisiensi termalnya semakin tinggi, karena dapat meningkatkan suhu dan menguapkan air dengan cepat dengan menggunakan bahan bakar seminimal mungkin. Berikut adalah gambar grafik efisiensi termal.



Gambar 3.33 Efisiensi Termal Pada *Downdraft Cyclone*



Gambar 3.34 Efisiensi Termal Pada *Downdraft Direct*



Gambar 3.35 Efisiensi Termal Pada *Updraft Cyclone*



Gambar 3.36 Efisiensi Termal Pada *Updraft Direct*

Nilai efisiensi termal tertinggi rata-rata pada kompor gasifikasi tipe *updraft* yaitu mencapai 13,52%, pola tiup udara *cyclone* dengan kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 800 gr. Selain *cyclone*, pola tiup udara *direct* juga memiliki nilai efisiensi termal tertinggi pada kompor gasifikasi tipe *updraft* yaitu 13,13% pada kecepatan aliran udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr. Nilai efisiensi termal pada pola tiup udara *cyclone* lebih tinggi dibandingkan pola tiup udara *direct*, karena pola tiup udara *cyclone* dapat mendistribusikan aliran udara secara menyeluruh dan sempurna.

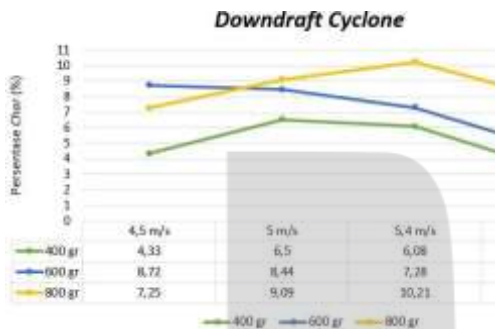
Sedangkan efisiensi termal terendah rata-rata pada kompor gasifikasi tipe *downdraft* hanya mencapai 6,61%, pola tiup udara *cyclone* dengan kecepatan aliran udara 5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 600 gr. Selain pola tiup udara *cyclone*, pola tiup udara *direct* juga memiliki nilai efisiensi termal yaitu 7,62 % dengan kecepatan aliran udara 5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr.

Dapa dilihat, bahwa kecepatan aliran udara mempengaruhi efisiensi termal. Semakin besar kecepatan aliran udara maka nilai efisiensi termal

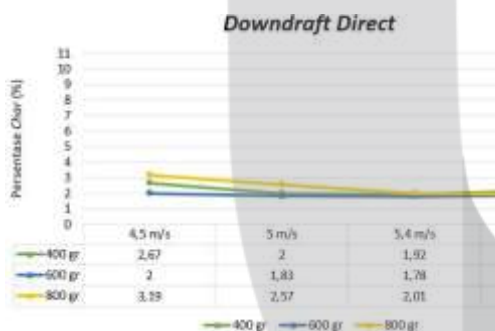
semakin besar juga. Hal ini dikarenakan, semakin besar kecepatan aliran udara maka akan membuat kalor yang berada pada kompor berpindah ke panci sehingga kalor yang dibutuhkan untuk menguapkan air bertambah. Laju kalor juga mempengaruhi nilai efisiensi termal. Semakin tinggi laju kalor, maka nilai efisiensi termal juga akan semakin tinggi.

3.8 Persentase Char

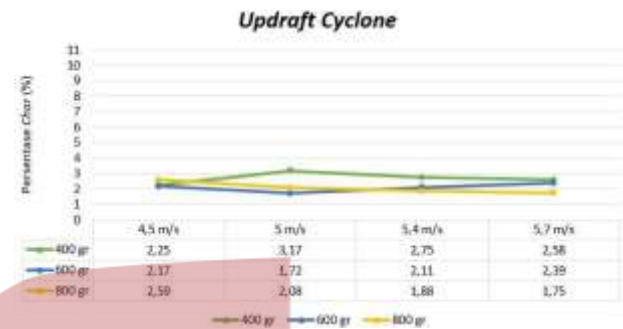
Pada penelitian ini, kompor gasifikasi tipe *downdraft* dengan pola tiup udara *cyclone* menghasilkan jumlah char yang besar, terlebih pada penelitian ini desain kompor tersebut adalah posisi lubang suplai udara primer sejajar dengan hoper sehingga sebagian dari bahan bakar tidak ikut terbakar. Berikut adalah gambar grafik persentase *char* pada empat kondisi kompor gasifikasi.



Gambar 3.37 Persentase Char Pada *Downdraft Cyclone*



Gambar 3.38 Persentase Char Pada *Downdraft Direct*



Gambar 3.39 Persentase Char Pada *Updraft Cyclone*



Gambar 3.40 Persentase Char Pada *direct Direct*

Persentase *char* terendah didapatkan pada kompor gasifikasi tipe *updraft* pada pola tiup udara *cyclone* sebesar 1,72% dengan kecepatan aliran udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 600 gr. Sedangkan persentase *char* tertinggi didapatkan pada kompor gasifikasi tipe *downdraft* pada pola tiup udara *direct* mencapai 10,21% dengan kecepatan aliran udara 5 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 800 gr. Nilai persentase *char* yang kecil dapat mempresentasikan bahwa kinerja kompor gasifikasi tersebut baik. Hal ini dikarenakan biomassa semakin tergasifikasi secara sempurna. Adapun nilai persentase *char* yang fluktuatif karena bahan bakar tidak tergasifikasi secara sempurna.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada empat kondisi kompor gasifikasi, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Performa kompor gasifikasi yang diuji pada variasi pola tiup udara *cyclone* lebih baik dibandingkan dengan pola tiup udara *direct*, serta kompor gasifikasi tipe *updraft* memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan kompor gasifikasi tipe *downdraft*.

2. Nilai efisiensi tertinggi sebesar 13,52% pada kompor gasifikasi updraft cyclone dengan kecepatan udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar sebanyak 400 gr. Efisiensi pada penelitian ini belum memenuhi standar metode SNI (7926:2013) Tungku Biomassa, yaitu minimal 20%.
3. Nilai laju konsumsi bahan bakar (FCR) untuk variasi pola tiup udara *cyclone* pada kompor gasifikasi tipe *downdraft* telah memenuhi standar SNI (7926:2013) Tungku Biomassa yaitu sebesar 0,52 kg/jam, hal ini dikarenakan pengujian menggunakan massa bahan bakar <1kg sudah dapat mendidihkan air sebanyak 1 liter.
4. Berdasarkan perancangan kompor gasifikasi, kondisi atau performa yang baik dengan mempertimbangkan persentase *char* terendah sebesar 1,72% dengan kecepatan udara 4,5 m/s dan massa bahan bakar 600 gr. Persentase warna api biru tertinggi sebesar 76,86% dengan kecepatan udara 5,4 m/s dan massa bahan bakar 600 gr. Suhu api maksimum sebesar 827,55°C dengan kecepatan udara 5,7 m/s dan massa bahan bakar 800 gr. Laju kalor tertinggi sebesar 964,402 kkal/jam dan waktu pendidihan tercepat yaitu 562 detik (9,3 menit) dengan kecepatan udara masing-masing 5,4 m/s dan massa bahan bakar masing-masing sebanyak 800 gr, yaitu pada kompor gasifikasi tipe *updraft* dengan pola tiup udara *cyclone*.
5. Hasil dari pengujian kompor gasifikasi tipe *updraft* dengan pola tiup udara *cyclone* memiliki kinerja yang lebih baik. Kompor gasifikasi tipe tersebut memiliki nilai efisiensi termal tertinggi yaitu 13,52%, FCR sebesar 1,64 kg/jam, persentase *char* yaitu 1,88%, waktu untuk mendidihkan air tercepat yaitu 562 detik (9,3 menit), laju kalor tertinggi yaitu 964,402 kkal/jam, suhu api maksimum yaitu 824,56°C, serta persentase warna api biru sebesar 30,38% dan warna api merah sebesar 40,32% pada kecepatan udara 5,4 m/s dan bahan bakar 800 gr.

REFERENCE

- [1] Ir. Subarudi, M.Wood,Sc., Bogor: Puslitbang Perubahan Iklim dan Kebijakan, 2002.
- [2] Ilminnafik, Nasrul dan Frenico A. O. (2016). *Karakteristik Api Syngas Pada Gasifikasi Downdraft dengan Bahan Biomassa Sekam Padi*. Universitas Jember.
- [3] F. Chartik. (2019). *Pengaruh Jenis Bahan Bakar dan Kecepatan Aliran Udara Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Biomassa*. Universitas Telkom. Bandung
- [4] A. Rizky. (2019). *Pengaruh Jumlah Lubang Udara Pada Tungku Pembakaran Serta Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Dengan Bahan Bakar Pelet Kayu Jati*. Universitas Telkom. Bandung.
- [5] Sari, D. P. (2019). *Pembuatan Bahan Bakar dari Limbah Serbuk Gergajian*. Universitas Lampung, p. 8.
- [6] Winata, Resiana. (2012). *Perancangan Dan Optimasi Kompor Gas Biomassa yang Beremisi Gas CO Rendah Menggunakan Bahan Bakar Pelet Biomassa Dari Limbah Bagas*. Depok.
- [7] A. Hartoyo. Dan R. H. (1978). *Sifat-Sifat Penyalaan dan Pembakaran Briket Biomassa Briket Batu Bara dan Arang Kayu*. Laporan Penelitian.
- [8] Pari. G. (2002). *Teknologi Alternatif Pemanfaatan Limbah Industri Pengolahan Kayu*. M.K Falsafah Sains. Program Pasca Sarjana IPB , p. 66.
- [9] Fathurrachman.(2020). *Energi Baru dan Terbarukan*. Diakses pada tanggal 20 November 2020. <http://energibarudanterbarukan.blogspot.com/2015/07/pelet-kayu-wood-pellet.html>
- [10] Khoiri, M. R. (2016). *Rancang Bangun Tungku Gasifikasi Tipe Downdraft Continue Bahan Bakar Sekam Padi*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [11] Djafar, Romi dkk. (2014). *Analisis Performa Kompor Gasifikasi Biomassa Tipe Forced Draft Menggunakan Variasi Jumlah Bahan Bakar Tongkol Jagung*. Gorontalo: Politeknik Gorontalo.
- [12] Khoiriyah A'isyatul. (2015). *Karakteristik Api Syngas pada Gasifikasi Sistem Downdraft dengan Oksigen Sebagai Gasyfaying Agent Berbahan Baku Biomassa*. Universitas Jember.
- [13] M. Samsul. Dan S. H. (2017). *Optimasi Gasifikasi Sekam Padi Tipe Fixed Bed Downdraft dengan Memvariasikan Hisapan Blower Supaya Menghasilkan Kandungan Tar*

- Sesuai Standar*. Jurnal Teknik Mesin. Universitas Pancasila Jakarta.
- [14] Asih, Erida. (2017). *Pengaruh Tinggi dan Jumlah Lubang Udara Pada Tungku Pembakaran Serta Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Biomassa*. Universitas Telkom. Bandung.
- [15] Rahmadani, F. (2020). *Pengaruh Variasi AFR (Air Fuel Ratio) Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Tipe Downdraft*. Universitas Telkom. Bandung.
- [16] Bilhaq, Mutahassin. (2019). 5 Tingkatan Suhu Api Berdasarkan Warna Nyala Apinya. Diakses pada tanggal 22 Oktober 2019. <https://www.idntimes.com/science/discovery/mutahassin-bilhaq/tingkatan-suhu-api-berdasarkan-warna-nyala-apinya-exp-c1c2/full>
- [17] Cahyanti, M. Dan E. R. S. (2010). *Algoritma Transformasi Ruang Warna*. Depok.
- [18] Birdayansyah, R. dkk (2015). *Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan Perintah Suara Berbasis Mikrokontroler Arduino*. Teknik Elektro. Universitas Lampung.
- [19] Akbar, Daru dan Slamet Riyadi. (2018). *Pengaturan Kecepatan Pada Motor Brushless DC (BLDC) Menggunakan PWM (Pulse Width Modulation)*. Universitas Katolik Soegijapranata. Semarang.
- [20] Hantoko, D. dkk. (2015). *Simulasi Termodinamika Perengkahan Tar pada Keluaran Fixed Bed Gasifier*. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- [21] Gunawan, I. G. H. dkk. (2015). *Analisis Performansi Reaktor Gasifikasi Updraft Dengan Bahan Bakar Tempurung Kelapa*. Universitas Udayana. Bali.
- [22] Wibowo, W. A. dkk. (2014). *Pengaruh Laju Aliran Udara dan Tipe Aliran Udara Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Tongkol Jagung*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- [23] Website Badan Pusat Statistika, <https://www.bps.go.id/indicator/60/167/1/produksi-kayu-hutan.html> (diakses 15 Desember 2020).
- [24] Sartika K, D. (2012). *Analisis Konsekuensi Dispersi Gas, Kebakaran, dan Ledakan Akibat Kebocoran Tabung LPG 12 kg Di Kelurahan Manggarai Selatan Tahun 2012 Dengan Menggunakan Breeze Incident Analyst Software*. Universitas Indonesia. Depok.
- [25] Website PT. Triwi Putra Jaya, 2016. <http://www.pttriwi.com/he804-multi-channel-handheld-thermocouple-temperature-data-logger.html?o=terbaru> (diakses 15 Desember 2020).
- [26] Electronic (Shenzhen) Co., LTD, Huato (unknown). *Operation Manual for HE70X/80X Series Multi-channel thermocouple thermometer.* [file:///C:/Users/Alsya%20Pratiwi/Downloads/Operation manual for HE700-800 series.pdf](file:///C:/Users/Alsya%20Pratiwi/Downloads/Operation%20manual%20for%20HE700-800%20series.pdf) (diakses 15 Desember 2020).