

Terbit online pada laman web jurnal :<http://jurnaldampak.ft.unand.ac.id/>

Dampak: Jurnal Teknik Lingkungan Universitas Andalas

| ISSN (Print) 1829-6084 |ISSN (Online) 2597-5129|



Artikel Penelitian

Uji Kinerja Tungku Biomassa Berbahan Bakar Pelet Cangkang Kemiri

Tegar Anggriawan, Fadjar Goembira, Yega Serlina.

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, Padang, Indonesia

*Koresponden: yega@eng.unand.ac.id

Diterima: 15 Oktober 2025

Diperbaiki: 19 November 2025

Disetujui: 20 Januari 2026

ABSTRACT

Candlenut shells are a type of biomass with significant potential as an alternative fuel. In this study, candlenut shells were processed into biopellets and utilized as fuel for a Top-Lit Updraft (TLUD) biomass stove. Two variations of candlenut shell biopellets were evaluated, biopellets with the addition of 10% tapioca starch as a binder (KT_{10}) and biopellets without a binder (K_0). This research aimed to evaluate the performance of a household-scale TLUD biomass cookstove by measuring $PM_{2.5}$, CO, and CO_2 emissions. Cookstove performance tests were conducted in accordance with SNI 7926:2013 on Biomass Stove Performance, with each test repeated three times. The results showed that $PM_{2.5}$ emissions were 130.59 ± 7.13 mg/kg for KT_{10} and 625.27 ± 16.17 mg/kg for K_0 . CO emissions were 4.05 ± 0.08 g/kg for KT_{10} and 3.01 ± 0.27 g/kg for K_0 , while CO_2 emissions were 69.42 ± 1.72 g/kg for KT_{10} and 67.24 ± 1.74 g/kg for K_0 . The $PM_{2.5}$, CO, and CO_2 emission values met the limits specified in SNI 7926:2013. K_0 exhibited better performance than KT_{10} in terms of pellet quality, CO emissions, and CO_2 emissions, whereas KT_{10} showed superior performance in $PM_{2.5}$ emissions and fuel consumption rate. The TLUD biomass cookstove met the specific fuel consumption requirements but did not satisfy the combustion efficiency and thermal efficiency criteria.

Keyword: candlenut shells, CO, CO_2 , $PM_{2.5}$, TLUD biomass stove

ABSTRAK

Cangkang kemiri merupakan salah satu jenis biomassa yang berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif. Cangkang ini diolah menjadi biopellet untuk digunakan sebagai bahan bakar kompor biomassa *Top Lit Up Draft* (TLUD). Dua variasi biopellet tempurung kemiri yaitu biopellet yang digunakan dengan penambahan tepung tapioka 10% sebagai bahan pengikat (KT_{10}), dan biopellet tanpa bahan pengikat (K_0). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja kompor biomassa TLUD pada skala rumah tangga dengan menghitung nilai emisi $PM_{2.5}$, CO, dan CO_2 . Uji kinerja kompor mengikuti prosedur yang tercantum dalam SNI 7926:2013 tentang Kinerja Tungku Biomassa dan setiap pengujian dilakukan dengan tiga kali pengulangan. Hasil pengujian menunjukkan nilai emisi $PM_{2.5}$ dari KT_{10} sebesar $130,59 \pm 7,13$ mg/kg, dan dari K_0 sebesar $625,27 \pm 16,17$ mg/kg. Nilai emisi CO sebesar $4,05 \pm 0,08$ g/kg untuk KT_{10} dan $3,01 \pm 0,27$ g/kg untuk K_0 . Nilai emisi CO_2 sebesar $69,42 \pm 1,72$ g/kg untuk KT_{10} dan $67,24 \pm 1,74$ g/kg untuk K_0 . Nilai emisi $PM_{2.5}$, CO, dan CO_2 ini memenuhi batasan yang ditetapkan SNI 7926:2013. K_0 lebih baik dari KT_{10} dalam kualitas pelet, CO, dan CO_2 , sedangkan KT_{10} lebih baik dari K_0 dalam $PM_{2.5}$ dan tingkat konsumsi bahan bakar. Kompor biomassa TLUD memenuhi persyaratan konsumsi bahan bakar spesifik, namun tidak memenuhi persyaratan efisiensi pembakaran dan efisiensi termal.

Kata Kunci: cangkang kemiri, CO, CO_2 , $PM_{2.5}$, tungku biomassa TLUD

1. PENDAHULUAN

Pemakaian bahan bakar fosil terus meningkat seiring dengan pertumbuhan kebutuhan energi, sementara ketersediaannya semakin menurun, harga semakin tidak stabil, dan dampaknya terhadap lingkungan semakin nyata. Di Indonesia, cadangan bahan bakar fosil telah mengalami penurunan yang signifikan. Cadangan gas alam tercatat sebesar 185,8 Trillion Standard Cubic Feet (TSCF) dengan produksi tahunan 2,95 TSCF diperkirakan hanya dapat bertahan selama 62 tahun, sedangkan cadangan minyak sebesar 9,1 miliar barel dengan tingkat produksi 387 juta barel per tahun diperkirakan habis dalam waktu sekitar 23 tahun (Efendi, 2022). Selain keterbatasan cadangan, penggunaan bahan bakar fosil juga berkontribusi terhadap peningkatan emisi gas rumah kaca yang pada dasarnya merupakan proses alami untuk menjaga kestabilan suhu Bumi, namun dalam konsentrasi yang berlebihan telah mempercepat pemanasan global. Kondisi ini menimbulkan berbagai dampak serius, antara lain mencairnya es di wilayah kutub, kenaikan permukaan air laut, terganggunya keseimbangan ekosistem, meningkatnya keasaman laut, serta penipisan lapisan ozon (Rezaprata, 2023).

Pertumbuhan jumlah penduduk mendorong peningkatan kebutuhan energi sehingga menuntut ketersediaan sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah biomassa, khususnya limbah cangkang kemiri yang hingga kini belum dimanfaatkan secara optimal, padahal berpeluang menjadi bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan. Provinsi Sumatra Barat termasuk lima provinsi penghasil kemiri terbesar di Indonesia dengan produksi mencapai 1.898,63 ton dan luas lahan sebesar 2.152,59 hektar. Data Badan Pusat Statistik Provinsi Sumatra Barat (2024) menunjukkan bahwa Kota Sawahlunto menempati urutan kedua sebagai penghasil kemiri terbesar di provinsi Sumatra Barat dengan produksi sebesar 460,48 ton dan luas lahan 236,49 hektar.

Cangkang kemiri memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku biopellet. Biopellet cangkang kemiri ini dibuat dalam dua variasi, yaitu biopellet dengan penambahan perekat tepung tapioka sebesar 10 % dan biopellet tanpa penambahan perekat. Selanjutnya, biopellet tersebut digunakan sebagai bahan bakar pada tungku biomassa tipe TLUD. Pada tungku ini, gas-gas hasil pembakaran seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄) dihasilkan melalui prinsip pembakaran dua tahap atau pirolisis, yang didukung oleh aliran udara alami maupun udara paksa, sehingga mampu menghasilkan energi panas dengan nyala api yang bersih dan minim asap (Putra dkk., 2024).

Penelitian terkait telah dilakukan oleh (Aristi, 2020) dan (R. W. Putra, 2019), untuk menguji tingkat pencemar Particulate Matter (PM_{2,5}), CO, dan karbon dioksida (CO₂) akibat penggunaan tungku biomassa dengan jenis bahan bakar dan tungku yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan biopellet lebih efisien dibandingkan biomassa yang belum diolah karena menghasilkan konsentrasi pencemar yang lebih rendah. Konsentrasi PM_{2,5} dari biopellet berada pada kisaran 24,75–33,12 µg/Nm³, konsentrasi CO sebesar 5,13–6,09 ppm, dan konsentrasi CO₂ sebesar 436,74–472,81 ppm, sedangkan pada biomassa yang belum diolah konsentrasi PM_{2,5} berkisar antara 69,60–158,57 µg/Nm³, CO sebesar 36,42–38,15 ppm, dan CO₂ sebesar 556,88–593,64 ppm. Meskipun kajian terkait biopellet telah banyak dilakukan, pengujian kinerja tungku biomassa TLUD dengan bahan bakar biopellet cangkang kemiri masih terbatas, sehingga diperlukan penelitian lanjutan. Biopellet cangkang kemiri diharapkan dapat dimanfaatkan sebagai salah satu bahan bakar alternatif yang efisien dan ramah lingkungan pada tungku biomassa TLUD.

Meskipun penelitian mengenai tungku biomassa TLUD dan penggunaan biopellet telah banyak dilakukan, kajian yang secara khusus mengevaluasi kinerja dan karakteristik emisi tungku biomassa TLUD dengan bahan bakar pellet cangkang kemiri masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini tidak berfokus pada pengembangan teknologi tungku yang sepenuhnya baru, melainkan memberikan kontribusi spesifik melalui analisis kinerja dan emisi pembakaran pellet cangkang kemiri sesuai standar SNI 7926:2013. Pendekatan ini memiliki nilai praktis yang tinggi karena memanfaatkan limbah biomassa lokal sebagai bahan bakar alternatif yang berpotensi diterapkan pada skala rumah tangga.

2. METODOLOGI

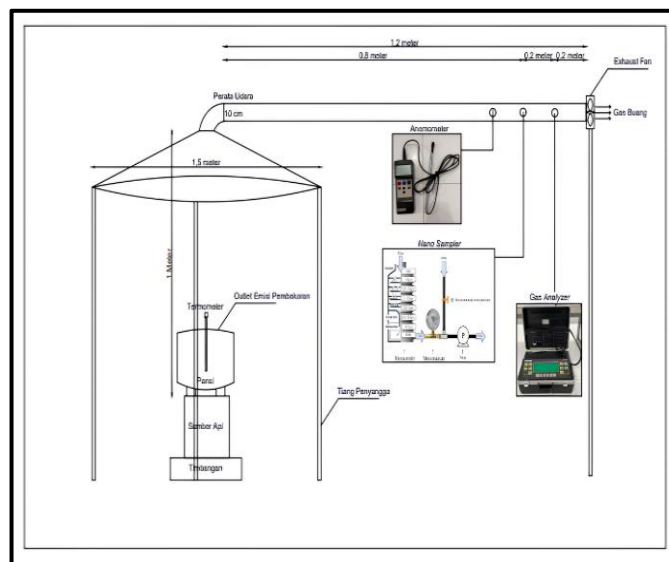
Adapun tungku yang digunakan adalah tungku biomassa TLUD seperti pada Gambar 1. Bahan bakar yang dibutuhkan adalah biopellet cangkang kemiri tanpa bahan perekat (K0) dan biopellet cangkang kemiri dengan penambahan perekat tepung tapioka sebanyak 10 % (KT10).



Gambar 1 Tungku Biomassa TLUD

Pengoperasian tungku biomassa tipe TLUD dilakukan dengan menggunakan biopellet cangkang kemiri sebagai bahan bakar. Biopellet dimasukkan ke dalam ruang bakar tungku, kemudian proses pembakaran diawali dengan penyalan pada bagian atas bahan bakar menggunakan sumber api awal. Selama proses pembakaran, tungku dioperasikan hingga nyala api mencapai kondisi stabil dan siap digunakan. Setelah proses pembakaran selesai, arang hasil pembakaran dipanen dan tungku dibersihkan untuk memastikan kondisi peralatan tetap optimal pada pengujian selanjutnya.

Pengujian emisi pembakaran biopellet cangkang kemiri menggunakan tungku biomassa tipe TLUD dilakukan di ruang tertutup Departemen Teknik Lingkungan Universitas Andalas, sedangkan pengujian nilai kalor dan kadar sulfur dilaksanakan di Laboratorium Dasar dan Sentral Universitas Andalas. Parameter yang diamati meliputi konsentrasi partikel PM_{2,5} serta gas CO dan CO₂. Data primer yang dikumpulkan berasal dari pengujian kualitas biopellet cangkang kemiri dengan dua variasi, yaitu biopellet dengan penambahan perekat tepung tapioka sebesar 10 % dan biopellet tanpa perekat. Data tersebut mencakup karakteristik kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon terikat, densitas, nilai kalor, dan kadar sulfur. Selain itu, dilakukan pengukuran konsentrasi PM_{2,5}, CO, dan CO₂, laju konsumsi bahan bakar, serta kinerja tungku biomassa TLUD secara simultan dengan tiga kali pengulangan untuk setiap perlakuan. Skema susunan alat sesuai SNI 7926:2013 dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2 Sketsa Susunan Alat Penelitian

Sumber: SNI 7926:2013

Gambar 3 menunjukkan bahwa ada beberapa titik sampling yaitu titik sampling PM_{2,5} serta titik sampling CO dan CO₂. Pengukuran PM_{2,5} menggunakan alat Nano Sampler sedangkan pengukuran CO dan CO₂ menggunakan alat Gas Analyzer. Titik sampling ini mengacu pada SNI 7117-21:2021 tentang Emisi Gas Buang - Sumber Tidak Bergerak. Pengambilan sampel, lokasi yang dipilih harus berada pada jarak 8 kali diameter cerobong asap dari aliran bawah (hulu) atau 2 kali diameter cerobong asap dari aliran atas. Syarat utamanya adalah aliran cerobong asap tidak boleh terganggu oleh lekukan, penyempitan, atau pelebaran.



Gambar 3 Susunan Alat Penelitian Uji Kinerja Tungku Biomassa TLUD

Pengukuran PM_{2,5} bertujuan untuk pengambilan data primer, pengambilan dilakukan selama waktu pengukuran efisiensi penggunaan bahan bakar menggunakan tungku biomassa. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan sebagai validasi data. Alat yang digunakan pada pengukuran PM_{2,5} adalah Nano Sampler. Nano Sampler mengukur partikel PM_{2,5} yang tersuspensi di udara bebas menggunakan filter fiber glass dengan metode analisis gravimetri. Laju aliran pada Nano Sampler untuk sampling PM_{2,5} sebesar 40 L/menit. Partikel yang diukur yaitu dari bahan bakar biopellet cangkang kemiri pada tungku biomassa TLUD.

Pengukuran CO dan CO₂ dilakukan menggunakan 2 variasi biopellet cangkang kemiri pada tungku biomassa TLUD. Pengukuran CO dan CO₂ menggunakan alat Gas Analyzer dengan merk Bacharach. Alat ini digunakan untuk pemantauan kualitas udara. Gas Analyzer memiliki sensor yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengukur kadar gas tertentu sesuai dengan jenis sensornya.

Pengukuran PM_{2,5}, CO, dan CO₂ ini dilakukan selama proses pembakaran biopellet cangkang kemiri menggunakan tungku biomassa tipe TLUD selama 1 jam pada ruangan tertutup dengan massa bahan bakar awal sebanyak 1 kg. Pengujian dilaksanakan di salah satu ruangan kosong di Departemen Teknik Lingkungan dengan kondisi ventilasi udara yang minimal guna meminimalisir pengaruh faktor eksternal terhadap hasil pengukuran. Rumus yang digunakan dapat dilihat di bawah ini:

Rumus yang digunakan dalam analisis emisi PM_{2,5} adalah sebagai berikut (Chantara dkk., 2019):

$$\text{EFS} = \frac{\text{masstotal}}{\text{massfuel}} \quad (1)$$

$$\text{EFS} = \frac{\text{mass, sampling}}{\text{massbiomass}} \times \frac{\text{Vair, total}}{\text{Vair, sampling}} \quad (2)$$

$$\text{EFS} = \frac{\text{mass, sampling}}{\text{massbiomass}} \times \frac{\sum_{t=0}^{t=t} [\pi r^2 \text{Vair, } t^t \delta]}{\text{fsampling tsampling}} \quad (3)$$

Keterangan:

EFS	=	faktor emisi
masstotal	=	total massa PM atau logam yang dihasilkan dari simulasi pembakaran terbuka
masssampling	=	massa sampling PM (g)
massfuel	=	massa bahan bakar kering yang dikonsumsi (kg)
massbiomass	=	massa biomassa kering pada setiap percobaan pembakaran (kg)
Vair;total	=	volume udara total (m ³) yang dihitung dari perkalian kecepatan udara yang melewati cerobong dan waktu pembakaran
Vair;sampling	=	volume udara sampel (m ³) yang didapatkan dari perkalian kecepatan udara pada Particulate Matter Collector (PMC) dengan waktu sampling
R	=	jari-jari cerobong (m)
Vair;t	=	kecepatan udara yang mengalir melalui cerobong selama waktu sampling (m/s)
t ^δ	=	interval waktu pengumpulan data (s)
fsampling	=	laju aliran udara PMC (m ³ /menit)
tsampling	=	waktu sampling PMC (menit)

Menghitung konsumsi spesifik bahan bakar dapat menggunakan rumus:

$$SC = \frac{F_{cd}}{P_{cf} - P} \quad (4)$$

Keterangan:

SC = konsumsi spesifik bahan bakar (g)
 cd = konsumsi rata-rata bahan bakar kering (g)
 P_{cf} = massa panci berisi air setelah pengujian (g)
 P = massa panci kosong (g)

Menghitung efisiensi pembakaran dapat menggunakan rumus:

$$\eta_c = 1 - \frac{N_{CO}}{N_{CO_2}} \quad (5)$$

Keterangan:

N = fraksi massa dari masing-masing gas

Menghitung efisiensi termal dapat dihitung menggunakan rumus:

$$\eta_T = \frac{M_a C_p \Delta T + \Delta m_a L}{\Delta m_k LHV} \quad (6)$$

Keterangan:

M_a = massa air (kg)
 C_p = kalor jenis air/4.180 KJ/(oC kg)
 ΔT = selisih suhu akhir air terhadap suhu awal (oC)
 Δm_a = massa air yang menguap (massa awal air - massa akhir air) (kg)
 L = kalor penguapan air (KJ/kg)
 Δm_k = massa bahan bakar yang telah dibakar (kg)
 LHV = nilai kalor bahan bakar (KJ/kg)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Biopellet Cangkang kemiri dan dibandingkan dengan biomassa jenis lain, dapat dilihat pada Tabel 1. Ini dibandingkan dengan biomassa jenis lain dengan perbandingan perekat yang sama

Tabel 1 Nilai Karakteristik Biopellet Cangkang kemiri

No.	Parameter	Jenis Biopellet			
		Kayu Jati	Kayu Jati + Tapioka 10 %	K0	KT10
1.	Kadar Air (%)	6,97	6,51	8,31	9,82
2.	Kadar Zat Terbang (%)	76,01	77,37	61,89	62,72
3.	Kadar Abu (%)	1,67	1,37	4,55	3,44
4.	Kadar Karbon Terikat (%)	15,35	14,74	25,16	24
5.	Densitas (g/cm ³)	1,14	1,28	1,08	1,61
6.	Nilai Kalor (kkal/kg)	4.247	4.319	4.507	4.459
7.	Kadar Sulfur (%)	0,03	0,02	0,07	0

K0 = Biopellet cangkang kemiri tanpa bahan perekat

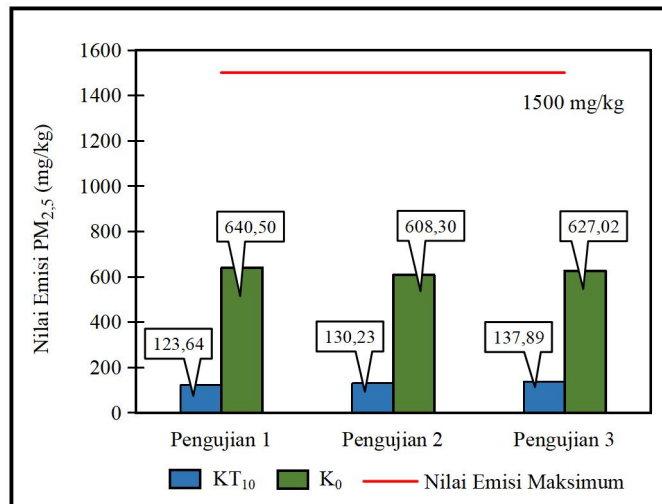
KT10 = Biopellet cangkang kemiri dengan penambahan perekat tapioka 10 %

Berdasarkan Tabel 1, dilihat bahwa dari semua parameter uji kualitas biopellet yang diperuntukkan untuk rumah tangga memenuhi untuk seluruh parameternya yang telah dipersyaratkan oleh SNI 8675:2018 tentang Pelet Biomassa untuk Energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa K0 lebih baik dari KT10 pada parameter kadar air, kadar zat terbang, kadar karbon terikat, dan nilai kalor. Akan tetapi, K0 maupun KT10 tetap bisa dijadikan sebagai bahan bakar pada tungku biomassa TLUD, karena dari hasil uji kualitas biopellet, semua parameter uji memenuhi untuk K0 dan juga KT10. Penambahan bahan perekat berpengaruh terhadap hasil uji pada parameter kadar abu, densitas, dan juga kadar sulfur pada biopellet cangkang kemiri yang dibuktikan semakin baiknya hasil uji kualitas biopellet pada ketiga parameter tersebut.

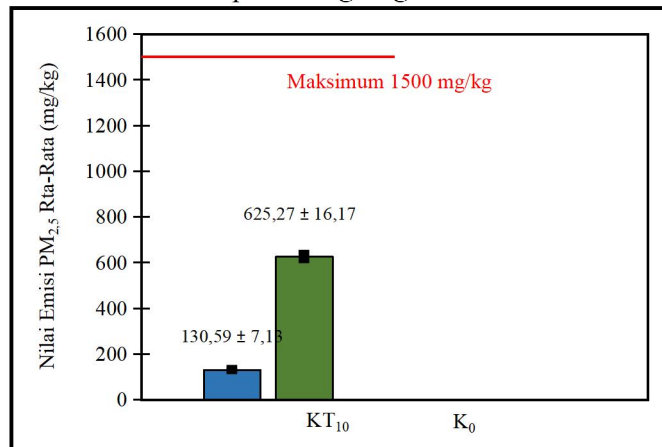
Dari hasil percobaan didapatkan nilai emisi dan kinerja tungku biomassa TLUD berbahan bakar pelet cangkang kemiri sebagai berikut:

Nilai Emisi PM_{2,5}

Pengukuran PM_{2,5} dilakukan sesuai dengan prosedur pengujian pada SNI 7926:2013. Setiap prosedur pengujian, dilakukan pengulangan pengukuran PM_{2,5} sebanyak 3 kali. Nilai emisi PM_{2,5} dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4 Nilai Emisi PM_{2,5} pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri



Gambar 5 Nilai Emisi PM_{2,5} Rata-Rata pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri

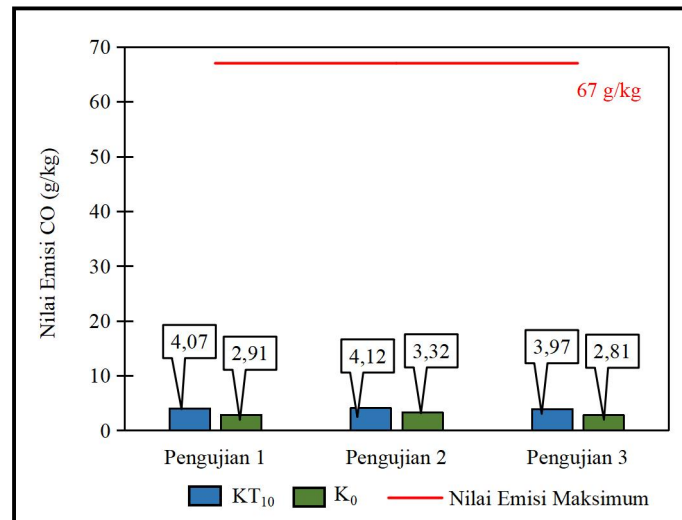
Berdasarkan hasil pengukuran, nilai emisi rata-rata PM_{2,5} dari pembakaran biopellet cangkang kemiri menunjukkan perbedaan signifikan antara KT₁₀ dan K₀. KT₁₀ menghasilkan nilai emisi jauh lebih rendah dibandingkan K₀ yaitu sebesar $130,59 \pm 7,13$ mg/kg, sedangkan pada K₀ yaitu sebesar $625,27 \pm 16,17$ mg/kg. Perbedaan tersebut disebabkan oleh kualitas masing-masing jenis biopellet cangkang kemiri. Kandungan zat terbang dalam bahan bakar berpengaruh terhadap laju dan durasi pembakaran serta jumlah asap yang dihasilkan selama proses pembakaran. Semakin tinggi kandungan zat terbang, semakin menurun kualitas biopellet yang dihasilkan (Prabawa & Miyono, 2017). Asap yang dihasilkan oleh pembakaran, yang terdiri dari partikel-partikel padat dan cair yang sangat kecil, berkontribusi secara signifikan terhadap peningkatan emisi PM_{2,5}.

Akan tetapi, kadar zat terbang tidak hanya menjadi penentu tingginya PM_{2,5} yang dihasilkan pada pembakaran. Tingginya nilai emisi PM_{2,5} pada K₀ juga disebabkan karena tingginya nilai kadar abu pada K₀ tersebut. Menurut Sari (2009), kandungan abu biomassa yang tinggi pada K₀ disebabkan oleh kandungan mineral yang tinggi pada bahan-bahan seperti N, P, K, Ca, Mg, dan S. Hal ini juga dibuktikan bahwa nilai kadar sulfur pada K₀ juga lebih tinggi dibandingkan KT₁₀. Selain itu, tingginya emisi PM_{2,5} pada K₀ disebabkan oleh proses pembakaran yang tidak berlangsung secara optimal. Pada kondisi ini, senyawa organik dan anorganik tidak terurai secara sempurna sehingga membentuk partikel mikroskopis yang terlepas ke udara bersama asap. Asap hasil pembakaran biomassa berpotensi menimbulkan gangguan kesehatan, termasuk infeksi paru-paru, karena mengandung partikel halus berupa PM_{2,5} (Nirmala & Prasasti, 2015).

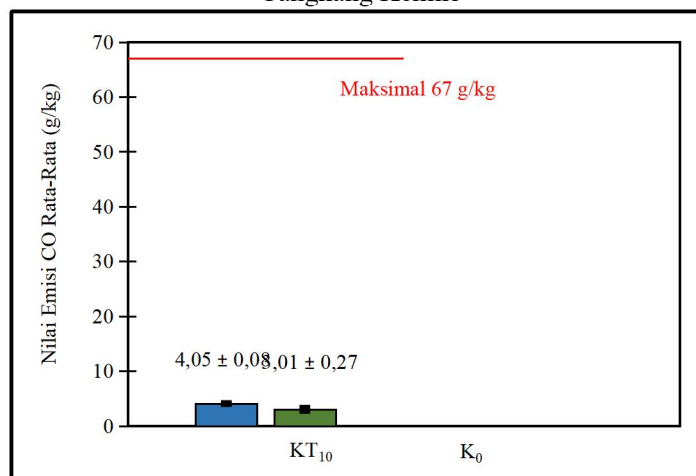
Seluruh nilai emisi PM_{2,5} dalam penelitian ini masih berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan dalam SNI 7926:2013. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa biopelet cangkang kemiri memiliki mutu yang baik karena menghasilkan asap yang relatif rendah selama proses pembakaran. Rendahnya pembentukan asap menyebabkan jumlah partikel halus yang terdeteksi oleh alat pemantau, seperti Nano Sampler, menjadi lebih sedikit. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa biopelet cangkang kemiri berpotensi digunakan sebagai salah satu bahan bakar alternatif pada tungku biomassa tipe TLUD.

Nilai Emisi CO

Pengukuran nilai emisi CO dilakukan berdasarkan prosedur pengujian yang tercantum dalam SNI 7926:2013. Dilakukan 3 kali pengulangan pengukuran untuk memastikan keakuratan dan validitas data. Langkah ini bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pengukuran serta menjamin konsistensi hasil yang diperoleh. Nilai emisi CO yang dihasilkan pada pembakaran menggunakan tungku biomassa TLUD dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6 Nilai Emisi CO pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopelet Cangkang Kemiri



Gambar 7 Nilai Emisi CO Rata-Rata pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopelet Cangkang Kemiri

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa nilai emisi CO rata-rata yang dihasilkan dari pembakaran KT₁₀ adalah 4,05 ± 0,08 g/kg, sedangkan pada K₀ sebesar 3,01 ± 0,27 g/kg. Artinya disetiap 1 kg biopelet cangkang kemiri, menghasilkan 3,01 - 4,05 g CO. Meskipun nilai emisi CO KT₁₀ lebih besar dari K₀, kedua nilai tersebut tetap berada di bawah batas maksimal yang ditetapkan dalam SNI 7926:2013.

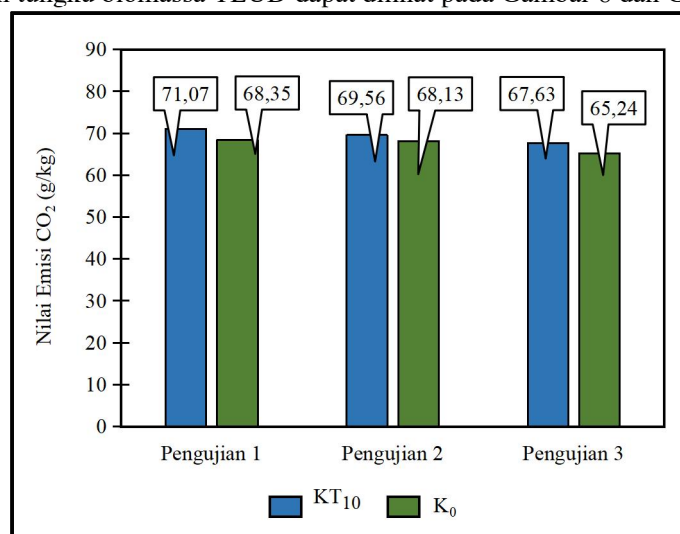
Rendahnya emisi CO menunjukkan bahwa proses pembakaran biopelet cangkang kemiri berlangsung dengan baik dan didukung oleh mutu biopelet yang memenuhi seluruh parameter uji kualitas berdasarkan analisis proksimat. Kondisi ini juga ditandai oleh sedikitnya asap yang dihasilkan selama pembakaran, yang mengindikasikan bahwa reaksi oksidasi karbon terjadi secara lebih sempurna sehingga pembentukan gas berbahaya dapat ditekan. CO terbentuk akibat pembakaran yang tidak sempurna, terutama ketika pasokan O₂ tidak mencukupi kebutuhan

reaksi. Kadar O₂ yang rendah pada gas buang menandakan bahwa udara pembakaran dimanfaatkan secara optimal, sedangkan kadar O₂ yang tinggi menunjukkan adanya udara berlebih yang tidak terpakai dan berpotensi menyebabkan pembentukan CO, yang seharusnya teroksidasi menjadi CO₂ (Prastya dkk., 2013).

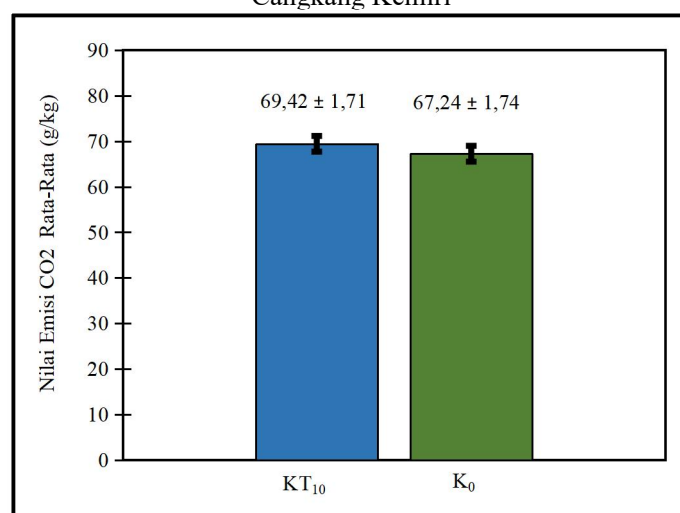
CO terbentuk ketika bahan bakar mengalami pembakaran yang tidak sempurna akibat keterbatasan O₂. Salah satu faktor yang memengaruhi kondisi tersebut adalah kerapatan bahan bakar, karena kerapatan menentukan kelancaran aliran O₂ ke dalam material yang dibakar. Kerapatan yang terlalu tinggi menghambat masuknya O₂ akibat sempitnya ruang antarpatahan, sehingga proses pembakaran tidak berlangsung optimal dan menghasilkan emisi CO yang lebih tinggi. Sebaliknya, kerapatan yang terlalu rendah menyebabkan bahan bakar mudah rapuh dan kehilangan kestabilan selama pembakaran karena partikel tidak terikat dengan baik. Kedua kondisi tersebut, baik terlalu padat maupun terlalu renggang, dapat menurunkan efisiensi pembakaran dan meningkatkan emisi gas yang dihasilkan dari pembakaran tidak sempurna (Setyawan & Ulfa, 2019).

Nilai Emisi CO₂

Pengukuran emisi CO₂ dilakukan sesuai dengan prosedur pengujian pada SNI 7926:2013. Nilai emisi CO₂ pada pembakaran menggunakan tungku biomassa TLUD dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8 Nilai Emisi CO₂ pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri



Gambar 9 Nilai Emisi CO₂ Rata-Rata pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri

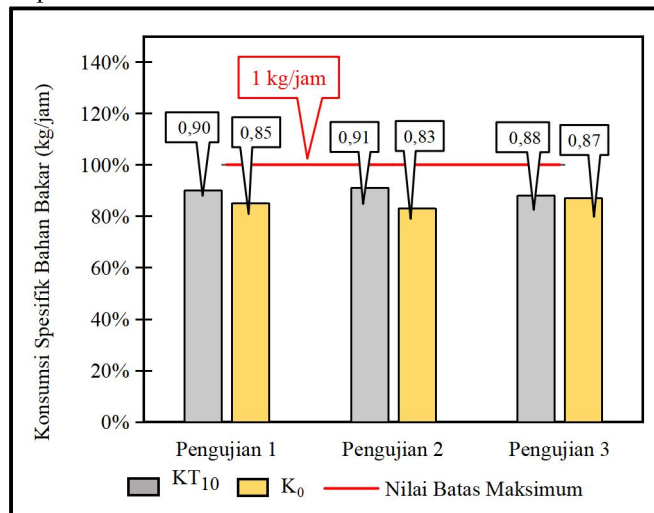
Berdasarkan pengukuran nilai emisi CO₂ dari pemakaian bahan bakar biopellet cangkang kemiri, nilai rata-rata CO₂ dari KT₁₀ yaitu sebesar 69,42 ± 1,72 g/kg, sedangkan nilai emisi rata-rata CO₂ dari K₀ yaitu sebesar 67,24 ± 1,74 g/kg. Dari pengujian yang dilakukan terlihat bahwa nilai emisi CO₂ pada K₀ lebih kecil dari nilai emisi CO₂ pada KT₁₀. Hal ini disebabkan oleh pembakaran yang tidak sempurna, yang menghasilkan CO dalam gas buang, yang seharusnya berupa CO₂. (Prastya dkk., 2013). Hal ini sejalan dengan nilai CO pada KT₁₀ juga lebih tinggi dibandingkan K₀ artinya masih ada pembakaran yang kurang sempurna pada proses pembakaran yang

seharusnya nilai CO pada K₀ juga lebih tinggi dibandingkan KT₁₀. Menurut (Tenaya & Hardiana, 2011), pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna terjadi karena tidak cukup oksigen masuk ke dalam ruang pembakaran, sehingga menghasilkan output energi yang kurang efektif.

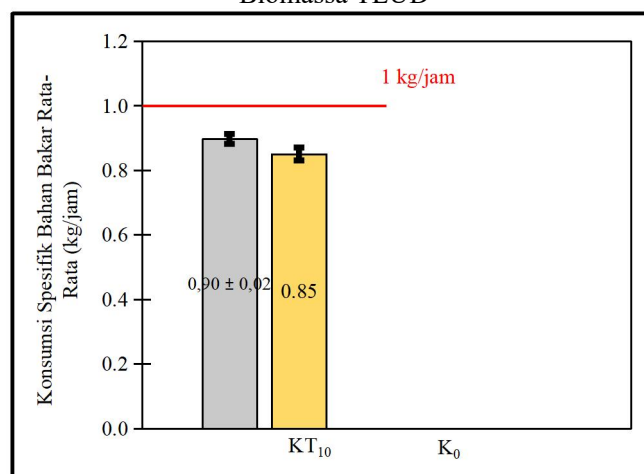
Berdasarkan hasil pengujian, pembakaran 1 kg bahan bakar biopellet cangkang kemiri menghasilkan emisi CO₂ sebesar 67,24–69,42 g. Nilai emisi CO₂ tersebut tergolong relatif rendah, serta tidak melanggar ketentuan karena standar SNI 7926:2013 tidak menetapkan batas maksimum maupun minimum untuk parameter CO₂. Konsentrasi CO₂ yang tinggi menandakan bahwa proses pembakaran berlangsung secara efisien, karena pada kondisi tersebut kadar CO dan O₂ dalam gas buang cenderung rendah, mengingat hasil utama pembakaran yang efisien adalah CO₂ dan uap air. Hubungan antara konsentrasi O₂ dan CO₂ bersifat berbanding terbalik, yaitu peningkatan O₂ akan menurunkan konsentrasi CO₂, sedangkan penurunan O₂ akan meningkatkan konsentrasi CO₂. Dengan demikian, semakin tinggi kandungan O₂ dalam gas buang, semakin menunjukkan bahwa proses pembakaran berlangsung kurang sempurna (Prastya et al., 2013).

Konsumsi Spesifik Bahan Bakar

Konsumsi spesifik bahan bakar merupakan indikator penting dalam menilai efisiensi energi dari bahan bakar padat. Dalam penelitian ini, analisis terhadap konsumsi spesifik bahan bakar bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja biopellet cangkang kemiri sebagai bahan bakar. Konsumsi spesifik bahan bakar biopellet cangkang kemiri dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10 Konsumsi Spesifik Bahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD

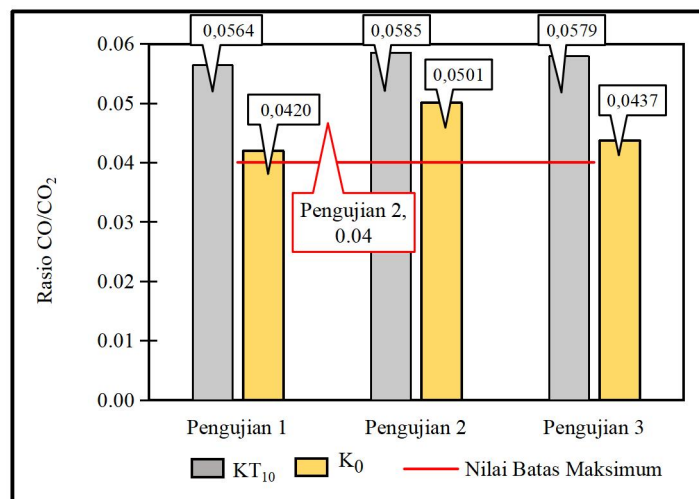


Gambar 11 Konsumsi Spesifik Bahan Bakar Rata-Rata Biopellet Cangkang Kemiri pada Pengujian Tungku Biomassa TLUD

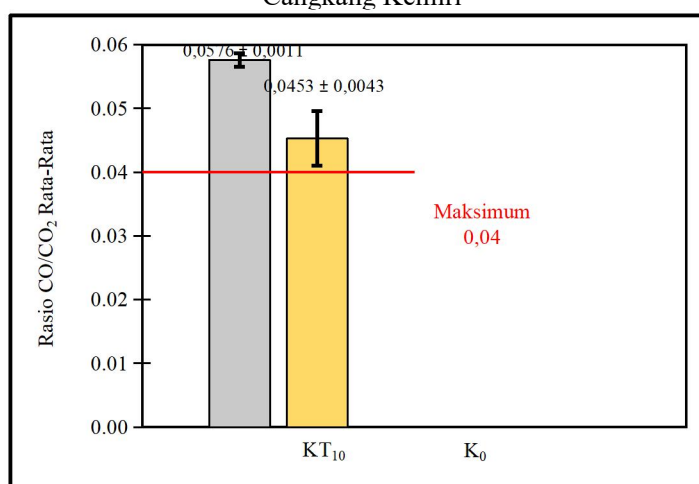
Nilai konsumsi bahan bakar rata-rata dari biopellet cangkang kemiri yang dihasilkan dari pembakaran menggunakan tungku biomassa TLUD yaitu, pada KT10 sebesar $0,90 \pm 0,02$ kg/jam, sedangkan pada K0 sebesar $0,85 \pm 0,02$ kg/jam. Dari pengujian ini dapat diartikan bahwa untuk 1 jam pengujian dibutuhkan 0,85 - 0,90 biopellet cangkang kemiri. K0 memiliki nilai konsumsi spesifik bahan bakar yang lebih baik dibandingkan KT10, hal ini karena nilai kalor berpengaruh pada laju pembakaran. Semakin tinggi nilai kalor bahan bakar, semakin lambat laju pembakaran. Semakin lama api menyala, semakin efisien (Budianto, Nurhuda, & Nadhir, 2015). Rendahnya nilai kalor pada penambahan tepung tapioka terkait dengan hasil analisis kadar air biopelletnya yang sedikit lebih tinggi dari perlakuan lainnya, dan kadar air ini akan menghambat peningkatan nilai kalor (Wibowo, Gunawan, & Pari, 2022). Dari penjelasan diatas dapat disimpulkan efisiensi dari pembakaran pada biopellet cangkang kemiri cukup baik, dan ditandai juga dengan konsumsi spesifik bahan bakar rata-rata dari KT10 dan K0 memenuhi nilai batas maksimum pada SNI 7926:2013.

Rasio CO/CO₂

Untuk mengetahui apakah tungku biomassa TLUD atau bahan bakar biopellet cangkang kemiri memenuhi standar nilai emisi yang berlaku, rasio antara CO dan CO₂ adalah indikator utama. Nilai rasio CO/CO₂ menunjukkan perbandingan kadar CO terhadap CO₂ yang dihasilkan selama proses pembakaran, misalnya ketika biopellet cangkang kemiri digunakan. Berdasarkan SNI 7926:2013, efisiensi pembakaran biomassa dapat memiliki rasio CO/CO₂ paling tinggi 0,04. Rasio CO/CO₂ dari pengujian ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12 Rasio CO/CO₂ dari Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri

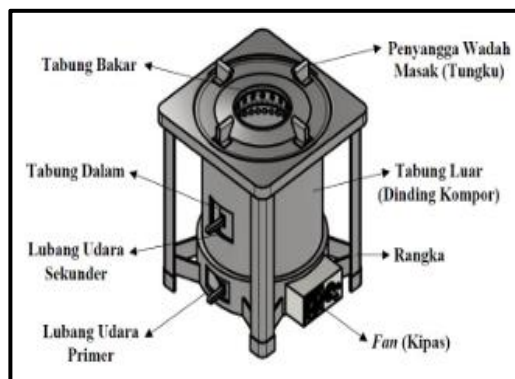


Gambar 13 Rasio CO/CO₂ Rata-Rata dari Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri

Dari pengujian yang telah dilakukan, rasio CO/CO₂ yang dihasilkan dari K0 lebih baik dibandingkan KT10 yaitu ditandai dengan nilai rasio CO/CO₂ dari K0 yaitu sebesar $0,0576 \pm 0,0011$, sedangkan pada KT10 yaitu sebesar $0,0453 \pm 0,0043$. Nilai rasio CO/CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar biopellet cangkang kemiri ini masih melewati nilai batas maksimum sesuai dengan pernyataan SNI 7926:2013. Hal ini terjadi karena masih ada

kondisi pembakaran yang tidak sempurna dari bahan bakar pada tungku biomassa yang ditandai dengan tingginya nilai CO dan rendahnya nilai CO₂ pada pembakaran menggunakan tungku biomassa TLUD berbahan bakar biopelet cangkang kemiri atau dengan kata lain, pembakaran menjadi sempurna ketika karbon dalam bahan bakar lebih banyak terkonversi menjadi CO₂ daripada CO.

Penggunaan kipas dengan kecepatan aliran udara yang dapat diatur pada rentang 2–10 m/s terbukti memengaruhi rasio CO/CO₂ pada emisi gas buang. Peningkatan kecepatan aliran udara suplai pada kompor cenderung menurunkan rasio CO/CO₂ karena proses pembakaran menjadi lebih optimal. Namun, kecepatan aliran udara yang terlalu tinggi perlu dihindari karena suplai udara berlebih dapat menyebabkan pendinginan zona pembakaran serta memperpendek waktu tinggal gas pirolisis, sehingga kadar emisi CO kembali meningkat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa emisi CO terendah, masing-masing sebesar 22 ppm dan 23 ppm, diperoleh pada kecepatan aliran udara 4 m/s dan 5 m/s. Sebaliknya, emisi CO tertinggi sebesar 101 ppm terjadi pada kecepatan aliran udara 3 m/s, yang disebabkan oleh minimnya turbulensi udara sehingga gas pirolisis tidak tercampur secara merata (Putra dkk., 2024). Kecepatan aliran udara ini juga berpengaruh nantinya ke efisiensi termal tungku biomassa. Bentuk desain fan dapat dilihat pada Gambar 14.

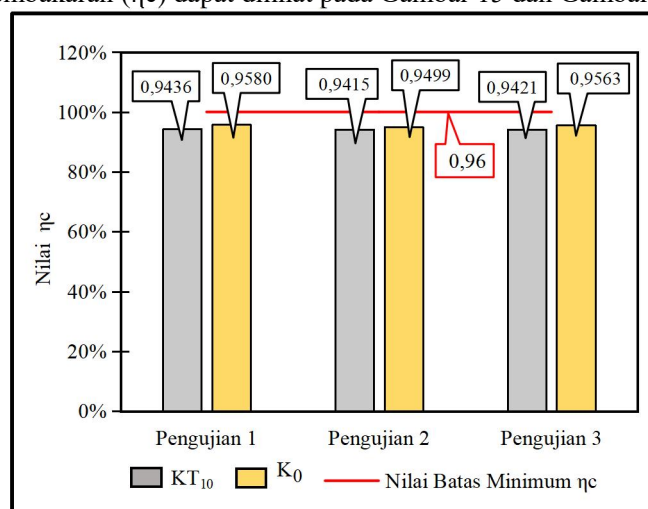


Gambar 14 Bentuk Penambahan Fan pada Tungku Biomassa

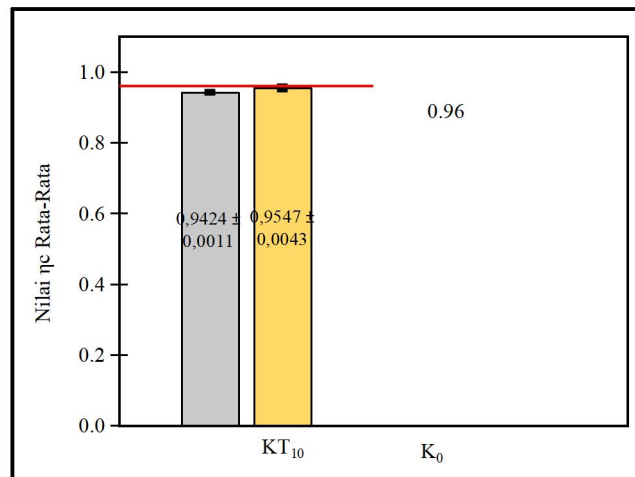
Sumber: Putra dkk., 2024

Nilai η_c (Efisiensi Pembakaran)

Nilai η_c menggambarkan tingkat kesempurnaan proses pembakaran yang ditunjukkan oleh dominannya pembentukan CO₂ sebagai hasil utama reaksi pembakaran. Pada sistem tungku biomassa tipe TLUD, parameter ini menjadi indikator penting dalam menilai mutu proses pembakaran serta efektivitas pemanfaatan bahan bakar. Semakin tinggi nilai η_c , semakin besar porsi energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar berhasil diubah menjadi energi panas, sehingga menandakan kinerja sistem pembakaran yang efisien dan lebih ramah lingkungan. Hasil pengujian efisiensi pembakaran (η_c) dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 15 Nilai Efisiensi Pembakaran (η_c) pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopelet Cangkang Kemiri

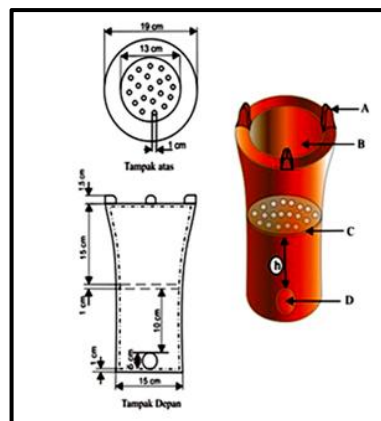


Gambar 16 Nilai Efisiensi Pembakaran (η_c) Rata-Rata pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri

Nilai efisiensi pembakaran rata-rata bahan bakar biopellet cangkang kemiri yang dihasilkan dari pembakaran menggunakan tungku biomassa TLUD berbahan bakar KT10 berada pada angka $0,9424 \pm 0,0011$, sedangkan pada K0 berada pada angka $0,9547 \pm 0,0043$. Dari pengujian tersebut dapat dilihat bahwa, efisiensi pembakaran pada **K0 lebih kecil dibandingkan KT10**.

Berdasarkan uraian tersebut, efisiensi pembakaran biopellet cangkang kemiri belum memenuhi nilai batas minimum yang ditetapkan dalam SNI 7926:2013. Kondisi ini dipengaruhi oleh ketinggian lubang udara pada tungku biomassa tipe TLUD yang berperan dalam menentukan tinggi rendahnya efisiensi pembakaran. Peningkatan jarak lubang udara cenderung menyebabkan kehilangan daya yang lebih besar karena perbedaan ketinggian lubang udara memengaruhi laju aliran udara. Perubahan laju aliran udara tersebut pada akhirnya mengganggu efisiensi perpindahan panas, baik melalui mekanisme konveksi maupun radiasi. Selain itu, penyebaran nyala api akibat posisi lubang udara yang kurang optimal menyebabkan panas tidak terfokus pada alat memasak, sehingga sebagian energi terbuang ke lingkungan (Mulyanto, Mirmanto, & Athar, 2016).

Penjelasan di atas telah dilakukan pengujian oleh (Mulyanto dkk, 2016), penggunaan tungku dengan ketinggian lubang udara 10 cm dan bahan bakar berukuran 2–4 cm menghasilkan efisiensi sebesar 15,62%. Sementara itu, pada ketinggian lubang udara 40 cm dengan ukuran bahan bakar 5–10 cm, nilai efisiensinya menurun menjadi 12,95%. Data ini menunjukkan bahwa efisiensi tungku dipengaruhi oleh konsumsi bahan bakar selama pembakaran. Semakin tinggi jarak lubang udara dan semakin besar ukuran bahan bakar, maka konsumsi bahan bakar cenderung meningkat, yang berdampak pada menurunnya efisiensi pembakaran serta meningkatnya kehilangan panas dan emisi gas CO. Hal ini diperkuat oleh hasil pengujian ini bahwa pada tungku dengan lubang udara setinggi 22 cm yang belum menunjukkan efisiensi pembakaran yang optimal. Selain itu, efisiensi juga dipengaruhi oleh nilai kalor dari bahan bakar yang digunakan. Maksud dari variasi ketinggian jarak lubang udara dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17 Ketinggian Jarak Lubang Udara pada Tungku Biomassa
Sumber: Mulyanto dkk., 2016

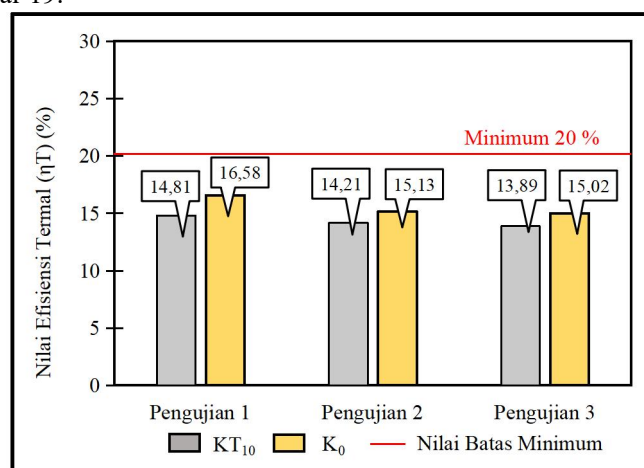
Keterangan:

h = ketinggian jarak lubang udara

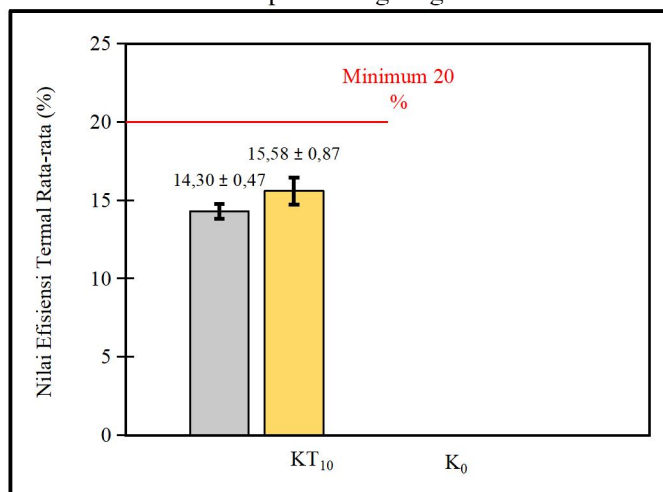
Kadar air yang tinggi pada biopellet dapat menurunkan nilai kalor pembakaran dan meningkatkan pembentukan asap, sehingga efisiensi pembakaran berkurang dan proses penyalaan menjadi lebih sulit karena sebagian energi awal digunakan untuk menguapkan air. Selain itu, kadar abu yang tinggi dalam bahan bakar berpotensi meningkatkan pembentukan endapan atau kerak selama pembakaran. Kondisi tersebut dapat mengotori permukaan tungku, memicu terjadinya korosi, menurunkan konduktivitas termal, dan pada akhirnya mengurangi kualitas proses pembakaran secara keseluruhan (Wahyullah, Putra, & Ismail, 2018).

Efisiensi Termal

Efisiensi termal merupakan ukuran sejauh mana energi panas dari bahan bakar dimanfaatkan secara efektif dalam proses pemanasan. Melalui parameter ini, dapat diketahui proporsi energi yang benar-benar digunakan untuk memanaskan air dibandingkan dengan energi yang hilang ke lingkungan dalam bentuk panas yang tidak dimanfaatkan. Evaluasi efisiensi termal penting dalam menilai kinerja sistem termal, terutama untuk meningkatkan efisiensi energi dan meminimalkan kehilangan panas. Hasil Pengujian efisiensi termal dapat dilihat pada Gambar 18 dan Gambar 19.



Gambar 18 Nilai Efisiensi Termal (η_T) pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri



Gambar 19 Nilai Efisiensi Termal (η_T) Rata-Rata pada Pembakaran Menggunakan Tungku Biomassa TLUD Berbahan Bakar Biopellet Cangkang Kemiri

Nilai efisiensi termal bahan bakar biopellet cangkang kemiri yang dihasilkan dari pembakaran menggunakan tungku biomassa TLUD berbahan bakar KT10 berada pada angka $14,30 \pm 0,47$ %, sedangkan pada K0 berada pada angka $15,58 \pm 0,87$ %. Dari pengujian ini, efisiensi termal dari K0 lebih baik daripada KT10. Akan tetapi, kedua variasi biopellet ini masih belum memenuhi nilai batas minimum sesuai dengan pernyataan SNI 7926:2013 yaitu sebesar 20%.

Kecepatan aliran udara berperan penting dalam menentukan efisiensi termal. Semakin tinggi kecepatan aliran udara, semakin besar pula perpindahan energi panas selama proses pengoperasian tungku biomassa, sehingga efisiensi termal meningkat. Selain itu, laju nilai kalor bahan bakar juga memengaruhi efisiensi tersebut. Nilai kalor yang tinggi memungkinkan pelepasan energi yang lebih besar, yang secara langsung berkontribusi terhadap

peningkatan efisiensi termal. (Selilana, Suwandi, & Ayodha, 2017). Nilai kalor pada K0 lebih tinggi dibandingkan KT10, dan dari nilai efisiensi termal yang dihasilkan, nilai efisiensi termal pada K0 juga lebih tinggi dibandingkan KT10, maka dapat disimpulkan jika nilai kalor yang tinggi meningkatkan efisiensi termal.

Upaya untuk meningkatkan efisiensi termal pada tungku ini yaitu dengan menambah jumlah lubang udara pada tungku biomassa TLUD ini. Menurut (Ramdhani & Effendy, 2025), efisiensi termal kompor meningkat seiring bertambahnya jumlah lubang udara pada tungku biomassa. Peningkatan jumlah lubang udara meningkatkan aliran udara dalam proses pembakaran. Efisiensi termal yang lebih tinggi mencerminkan kinerja sistem yang lebih efektif dalam mentransfer energi panas ke media pemanas (panci).

Hasil penelitian (Ramdhani & Effendy, 2025) menunjukkan bahwa, didapatkan efisiensi termal pada pengujian tungku dengan variasi lubang udara 25 adalah 12,27 %, variasi lubang udara 45 adalah 15,77 %, dan pada variasi lubang udara 65 adalah 17,61 %. Variasi lubang udara 65 menghasilkan efisiensi termal tertinggi. Hal ini disebabkan oleh tingginya temperatur nyala api yang dihasilkan pada variasi tersebut, sehingga kehilangan kalor ke lingkungan dapat diminimalkan. Hal ini sejalan dengan penelitian ini bahwa dengan jumlah lubang udara sebanyak 57 menghasilkan efisiensi termal sebesar 14,30 - 15,58 %. Artinya dengan peningkatan jumlah lubang udara, akan meningkatkan juga efisiensi termal pada tungku biomassa tersebut. Gambar variasi lubang udara yang dimaksud dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20 Lubang udara pada tungku biomassa

Sumber: Mirmanto dkk, 2017

Penelitian Anggara dkk. (2019) juga menjelaskan bahwa, Efisiensi termal dipengaruhi oleh kecepatan aliran udara dan jumlah lubang udara pada sistem pembakaran. Dari tiga variasi jumlah lubang udara, yaitu 20, 30, dan 40, nilai efisiensi termal tertinggi sebesar 13,55% diperoleh pada jumlah lubang udara 40 dengan kecepatan aliran udara 3,5 m/s. Sebaliknya, efisiensi termal terendah sebesar 10,25% terjadi pada konfigurasi yang sama, yaitu jumlah lubang udara 40, namun dengan kecepatan aliran udara hanya 0,5 m/s. Dapat disimpulkan bahwa kecepatan aliran udara juga memengaruhi efisiensi termal pada tungku biomassa.

Dari hasil pengujian uji kinerja tungku biomassa, berikut hasil rekapitulasi uji kinerja tungku biomassa TLUD dan dibandingkan dengan penelitian lain dengan biomassa berbeda, seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Perbandingan Hasil Uji dengan Penelitian Suhartono dkk. (2018)

No.	Parameter	Penelitian Suhartono, dkk (2018)			Penelitian ini (Biopellet Cangkang Kemiri)	
		Tongkol Jagung	Batok Kelapa	Serpihan Kayu	KT10	K0
1.	Emisi CO (g/kg)	42,1	39,2	38,6	4,05	3,01
2.	Emisi PM2,5 (g/kg)	0,9	1,3	0,6	0,13	0,62
3.	Konsumsi Spesifik Bahan Bakar (kg/jam)	0,65	0,63	0,44	0,90	0,85
4.	Rasio CO/CO2	0,028	0,015	0,011	0,057	0,045
5.	Efisiensi Pembakaran (%)	97,2	98,5	98,9	94,2	95,5
6.	Efisiensi Termal (%)	15,78	18,81	27,50	14,30	15,58

Dari perbandingan 2 penelitian tersebut, dapat dilihat bahwa, pada penelitian Suhartono dkk. (2018), memenuhi untuk 5 parameter uji yang ada pada SNI 7926:2013. Akan tetapi pada penelitian ini, hasil dari emisi CO dan PM2,5 lebih baik dibandingkan penelitian Suhartono dkk. (2018). Parameter efisiensi pembakaran dan efisiensi termal untuk penelitian ini masih belum memenuhi SNI 7926:2013, hal ini bisa ditingkatkan dengan mengacu pada penelitian terkait seperti, penelitian Mulyanto dkk. (2016) untuk variasi ketinggian lubang udara pada tungku biomassa dan Putra dkk. (2024), dengan penambahan fan pada tungku biomassa untuk meningkatkan efisiensi pembakaran, serta penelitian Ramdhani & Effendy, (2025) dan Anggara dkk. (2019), variasi jumlah lubang udara

dan kecepatan aliran udara merupakan dua faktor penting yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi termal pada tungku biomassa tipe TLUD.

4. KESIMPULAN

Nilai emisi PM_{2,5}, CO, dan CO₂ yang dihasilkan dari pembakaran tungku biomassa TLUD berbahan bakar biopellet cangkang kemiri memenuhi syarat maksimum yang ditetapkan SNI 7926:2013 untuk kedua variasi biopellet cangkang kemiri. Nilai emisi PM_{2,5}, CO, dan CO₂ pada KT10 berturut-turut, yaitu $130,59 \pm 7,13$ mg/kg, $4,05 \pm 0,08$ g/kg, dan $69,42 \pm 1,71$ g/kg, serta untuk K0 berturut-turut, yaitu $625,27 \pm 16,17$ mg/kg, $3,01 \pm 0,27$ g/kg, dan $67,24 \pm 1,74$ g/kg. Biopellet cangkang kemiri tanpa bahan perekat (K0) lebih baik dibandingkan biopellet cangkang kemiri dengan penambahan bahan perekat tepung tapioka 10 % (KT10) pada parameter CO dan CO₂, sedangkan KT10 lebih baik dari K0 pada parameter PM_{2,5}, hal ini karena nilai yang dihasilkan jauh lebih baik. Pengujian kinerja tungku biomassa TLUD belum memenuhi standar nilai yang ditetapkan pada SNI 7926:2013 untuk efisiensi pembakaran dan efisiensi termal, serta telah memenuhi standar nilai yang ditetapkan pada konsumsi spesifik bahan bakar. Hasil uji kinerja tungku biomassa pada parameter konsumsi spesifik bahan bakar, efisiensi pembakaran dan efisiensi termal untuk KT10 berturut-turut, yaitu $0,90 \pm 0,02$ kg/jam, $0,9424 \pm 0,0011$, dan $14,29 \pm 0,46$ %, serta untuk K0 berturut-turut, yaitu $0,85 \pm 0,02$ kg/jam, $0,9547 \pm 0,0043$, dan $15,59 \pm 0,86$ %.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak Departemen Teknik Lingkungan yang telah mendukung penelitian ini melalui pendanaan dengan nomor kontrak No. B/97/UN16.09/SPK/PT.01.03/RKAT-UNAND/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- Anggara, R., Suwandi, & Fauzi, R. (2019). Pengaruh Jumlah Lubang Udara pada Tungku Pemabakaran Serta Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi dengan Bahan Bakar Pelet Kayu Jati. *E-Proceeding of Engineering*, 6(2), 5225–5233.
- Aristi, D. M. (2020). *Analisis Konsentrasi Particulate Matter 2,5 (PM_{2,5}), Karbon Monoksida (CO), Karbon Dioksida (CO₂), dan Laju Konsumsi Bahan Bakar pada Kompor Biomassa Berbahan Bakar Biopellet Sekam Padi* (Tugas Akhir). Universitas Andalas, Kota Padang.
- Budianto, A., Nurhuda, M., & Nadhir, A. (2015). *Uji Efisiensi Tungku Tanah Liat Berdaya Sedang*.
- Chantara, S., Thepnuan, D., Wiriya, W., Prawan, S., & Tsai, Y. I. (2019). Emissions of pollutant gases, fine particulate matters and their significant tracers from biomass burning in an open-system combustion chamber. *Chemosphere*, 224, 407–416. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.02.153>
- Efendi, R. (2022). Analisis Karakteristik Briket Dari Cangkang Kemiri Sebagai Bahan Bakar Alternatif. In *Jurnal Teknik Mesin FT-UMI* (Vol. 4).
- Mulyanto, A., Mirmanto, & Athar, M. (2016). Pengaruh Ketinggian Lubang Udara pada Tungku Pembakaran Biomassa Terhadap Unjuk Kerjanya. *Dinamika Teknik Mesin*, 6(1), 22–30.
- Nirmala, D. S., & Prasasti, C. I. (2015). Concentration of PM_{2,5} and Characteristic Analysis of Workers with Health Complaints Smoked Fish Workers in Tambak Wedi Village Surabaya. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 8(1), 57–68.
- Prabawa, I. D. G. P., & Miyono. (2017). Mutu biopellet dari campuran cangkang buah karet dan Bambu Ater (*Gigantochloa atter*). *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 9(2), 99–110.
- Prastya, R., Susilo, B., & Lutfi, M. (2013). Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Biogas terhadap Emisi Gas Buang Mesin Generator Set. In *Jurnal Keteknikan Pertanian Tropis dan Biosistem* (Vol. 1).
- Putra, R. A., Zurohaina, & Kholidah, N. (2024). Analisis Pengaruh Kecepatan Aliran Udara Terhadap Performa Kompor Biomassa Top-Lit Up Draft (T-LUD) Berbahan Bakar Biopellet Kayu Jati - Chips Bambu Betung. *Jurnal Penelitian Sains*, 26(3), 311. <https://doi.org/10.56064/jps.v26i3.1076>
- Putra, R. W. (2019). *Analisis Konsentrasi Particulate Matter 2,5 (PM_{2,5}), Karbon Monoksida (CO), Karbon Dioksida (CO₂), Rasio CO/CO₂ dan Laju Konsumsi Bahan Bakar Akibat Penggunaan Kompor Biomassa Berbahan Bakar Limbah Tongkol Jagung dan Sekam Padi*. Universitas Andalas, Kota Padang.
- Ramdhani, Q., & Effendy, M. (2025). Rancang Bangun dan Uji Performa Kompor Gasifikasi Biomassa (Tempurung Kelapa) Tipe Updraft. *JTM*, 14(37), 37–44.
- Rezapatama, M. S. (2023). Nilai Jasa Lingkungan Pada Hutan Kota di Taman Margasatwa Ragunan, Jakarta. In *CHEMVIRO: Jurnal Kimia dan Ilmu Lingkungan* (Vol. 2). Jakarta.
- Sari, N. K. (2009). Pembuatan Bioetanol dari Rumput Gajah dengan Distilasi Batch. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, 8(3), 94–103.

- Selilana, E. A., Suwandi, & Ayodha, T. (2017). Pengaruh Tinggi dan Jumlah Lubang Udara pada Tungku Pembakaran Serta Variasi Kecepatan Aliran Udara Terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Biomassa. *E-Proceeding of Engineering*, 4, 3862–3868.
- Setyawan, B., & Ulfa, R. (2019). Pengaruh Komposisi Bahan Baku dan Perekat Terhadap Emisi Gas Briket Arang Kulit Kopi dan Tempurung Kelapa. In *Prosiding Seminar Nasional MIPA UNIBA*.
- Tenaya, I. G. N. P., & Hardiana, M. (2011). Pengaruh Air Fuel Ratio Terhadap Emisi Gas Buang Berbahan Bakar Lpg Pada Ruang Bakar Model Helle-Shaw Cell. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 5(1), 39–45.
- Wahyullah, Putra, O. D., & Ismail. (2018). Pemanfaatan Biomassa Tumbuhan Menjadi Biopellet sebagai Alternatif Energi Terbarukan. *Hasanuddin Student Journal*, 2(1), 239–247.
- Wibowo, S., Gunawan, I., & Pari, G. (2022). Pengaruh Penambahan Tepung Tapioka Pada Karakteristik Pelet Kayu dari Limbah Cabang Kayu Jati Perhutani Plus (JPP). *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 16(1), 50–63. <https://doi.org/10.22146/jik.v16i1.180>