

Analisis Konsentrasi PM_{2,5}, CO, dan CO₂, serta Laju Konsumsi Bahan Bakar Biopellet Sekam Padi dan Jerami pada Kompor Biomassa

Fadjar Goembira^{1,2}, Debby Maurine Aristi¹, Defri Nofriadi¹, Nilda Tri Putri²

¹Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas; e-mail: fgoembira@eng.unand.ac.id

²Program Profesi Insinyur, Program Pascasarjana Universitas Andalas

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis konsentrasi PM_{2,5}, CO dan CO₂ dalam ruangan ketika dilakukan penggunaan bahan bakar biopellet pada sebuah kompor biomassa, serta menghitung laju konsumsi bahan bakar tersebut. Pengujian menggunakan metode water boiling test (WBT) untuk mensimulasikan proses memasak yang terbagi ke dalam 3 fase, yaitu cold start (CS)/fase dingin, hot start (HS)/fase panas, dan simmering (SM)/fase mendidih. Biopellet dibuat dari limbah sekam dan jerami padi. Pengukuran PM_{2,5} dilakukan menggunakan low volume air sampler (LVS) yang dilengkapi dengan elutriator untuk memisahkan partikel berukuran di atas 2,5 mikron dan filter fiberglass untuk menangkap partikel berukuran kurang dari 2,5 mikron pada kecepatan aliran udara 3,5 liter per menit. Sedangkan pengukuran CO dan CO₂ menggunakan Portable Air Quality Monitor. Didapatkan konsentrasi PM_{2,5} biopellet sekam padi pada fase CS, HS, dan SM berturut-turut 33,13, 30,81, dan 24,76 µg/Nm³, sedangkan untuk biopellet jerami padi diperoleh 23,29, 29,98, dan 30,42 µg/Nm³. Terkait konsentrasi CO, pada ketiga fase berturut-turut untuk biopellet sekam padi yaitu 5,29, 5,14, dan 6,09 ppm, sedangkan untuk biopellet jerami padi didapatkan 6,13, 5,86, dan 5,67 ppm. Terakhir, pengukuran konsentrasi CO₂ biopellet sekam padi yaitu 436,74, 451,71, dan 472,82 ppm, sedangkan pada biopellet jerami padi terukur 419,87, 417,93, dan 453,43 ppm, pada ketiga fase berturut-turut. Konsentrasi PM_{2,5}, gas CO dan CO₂ biopellet masih memenuhi baku mutu udara indoor sesuai dengan PERMENKES/1077/2011. Rasio CO/CO₂ berada di bawah nilai 0,02 yang menunjukkan pembakaran bahan bakar biopellet menghasilkan karbon monoksida yang kecil sehingga terjadi pembakaran sempurna. Laju konsumsi bahan bakar biopellet lebih kecil dibandingkan jika digunakan biomassa yang belum diolah menjadi biopellet.

Kata kunci: Biopellet Sekam Padi, Biopellet Jerami Padi, Water Boiling Test, Konsentrasi PM_{2,5}, CO, CO₂ Indoor, Laju Konsumsi Bahan Bakar

ABSTRACT

This research was conducted to analyse indoor PM_{2,5}, CO dan CO₂ concentrations during the use of biopellet fuel in a biomass stove, and to calculate the fuel consumption rate. Water boiling test (WBT) was used to simulate cooking activities, which comprises of three phases, i.e., cold start (CS), hot start (HS), and simmering (SM). The biopellet was made from rice husk and straw wastes. PM_{2,5} were measured by using a low volume air sampler (LVAS) that was equipped with an elutriator to separate particulates with more than 2.5-micron size and a fiberglass filter to trap particulates with less than 2.5-micron size at air flow rate of 3.5 liter per minute. Meanwhile, a portable air quality monitor was used to measure CO dan CO₂. It was found that PM_{2,5} concentrations for rice husk biopellet during CS, HS, and SM were, respectively, 33.13, 30.81, and 24.76 µg/Nm³. While those for rice straw biopellet were 23.29, 29.98, and 30.42 µg/Nm³. Regarding CO concentrations during the three phases for rice husk biopellet were, respectively, 5.29, 5.14, and 6.09 ppm, whilst for the rice straw biopellet the concentrations were 6.13, 5.86, and 5.67 ppm. Lastly, the CO₂ measurements for rice husk biopellet were 436.74, 451.71, and 472.82 ppm, while those for rice straw biopellet were 419.87, 417.93, and 453.43 ppm, during the three phases correspondingly. All PM_{2,5}, CO and CO₂ gas concentrations still met indoor air quality standard, in accordance with Minister of Health Regulation Number 1077/2011. Moreover, the CO/CO₂ ratios were below 0.02, which indicates that the combustion of the biopellet fuels emitted small amount of carbon monoxide, thus, perfect combustion were achieved. The biopellet fuel consumption rates were smaller than those of virgin biomasses that had not been converted into biopellet.

Keywords: Rice Husk Biopellet, Rice Straw Biopellet, Water Boiling Test, Indoor PM_{2,5}, CO, CO₂ Concentrations, Fuel Consumption Rate

Citation: Goembira, F., Aristi, D., Nofriadi, D. dan Putri, N.P. (2021). Analisis Konsentrasi PM_{2,5}, CO, CO₂ serta Laju Konsumsi Bahan Bakar Biopellet Sekam Padi dan Jerami pada Kompor Biomassa. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(2), 201-210, doi:10.14710/jil.19.2.201-210

1. Latar Belakang

Biomassa secara umum lebih dikenal sebagai bahan kering material organik atau bahan yang tersisa setelah suatu tanaman atau material dihilangkan kadar airnya atau dikeringkan. Penggunaan biomassa dapat menggantikan peran bahan bakar fosil seperti minyak tanah, batubara, minyak bumi yang digunakan untuk memasak, transportasi, dan lainnya. Bahan bakar fosil tersebut diperoleh dari karbon yang berasal dari dalam bumi dimana ketika dibakar akan melepaskan karbon ke atmosfer yang merupakan salah satu penyebab utama terjadinya pemanasan global, sedangkan apabila memanfaatkan biomassa tidak akan menambahkan emisi karbon ke atmosfer karena karbon yang dilepas melalui pembakaran biomassa akan mampu diserap kembali oleh pohon pengganti pada proses fotosintesis (Amirta, 2018).

Pemanfaatan biomassa menjadi bahan bakar alternatif juga dapat mengatasi permasalahan lingkungan yaitu dapat mereduksi limbah biomassa yang dihasilkan. Menurut Abdullah (2009), biomassa limbah pertanian yang potensial digunakan yaitu limbah tanaman padi (jerami dan sekam), limbah jagung (tongkol, batang, dan daun), limbah sawit (cangkang, serat, dan tandan kosong), ampas tebu dan limbah kelapa (sabut, tempurung). Di antara limbah pertanian tersebut, limbah sekam padi dan jerami padi tersedia dalam jumlah yang lebih banyak dibandingkan dengan limbah pertanian lainnya. Hal ini ditunjang dengan data Badan Pusat Statistik (BPS) pada tahun 2017 bahwa produksi padi di Indonesia pada tahun 2017 yaitu mencapai 81.382.451 ton. Demikian juga produksi padi di Sumatera Barat yang mencapai 2.824.509 ton dengan jumlah limbah sekam sebesar 30% dari bobot padi yaitu 847.353 ton dan menurut Litbang Pertanian 1 ton produksi padi mampu menghasilkan 1,5 ton jerami, maka potensi jerami padi yaitu berkisar 4.236.764 ton. Data di atas dapat dijadikan acuan untuk memanfaatkan limbah tersebut secara efektif dan maksimal serta mampu mereduksi limbah padi yang dihasilkan.

Biomassa telah lama digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Pada data BPS tahun 2018 menyebutkan bahwa 25,67% masyarakat di Indonesia masih menggunakan biomassa kayu bakar sebagai bahan bakar untuk keperluan memasak. Penggunaan biomassa dengan pembakaran langsung terbuka (*open burning*) menggunakan tungku tradisional tidak efisien (Owsianoski, 2007). Selain efisiensi yang rendah, pembakaran terbuka menimbulkan emisi seperti CO, H₂S, NO_x, SO_x dan partikel debu yang berdampak buruk terhadap kesehatan pengguna kompor dan juga mengotori ruangan dapur (Mac Carty *et al.*, 2008).

Biomassa dapat diubah menjadi bahan bakar alternatif lain yang sudah dijadikan biopellet. Biopellet adalah salah satu bahan bakar terbarukan yang berasal dari biomassa. Salah satu kelemahan penggunaan biomassa secara curah adalah sulitnya mengontrol proses konversi energi akibat biomassa mempunyai ukuran yang tidak seragam, densitas yang

rendah, proses aliran bahan yang tidak stabil menyulitkan dalam pengkondisian rasio bahan bakar dan oksigen, sehingga gas yang tidak diharapkan terbentuk, seperti CO, CH₄ dan H₂ (Fryda *et al.*, 2008).

Penelitian terdahulu mengenai biomassa juga telah dilakukan oleh Putra (2019), yang dilakukan untuk menguji tingkat pencemar PM_{2,5}, CO, dan CO₂ di dalam ruangan akibat penggunaan kompor biomassa dengan bahan bakar biomassa yang belum diolah. Pemilihan parameter emisi PM_{2,5}, CO, dan CO₂ dikarenakan pada proses pembakaran biomassa akan menghasilkan CO dan CO₂ akibat reaksi karbon dan oksigen, serta akan menyisakan material berupa abu atau partikulat (Suroño, 2010). Berdasarkan hasil pengujian, konsentrasi PM_{2,5} dan CO pada kompor biomassa dengan bahan bakar biomassa yang belum diolah didapatkan konsentrasi yang melebihi baku mutu yaitu sebesar 35µg/m³ dan 9 ppm berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1077 Tahun 2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah. Sedangkan untuk konsentrasi CO₂ berdasarkan hasil pengujian dengan bahan bakar biomassa yang belum diolah didapatkan konsentrasi yang telah memenuhi baku mutu yaitu di bawah 1.000 ppm.

Berdasarkan penjelasan di atas perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai potensi pencemaran udara PM_{2,5}, CO, CO₂, serta efisiensi pemakaian bahan bakar dengan bahan bakar yang telah dikonversi menjadi biopellet. Hal ini dilakukan untuk membandingkan hasil yang didapatkan pada biomassa yang telah dikonversi menjadi biopellet dengan penelitian sebelumnya yaitu biomassa belum diolah.

2. Metodologi

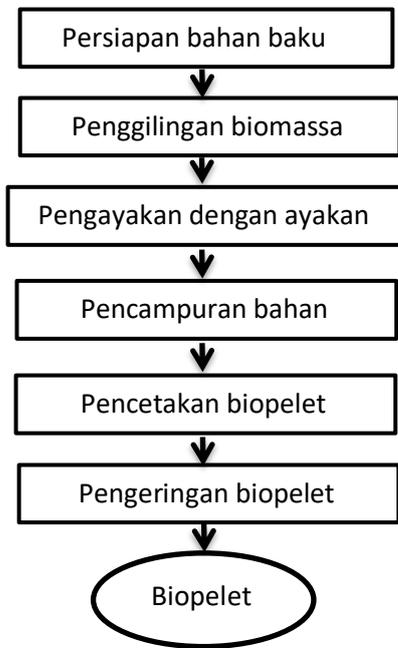
Kompor biomassa yang dipakai ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan prosedur pembuatan biopellet dapat dilihat pada Gambar 2. Setelah dilakukan proses pembuatan biopellet, selanjutnya dilakukan uji kualitas yang meliputi: pengukuran kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, kadar karbon terikat, densitas, dan nilai kalor. Pengukuran kadar air memiliki tujuan untuk mengetahui sifat higroskopis dari biopellet yang dihasilkan (Hendra, 2012). Kandungan kadar air di dalam biopellet mempengaruhi nilai kalor, semakin rendah nilai kadar air maka akan meningkatkan nilai kalor. Kadar air yang rendah akan memudahkan proses penyalaan dan menurunkan jumlah asap saat pembakaran (Rahman, 2011). Perhitungan kadar air memakai persamaan:

$$\text{Kadar air (\%)} = \left(\frac{\text{BB} - \text{BKT}}{\text{BB}} \right) \times 100\% \quad (1)$$

di mana BB adalah berat sampel sebelum dikeringkan dalam oven (g), dan BKT adalah berat sampel setelah dikeringkan dalam oven (g).



Gambar 1. Kompor Biomassa



Gambar 2. Diagram Alir Pembuatan Biopellet

Selanjutnya, pengukuran kadar abu, di mana abu merupakan sisa pembakaran yang tidak lagi memiliki unsur karbon. Unsur utama dari karbon adalah silika yang tidak dapat terbakar pada waktu pembakaran sehingga pengaruhnya kurang baik terhadap nilai kalor yang dapat menurunkan kualitas pellet (Hendra, 2012). Perhitungan kadar abu memakai persamaan:

$$\text{Kadar abu (\%)} = \frac{\text{Berat Abu}}{\text{Berat Sampel}} \times 100\% \quad (2)$$

di mana Berat Abu adalah berat cawan dan sampel setelah pengeringan dikurangi berat cawan kosong (g), sedangkan Berat Sampel adalah berat cawan dan sampel sebelum pengeringan dikurangi berat cawan kosong (g).

Kadar zat terbang selanjutnya diukur untuk mengetahui zat yang dapat menguap sebagai hasil dekomposisi senyawa-senyawa di dalam suatu bahan selain air (Hendra, 2012). Kadar zat terbang yang tinggi pada suatu bahan bakar akan menurunkan efisiensi pembakaran dan asap yang dihasilkan akan semakin banyak sehingga menimbulkan polusi (Nurwigha, 2012). Perhitungan kadar zat terbang memakai rumus sebagai berikut:

$$\text{Kadar zat terbang (\%)} = \left(\frac{B-C}{W} \right) \times 100\% \quad (3)$$

di mana B adalah berat sampel setelah dikeringkan dari uji kadar air (g), C merupakan berat sampel

setelah dipanaskan dalam *furnace* (g), dan W adalah berat sampel awal sebelum pengujian kadar air (g).

Selanjutnya dilakukan pengukuran kadar karbon terikat. Kadar karbon terikat adalah fraksi karbon dalam biomassa selain fraksi air, zat terbang, dan abu (Pari, 2004). Kadar karbon terikat (KKT, dalam %) berbanding terbalik dengan zat terbang. Kadar karbon terikat yang tinggi pada biopellet akan memiliki nilai kalor yang juga tinggi (Onu *et al.*, 2010). Perhitungan kadar karbon terikat memakai persamaan sebagai berikut:

$$\text{KKT (\%)} = 100\% - (\text{Kadar air} + \text{Kadar abu} + \text{Kadar zat terbang}) \quad (4)$$

Parameter uji kualitas selanjutnya adalah densitas. Densitas berpengaruh terhadap kualitas bahan bakar padat, karena densitas yang tinggi dapat meningkatkan nilai kalor bahan bakar. Cara mengukur densitas dilakukan dengan mengambil 1 gram sampel ditimbang agar diketahui berat dan ukur volumenya. Nilai densitas dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Densitas} = \frac{B}{V} \quad (5)$$

di mana B adalah berat contoh uji (g), dan V adalah volume contoh uji (cm³).

Nilai kalor merupakan parameter kualitas biopellet yang selanjutnya diuji. Nilai kalor adalah besarnya panas yang dihasilkan dari pembakaran suatu bahan bakar dengan jumlah tertentu. Penetapan nilai kalor menggunakan alat *Bomb Calorimeter*. Nilai kalor di hitung dengan persamaan:

$$\text{Nilai Kalor (kal/g)} = \left(\frac{t \cdot w - I_1 - I_2 - I_3}{m} \right) \quad (6)$$

di mana t adalah Kenaikan suhu pada termometer (°C), w = 2.428,03 kalori/°C, I₁ merupakan jumlah Na₂CO₃ yang terpakai untuk titrasi (ml), I₂ = 13,7 x 1,02 x Berat Sampel (g); I₃ = 2,3 x panjang kawat terbakar (cm), dan m = Berat bahan (g).

Terkait pengukuran polutan udara dari proses pembakaran biopellet, dilakukan untuk PM_{2,5}, CO, dan CO₂. Pengukuran PM_{2,5} dilakukan dalam 2 tahap, yaitu tahap pertama pengambilan data dilakukan selama 1 jam sebelum kompor biomassa digunakan sebagai data *background*. Tahap kedua dilakukan selama waktu pengukuran efisiensi kompor biomassa, dan kedua data ini akan dijadikan sebagai data primer. Pengukuran dilakukan sebanyak 3 kali pengulangan sebagai validasi data. Alat yang digunakan untuk pengukuran PM_{2,5} yaitu *Low Volume Air Sampler* (LVAS). LVAS merupakan alat pengukur pencemaran udara partikulat yang dapat mengukur PM₁₀ dan PM_{2,5} yang tersuspensi di udara bebas dengan menggunakan filter *fiber glass* dan metode gravimetri. Laju aliran udara untuk mengukur PM_{2,5} sebesar 3,5 l/menit.

Prosedur pemakaian alat LVAS untuk pengukuran PM_{2,5} terdiri atas tahap persiapan, pengambilan sampel, dan penimbangan. Pada tahap persiapan, filter yang akan digunakan disimpan di dalam

desikator yang berisi *silica gel* selama 24 jam. Selanjutnya, filter tersebut ditimbang sebanyak 5 kali hingga didapatkan berat konstan kemudian berat filter dicatat. Terakhir, filter tersebut diberi label dan diletakkan ke dalam *file box* yang berisi *silica gel*. Dalam tahap pengambilan sampel, filter dimasukkan ke *filter holder*, lalu LVAS dihubungkan dengan pompa penghisap udara dengan menggunakan selang silikon lalu disambungkan dengan arus listrik. LVAS diletakkan menggunakan *tripod* pada titik pengukuran (di lokasi *sampling*) dan setinggi 1 meter dari bagian atas kompor. Lalu pompa penghisap dihidupkan dan dilakukan *sampling* dengan kecepatan laju aliran udara (*flow rate*) 3,5 l/menit untuk *sampling* PM_{2.5}. Durasi pengambilan sampel dilakukan selama pengukuran efisiensi bahan bakar dilaksanakan. Setelah *sampling* selesai, filter dikeluarkan dari *filter holder* dengan menggunakan pinset lalu dimasukkan ke dalam desikator selama 24 jam. Proses sampel diulangi sebanyak 3 kali agar data yang didapatkan akurat. Terakhir, filter yang telah didiamkan selama 24 jam di dalam desikator ditimbang sebanyak 5 kali menggunakan neraca analitik hingga didapatkan berat yang stabil, dan hasil penimbangan dicatat.

Selanjutnya, pengukuran gas CO dan CO₂ dilakukan menggunakan alat *Portable air quality monitor* dengan *electro-thermal sensor* untuk mengukur gas CO dan *non-dispersive infrared sensor* (NDIR) untuk mengukur gas CO₂. *Portable air quality monitor* memiliki rentang 0-500 ppm dan ketelitian ±50 ppm untuk pengukuran gas CO dan 0-5.000 ppm dan ketelitian ±50 ppm untuk pengukuran gas CO₂. Pencatatan konsentrasi CO dan CO₂ dalam satuan ppm yang ditunjukkan pada *Portable air quality monitor* dilakukan setiap 1 menit pengukuran selama prosedur *water boiling test* (WBT) dilakukan.

Pengukuran laju konsumsi bahan bakar menggunakan *Water Boiling Test Method* (Bailis *et. al*, 2007) dengan pengukuran yang dilakukan pada ruangan tertutup dengan sedikit ventilasi atau *Hood Method*. Pengukuran dilakukan menggunakan kompor biomassa dengan bahan bakar biopellet sekam padi dan biopellet jerami padi. Pengukuran yang dilakukan terdiri dari 3 fase pengujian yang dilakukan secara berurutan yaitu fase dingin, fase panas, dan fase mendidih.

Bahan dan alat yang disiapkan adalah bahan bakar biopellet, LVAS, *portable air quality monitor*, air dengan temperatur ruang sebanyak 2,5 liter, panci aluminium, *stopwatch*, kompor biomassa, timbangan digital, dan termokopel tipe K.

Prosedur pengujian diawali dengan penimbangan berat panci kosong dan pencatatan beratnya, kemudian, bahan bakar dimasukkan ke dalam tungku kompor biomassa sampai 2/3 tinggi ruang pembakaran (250 gram), dan massa bahan bakar awal dicatat. Panci berisi air diletakkan di atas tungku, dan termokopel dipasang di atas panci sehingga ujungnya menggantung sekitar 5 cm dari dasar panci dan tidak menyentuh dinding panci, kemudian suhu air dan

massa panci berisi air dicatat. Langkah selanjutnya adalah menyalakan *Low Volume Air Sampler*, untuk pengukuran emisi PM_{2.5}, dan pengoperasian *Portable air quality monitor* untuk mengukur gas CO dan CO₂.

Selanjutnya dilakukan penyalakan api pada kompor biomassa dan *stopwatch* dihidupkan, serta dilakukan pencatatan waktu ketika api mulai hidup. Ketika air mulai mendidih dilakukan pencatatan waktu setiap menit sampai temperatur air turun tiga derajat dari titik didih. Pada kondisi tersebut, pengujian dihentikan. Titik didih tidak harus 100°C, tetapi mengikuti formula sebagai berikut:

$$t_D = \left(100 - \frac{h}{300}\right) \quad (7)$$

di mana t_D adalah titik didih (°C), dan h merupakan ketinggian lokasi dari permukaan laut (meter).

Langkah selanjutnya, setelah kompor dimatikan adalah dilakukan penimbangan kompor dengan bahan bakar yang tersisa untuk menentukan laju konsumsi bahan bakar. Panci yang masih berisi air ditimbang untuk mengetahui berat air setelah pengujian.

Hasil data dari pengukuran dan penimbangan berat awal dan akhir dari filter kemudian diolah lebih lanjut untuk mendapatkan konsentrasi PM_{2.5}. Perhitungan yang dilakukan dapat menggunakan rumus:

$$C = \frac{(W_s - W_o) \times 10^6}{V_{stp}} \quad (8)$$

di mana C adalah konsentrasi partikel tersuspensi ($\mu\text{g}/\text{N.m}^3$), W_s merupakan berat filter *fiber glass* setelah *sampling* (g), W_o adalah berat filter *fiber glass* sebelum *sampling* (g), 10^6 = konversi dari g menjadi μg .

Setelah dilakukan pengukuran gas CO dan CO₂, data konsentrasi dianalisis sehingga diperoleh gambaran konsentrasi gas CO dan CO₂ dengan menggunakan rumus:

$$C_{8jam} = C_{sampling} \times \left[\frac{n}{8}\right]^p \quad (9)$$

di mana C_{8jam} adalah konsentrasi 8 jam gas (ppm), $C_{sampling}$ adalah konsentrasi gas rata-rata terukur saat *sampling* n jam (ppm), n adalah lama waktu *sampling* (jam), dan P merupakan factor konversi canter (0,17 - 0,2).

Perhitungan laju konsumsi bahan bakar dilakukan untuk mengetahui tingkat pemakaian bahan bakar berdasarkan jumlah bahan bakar yang tersisa dengan tujuan bahan bakar tersebut layak digunakan atau tidak. Menghitung laju konsumsi bahan bakar dapat menggunakan formula yang mengacu pada rumus

$$SC = \frac{f_{cd}}{P_{cf} - P} \quad (10)$$

di mana SC adalah konsumsi bahan bakar spesifik (g/g), f_{cd} merupakan konsumsi rata-rata bahan bakar kering (g), P_{cf} adalah massa panci berisi air setelah pengujian (g), dan P = massa panci kosong (g).

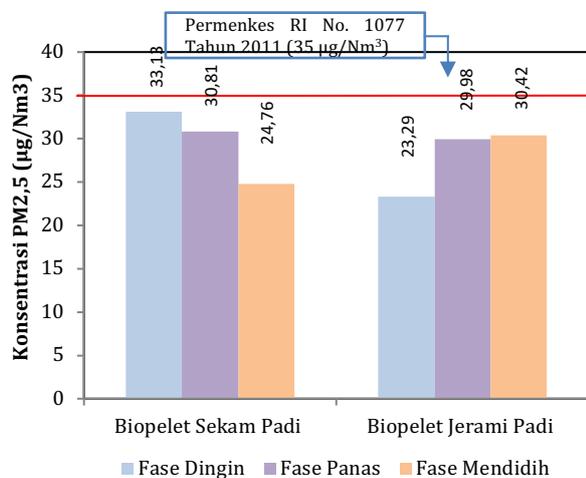
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Konsentrasi Pengukuran PM_{2,5}, CO, dan CO₂

Pengujian konsentrasi *background* dilakukan selama 1 jam untuk mendapatkan konsentrasi dari ruangan uji kompor biomassa sebelum kompor digunakan. Konsentrasi PM_{2,5} *background* biopellet sekam padi yang didapatkan sebesar 7,43 µg/Nm³, konsentrasi CO yang didapatkan sebesar 0 ppm, dan pada pengujian konsentrasi CO₂ sebesar 434,37 ppm. Sedangkan biopellet jerami padi konsentrasi PM_{2,5} *background* yang didapatkan sebesar 7,04 µg/Nm³, konsentrasi CO yang didapatkan sebesar 0 ppm, dan pada pengujian konsentrasi CO₂ sebesar 403,95 ppm

Konsentrasi rata-rata PM_{2,5} dengan konversi 24 jam dari penggunaan biopellet sekam padi yaitu sebesar 33,13 µg/Nm³ pada fase dingin, 30,81 µg/Nm³ pada fase panas, dan 24,76 µg/Nm³ pada fase mendidih. Sedangkan konsentrasi PM_{2,5} menggunakan bahan bakar biopellet jerami padi dengan konversi 24 jam sebesar 23,29 µg/Nm³ untuk fase dingin, 29,98 µg/Nm³ untuk fase panas dan 30,42 µg/Nm³ untuk fase mendidih.

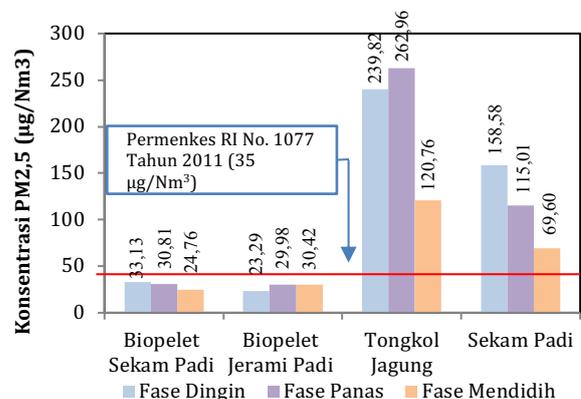
Sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 3, Secara keseluruhan konsentrasi rata-rata PM_{2,5} untuk semua fase pengujian kompor biomassa memenuhi baku mutu yang telah dipersyaratkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan No. 1077/MENKES/PER/V/2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah. Kualitas yang dimiliki biopellet mempengaruhi emisi yang dihasilkan. Biopellet yang diujikan memiliki kualitas yang baik karena memiliki kadar air yang rendah, ukuran yang seragam, permukaan yang halus dan rata, dan tidak mengeluarkan asap hitam saat dibakar di kompor biomassa. Faktor lain yang mempengaruhi hasil pengukuran PM_{2,5} yaitu kondisi ruangan yang memiliki ventilasi yang cukup untuk menyalurkan emisi gas buang PM_{2,5}. Ventilasi yang digunakan pada penelitian berdimensi 1,2 m x 0,7 m dengan bukaan sebesar 56%.



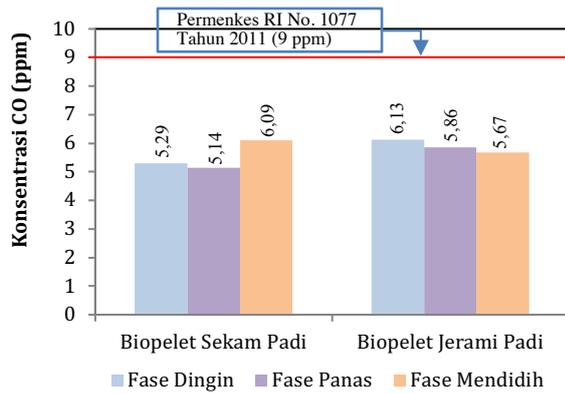
Gambar 3. Konsentrasi Rata-Rata PM_{2,5} Setiap Fase Bahan Bakar Biopellet

Hal ini sudah sesuai dengan yang dipersyaratkan oleh Permenkes No.1077/ MENKES/PER/V/2011 dalam pengendalian PM_{2,5} adalah ventilasi memiliki bukaan sekurang-kurangnya 40% dari luas lantai dengan sistem silang agar dapat mengurangi dampak polusi yang ditimbulkan dari proses pembakaran atau pencemar udara lainnya.

Berdasarkan Gambar 4, konsentrasi PM_{2,5} yang didapatkan dari pembakaran biomassa yang sudah dijadikan biopellet dengan bahan bakar biomassa yang belum diolah memiliki perbandingan yang signifikan. Nilai konsentrasi PM_{2,5} yang dihasilkan oleh biopellet sekam padi dan biopellet jerami padi nilainya lebih rendah, sedangkan pada penelitian Putra (2019) menunjukkan hasil konsentrasi emisi PM_{2,5} berada di atas baku mutu yang ditetapkan. Konsentrasi PM_{2,5} yang dihasilkan pada biomassa yang belum diolah memiliki nilai yang tinggi. Hal ini bisa dilihat dari asap yang dihasilkan dari pembakaran biomassa yang belum diolah berwarna hitam dan dihasilkan dalam jumlah yang banyak (Putra, 2019). Menurut Jyoti (2019), sebagian besar partikulat hasil dari proses pembakaran akan keluar sebagai asap hitam tebal. Selain itu menurut Sugiarto (2019), tingginya kadar partikulat pada proses pembakaran juga diakibatkan oleh terjadinya pembakaran yang tidak sempurna, dimana proses pembakaran tidak sempurna ini akan menyebabkan pembentukan karbondioksida, asap dan debu. Sedangkan pada pembakaran biopellet sekam padi dan biopellet jerami padi, asap yang dihasilkan hanya sedikit dan berwarna putih. Hal ini mengindikasikan bahwa proses konversi biomassa menjadi biopellet dapat meminimalisir partikulat yang dihasilkan dari proses pembakarannya dan membuktikan bahwa konversi biomassa menjadi biopellet dapat menurunkan nilai konsentrasi PM_{2,5} pada saat pembakaran. Konsentrasi rata-rata CO dengan konversi 8 jam dari penggunaan biopellet sekam padi yaitu sebesar 5,29 ppm pada fase dingin, 5,14 ppm pada fase panas, dan 6,09 ppm pada fase mendidih. Sedangkan konsentrasi CO menggunakan bahan bakar biopellet jerami padi dengan konversi 8 jam sebesar 6,13 ppm untuk fase dingin, 5,86 ppm untuk fase panas, dan 5,67 ppm untuk fase mendidih.



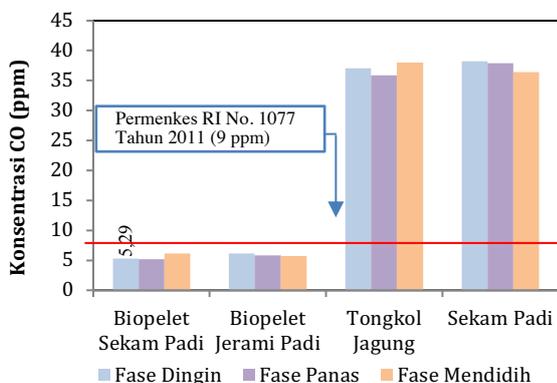
Gambar 4. Perbandingan Konsentrasi Rata-Rata PM_{2,5} Bahan Bakar Biopellet dengan Bahan Bakar yang Belum Diolah



Gambar 5. Konsentrasi Rata-Rata CO Setiap Fase Bahan Bakar Biopelet

Berdasarkan Gambar 5, konsentrasi CO dengan bahan bakar biopelet berada di bawah baku mutu yang telah ditetapkan berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 1077/MENKES/V/2011 tentang pedoman penyehatan udara dalam ruang rumah. Emisi gas CO dapat diturunkan sebanyak 40% dengan penambahan *excess air* atau udara berlebih (Syamsiro, 2007), dan pada saat penelitian telah dilakukan pembukaan pintu udara pada kompor biomassa agar terjadi proses *excess air* agar emisi gas CO yang dihasilkan rendah.

Konsentrasi gas CO pada fase mendidih biopelet sekam padi seharusnya memiliki nilai yang lebih rendah. Hal ini dikarenakan pengujian pada fase mendidih dilakukan lebih lama dibandingkan dengan fase dingin dan fase panas yaitu selama 45 menit, sehingga pembakaran pada fase mendidih terjadi secara sempurna yang telah mencapai tahap pembakaran arang. Sesuai dengan penelitian Fisafarani (2010), bahwa gas CO saat pembakaran biopelet akan dihasilkan pada menit ke-10 hingga menit ke-15 yaitu tahap devolatilisasi atau penguapan zat-zat volatil, sehingga pembakaran belum terjadi secara sempurna. Sedangkan pada menit ke- 20 hingga 25, konsentrasi CO mulai menurun dan konsentrasi CO₂ meningkat karena pembakaran sudah terjadi secara sempurna dan berada pada tahap pembakaran arang.



Gambar 6. Perbandingan Konsentrasi Rata-Rata CO Bahan Bakar Biopelet dengan Bahan Bakar yang Belum Diolah

Konsentrasi gas CO pada fase mendidih biopelet sekam padi tidak sesuai dengan teori. Hal ini bisa disebabkan oleh adanya penumpukan bahan bakar pada kompor, karena pada saat pengujian dilakukan penambahan bahan bakar ke dalam kompor. Penambahan tersebut bertujuan agar bahan bakar tercukupi untuk mendidihkan air pada fase mendidih selama 45 menit. Namun, penambahan bahan bakar ini akan menghalangi laju aliran udara sehingga pasokan udara yang masuk ke dalam kompor menjadi berkurang. Selain itu, bahan bakar yang baru ditambahkan juga akan mengalami tahap pengeringan dan devolatilisasi sehingga pembakarannya akan menghasilkan gas CO.

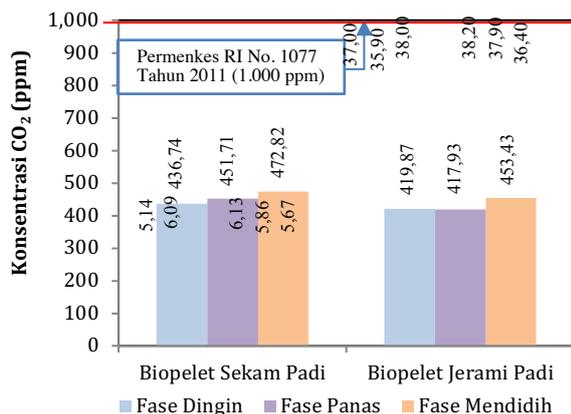
Konsentrasi CO pada biopelet jerami padi telah sesuai dengan teori Fisafarani (2010), dimana konsentrasi tertinggi didapatkan pada fase dingin dan fase panas. Hal ini dikarenakan reaksi pembakaran biopelet yang terjadi pada fase dingin dan fase panas yaitu melepaskan uap air dan zat mudah menguap (*volatile matter*) pada biopelet. Pembakaran pada fase dingin dan fase panas belum terjadi secara sempurna dikarenakan temperatur pembakaran belum mencapai titik didih atau nilai optimal. Ketika pembakaran dilakukan pada temperatur yang rendah, maka CO yang dihasilkan akan bernilai tinggi.

Apabila gas CO memiliki konsentrasi yang tinggi akan menyebabkan gangguan kesehatan, hingga kematian. Gas CO yang terhisap ke dalam paru-paru akan masuk ke dalam peredaran darah dan menghalangi masuknya oksigen (O₂), karena gas CO bersifat racun metabolis yang akan ikut bereaksi dengan darah menjadi karboksihemoglobin (COHb). Keadaan ini menyebabkan darah menjadi lebih mudah menangkap CO dibandingkan O₂ dan menyebabkan fungsi vital darah sebagai pengangkut oksigen terganggu (Yulianti, 2013).

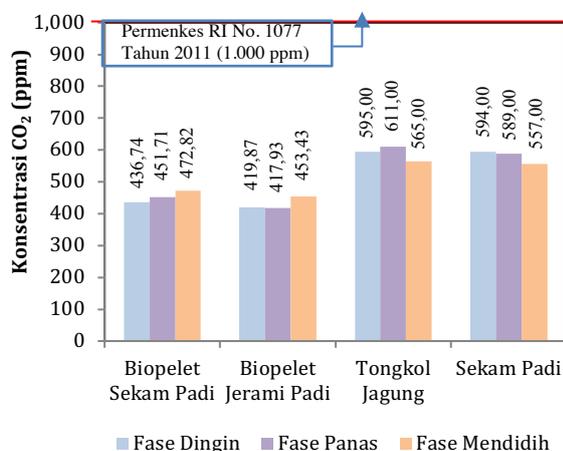
Berdasarkan perbandingan pada Gambar 6, dapat dilihat bahwa konsentrasi gas CO yang dihasilkan oleh pembakaran biopelet jauh lebih kecil dibandingkan dengan konsentrasi gas CO yang dihasilkan oleh pembakaran biomassa yang belum diolah hasil dari penelitian Putra (2019). Penelitian Putra (2019) menunjukkan konsentrasi gas CO yang dihasilkan oleh pembakaran biomassa yang belum diolah memiliki nilai yang lebih besar dan berada di atas baku mutu maksimum yang ditetapkan yaitu 9 ppm. Perbedaan nilai konsentrasi gas CO antara bahan bakar tersebut salah satunya disebabkan oleh kadar air yang terkandung di dalamnya. Kadar air pada biopelet lebih rendah daripada biomassa yang belum diolah, (Rahman, 2011). Hal ini dikarenakan biopelet telah melalui tahapan proses penggilingan dan penghalusan sehingga pori-pori pada biopelet yang awalnya terisi oleh molekul-molekul air akan digantikan oleh partikel-partikel yang saling mengikat serta juga dilakukan proses pengeringan yang akan menurunkan kadar air pada biopelet. Kadar air yang rendah akan meningkatkan efisiensi dan melancarkan keberlangsungan pembakaran. Sedangkan menurut Hansen *et al.* (2009); Nurwighraha (2012); Hendra

(2012), kadar air yang tinggi menyebabkan proses pembakaran lambat, menimbulkan banyak asap, dan menyebabkan polusi udara.

Nilai konsentrasi gas CO pada bahan bakar yang belum diolah juga diakibatkan oleh pembakaran yang tidak sempurna akibat kurangnya oksigen pada saat pembakaran. Pembakaran yang tidak sempurna ini disebabkan ukuran yang tidak seragam dari biomassa yang belum diolah yang menyebabkan tumpukan didalam ruang bakar dan menghalangi laju aliran udara sehingga ketersediaan atau pasokan oksigen yang masuk ke ruang pembakaran kurang dan menghasilkan CO. Beban bahan bakar yang terlalu banyak dan tidak diimbangi oleh aliran udara alami yang melewati lubang udara merupakan penyebab pembakaran tidak sempurna (Setiani, 2019). Hal ini membuktikan bahwa pengolahan biomassa menjadi biopellet efektif menurunkan konsentrasi CO pada proses pembakaran. Konsentrasi rata-rata CO₂ dengan konversi 8 jam dari penggunaan biopellet sekam padi yaitu sebesar 436,74 ppm pada fase dingin, 451,71 ppm pada fase panas, dan 472,82 ppm pada fase mendidih.



Gambar 7. Konsentrasi Rata-Rata CO₂ Setiap Fase Bahan Bakar Biopellet



Gambar 8. Perbandingan Konsentrasi Rata-Rata CO₂ Bahan Bakar Biopellet dengan Bahan Bakar yang Belum Diolah

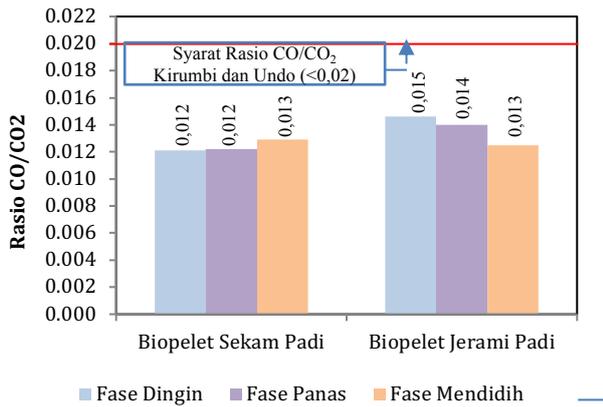
Sedangkan konsentrasi CO₂ menggunakan bahan bakar biopellet jerami padi dengan konversi 8 jam sebesar 419,87 ppm untuk fase dingin, 417,93 ppm untuk fase panas, dan 453,43 ppm untuk fase mendidih. Berdasarkan Gambar 7. secara keseluruhan konsentrasi CO₂ dengan bahan bakar biopellet berada di bawah baku mutu yang telah ditetapkan berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 1077/MENKES/V/2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah. Konsentrasi gas CO₂ biopellet sekam padi dan biopellet jerami padi tertinggi dihasilkan pada fase mendidih.

Hal ini dikarenakan waktu pemasakan pada fase mendidih lebih lama dibandingkan dengan fase dingin dan fase panas, sehingga reaksi pembakaran yang terjadi yaitu tahapan pembakaran arang dimana pada saat tersebut biopellet sudah habis terbakar dan menghasilkan arang, sehingga konsentrasi CO akan menurun dan konsentrasi CO₂ akan meningkat. Hal ini telah sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Supramono (2013), bahwa gas CO₂ tertinggi dihasilkan oleh pengujian dengan *residence time* atau waktu kontak yang lebih lama, dan waktu untuk pengujian fase mendidih lebih lama dari fase dingin dan fase panas, sehingga konsentrasi gas CO₂ paling tinggi berada pada fase mendidih. Menurut Makino (1992), untuk memperoleh reaksi yang sempurna menuju pembentukan CO₂ ada tiga syarat yang harus dipenuhi yaitu kecukupan waktu tinggal reaksi untuk reaksi CO ke CO₂, oksigen yang cukup untuk menyempurnakan reaksi oksidasi, dan suhu reaksi yang cukup tinggi untuk memperbesar kinetika reaksi oksidasi. Sehingga suhu pembakaran yang dihasilkan akan tinggi dan mengakibatkan reaksi konversi gas CO menjadi CO₂ lebih cepat dan gas CO yang terbentuk tidak banyak.

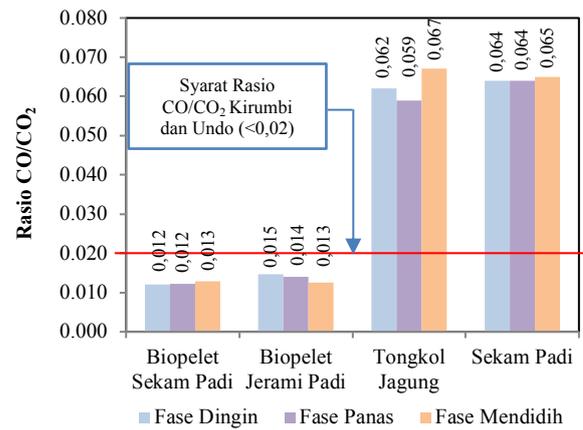
Berdasarkan Gambar 8. dapat dilihat bahwa konsentrasi CO₂ dari bahan bakar biopellet dan biomassa yang belum diolah memenuhi baku mutu untuk setiap fasenya. Konsentrasi pada pembakaran biopellet lebih kecil dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah yang telah diteliti sebelumnya. Hal ini dikarenakan waktu pembakaran yang lebih singkat pada biopellet dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah, terutama pada fase dingin dan fase panas. Dimana waktu pembakaran biopellet pada fase dingin 16 menit dan fase panas 17 menit untuk mendidihkan air, sedangkan pada pembakaran biomassa yang belum diolah waktu yang dibutuhkan untuk mendidihkan air berkisar 40-50 menit. Hal ini sesuai dengan penelitian Fisafarani (2010), bahwa emisi CO₂ pada menit ke-10 bernilai rendah dan kemudian meningkat pada menit ke-20. Konsentrasi CO₂ yang rendah ini dikarenakan temperatur pada awal pembakaran masih berada pada nilai yang rendah pula.

3.2. Laju Konsumsi Bahan Bakar

Perhitungan rasio CO/CO₂ di dalam pembakaran berfungsi untuk melihat efisiensi pembakaran.



Gambar 9. Rasio CO/CO₂ Pengujian Kompur Biomassa Berbahan Bakar Biopellet



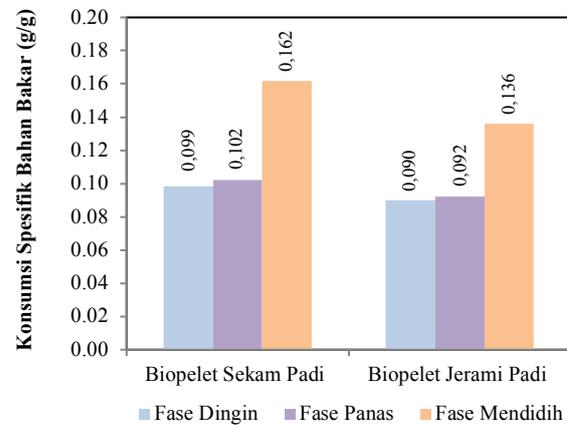
Gambar 10. Perbandingan Rasio CO/CO₂ Pengujian Kompur Biomassa antara Biopellet dengan Biomassa yang Belum Diolah

Menurut SNI 7926-2013, efisiensi pembakaran merupakan besaran yang menunjukkan tingkat kesempurnaan proses pembakaran yang dilihat dari minimnya kandungan gas karbon monoksida di dalam gas hasil proses pembakaran Syarat rasio CO/CO₂ harus kurang dari 0,02 sebagai acuan dalam efisiensi pembakaran pada kompor (Kirumbi dan Ondu, 2016).

Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat bahwa rasio CO/CO₂ bahan bakar biopellet berada di bawah 0,02. Rasio CO/CO₂ pada biopellet sekam padi sebesar 0,012 untuk fase dingin, 0,012 untuk fase panas, dan 0,013 untuk fase mendidih. Sedangkan pada biopellet jerami padi yaitu fase dingin 0,015, fase panas 0,014, dan fase mendidih 0,013. Hasil ini menunjukkan bahwa proses pembakaran bahan bakar biopellet sekam padi minim gas karbon monoksida sehingga efisiensi pembakarannya termasuk baik, yang dibuktikan dengan nilai rasio CO/CO₂ yang kecil dari 0,02.

Rasio CO/CO₂ yang telah diujikan pada penelitian ini dibandingkan dengan penelitian Putra (2019) yang menggunakan biomassa sekam padi dan tongkol jagung yang belum diolah. Berdasarkan **Gambar 10**, biopellet memiliki rasio CO/CO₂ yang lebih kecil, dan biomassa yang belum diolah memiliki nilai lebih besar dan melebihi nilai yang dipersyaratkan yaitu 0,02. Hal ini disebabkan oleh proses pembakaran biomassa yang belum diolah menghasilkan gas karbon monoksida yang besar. Dapat disimpulkan bahwa efisiensi pembakaran dari pembakaran biopellet sekam padi lebih baik dibandingkan dengan pembakaran sekam padi yang telah diteliti oleh Putra (2019).

Pengujian laju konsumsi bahan bakar bertujuan untuk menentukan efisiensi penggunaan bahan bakar yang digunakan pada pengujian. Laju konsumsi spesifik bahan bakar merupakan jumlah massa bahan bakar yang terpakai untuk mendidihkan air selama proses pemasakan. Laju konsumsi bahan bakar didapatkan dari pengujian kompor biomassa berbahan bakar biopellet dengan menggunakan metode *Water Boiling Test* (WBT). Pengukuran yang dilakukan menggunakan bahan bakar biopellet kemudian dibandingkan dengan yang telah diteliti sebelumnya oleh Putra (2019).



Gambar 11. Laju Konsumsi Bahan Bakar Biopellet

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada bahan bakar biopellet sekam padi didapatkan laju konsumsi bahan bakar sebesar 0,099 g/g pada fase dingin, 0,102 g/g pada fase panas, dan 0,162 g/g pada fase mendidih. Sedangkan laju konsumsi bahan bakar pada biopellet jerami padi didapatkan sebesar 0,090 g/g pada fase dingin, 0,092 g/g pada fase panas, dan 0,136 g/g pada fase mendidih. Laju konsumsi bahan bakar paling tinggi didapatkan pada fase mendidih, dikarenakan pengujian fase mendidih ini bertujuan mempertahankan titik didih selama 45 menit dan ini relatif lebih lama jika dibandingkan dengan fase dingin dan fase panas sehingga bahan bakar yang terpakai lebih banyak.

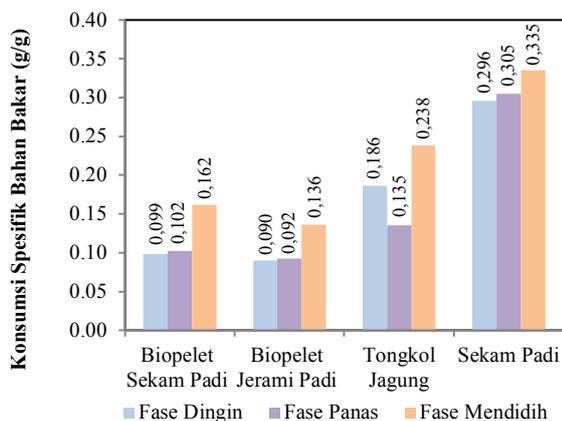
Pada saat pembakaran, waktu yang dibutuhkan biopellet untuk mendidihkan air lebih singkat jika dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah. Hal ini dikarenakan nilai kalor pada biopellet lebih tinggi jika dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah sehingga menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi, dan api yang lebih stabil. Hal ini sesuai dengan penelitian Masitoh dkk (2014), yang menyatakan bahwa biopellet lebih cepat 3-5 menit dalam mendidihkan 0,5 L dibandingkan sekam padi. Hal ini disebabkan temperatur bara api

yang dihasilkan dari biopellet 670°C, sedangkan sekam padi memiliki suhu sekitar 580°C.

Pada saat pembakaran, waktu yang dibutuhkan biopellet untuk mendidihkan air lebih singkat jika dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah. Hal ini dikarenakan nilai kalor pada biopellet lebih tinggi jika dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah sehingga menghasilkan temperatur pembakaran yang lebih tinggi, dan api yang lebih stabil. Hal ini sesuai dengan penelitian Masitoh dkk (2014), yang menyatakan bahwa biopellet lebih cepat 3-5 menit dalam mendidihkan 0,5 L dibandingkan sekam padi. Hal ini disebabkan temperatur bara api yang dihasilkan dari biopellet 670°C, sedangkan sekam padi memiliki suhu sekitar 580°C.

Kadar air yang terkandung di dalam bahan bakar yang belum diolah juga menjadi faktor penurunan mutu bahan bakar. Kadar air ini dapat menurunkan nilai kalor, karena pada saat proses pembakaran, sejumlah kalor yang terkandung di dalam bahan bakar digunakan untuk menguapkan kadar air tersebut. Nilai kalor yang rendah pada bahan bakar akan menyebabkan suhu pembakaran yang dihasilkan menjadi rendah sehingga akan memerlukan waktu yang lebih lama untuk memanaskan air hingga mencapai suhu didihnya. Hal ini menyebabkan proses pendidihan air memerlukan bahan bakar yang lebih banyak, sehingga memiliki nilai laju konsumsi bahan bakar yang tinggi. Hal ini membuktikan bahwa semakin lama waktu pembakaran akan memerlukan bahan bakar yang lebih banyak. Biopellet memiliki nilai laju konsumsi bahan bakar yang lebih rendah jika dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah yang telah diujikan sebelumnya. Bahan bakar dengan laju konsumsi spesifik yang rendah memiliki efisiensi bahan bakar yang lebih baik, karena penggunaan bahan bakar lebih sedikit.

Hal ini sesuai dengan penelitian Hasanuddin dan Lahay (2012), bahwa efisiensi penggunaan bahan bakar yang paling efektif dipengaruhi oleh waktu pemasakan yang lebih singkat, nilai kalor bahan bakar yang tinggi, dan kebutuhan bahan bakar yang lebih sedikit.



Gambar 13. Perbandingan Laju Konsumsi Bahan Bakar Biopellet dengan Biomassa yang Belum Diolah

Berdasarkan keterangan di atas, dapat dibuktikan dalam penelitian ini bahwa penggunaan kompor biomassa dengan bahan bakar biopellet sekam padi dan biopellet jerami padi lebih hemat jika dibandingkan dengan biomassa yang belum diolah yang diujikan pada penelitian sebelumnya.

4. Kesimpulan

Konsentrasi PM_{2,5}, gas CO, dan CO₂ yang didapatkan dari pengukuran pada saat pembakaran biopellet sekam padi dan biopellet jerami padi memenuhi baku mutu menurut Peraturan Menteri Kesehatan RI No. 1077/MENKES/PER/V/2011 tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah. Biopellet menghasilkan emisi PM_{2,5}, CO, dan CO₂ dengan konsentrasi yang lebih rendah daripada biomassa yang belum diolah. Rasio CO/CO₂ yang didapatkan pada penelitian ini telah memenuhi syarat yaitu < 0,02 dan penggunaan biopellet lebih efisien dibandingkan dengan penggunaan biomassa yang belum diolah dilihat dari nilai konsumsi bahan bakar spesifik biopellet.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah. 2009. Sustainable Parameters in Introducing Renewable Energy Technology. *ISESCO Science and Technology Vision*, 5(8):7-10.
- Amirta, R. 2018. Pellet Kayu Energi Hijau Masa Depan. *Mulawarman University Press*. Samarinda.
- Badan Pusat Statistik. 2017. *Produksi Padi Provinsi Sumatera Barat*. Badan Pusat Statistik. Sumatera Barat.
- Bailis, R., Ogle, D., MacCarty, N., and Still, D. 2007. The Water Boiling Test version 3.0.0. *The Clean Cook Stove Standard*.
- Fisafarani, H. 2010. *Identifikasi Karakteristik Sumber Daya Biomassa dan Potensi Bio-Pellet di Indonesia*. Skripsi. Depok: Program Sarjana Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Fryda, L. E., Panopoulos, K. D., and Kakaras, E. 2008. Agglomeration in fluidised bed gasification of biomass. *Powder Technology*, vol. 181, no. 3, pp. 307-20.
- Hansen, M.T., Jein, A.R., Hayes, S., and Bateman, P. 2009. *English Handbook for Wood Pellet Combustion. Intelligent Energy for Europe*.
- Hasanuddin dan Lahay, H. 2012. *Pembuatan biopellet ampas kelapa sebagai energi bahan bakar alternatif pengganti minyak tanah ramah lingkungan*. Laporan Penelitian Berorientasi Produk Dana PNBTP Tahun Anggaran 2012. Gorontalo: Universitas Gorontalo.
- Hendra, D. 2012. Rekayasa Pembuatan Mesin Pellet Kayu Dan Pengujian Hasilnya. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 30 (2):144-154.
- Jyoti, M. D dan Setiawati, I. 2019. *Identifikasi dan Analisis Kadar Total Partikulat Debu dari Emisi Cerobong Industri di Lampung*. Balai Riset dan Standarisasi Industri Bandar Lampung dan Balai Besar Kimia Kemasan. Majalah Teknologi Agro Industri (Tegi) Vol 11. Jakarta.

- Kirumbi, M. R, and Ondu, C. K. K. 2016. Comparative Analysis of Indoor Air Pollutans Emitted by the Advanced Stove Relative to the Conventional Bioethanol Gel Stoves. *International Journal of Advanced Engineering Research and Technology (IJAERT)*. Vol 4: ISSN Nomor 2348 – 8190.
- Mac Carty, N., Ogle, D., Still, D., Bond, T and Roden, C. 2008. A Laboratory Comparison of the Global Warming Impact of Five Major Types of Biomass Cooking Stoves. *Energy for Sustainable Development XII*: 5-14.
- Makino, A. 1992. Drag Coefficient of a Slowly Moving Carbon Particle Undergoing Combustion. *Combustion Science and Technology*. Vol 81 pp. 169-192
- Masitoh., Kurniati, M., dan Irzaman. 2014. *Analisis Diameter Biopellet Sekam Padi Terhadap Efisiensi Energi Bahan Bakar*. Bogor: Seminar Nasional dan Rapat Tahunan Bidang MIPA, Departemen Fisika FMIPA IPB.
- Nurwigha, R. 2012. *Pembuatan biopellet dari cangkang kelapa sawit dengan penambahan arang cangkang sawit dan serabut sawit sebagai bahan bakar alternatif terbarukan*. Tugas Akhir Sarjana. Institut Pertanian Bogor.
- Onu, F., Rahman, M.B.N., dan Sudarja. 2010. *Pengukuran Nilai Kalor Bahan Bakar Briket Arang Kombinasi Cangkang Pala (myristica fragan Houutt) dan Limbah Sawit (elaeis guinennsis)*. Seminar Nasional Teknik Mesin. UMY: Yogyakarta.
- Owsianowski, J. V. dan Barry, P. 2007. *Improved cooking stoves for developing countries*. 15th European Biomass Conference and Exhibition, Italy, 7–11 May 2007.
- Pari, G. 2004. *Kajian Struktur Arang Aktif dari Serbuk Gergaji Kayu sebagai Adsorben Emisi Formaldehida Kayu Lapis*. Disertasi Doktor. Institut Pertanian Bogor.
- Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 1077/MENKES/PER/V/2011 *tentang Pedoman Penyehatan Udara dalam Ruang Rumah*.
- 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*. Tugas Akhir. Padang: Jurusan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Andalas.
- Rahman. 2011. *Uji Keragaan Biopellet dari Biomasa Limbah Sekam Padi (Oryza sativa sp.) sebagai Bahan Bakar Alternatif Terbarukan*. Tugas Akhir Sarjana. Fakultas Teknologi Pertanian Institut Pertanian Bogor.
- Setiani, V., Rohmadhani, M., Setiawan, A., dan Maulidya, R. D. 2019. Potensi Emisi dari Pembakaran Biobriket Ampas Tebu dan Tempurung Kelapa. *In Seminar MASTER PPNS (Vol. 4, No. 1, pp. 115-118)*.
- SNI 8021-2014 tentang Pelet kayu. Badan Standardisasi Nasional. 2014.
- Sugiarto., Herawati, P., dan Riyanti, A. 2019. *Analisis Konsentrasi SO₂, NO₂ dan Partikulat pada Sumber Emisi Tidak Bergerak (cerobong) Berbahan Bakar Batubara dan Cangkang (Studi Kasus di Kabupaten Muaro Jambi)*. Batanghari: Jurnal Daur Lingkungan.
- Supramono, D dan Rizka, W. A. 2013. *Unjuk Kerja Pembakaran Biopellet Menggunakan Biomass Gas Stove Top-Lit Up Draft (TLUD) Gasifier*. Skripsi. Depok: Program Sarjana Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Surono, U. B. 2010. Peningkatan Kualitas Pembakaran Biomassa Limbah Tongkol Jagung sebagai Bahan Bakar Alternatif dengan Proses Karbonisasi dan Pembriketan. *Jurnal Rekayasa Proses*, 4(1).
- Syamsiro, M dan Saptoadi, H. 2007. Pembakaran Briket Biomassa Cangkang Kakao: Pengaruh Temperatur Udara Preheat. *In Seminar Nasional Teknologi*, (B1-B10).
- Yulianti, S. 2013. *Analisis Konsentrasi Gas Karbon Monoksida (CO) Pada Ruas Jalan Gajah Mada Pontianak*. Universitas Tanjungpura: Pontianak