

## RANCANG BANGUN DAN UJI PERFORMA KOMPOR GASIFIKASI BIOMASSA (TEMPURUNG KELAPA) TIPE *UPDRAFT* DENGAN VARIASI JUMLAH LUBANG UDARA SEKUNDER DAN PENGGUNAAN *THERMOELECTRIC GENERATOR*

**Qodry Ramdhani**

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: [godry.19036@mhs.unesa.ac.id](mailto:godry.19036@mhs.unesa.ac.id)

**Mohammad Effendy**

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: [mohammadeffendy@unesa.ac.id](mailto:mohammadeffendy@unesa.ac.id)

### Abstrak

Gasifikasi merupakan konversi termokimia dengan panas yang dapat mengubah biomassa kering menjadi bahan bakar *syngas*. Penelitian ini membahas proses gasifikasi biomassa sebagai teknologi konversi termokimia untuk menghasilkan *syngas* dengan menggunakan *gasifier* tipe *updraft* berbahan bakar tempurung kelapa. Fokus utama adalah menganalisis pengaruh variasi jumlah lubang udara sekunder (25, 45, dan 65 lubang) terhadap performa pembakaran dan keluaran listrik dari *thermoelectric generator* (TEG). Metode yang digunakan adalah uji eksperimen dengan pendekatan kuantitatif deskriptif, mengacu pada standar SNI 7926:2013. Variabel bebas berupa jumlah lubang udara, sedangkan variabel terikat meliputi temperatur nyala, durasi dan warna nyala api, efisiensi *thermal* kompor, serta besaran tegangan, arus, dan daya listrik yang dihasilkan. Uji dilakukan dengan beban air sebesar 1,5 kg sebagai simulasi pemanfaatan panas. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lubang udara memperbaiki performa pembakaran dan kinerja TEG. Konfigurasi 65 lubang menghasilkan temperatur tertinggi (834°C), durasi nyala terlalu lama (18 menit), tegangan tertinggi (4,055 V), daya maksimum (25,3 kW), dan efisiensi *thermal* tertinggi (17,61%).

**Kata Kunci:** Kompor Gasifikasi, Biomassa Tempurung Kelapa, *Thermoelectric generator*.

### Abstract

*Gasification is a thermochemical conversion process that utilizes heat to transform dry biomass into syngas fuel. This study investigates the biomass gasification process as a thermochemical conversion technology to generate syngas using an updraft-type gasifier fueled by coconut shell. The primary focus is to analyze the effect of varying the number of secondary air holes (25, 45, and 65 holes) on combustion performance and the electrical output of a thermoelectric generator (TEG). The methodology involves experimental testing through a descriptive quantitative approach, following the SNI 7926:2013 standard. The independent variable is the number of air holes, while the dependent variables include flame temperature, flame duration and color, stove thermal efficiency, and the magnitude of voltage, current, and power output. Testing was conducted using a 1.5 kg water load to simulate practical heat utilization. The results indicate that increasing the number of air holes enhances combustion performance and TEG efficiency. The configuration with 65 holes yielded the highest flame temperature (834 °C), longest flame duration (18 minutes), maximum voltage (4.055 V), peak power output (25.3 kW), and the highest thermal efficiency (17.61%).*

**Key words:** *Gasification Stove, Coconut Shell Biomass, Thermoelectric generator.*

### PENDAHULUAN

Indonesia dikenal memiliki kekayaan sumber daya biomassa yang sangat melimpah. Letak geografis dan iklim tropis memungkinkan pertumbuhan berbagai tanaman yang dapat dimanfaatkan sebagai biomassa, mulai dari limbah pertanian, residu kehutanan, hingga sampah organik perkotaan. Potensi ini menjadikan biomassa sebagai salah satu solusi energi alternatif yang sangat menjanjikan, khususnya dalam menghadapi tantangan ketahanan energi nasional.

Biomassa merupakan bahan organik hasil proses fotosintesis, yang berasal dari produk utama ataupun limbah tanaman, kayu, limbah pertanian, dan sampah organik (Armansyah, 2019). Selain digunakan sebagai bahan pangan, pakan, atau bahan baku industri, biomassa juga banyak dimanfaatkan sebagai bahan bakar karena sifatnya yang dapat diperbaharui. Biomassa yang bernilai

ekonomis rendah seperti limbah tempurung kelapa atau jerami sering kali menjadi bahan bakar alternatif karena ketersediaannya yang melimpah dan biaya yang rendah (Parinduri & Parinduri, 2020).

Seiring meningkatnya kebutuhan energi akibat pertumbuhan populasi dan aktivitas manusia, cadangan energi fosil terus mengalami penurunan. Hal ini mendorong pentingnya pengembangan sumber energi baru dan terbarukan. Meskipun sering digunakan secara bergantian, istilah “terbaharui” dan “berkelanjutan” tidaklah identik. Kemampuan vegetasi untuk mengalami daur ulang bergantung pada prinsip-prinsip ekologi yang kompleks. Agar suatu biosistem dapat berfungsi secara optimal, diperlukan keseimbangan antara tingkat panen dan laju pertumbuhan, disertai dengan perlindungan lingkungan terhadap lahan budidaya. Tanpa kondisi tersebut, keberlanjutan jangka panjang dari sistem biomassa akan sulit untuk dicapai (Herlambang, dkk,

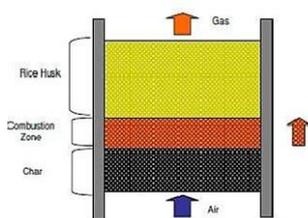
2017). Pemanfaatan biomassa sebagai energi alternatif menjadi solusi yang tidak hanya berkelanjutan tetapi juga ramah lingkungan. Salah satu metode konversi energi biomassa yang populer adalah proses gasifikasi.

Terdapat tiga metode utama dalam konversi biomassa menjadi energi, yaitu pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran. Pirolisis merupakan suatu proses termal yang memecah senyawa karbon dalam kondisi tanpa oksigen. Berbeda dengan pembakaran langsung, pirolisis melibatkan tahap di mana dekomposisi termal berlangsung tanpa kehadiran oksigen. Sementara itu, gasifikasi adalah proses konversi biomassa padat menjadi gas-gas yang mudah terbakar melalui reaksi termokimia. Di antara ketiganya, pembakaran merupakan teknik paling sederhana dan paling awal yang digunakan untuk mengubah energi kimia dalam biomassa menjadi energi panas (Zobaa & Bansal, 2011).

Gasifikasi merupakan proses pembakaran terbatas yang berlangsung dalam suhu tinggi dan kadar oksigen yang rendah, menghasilkan gas sintesis (*syngas*) berupa CO, H<sub>2</sub>, dan CH<sub>4</sub>. Gas ini dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam berbagai aplikasi termasuk kompor. Pembuatan kompor gasifikasi biomassa adalah langkah yang tepat untuk memanfaatkan sumber biomassa yang ada di Indonesia (Hanani, 2010). Kompor gasifikasi yang memanfaatkan *syngas* dari biomassa memiliki efisiensi panas tinggi dan cocok digunakan di lingkungan rumah tangga, khususnya di daerah pedesaan.

Gasifikasi menawarkan sejumlah keunggulan dibandingkan pemanfaatan langsung bahan bakar padat. Proses ini menghasilkan gas sintesis dengan nilai kalor yang lebih tinggi dan komposisi yang lebih bersih, serta menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan dengan pembakaran langsung bahan bakar padat. Gasifikasi juga dapat digunakan untuk mengkonversi limbah padat menjadi bahan bakar atau produk industri yang berguna.

Kompor berbasis sistem gasifikasi tipe updraft, yang juga dikenal sebagai *counter-current gasifier*, memiliki keunggulan desain yang terletak pada arah aliran bahan bakar padat yang bergerak ke bawah, sementara aliran gas hasil gasifikasi bergerak ke atas. Konfigurasi ini memungkinkan proses pemanasan awal bahan bakar secara efisien melalui kontak dengan gas panas yang naik, sehingga meningkatkan efisiensi termal keseluruhan sistem. Sistem ini cenderung lebih efisien dan sederhana dalam konstruksi. Untuk meningkatkan proses pembakaran, digunakan sistem blower yang menyuplai oksigen secara terus-menerus ke ruang bakar, memungkinkan pembakaran primer dan sekunder sehingga api yang dihasilkan lebih bersih dan stabil (Belonio, 2005).



**Gambar 1.** Skema Updraft Gasifier (Hidayat, 2014)

Dalam proses gasifikasi, biomassa mengalami serangkaian tahapan reaksi termokimia yang diklasifikasikan berdasarkan kisaran suhu operasional, yaitu: tahap pengeringan (900 °C), dan reduksi (400–900 °C). Tahapan pengeringan, pirolisis, dan reduksi merupakan proses endotermik yang membutuhkan asupan panas dari luar, sedangkan tahap oksidasi parsial bersifat eksotermik dan berperan sebagai sumber energi termal internal. Panas yang dihasilkan pada fase eksotermik ini menjadi penopang utama berlangsungnya keseluruhan proses gasifikasi secara berkelanjutan (Hidayat, 2014).

Rasio antara udara dan bahan bakar dalam proses gasifikasi memainkan peran krusial dalam menentukan jalannya reaksi kimia serta kualitas gas sintesis yang dihasilkan. Kebutuhan pasokan udara dalam gasifikasi berada pada rentang menengah antara kondisi pirolisis dan pembakaran, sehingga diperlukan rasio udara-bahan bakar yang tepat guna mengoptimalkan produksi gas sintesis. Dalam konteks gasifikasi biomassa, nilai Air-Fuel Ratio (AFR) biasanya dijaga di bawah 1,5 untuk memastikan efisiensi konversi energi yang optimal (Najib & Darsopuspito, 2012).

Dalam penelitian ini, penulis mengembangkan desain kompor gasifikasi dengan memvariasikan jumlah lubang udara sekunder (25, 45, dan 65 lubang) untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap performa nyala api dan efisiensi kompor. Parameter yang diamati meliputi suhu nyala, durasi dan warna api, efisiensi pembakaran, serta output listrik yang dihasilkan oleh *Thermoelectric generator* (TEG) yang dipasang pada sisi luar tungku.

Thermoelectric generator (TEG), atau Seebeck generator, adalah perangkat yang menghasilkan listrik secara langsung dari perbedaan suhu antara sisi panas dan dingin, berdasarkan prinsip efek Seebeck (Widjaja, 2012). Energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk menggerakkan blower kompor atau perangkat listrik berdaya rendah seperti lampu dan pengisi daya baterai. Integrasi TEG dalam sistem kompor menciptakan solusi memasak mandiri yang hemat energi dan cocok untuk wilayah dengan keterbatasan akses listrik.

Berdasarkan permasalahan yang telah diidentifikasi sebelumnya, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Menganalisis pengaruh variasi jumlah lubang udara pada gasifier tipe updraft terhadap karakteristik nyala api, mencakup temperatur, durasi, dan warna api selama proses gasifikasi; (2) Mengevaluasi dampak variasi jumlah lubang udara terhadap performa *Water Boiling Test* (WBT) dalam proses gasifikasi; serta (3) Menilai pengaruh variasi jumlah lubang udara terhadap parameter kinerja thermoelectric generator, meliputi daya listrik, tegangan, dan arus listrik yang dihasilkan

## METODE

### 1. Jenis Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode eksperimental langsung dengan menggunakan reaktor gasifikasi tipe updraft. Biomassa berupa tempurung kelapa digunakan sebagai bahan bakar untuk mengkaji pengaruh variasi jumlah lubang udara pada dinding reaktor terhadap efisiensi kinerja kompor gasifikasi

biomassa serta pemanfaatan thermoelectric generator terhadap konversi energi panas yang dihasilkan selama proses gasifikasi.

## 2. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama 2 bulan pada Februari 2025 sampai dengan Maret 2025 di bengkel Sumalik Surabaya, yang berlokasi di Jl. Jambangan IX, No.46, Desa Jambangan, Kec. Jambangan, Surabaya, Jawa Timur 60232.

## 3. Variabel Penelitian

### a. Variabel bebas

Jumlah lubang udara sekunder yang digunakan pada tabung reaktor kompor gasifikasi divariasikan yaitu 25, 45, 65 lubang.

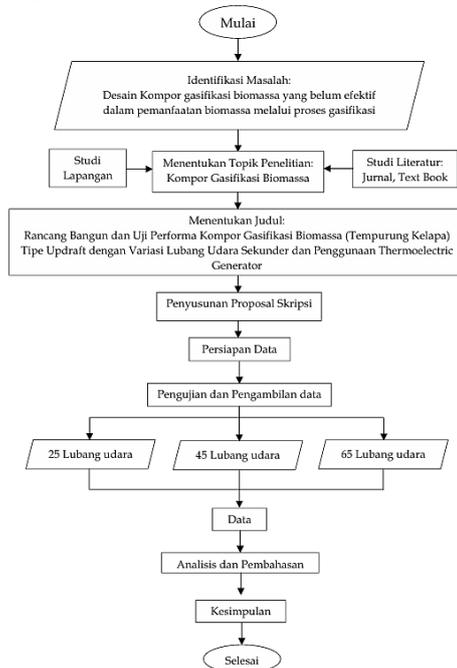
### b. Variabel Terikat

- 1) Temperatur api
- 2) Durasi waktu nyala api
- 3) Warna nyala api
- 4) Waktu nyala api efektif
- 5) Efisiensi *thermal* kompor
- 6) Daya yang dihasilkan kompor untuk *thermoelectric generator* adalah: besaran arus, besaran tegangan, dan besaran daya yang dihasilkan TEG pada panas buang kompor

### c. Variabel Kontrol

- 1) Biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar kompor gasifikasi adalah tempurung kelapa.
- 2) Massa air dalam pengujian kompor gasifikasi biomassa adalah 1,5 kg.
- 3) Berat kering bahan baku tempurung kelapa adalah 1,5 kg.
- 4) Proses gasifikasi menggunakan gasifier tipe *updraft*.
- 5) Mencatat data temperatur api setiap satu menit dari waktu operasional kompor.

## 4. Rancangan Penelitian

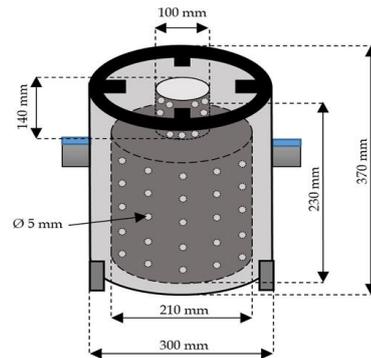


Gambar 2. Rancangan Penelitian

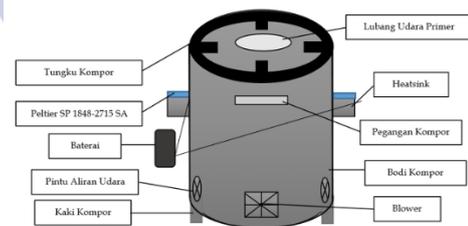
## 5. Alat dan Bahan

### a. Alat

- 1) Kompor gasifikasi biomassa tipe *updraft*



Gambar 3. Desain Kompor Gasifikasi Biomassa



Gambar 4. Desain reaktor

- 2) Mesin gerinda
- 3) Mesin bor
- 4) Soldering iron
- 5) *Thermoelectric generator*
- 6) Blower
- 7) Panci air
- 8) Korek api

### b. Bahan

- 1) Tempurung kelapa
- 2) Air

### c. Intrumen

- 1) *Thermogun*
- 2) Timbangan
- 3) *Stopwatch*
- 4) *Avometer*

## 6. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian dalam penelitian ini meliputi prosedur pembuatan kompor dan prosedur pengambilan data.

### a. Prosedur pembuatan kompor

- 1) Merancang desain kompor menggunakan aplikasi *Corel Draw* dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang berpengaruh seperti dimensi, ruang pembakaran, ruang udara primer dan sekunder, dan mekanisme pengumpanan bahan bakar.
- 2) Persiapan alat dan bahan seperti bahan kompor dari logam baja untuk bagian yang terkena panas, alat pemotong, dan pengukur.
- 3) Pemotongan dan pembentukan material.
- 4) Pemasangan saluran udara untuk 3 tabung reaktor dengan masing-masing 25, 45, dan 65 lubang udara.

- 5) Perakitan kompor dengan memasang reaktor ke badan kompor lalu tungku dengan tabung reaktor.
  - 6) Pengecekan kompor sebagai antisipasi kebocoran.
  - 7) Pemasangan sistem pengumpanan bahan bakar.
- b. Prosedur pengambilan data
- 1) Melakukan persiapan alat dan bahan yang meliputi biomassa (tempurung kelapa), thermogun, timbangan, kamera, dan stopwatch.
  - 2) Menimbang tempurung kelapa sebanyak 1,5 kg dan memasukkannya ke dalam reaktor gasifikasi.
  - 3) Membuka saluran udara pada kompor untuk menyediakan pasokan udara awal.
  - 4) Setelah api berhasil dinyalakan, proses pencatatan waktu dimulai.
  - 5) Mengaktifkan stopwatch serta mengamati dan mencatat durasi nyala api.
  - 6) Mengamati karakteristik visual api, khususnya warna nyala, dan mendokumentasikannya menggunakan kamera. Mengamati kinerja TEG untuk menghasilkan listrik dari energi panas buang proses gasifikasi.
  - 7) Pengukuran tegangan listrik yang dihasilkan oleh *thermoelectric generator* tipe peltier SP 1848 27145 SA dengan menggunakan Avometer.
  - 8) Menutup lubang primer agar menghambat oksigen masuk ke tabung reaktor dan memberhentikan proses gasifikasi.
  - 9) Menunggu sampai proses gasifikasi selesai (tempurung kelapa habis).
  - 10) Keluarkan semua arang sisa pembakaran. Timbang beratnya dan catat ke dalam tabel dan pengukuran data.

Untuk mengambil data *Water Boiling Test* prosedurnya sebagai berikut:

- 1) Mengulang langkah 1-6 di atas dengan menggunakan 1,5 liter air di panci.
- 2) Aktifkan stopwatch, amati proses perebusan, dan catat waktu yang dibutuhkan hingga air mencapai kondisi mendidih.
- 3) Dokumentasikan waktu dan suhu saat air pertama kali mencapai titik didih lokal.
- 4) Setelah air mendidih, segera hentikan suplai udara dan matikan blower.
- 5) Hapus sisa tempurung kelapa dari ruang pembakaran, lalu padamkan api sepenuhnya.
- 6) Diamkan air dalam panci selama lima menit untuk memungkinkan proses penguapan berlangsung.
- 7) Timbang panci beserta air yang tersisa, lalu masukkan data ke dalam tabel pengukuran.
- 8) Timbang sisa tempurung kelapa yang tidak terkonversi, dan catat hasilnya dalam tabel pengukuran dan data.
- 9) Memastikan seluruh data hasil pengukuran telah terdokumentasi secara lengkap,

mencakup waktu perebusan, suhu saat air mencapai titik didih, sisa tempurung kelapa yang tidak terbakar, berat akhir panci beserta air, serta residu berupa abu pembakaran, yang seluruhnya dicatat dalam tabel pengukuran dan data.

- 10) Lakukan semua proses pada masing masing reaktor dengan variasi jumlah lubang udara pada reaktor yang berbeda.

## 7. Teknik Analisis Data

Penelitian ini menggunakan metode analisis data kuantitatif deskriptif, di mana data diperoleh melalui instrumen pengukuran, selanjutnya diolah secara teoritis dan disajikan dalam bentuk tabel yang disertai penjelasan untuk mempermudah interpretasi hasil.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Temperatur Nyala Api

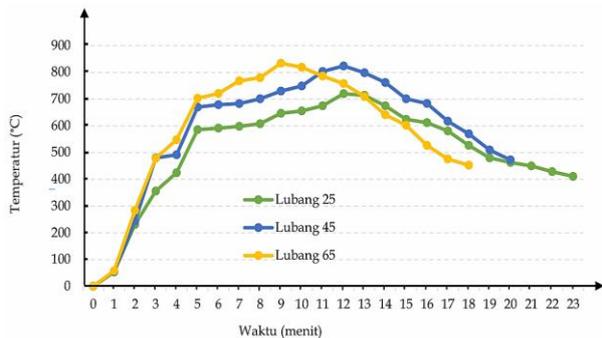
Berikut adalah data hasil temperatur nyala api:

**Tabel 1.** Data Temperatur Nyala Api

Waktu (min)	Jumlah Lubang Udara		
	25	45	65
0	54	55	58
1	231	243	284
2	356	480	479
3	425	492	548
4	512	542	622
5	586	670	703
6	591	679	721
7	598	683	768
8	608	701	780
9	647	730	834
10	656	749	819
11	675	803	786
12	720	824	758
13	714	798	709
14	675	762	641
15	624	701	602
16	612	684	527
17	581	617	476
18	527	570	453
19	480	510	
20	463	473	
21	450		
22	429		
23	411		

Untuk mengukur temperatur nyala api pada kompor biomassa, digunakan thermogun tipe Uni T dengan rentang  $-32^{\circ}\text{C}$  hingga  $1100^{\circ}\text{C}$  dan resolusi  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Pengukuran dilakukan dengan menembakkan alat ke arah gasifier dari jarak 50 cm pada sudut  $15^{\circ}$ , mencatat suhu setiap menit hingga api padam. Suhu mulai diamati sejak menit pertama, dan terus meningkat seiring terbentuknya *syngas*. Proses ini diawali dari masuknya bahan bakar, munculnya asap sebagai tanda pengeringan, lalu dilanjutkan dengan fase pirolisis dan gasifikasi yang

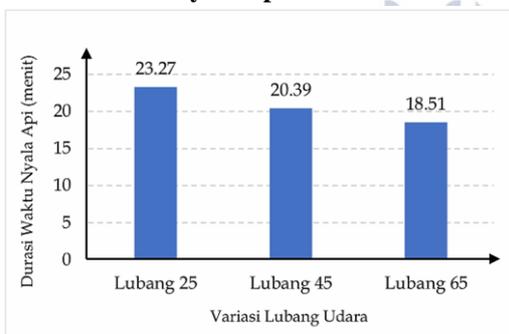
ditandai asap pekat. Tinggi rendahnya temperatur nyala api mencerminkan besar kecilnya kalor yang dihasilkan (Pramana & Susila, 2020).



Gambar 5. Grafik Temperatur Nyala Api

Berdasarkan hasil analisis pada Gambar 4, peningkatan jumlah lubang udara pada gasifier berbanding lurus dengan laju alir syngas yang dihasilkan. Peningkatan laju syngas turut memperbesar suplai oksigen di zona oksidasi, sehingga menghasilkan lebih banyak karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dan arang (char) sebagai produk reaksi (Vidian, 2008). Proses ini juga meningkatkan jumlah uap air (H<sub>2</sub>O) dan gas CO<sub>2</sub> yang teruapkan dari bahan bakar, mendorong terbentuknya gas karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H<sub>2</sub>) yang bereaksi lebih lanjut menghasilkan gas metana (CH<sub>4</sub>) sebagai bagian dari komponen syngas. Kandungan gas mudah terbakar yang tinggi dalam syngas berkontribusi terhadap peningkatan temperatur nyala api, yang secara langsung memengaruhi karakteristik visual nyala. Sebaliknya, apabila kandungan gas mudah terbakar rendah, temperatur dan intensitas visual nyala api juga akan menurun (Adrieq, 2016).

## 2. Durasi Waktu Nyala Api



Gambar 6. Durasi Waktu Nyala Api

Durasi nyala api diukur menggunakan stopwatch, dimulai sejak syngas berhasil dinyalakan hingga api padam akibat habisnya tempurung kelapa di dalam tabung gasifier. Jumlah lubang udara pada reaktor berpengaruh signifikan terhadap kecepatan penyalan syngas. Semakin besar suplai udara yang masuk ke dalam sistem, maka proses oksidasi berlangsung lebih cepat,

sehingga laju dekomposisi biomassa meningkat secara signifikan (Vidian, 2008)

Berdasarkan gambar, durasi nyala yang berhasil dicapai pada masing-masing variasi jumlah lubang udara 25, 45, dan 65. Nyala api terlama yaitu diperoleh pada variasi lubang udara 25 dengan durasi 23.27 menit. Sedangkan untuk durasi nyala api tersingkat yaitu diperoleh pada variasi lubang udara 65 dengan durasi 18.51 menit.

Berdasarkan data yang diperoleh, durasi nyala api cenderung menurun seiring dengan peningkatan jumlah lubang udara pada gasifier. Hal ini disebabkan oleh bertambahnya suplai udara yang masuk ke dalam zona pembakaran, sehingga mempercepat laju reaksi pembakaran antara udara dan biomassa. Akibatnya, proses konversi biomassa berlangsung lebih cepat dan bahan bakar di dalam reaktor gasifikasi lebih cepat habis

Dari aspek keluaran syngas, peningkatan kecepatan aliran udara ke dalam gasifier sebanding dengan meningkatnya laju keluaran syngas. Bertambahnya jumlah lubang udara memperbesar volume udara yang masuk, sehingga mempercepat produksi dan pelepasan syngas. Konsekuensinya, biomassa tempurung kelapa akan mengalami dekomposisi lebih cepat dan habis dalam waktu yang lebih singkat, yang pada akhirnya mengakibatkan durasi nyala api menjadi lebih singkat pula (Myzhar & Sutjahjo, 2019).

## 3. Warna Nyala Api

Karakteristik warna nyala api merupakan hasil dari interaksi antara kandungan zat volatil, pencampuran udara primer dan sekunder, serta keberadaan partikel jelaga. Warna nyala tersebut mencerminkan fenomena emisi gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang tertentu yang dipancarkan oleh senyawa-senyawa aktif dalam nyala api. Dalam proses gasifikasi, gas mampu bakar bereaksi dengan oksigen, menghasilkan energi panas. Selama proses ini, radikal OH memancarkan spektrum ultraviolet yang tampak sebagai cahaya kuning hingga merah, sedangkan senyawa CH dan C<sub>2</sub> memancarkan spektrum pada panjang gelombang hijau dan biru.

Tabel 2. Data Warna Nyala Api

No.	Variasi Lubang Udara	Warna	Visualisasi	Temperatur
1.	25	Jingga		1000°C-1200°C
2.	45	Jingga		1000°C-1200°C

3.	65	Jingga		1000°C- 1200°C
----	----	--------	---	-------------------

Visualisasi nyala api menunjukkan kemunculan warna kebiruan pada beberapa kondisi pembakaran. Temperatur tertinggi yang tercatat menggunakan thermogun adalah 834 °C, yang diperoleh pada variasi lubang udara sebanyak 65. Pada variasi lubang udara 25 dan 45, nyala api didominasi oleh warna jingga, yang mengindikasikan temperatur pembakaran yang relatif tinggi. Variasi lubang udara 65 menghasilkan nyala api dengan karakteristik warna terbaik, yakni jingga solid disertai semburat kebiru-biruan. Dominasi warna jingga tersebut dikaitkan dengan tingginya konsentrasi radikal OH dibandingkan dengan CH dan C<sub>2</sub>, sehingga spektrum warna nyala cenderung ke arah kemerahan. Hasil pengamatan visual terhadap warna nyala api pada masing-masing variasi dapat dilihat pada Tabel 2.

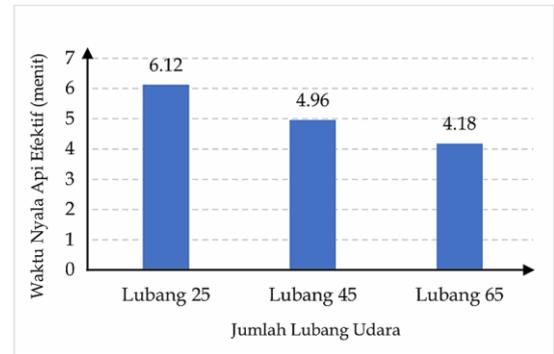
Berdasarkan kajian literatur mengenai karakteristik warna nyala api, warna jingga menunjukkan bahwa suhu reaktor berada dalam kisaran 1000 °C hingga 1200 °C. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi temperatur proses gasifikasi, maka proporsi warna biru dalam nyala api cenderung meningkat. Menurut Maulidian, dkk (2023), intensitas warna biru pada nyala api berkorelasi dengan kandungan metana (CH<sub>4</sub>) dalam fraksi gas syngas yang bersifat mudah terbakar, seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H<sub>2</sub>), dan metana (CH<sub>4</sub>).

Secara umum, hasil pembakaran dalam penelitian ini masih menunjukkan karakteristik campuran, yang menandakan belum tercapainya pembakaran sempurna. Hal ini terlihat dari visualisasi nyala api yang belum sepenuhnya berwarna biru. Dominasi warna jingga pada nyala api disebabkan oleh radiasi partikel jelaga (soot radiation), yang terjadi dalam kondisi non-stoikiometri, yakni saat rasio pencampuran antara bahan bakar dan udara tidak seimbang. Keberadaan jelaga ini membatasi peluang terjadinya pencampuran sempurna antara bahan bakar dan oksidan. Oleh karena itu, warna nyala jingga mencerminkan proses pembakaran yang masih didominasi oleh mekanisme pembakaran difusi dan bersifat kurang efisien.

#### 4. Water boiling test

##### a. Waktu nyala api efektif

Pengujian durasi efektif nyala api pada kompor gasifikasi biomassa dilakukan dengan cara mengukur waktu yang diperlukan untuk merebus 1,5 kg air menggunakan bahan bakar tempurung kelapa sebanyak 1,5 kg. Durasi nyala api dihitung berdasarkan selisih waktu antara saat kompor dinyalakan hingga air mencapai titik didih atau bahan bakar habis terbakar.



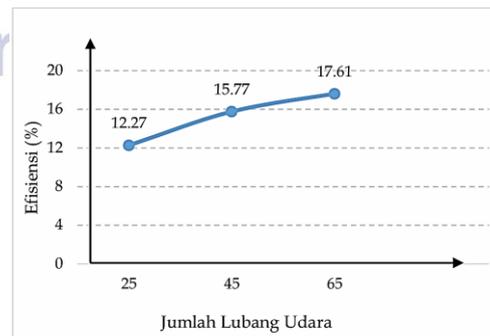
**Gambar 7.** Perbandingan Waktu Nyala Api Efektif

Gambar 7 menunjukkan perbandingan nyala api efektif kompor pada variasi jumlah lubang udara 25, 45, dan 65. Menjelaskan bahwa pada variasi lubang udara 25 nyala efektif yang dihasilkan selama proses adalah 6,12 menit, pada variasi lubang udara 45 selama 4,96 menit, dan pada variasi lubang udara 65 selama 4,18 menit.

Data yang ditunjukkan pada gambar mengindikasikan adanya variasi signifikan antar variabel terhadap durasi pemanasan air. Temuan ini memperkuat bahwa perbedaan jumlah lubang udara pada kompor gasifikasi biomassa berdampak langsung terhadap durasi nyala api efektif dalam proses pendidihan 1,5 kg air. Semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan air, maka semakin tinggi pula tingkat efisiensi kompor. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan laju aliran udara memperpendek waktu nyala api efektif yang dihasilkan.

##### b. Efisiensi Thermal

Metode yang digunakan untuk menguji efisiensi termal kompor gasifikasi biomassa dilakukan dengan menghitung rasio antara energi yang digunakan untuk mendidihkan dan menguapkan air terhadap total energi panas yang terkandung dalam bahan bakar. Hasil perhitungan efisiensi termal dari penelitian ini disajikan pada Gambar 8 berikut.



**Gambar 8.** Grafik nilai efisiensi *thermal*

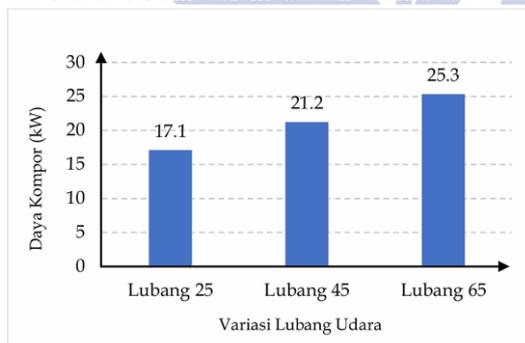
Berdasarkan gambar 8 didapatkan efisiensi *thermal* pada pengujian kompor dengan variasi lubang udara 25 adalah 12,27%, variasi lubang udara 45 adalah 15,77%, dan pada variasi lubang

udara 65 adalah 17,61%. Pada lubang udara 65 menghasilkan efisiensi *thermal* tertinggi, hal ini disebabkan pada variasi lubang udara 65 menghasilkan temperatur nyala api yang tinggi sehingga akan lebih cepat memanaskan dan kehilangan kalor (*heat loss*) ke lingkungan dapat terminimalisir.

Gambar tersebut menunjukkan bahwa efisiensi termal kompor meningkat seiring bertambahnya jumlah lubang udara pada tabung gasifier. Peningkatan jumlah lubang udara meningkatkan aliran udara ke dalam proses pembakaran, yang berdampak positif terhadap efisiensi gasifikasi. Namun, efisiensi yang dicapai dalam penelitian ini belum optimal karena masih terdapat kebocoran pada alat gasifikasi yang menghambat transfer panas secara maksimal. Efisiensi termal yang lebih tinggi mencerminkan kinerja sistem yang lebih efektif dalam mentransfer energi panas ke media pemanas (panci). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa peningkatan jumlah lubang udara berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi termal kompor biomassa.

#### c. Daya kompor

Pengujian daya keluaran kompor gasifikasi biomassa dilakukan dengan menghitung rasio antara total energi panas yang dihasilkan oleh kompor terhadap durasi nyala api efektif. Nilai ini merepresentasikan besarnya daya termal yang dihasilkan sistem dalam satuan waktu tertentu.



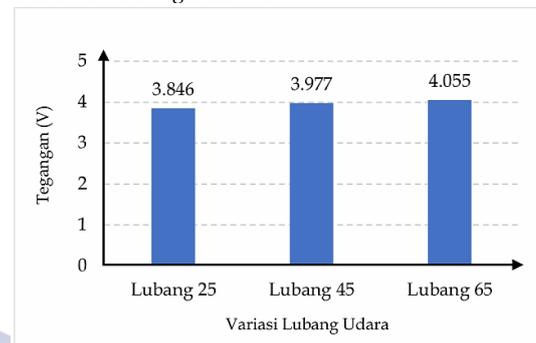
**Gambar 9.** Perbandingan Data Daya Kompor

Berdasarkan gambar 9, diperoleh nilai daya pada pengujian kompor dengan variasi jumlah lubang udara 25 adalah 17,1 kW, lubang udara 45 adalah 21,2 kW, dan variasi lubang udara 65 adalah 25,3 kW.

Data pada gambar 9 menunjukkan adanya tren peningkatan nilai daya pada setiap variasi jumlah lubang udara yang diterapkan pada gasifier. Hal ini menunjukkan bahwa semakin banyak lubang udara yang tersedia untuk suplai udara, maka semakin besar pula daya termal yang dihasilkan oleh kompor. Dengan demikian, konfigurasi jumlah lubang udara secara langsung memengaruhi performa daya keluaran dari sistem gasifikasi biomassa

#### d. Tegangan Termoelektrik Generator

Pada penelitian ini, hasil panas buang pada bagian kompor dimanfaatkan sebagai penghasil listrik dengan mekanisme memperbesar perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) pada masing-masing sisi *thermoelectric generator*.



**Gambar 10.** Data Hasil Tegangan Listrik TEG

Dalam pengujian *thermoelectric generator* pada kompor gasifikasi biomassa, terdapat hubungan antara jumlah lubang udara dan tegangan listrik yang dihasilkan. Semakin banyak lubang udara yang tersedia, semakin besar kemungkinan terjadi peningkatan tegangan listrik, meskipun peningkatannya tidak terlalu signifikan. Namun, meski perbedaannya kecil, tegangan yang dihasilkan sudah cukup untuk memutar kipas yang berfungsi sebagai pemasok udara sekunder dalam proses gasifikasi, membantu meningkatkan efisiensi pembakaran dan memastikan proses berlangsung dengan optimal.

Berdasarkan hasil pengujian, pada variasi lubang udara 25, tegangan listrik yang dihasilkan adalah 3.846 V. Kemudian, saat jumlah lubang udara ditingkatkan menjadi 45, tegangan yang dihasilkan naik menjadi 3.977 V, menunjukkan adanya peningkatan meskipun relatif kecil. Selanjutnya, pada variasi lubang udara 65, tegangan listrik mencapai 4.055 V, yang merupakan nilai tertinggi dalam pengujian ini. Peningkatan ini menunjukkan bahwa jumlah lubang udara berpengaruh terhadap kinerja termoelektrik generator, terutama dalam proses konversi panas menjadi energi listrik.

Selain tegangan listrik, perbedaan suhu ( $\Delta T$ ) antara sisi panas dan sisi dingin juga memainkan peran penting dalam hasil yang diperoleh. Pada variasi lubang udara 25, perbedaan suhu tercatat berada dalam rentang 40-50°C, menunjukkan tingkat pemanasan yang moderat. Saat lubang udara ditingkatkan menjadi 45, perbedaan suhu meningkat menjadi 45-60°C, yang memungkinkan konversi energi yang lebih optimal. Pada variasi lubang udara 65, perbedaan suhu mencapai 60°C, menciptakan kondisi yang lebih ideal bagi termoelektrik generator untuk menghasilkan tegangan listrik yang lebih tinggi. Meskipun peningkatan tegangan tidak terlalu drastis, tren yang terlihat mengindikasikan bahwa

jumlah lubang udara dapat memengaruhi efisiensi konversi energi termoelektrik.

### Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data, disimpulkan bahwa jumlah lubang udara sekunder pada gasifier tipe updraft berpengaruh signifikan terhadap performa kompor gasifikasi biomassa dan kinerja termoelektrik. Variasi 65 lubang menghasilkan temperatur nyala tertinggi (834°C), warna api lebih biru, tegangan termoelektrik tertinggi (4,055 V), efisiensi termal paling tinggi (17,61%), daya kompor maksimum (25,3 kW), serta waktu paling singkat untuk mendidihkan 1,5 kg air (4,18 menit). Sebaliknya, jumlah lubang 25 menghasilkan temperatur dan efisiensi terendah, namun durasi nyala api terlama. Secara keseluruhan, semakin banyak jumlah lubang udara, semakin optimal proses pembakaran dan konversi energi yang dihasilkan.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar penelitian selanjutnya difokuskan pada penyempurnaan kinerja gasifier menggunakan bahan bakar tempurung kelapa. Selain itu, pengembangan desain kompor gasifikasi, terutama pada sistem aliran udara, perlu ditingkatkan untuk memperoleh proses pembakaran yang lebih efisien dan stabil. Kajian lebih lanjut juga diperlukan terhadap komposisi kandungan *syngas* yang dihasilkan, serta pemanfaatan energi panas buang melalui integrasi termoelektrik generator. Di samping itu, penelitian mendatang diharapkan mempertimbangkan penggunaan jenis bahan bakar alternatif lain yang mudah diperoleh di sekitar lingkungan pengguna agar teknologi lebih adaptif dan aplikatif.

### DAFTAR PUSTAKA

- Adrieq, A.S.B. (2016). Studi eksperimental pengaruh air fuel ratio proses gasifikasi briket municipa solid waste terhadap unjuk kerja gasifier tipe downdraft. *Jurnal Teknik ITS*, 1(1).
- Armansyah, D.H. (2019). Pemanfaatan panas pada dinding kompor gasifikasi biomassa untuk pembangkit listrik DC menggunakan *thermoelectric generator*. *Journal of Renewable Energy & Mechanics*, 3(2), 44-52.
- Belonio, Alexi.T. (2005). *Rice husk gas stove handbook*. Philippines: College of Agriculture Central Philippine University Iloilo City.
- Hanani, F. (2010). Identifikasi karakteristik sumber daya biomassa dan potensi biopellet di Indonesia. Universitas Indonesia Laporan Penelitian.
- Herlambang, S., Rina, S., Purwono, A.Z., & Sutiono, H.T. (2017). Biomassa sebagai sumber energi masa depan. *Gerbang Media Aksara*.
- Hidayat, A. (2014). Karakterisasi proses gasifikasi biomassa pada reaktor downdraft sistem batch dengan variasi air fuel ratio (AFR) dan ukuran biomassa. (Penelitian Tugas Akhir, Laboratorium Minyak Bumi, Gas, dan Batubara, Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta).
- Maulidian, C.D., Chrisnandari, R.D., & Setiawan, E.S. (2023). Analisis pembakaran gas metana pada unit flaring wastewater treatment plant (wwtp). *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 7(4), 362-371.
- Myzhar, R. & Sutjahjo, H. (2019). Uji kualitas *syngas* gasifikasi biomassa cangkang sawit terhadap afr dan kadar air pada gasifier tipe updraft. *Jurnal Teknik Mesin*, 7(2), 43-48.
- Najib, L., & Darsopuspito, S (2012). Karakterisasi proses gasifikasi biomassa tempurung kelapa sistem downdraft kontinu dengan variasi perbandingan udara-bahan bakar (AFR) dan ukuran biomassa. Institut Teknologi Sepuluh Noverber.
- Parinduri, L., & Parinduri, T. (2020). Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), 88-92.
- Pramana, A.P. & Susila, W. (2020). Pengaruh variasi laju aliran udara pada updraft gasifier sistem semi kontinu terhadap kualitas nyala api syn gas pada gasifikasi biomassa limbah cangkang kemiri. *Jurnal Teknik Mesin*, 8(2), 41-48.
- Vidian, F. (2008). Gasifikasi tempurung kelapa menggunakan updraft gasifier pada beberapa variasi laju alir udara pembakaran. *Jurnal Teknik Mesin*, 10(02), 88-93.
- Widjaja, S.P. (2012) Pengukuran dan analisis karakteristik thermoelectric generator dalam pemanfaatan energi panas yang terbuang. Program Studi Teknik Elektro FTEK-UKSW.
- Zobaa, A. F. and Bansal, R. C. (2011). *Handbook of renewable energy technology*. World Scientific Publishing.