

PENGARUH VARIASI ARAH ALIRAN UDARA PADA STOVE TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN WOOD PELLET

Lilis Yuliati

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
lilis_y@ub.ac.id

David Simanungkalit

Mahasiswa S1
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
dfrengki97@gmail.com

This research was conducted to investigate the effect of inlet airflow direction on the combustion characteristics of a wood pellet stove. The direction of the airflow into the wood pellet stove is varied for four methods, namely inlet I, inlet II, inlet III, and inlet IV. At inlets, I, II, and III air is injected into the plenum in the radial direction with the injection points at $r = -8, 0,$ and 8 cm respectively, whereas at inlet IV the direction of airflow into the plenum is in the axial direction with the injection point at $r = 0$. The combustion characteristics were observed in the wood pellet stove with a continuous fuel feeding system. The combustion characteristics investigated in this research consist of flame visualization, flame temperature, combustion rate, and the efficiency of the wood pellet stove. The results showed that wood pellet stoves with inlet IV had a lower combustion rate and flame height, however, this stove indicates a higher flame temperature and stove efficiency. Air entrance through the inlet IV induces most of the airflow to enter the combustion chamber through the primary channel, compared to that through the secondary and tertiary channels. The primary airflow through the wood pellet encourages a better devolatilization and combustion process. These conditions conduce the flame dimension which is a zone where the combustion reaction occurs is smaller with a higher flame temperature, due to higher volumetric heat release rate. This matter results in better heat transfer from the flame to the test fluid and higher stove efficiency.

Keywords: Wood Pellet, Air Flow Direction, Continuous Fuel Feeding, Combustions Characteristics.

1. PENDAHULUAN

Energi merupakan salah satu penggerak utama roda perekonomian nasional. Konsumsinya terus meningkat mengikuti permintaan berbagai sektor pembangunan khususnya listrik, industri dan transportasi. Kebutuhan energi saat ini dipenuhi oleh sumber daya fosil baik minyak bumi, gas dan batu bara [1]. Di Indonesia tercatat pada tahun 2016 sisa cadangan sumber energi fosil semakin berkurang, dimana cadangan minyak bumi sekitar 7.115,11 MMSTB, gas bumi sekitar 101,22 TSCF, dan batu bara sekitar 14,3 miliar ton. Jumlah ini tidak banyak, dan diperkirakan akan habis dalam beberapa puluh tahun lagi [2].

Disamping itu Indonesia merupakan negara yang terletak pada bentang khatulistiwa yang memiliki iklim tropis yang memiliki kekayaan hayati yang sangat melimpah. Menurut [3] Indonesia memiliki luas hutan 125,9 juta ha, dengan luas kawasan hutan produksi seluas 68,8 juta ha. Hal ini menunjukkan pengembangan energi baru dan terbarukan dengan berbahan kekayaan hayati, khususnya kayu sangat potensial untuk dijadikan bahan bakar biomassa. Biomassa adalah material biologis yang dapat digunakan sebagai bahan bakar, baik secara langsung maupun setelah diproses melalui serangkaian proses yang dikenal dengan konversi biomassa [4]. Biomassa masih sangat potensial untuk dikembangkan menjadi energi terbarukan untuk mengurangi atau bahkan menggantikan energi fosil yang semakin lama semakin menipis dan juga merusak alam. Potensi limbah biomassa sangat melimpah di Indonesia dengan perkiraan tiap tahunnya sebesar 123.5 juta ton [5]. Tetapi biomassa memiliki beberapa kendala untuk dibakar secara langsung, yaitu biomassa memiliki nilai kalor yang rendah, densitas energi tiap satuan volumenya rendah, serta mempunyai emisi *particulate matter* yang tinggi [6]. Karena itu diperlukan pengolahan biomassa sebelum digunakan sebagai bahan bakar. Salah satu contoh pengolahan biomassa sebagai bahan bakar adalah dengan pembuatan *wood pellet*, yang merupakan hasil densifikasi serbuk dari olahan kayu dengan atau tanpa campuran biomassa yang lainnya.

Wood pellet mulai digunakan sebagai bahan bakar boiler pada industri dan dalam pembakaran *co-firing* pada pembangkit listrik tenaga uap [7,8]. Selain itu *wood pellet* juga banyak digunakan pada industri kecil dan menengah, sebagai sumber panas untuk proses pengeringan ataupun memasak [9,10]. Untuk mengkonversi bahan bakar *wood pellet* menjadi panas dapat menggunakan ruang bakar yang disebut *wood pellet stove*. Desain yang sesuai dari *wood pellet stove* dapat menghasilkan pembakaran yang efisien dengan emisi yang rendah [11,12]. Pembakaran yang sempurna, perpindahan panas yang optimal dari nyala api ke peralatan yang memerlukan dan efisiensi *wood pellet stove* sangat dipengaruhi oleh desain *wood pellet stove*, yang meliputi dimensi ruang bakar dan distribusi udara pembakaran [12-14]. Pengukuran efisiensi *wood pellet stove* dilakukan dengan metode *Water Boiling Test* (WBT) [15].

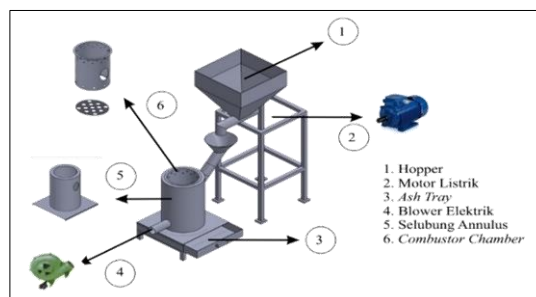
Jumlah udara yang sesuai akan menghasilkan pembakaran yang sempurna dengan temperatur nyala api yang tinggi. Formula untuk menentukan aliran udara pembakaran yang optimum dikembangkan oleh [16]. Selain jumlah, pembagian suplai udara ke ruang bakar sebagai udara primer, sekunder dan tersier juga sangat mempengaruhi kualitas pembakaran di dalam *stove*. Udara dari saluran udara masuk ke plenum dan selanjutnya masuk ke ruang bakar melalui lubang udara primer, sekunder dan tersier. Kecepatan udara pembakaran juga mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap kualitas dan temperatur pembakaran di dalam tungku gasifikasi sekam padi [17].

Berbagai penelitian mengenai *wood pellet stove* telah banyak dilakukan untuk mendapatkan *stove* dengan performa yang baik seperti efisiensi pembakaran yang tinggi dan minimalisir emisi *particulate matter*, serta perpindahan panas dari nyala api yang optimal. Salah satu variabel yang mempengaruhi karakteristik pembakaran pada *wood pellet stove* secara signifikan adalah aliran udara pembakaran. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari arah aliran dan posisi injeksi udara pembakaran terhadap karakteristik pembakaran dan efisiensi *wood pellet stove*. Udara pembakaran diinjeksikan ke dalam plenum sebelum masuk ke ruang bakar. Dengan arah aliran dan titik injeksi udara yang tepat diharapkan dapat menghasilkan *wood pellet stove* dengan pembakaran yang sempurna dan efisiensi yang tinggi.

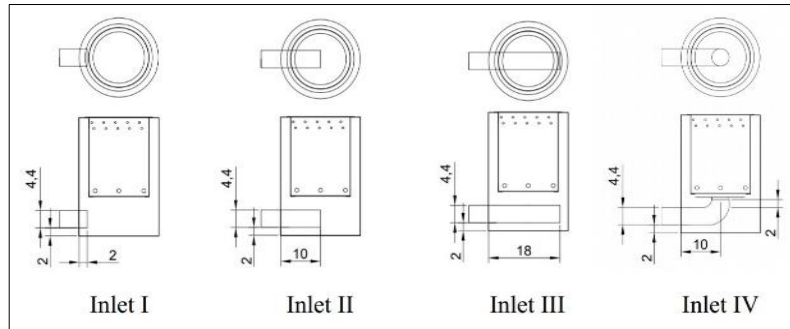
2. METODE DAN BAHAN

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan metode *experimental research* yang dilakukan untuk mengetahui pengaruh arah aliran udara terhadap karakteristik pembakaran *wood pellet stove* dengan menggunakan *continuous feeding* untuk sistem suplai bahan bakar. *Wood pellet stove* yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 1. *Stove* terdiri dari ruang bakar yang diselubungi oleh *annulus chamber* (plenum), sistem pengumpan bahan bakar (*hopper* dengan *screw feeder* dan motor listrik), serta blower untuk mengalirkan udara pembakaran. Arah aliran udara masuk ke plenum *wood pellet stove* divariasikan 4 macam yaitu inlet I, inlet II, inlet III dan inlet IV. Pada variasi inlet I, inlet II dan inlet III udara masuk ke plenum *wood pellet stove* pada arah radial dengan titik injeksi berturut-turut pada $r = -8, 0$ dan 8 cm. Sedangkan pada variasi inlet IV udara masuk ke plenum *wood pellet stove* pada arah aksial di titik $r = 0$. Titik $r = 0$ adalah titik pusat ruang bakar yang berbentuk silinder. Dari plenum selanjutnya udara akan masuk ke ruang bakar melalui lubang saluran udara primer yang terletak pada bagian bawah ruang bakar, lubang udara sekunder yang terletak di sekeliling ruang bakar bagian bawah ataupun melalui lubang udara tersier yang terdapat di sekeliling ruang bakar bagian atas. Variasi arah aliran udara masuk ke plenum akan menentukan jumlah udara yang masuk ke ruang bakar sebagai udara primer, sekunder atau tersier. Arah aliran udara masuk ke *wood pellet stove* dapat dilihat pada Gambar 2. Karakteristik pembakaran *wood pellet stove* yang diamati meliputi visualisasi nyala api, temperatur api, laju pembakaran dan efisiensi *wood pellet stove*.



Gambar 1. *Wood pellet stove*



Gambar 2. Variasi arah aliran udara ke plenum *wood pellet stove*

Wood pellet yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk silinder dengan diameter 8 mm dan terbuat dari serbuk kayu sengon. Panjang *wood pellet* bervariasi antara 3 - 5 cm. Hasil analisis *proximate* untuk *wood pellet* ditunjukkan pada Tabel 1.

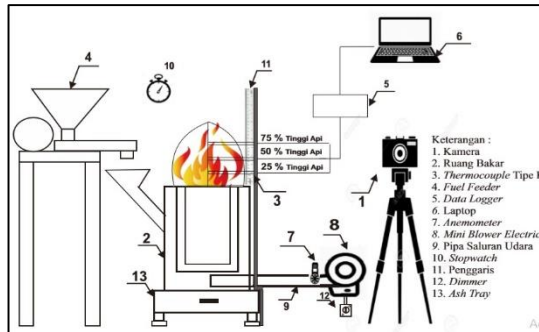
Tabel 1: Hasil uji *proximate wood pellet*.

Parameter	Satuan	Nilai
Kadar Uap	% wt	7.86
Kadar Abu	% wt	1.26
Volatile Matter	% wt	74.89
Fixed Carbon	% wt	15.99
Total Sulfur	% wt	0.07
High Heating Value	kcal/kg	4523
Low Heating Value	kcal/kg	4210

2.2 Pengujian Pembakaran pada *Wood Pellet Stove*

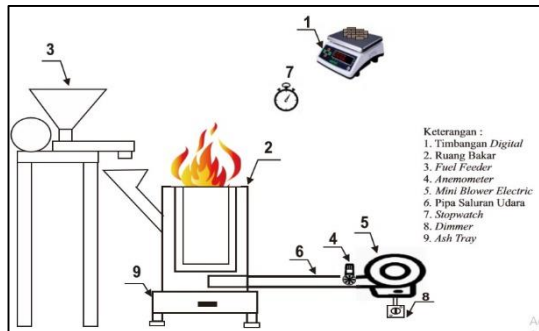
Pengujian pembakaran dilakukan di dalam ruang bakar *stove*, dimana *wood pellet* sebanyak 200 gram diletakkan di dalam *combustor chamber* dan dinyalakan dengan menambahkan spirtus sebanyak 20 mL. Spirtus digunakan sebagai pemicu awal nyala api pada pembakaran *wood pellet* di dalam *combustor chamber*, untuk mendapatkan nyala api stabil. Setelah dua menit dan nyala api *wood pellet* sudah cukup merata, blower dinyalakan sesuai dengan kecepatan yang telah ditentukan. Setelah 3 menit dan nyala api *wood pellet* didalam *combustor chamber* stabil, maka dimulailah proses *feeding wood pellet*. Motor listrik menyala selama 7 detik dan mati selama 53 detik, menghasilkan aliran *wood pellet* sebesar 42 gram/menit. Pembakaran pada *wood pellet stove* dengan pengumpanan bahan bakar secara intermitten dan kontinyu diamati. Kecepatan udara pembakaran pada saluran keluar blower dalam setiap pengujian dijaga konstan sebesar 2.56 m/s, besar kecepatan diukur menggunakan *anemometer* untuk memperoleh nilai yang sesuai. Putaran blower diatur menggunakan *dimmer* untuk mendapatkan kecepatan udara yang telah ditentukan. Pembakaran pada *wood pellet stove* dilakukan pada kondisi tersebut diatas, dan dilakukan beberapa pengujian mengenai karakteristik pembakaran yang meliputi visualisasi nyala api, temperatur nyala api, laju pembakaran, dan efisiensi. Pengujian efisiensi *wood pellet stove* dilakukan dengan metode *water boiling test*.

Skema pengujian visualisasi dan temperatur nyala api ditunjukkan pada Gambar 3. Pembakaran pada *wood pellet stove* dilakukan seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya. Selanjutnya pada dinding luar ruang bakar diletakkan penggaris untuk mengukur ketinggian nyala api. Proses pembakaran direkam menggunakan video kamera. Pengambilan data menggunakan kamera untuk mengetahui bentuk, tinggi dan evolusi api yang terbentuk dari pembakaran dengan pengumpanan bahan bakar *continuous feeding*. Pengamatan visualisasi nyala api dilakukan selama 7 kali siklus pengumpanan bahan bakar. Dari hasil visualisasi nyala api akan ditentukan tinggi rata-rata nyala api. Tinggi nyala api yang diperoleh dari penelitian ini digunakan sebagai referensi titik pengukuran temperatur nyala api. Temperatur nyala api diukur pada titik yang terletak pada 25%, 50% dan 100% tinggi api.



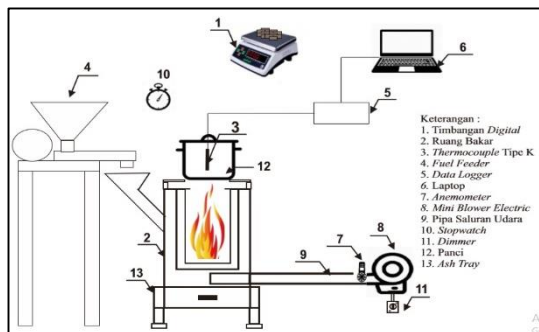
Gambar 3. Skema instalasi pengujian visualisasi dan temperatur nyala api

Pengukurann temperatur api menggunakan tiga sensor termokopel tipe K dengan diameter 0.2 mm, yang diletakkan pada tiga titik secara vertikal yaitu pada 25% tinggi api, 50% tinggi api dan 75% tinggi api yang diukur dari mulut *stove*. Peletakan titik tersebut berdasarkan beberapa kali percobaan dan observasi awal yang dilakukan, dilihat dari kecenderungan tinggi api dari visualisasi nyala api yang dihasilkan pada setiap variasi. Sensor termokopel dihubungkan dengan data logger Advantech dan personal komputer. Hasil pengukuran temperatur tersimpan dalam bentuk file excel.



Gambar 4. Skema instalasi pengujian laju pembakaran

Skema pengujian laju pembakaran ditunjukkan pada Gambar 4. Laju pembakaran ditentukan dari massa bahan bakar yang terbakar dibagi dengan lama/waktu pembakaran. Massa bahan bakar diperoleh dari massa awal bahan bakar dikurangi dengan massa bahan bakar yang tersisa di dalam *combustion chamber* ditambah dengan massa abu yang terdapat pada *ash tray*. Proses pengukuran massa bahan bakar yang terbakar dan waktu pembakaran dilakukan setelah 7 periode pengumpanan bahan bakar. Pada akhir periode pengumpanan bahan bakar yang ketujuh, nyala api dimatikan, bahan bakar yang tersisa dan abu ditimbang pada timbangan digital dengan skala pengukuran terkecil sebesar 0,1 gram.



Gambar 5. Skema instalasi pengujian *water boiling test*

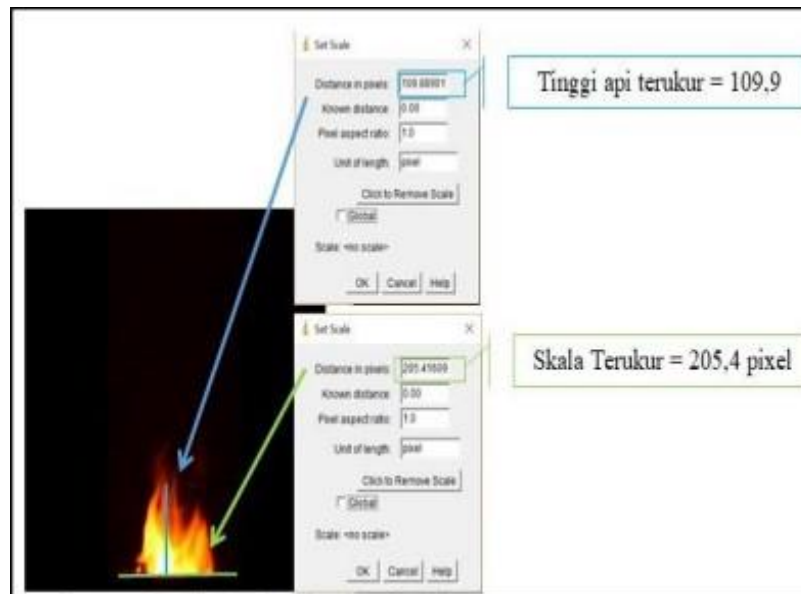
Efisiensi *wood pellet stove* diuji dengan metode *water boiling test*. Skema pengujian *water boiling test* ditunjukkan pada Gambar 5. Efisiensi dihitung berdasarkan kalor yang dimanfaatkan untuk pemanasan dan penguapan air dibandingkan terhadap kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran pada *wood pellet stove*. Wadah berisi air dengan volume 2.5 L dipanaskan dan diuapkan pada *wood pellet stove*. Kalor untuk pemanasan dan penguapan air terdiri dari kalor sensibel untuk menaikkan temperatur dan kalor laten untuk penguapan air. Kalor yang dihasilkan dari proses pembakaran dihitung dari massa bahan bakar dikalikan dengan *low heating value* dari *wood pellet* yang digunakan.

3. HASIL DAN DISKUSI

Dari penelitian yang telah dilakukan, diperoleh data visualisasi nyala api, temperatur nyala api, massa *wood pellet* yang terbakar selama pengujian, waktu pembakaran, kenaikan temperatur air dan massa air yang menguap selama *boiling water test*. Proses pengolahan data dan hasilnya ditampilkan pada grafik dalam sub bab berikut.

3.1 Pengukuran tinggi api

Dari pengambilan data visualisasi nyala api didapatkan data berupa visualisasi api yang dihasilkan dari proses pembakaran *wood pellet* dalam bentuk video. Data visualisasi nyala api dalam bentuk video yang telah diperoleh dari pengambilan data selanjutnya diolah menjadi beberapa bagian foto. Pada pengolahan data pengukuran tinggi api digunakan visualisasi api pada saat pengumpanan bahan bakar yang ke-6 berlangsung dari setiap variasi arah aliran udara dengan durasi selama 1 menit, dan selanjutnya pengambilan foto pada data visualisasi dilakukan pada setiap 5 detik sekali sehingga dihasilkan 12 buah foto dari satu variasi. Proses pengambilan 12 buah foto dilakukan dengan memecah video pada setiap akhir 5 detik didalam periode rekaman video selama 60 menit. Pada detik ke-5, data visualisasi nyala api yang masih berbentuk video kemudian dipecah menjadi 30 foto (kamera yang digunakan memiliki fps sebesar 30, sehingga 1 detik di video sama dengan 30 foto). Dari foto-foto tersebut kemudian dipilih satu foto dengan visualisasi api yang mewakili bentuk api dari foto-foto tersebut. Selanjutnya hal yang sama dilakukan pada setiap kelipatan 5 detik seperti detik ke-10, detik ke-15 dan seterusnya. Data yang sudah diolah menjadi bentuk foto tersebut kemudian diolah menggunakan aplikasi ImageJ. Berikut adalah salah satu hasil pengolahan data tinggi api pada ruang bakar dengan arah aliran udara inlet IV.



Gambar 6. Visualisai nyala api pada variasi inlet IV

Perhitungan tinggi nyala api ditentukan dengan membandingkan jumlah pixel dalam panjang api yang terukur terhadap jumlah pixel suatu skala panjang yang ukurannya sudah diketahui. Gambar 6 menunjukkan data yang diperoleh dari eksperimen, dan perhitungan tinggi nyala api dilakukan sebagai berikut:

Jumlah pixel pada pengukuran tinggi api = 109.9 pixel

Jumlah pixel pada pengukuran skala terukur = 205.4 pixel

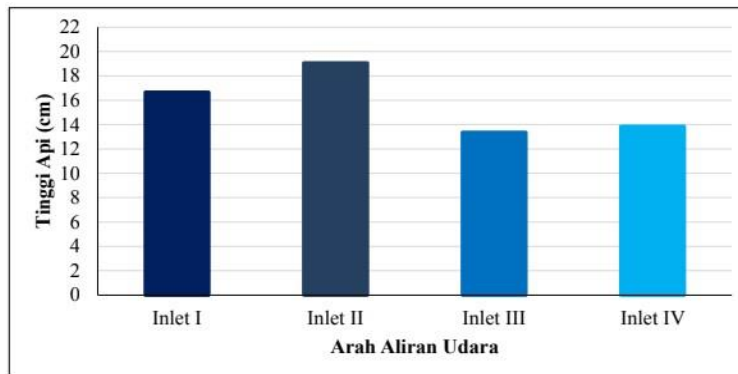
Panjang skala sebenarnya = 20 cm

$$\begin{aligned} \text{Tinggi api sebenarnya} &= (\text{Panjang skala sebenarnya} : \text{Jumlah pixel skala}) \times \text{Jumlah pixel api terukur} \\ &= (20 \text{ cm} : 205.4 \text{ pixel}) \times 109.9 \text{ pixel} \\ &= 10.7012 \text{ cm} \approx 10.7 \text{ cm} \end{aligned}$$

3.2 Pengaruh variasi arah aliran udara terhadap visualisasi nyala api pada *wood pellet stove*

Gambar 7 menunjukkan tinggi nyala api rata-rata untuk setiap variasi arah aliran udara pembakaran. Grafik tersebut menunjukkan tinggi api rata-rata yang dihasilkan proses pembakaran dalam satu siklus pengumpanan bahan bakar. Tinggi nyala api rata-rata pada *wood pellet stove* dengan inlet I, inlet II, inlet III dan inlet IV berturut-turut sebesar 16.67 cm, 19.05 cm, 13.35 cm dan 13.85 cm. Nyala api yang paling tinggi terjadi pada *wood pellet stove* dengan inlet II, dimana udara pembakaran masuk ke plenum pada arah radial dengan titik injeksi pada $r = 0$. Sebaliknya nyala api yang paling rendah terjadi pada *wood pellet stove* dengan inlet III. Pada

ruang bakar terdapat 3 jenis lubang udara, dimana udara dari plenum masuk ke daerah reaksi pembakaran, yaitu lubang udara primer, sekunder dan tersier. Lubang udara primer terletak pada bagian alas ruang bakar yang berbentuk silinder, sedangkan lubang udara sekunder dan tersier terletak pada sekeliling silinder, berturut-turut pada bagian bawah dan atas.

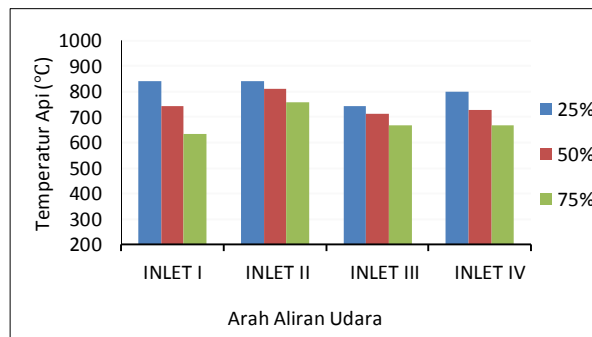


Gambar 7. Pengaruh arah aliran udara terhadap tinggi api rata-rata pada *wood pellet stove*

Variasi arah aliran udara masuk ke plenum *wood pellet stove* mempengaruhi jumlah udara yang mengalir melalui lubang udara primer, sekunder dan tersier. Pada *stove* dengan inlet I dan inlet II, udara masuk ke bagian plenum yang terdapat di bagian bawah ruang bakar, sehingga sebagian besar udara masuk ke ruang bakar sebagai udara primer. Arah aliran udara ini juga mengakibatkan distribusi udara pada setiap lubang udara primer yang tidak seragam, lebih besar pada satu bagian dan lebih kecil pada bagian lainnya. Hal ini menghasilkan kecepatan ke arah aksial yang lebih besar pada sebagian ruang bakar, sehingga menghasilkan nyala api yang lebih tinggi. Pada inlet IV, udara masuk ke plenum pada arah aksial tepat dibawah ruang bakar. Pada jarak 0.5 cm dari saluran udara dipasang plat sejajar dengan dasar ruang bakar, agar udara terdistribusi secara lebih merata melalui setiap lubang pada ruang bakar. Udara keluar pada arah aksial, kemudian terbelokkan secara merata ke arah radial dan masuk ke ruang bakar secara merata melalui lubang udara primer, sekunder dan tersier. Menghasilkan kecepatan aksial dalam ruang bakar yang lebih kecil dan nyala api yang lebih rendah. Demikian juga dengan aliran udara melalui inlet III, udara membentur dinding *annulus chamber*, tersebar merata ke seluruh plenum dan masuk ke ruang bakar melalui saluran udara primer, sekunder dan tersier. Kondisi ini menghasilkan nyala api yang lebih rendah sebagaimana pada *stove* dengan dengan inlet IV.

3.3 Pengaruh variasi arah aliran udara terhadap temperatur api rata-rata pada *wood pellet stove*

Gambar 8 menunjukkan temperatur nyala api pada *wood pellet stove* dengan variasi arah aliran udara. Temperatur nyala api diukur pada sumbu ruang bakar pada titik 25%, 50% dan 75% tinggi nyala api. Pengukuran temperatur nyala api dilakukan dalam 3 periode pengumpanan bahan bakar, yaitu pada pengumpanan ke 5 sampai 7. Temperatur selalu berfluktuasi dan merupakan fungsi dari waktu. Temperatur yang ditampilkan pada Gambar 8 adalah temperatur rata-rata pada setiap titik pengukuran. Secara umum terlihat bahwa nyala api pada tinggi 25% memiliki temperatur yang lebih tinggi, semakin ke atas temperatur nyala api semakin berkurang.



Gambar 8. Pengaruh arah aliran udara terhadap temperatur nyala api pada *wood pellet stove*

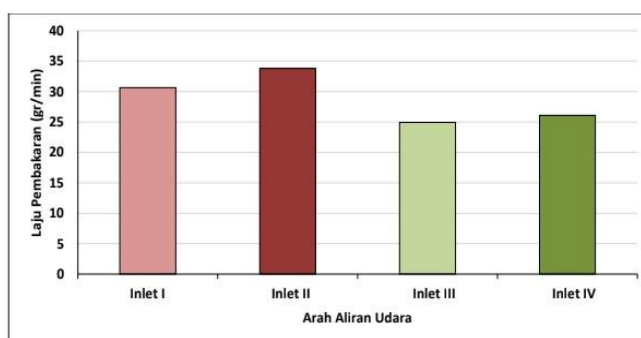
Gambar 8 menunjukkan bahwa *stove* dengan inlet I dan inlet II memiliki temperatur nyala api yang paling tinggi. Semakin besar persentase tinggi api (semakin jauh dari mulut *stove*), temperatur api semakin turun. Tetapi *stove* dengan inlet II memiliki penurunan temperatur yang lebih rendah dan distribusi temperatur yang lebih seragam sepanjang sumbu ruang bakar. Hal ini disebabkan inlet yang terletak pada tengah selubung

annulus dan ruang bakar, sehingga memungkinkan udara lebih banyak terdistribusi pada lubang udara primer, dari pada lubang udara sekunder dan tersier. Menghasilkan pembakaran yang lebih banyak disekitar sumbu ruang bakar, dengan nyala api yang lebih tinggi dan temperatur api yang lebih tinggi dan lebih seragam. Pada stove dengan inlet I, dimana udara masuk ke plenum pada ujung annulus mengakibatkan sebagian udara masuk ke lubang udara primer dan menghasilkan kecepatan aksial yang besar, dan sebagian udara lainnya masuk melalui saluran sekunder dan tersier dalam jumlah yang juga relatif banyak. Tetapi aliran udara ini tidak terdistribusi merata pada setiap lubang, mengakibatkan kecepatan yang tinggi pada satu sisi ruang bakar dan nyala api yang kurang merata. Kondisi ini menghasilkan nyala api yang sangat fluktuatif dan distribusi temperatur yang sangat besar sepanjang sumbu ruang bakar.

Stove dengan inlet III menghasilkan temperatur nyala api yang paling rendah, tetapi penurunan temperatur sepanjang sumbu nyala api yang sangat kecil. *Stove* ini memiliki distribusi temperatur yang paling seragam sepanjang sumbu ruang bakar. Rendahnya temperatur pada *stove* ini juga berhubungan dengan laju pembakaran yang lebih rendah, sebagaimana akan ditunjukkan pada sub bab berikut. *Stove* dengan inlet IV memiliki temperatur nyala api yang relatif tinggi dengan penurunan temperatur sepanjang sumbu ruang bakar yang agak besar. Besarnya temperatur nyala api dan distribusi temperatur nyala api sepanjang sumbu ruang bakar sangat dipengaruhi oleh aliran udara masuk dari plenum ke ruang bakar, pencampuran udara dan bahan bakar serta laju pembakaran di dalam ruang bakar. Hasil pengamatan ini menunjukkan bahwa inlet udara dengan titik injeksi pada bagian tengah / pusat ruang bakar menghasilkan temperatur nyala api yang lebih besar. Letak inlet pada tengah selubung anulus memiliki distribusi udara yang cenderung merata pada lubang udara primer, sekunder dan tersier sehingga temperatur yang dihasilkan akan cenderung tinggi dan nyala api lebih stabil.

3.4 Pengaruh variasi arah aliran udara terhadap laju pembakaran pada *wood pellet stove*

Laju pembakaran pada *wood pellet stove* dengan variasi arah aliran udara diperlihatkan pada Gambar 9.



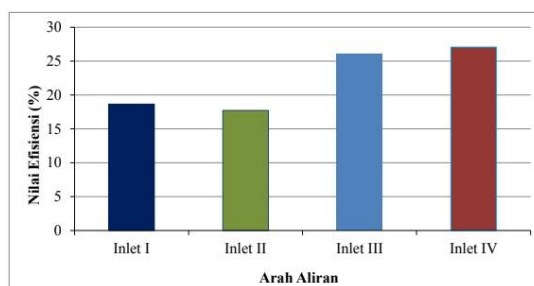
Gambar 9. Pengaruh variasi arah aliran udara terhadap laju pembakaran pada *wood pellet stove*

Gambar 9 menunjukkan bahwa *wood pellet stove* dengan inlet II dan inlet I memiliki laju pembakaran yang lebih besar bila dibandingkan dengan *wood pellet stove* dengan inlet III dan inlet IV. Hal ini menunjukkan bahwa pada *stove* dengan inlet I dan inlet II, sebagian besar udara masuk ke ruang bakar melalui saluran udara primer. Aliran udara primer melewati bahan bakar, sehingga menghasilkan proses pengeringan, volatilisasi dan reaksi dengan bahan bakar. Sehingga proses penguapan dan pembakaran bahan bakar menjadi lebih cepat, menghasilkan laju pembakaran yang lebih besar. Fenomena di atas juga dibuktikan dengan tinggi dan temperatur nyala api yang lebih besar pada *stove* dengan inlet I dan inlet II. Sebaliknya pada *stove* dengan inlet III dan IV, udara yang masuk ke ruang bakar melalui saluran udara primer lebih sedikit dengan kecepatan aksial yang lebih kecil. Hal ini bersesuaian dengan hasil visualisasi nyala api dengan dimensi api yang lebih rendah. Tetapi, nyala apinya mempunyai temperatur yang relatif sama dengan distribusi temperatur yang lebih seragam.

Pemilihan arah aliran udara, tidak hanya ditentukan berdasarkan laju pembakaran saja. Tetapi harus memperhatikan secara keseluruhan bagaimana laju pembakaran, visualisasi nyala api dan distribusi temperturnya, dan yang paling penting adalah efisiensinya.

3.5 Pengaruh variasi arah aliran udara terhadap efisiensi *wood pellet stove*

Gambar 10 menggambarkan efisiensi *wood pellet stove* dengan variasi arah aliran udara. *Wood pellet stove* dengan inlet III dan inlet IV mempunyai efisiensi yang lebih tinggi dari pada *stove* dengan inlet I dan inlet II, walaupun mempunyai laju pembakaran yang lebih rendah. Efisiensi yang tinggi diperlukan untuk mendapatkan pemakaian bahan bakar yang lebih ekonomis.



Gambar 10. Pengaruh variasi arah aliran udara terhadap efisiensi *wood pellet stove*

Wood pellet stove dengan inlet IV mempunyai efisiensi yang tertinggi sebesar 27.07%. Efisiensi *stove* dipengaruhi oleh dimensi nyala api dan distribusi temperatur nyala api, yang akan mempengaruhi efektivitas perpindahan panas dari nyala api ke media yang dipanaskan dan besar panas yang hilang ke lingkungan, baik secara konveksi ataupun radiasi. *Wood pellet stove* dengan inlet IV mempunyai tinggi nyala api yang lebih rendah dengan temperatur yang relatif sama dibandingkan *stove* dengan inlet I dan inlet II. Hasil ini menunjukkan bahwa tinggi api yang lebih rendah menghasilkan perpindahan panas yang lebih efektif, sehingga menghasilkan efisiensi yang lebih besar. *Stove* dengan inlet III memiliki laju pembakaran yang paling rendah, demikian juga temperatur nyala apinya juga paling rendah. Api memiliki dimensi yang rendah dengan distribusi temperatur yang paling seragam. Kondisi ini menghasilkan *stove* dengan efisiensi yang sedikit lebih rendah dari pada *stove* dengan inlet IV. Dapat dikatakan bahwa dimensi nyala api, temperatur api dan distribusi temperatur nyala api mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap efisiensi *stove*.

Dari pembahasan di atas dapat dilihat bahwa aliran udara primer yang dominan menghasilkan kecepatan aksial dalam ruang bakar yang besar. Hal ini berhubungan dengan laju pembakaran yang besar, serta ukuran dan temperatur nyala api yang lebih tinggi. Tetapi kondisi ini mengakibatkan perpindahan panas (dari nyala api ke media yang dipanaskan) kurang efektif, serta menyebabkan terjadinya *heat loss* yang lebih besar dari nyala api ke lingkungan. Sehingga efisiensi *stove* menjadi lebih rendah. Kondisi tersebut terjadi pada *stove* dengan inlet I dan II. Selanjutnya yang perlu diperhatikan adalah kecepatan proses memasak atau pemanasan dipengaruhi oleh laju perpindahan panas. *Stove* dengan efisiensi yang lebih tinggi bisa memerlukan waktu memasak yang lebih lama karena laju pembakaran dan pembangkitan panasnya yang lebih rendah.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa perbedaan arah aliran udara pada *stove* mempengaruhi jumlah aliran udara primer, sekunder dan tersier yang masuk ke ruang bakar, yang selanjutnya menghasilkan karakteristik pembakaran yang berbeda pada *wood pellet stove*. Bila udara pembakaran sebagian besar masuk ke ruang bakar melalui saluran udara primer, mengakibatkan laju pembakaran yang lebih besar, dengan geometri api dan temperatur nyala api yang lebih besar; tetapi mengakibatkan efisiensi *stove* yang lebih rendah karena besarnya *heat loss* ke lingkungan. Hal tersebut terjadi pada *wood pellet stove* dengan inlet I dan inlet II. Sebaliknya bila udara pembakaran masuk ke ruang bakar melalui saluran udara primer, sekunder dan tersier secara lebih merata, menghasilkan laju pembakaran yang lebih rendah dengan dimensi nyala api yang lebih rendah, tetapi memiliki temperatur nyala api yang relatif sama; dengan efisiensi *stove* yang lebih tinggi. Kondisi ini terjadi pada *wood pellet stove* dengan inlet IV. Efektivitas perpindahan panas dan efisiensi *stove* sangat dipengaruhi oleh dimensi nyala api, temperatur dan distribusi temperatur nyala api. *Stove* dengan inlet III memiliki karakteristik yang serupa *stove* dengan inlet IV.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] SUGANAL, HUDAYA, G.K., “Bahan bakar co-firing dari batubara dan biomassa tertorefaksi dalam bentuk briket (skala laboratorium)”, *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*, v. 15, n. 1, pp. 31-48, 2019.
- [2] YUDIARTONO, ANINDHITA, SUGIYONO, A., WAHID, L.M.A., ADIARSO, “ Outlook Energi Indonesia” Jakarta, Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIPE), 2018.
- [3] ANONIMOUS, “Statistik Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan”, Jakarta, Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2017.
- [4] PRANOTO, B., PANDIN, M., FITHRI, S.R., NASUTION, S., “Peta potensi limbah biomassa pertanian dan kehutanan sebagai basis data pengembangan energi terbarukan”, *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, v. 12, n. 2, pp. 123-130, Desember 2013.
- [5] PURWANTO, W.W., SUPRAMONO, D., FISAFARANI, H., “Biomass waste and biomass pellets characteristics and their potential in Indonesia”, *Proceeding of The 1st International Seminar on Fundamental and Application ISFACHe 2010 of Chemical Engineering*, pp. C004-1 – C004-8, Bali, Nov. 2010.
- [6] CHRISTOFER R, OHMAN M. & WASTERLUND, I., “Effect of raw material composition in woody

- biomass pellets on combustion characteristics”, *Biomass & Bioenergy*, v. 31, n. 1, pp. 66-72, 2007.
- [7] GUO, F., ZHONG, Z., “Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging”, *Environmental Pollution*, v. 239, pp. 21-29, 2018.
- [8] IEA., *Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing*, Enschede, Twente University Press, 2002.
- [9] BUCHMAYR, M., GRUBER, J., HARGASSNER, M. & HOCHENAUER, C., “Experimental investigation of the primary combustion zone during staged combustion of wood-chips in a commercial small-scale boiler”, *Biomass and Bioenergy*, v. 81, pp. 356-363, 2015.
- [10] GOGOI, B. & BARUAH D. C., “Steady state heat transfer modeling of solid fuel biomass stove: Part 1”, *Energy*, v. 97, pp. 283-295, 2016.
- [11] GANDIGUDE, A., NAGARHALLI, M., “Simulation of rocket cook-stove geometrical aspect for its performance improvement”, *Proceeding of Material Today*, v. 5, n. 2, pp. 3903-3908, 2018.
- [12] KUMAR, M. KUMAR, S. & TYAGI S. K., “Design, development and technological advancement in the biomass cookstoves: a review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 26, pp. 265-285, 2013.
- [13] IGBOANUGO, A.C. & AJIEH, M.U., “Design and construction of a biomass stove for cooking in rural settlements in Nigeria”, *Nigerian Research Journal of Engineering and Environmental Sciences*, v. 2, n. 2, pp. 351-359, 2017.
- [14] BURHANTORO, J., “Pengaruh distributor udara pada tungku gasifikasi updraft”, Skripsi, Surakarta, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2016.
- [15] BAILIS, R., OGLE, D., MACCARTY, N. & STILL, D., *The Water Boiling Test (WBT) version 4.12*, Household Energy and Health Programme, Shell Foundation, 2009.
- [16] JAIN, T. & SHETH, P.N., “Design of energy utilization test for a biomass cook stove: Formulation of an optimum air flow recipe”, *Energy*, v. 166, pp. 1097-1105, 2019.
- [17] HANDOYO, “Pengaruh kecepatan udara pada tungku gasifikasi sekam padi terhadap temperatur pembakaran”, Skripsi, Surakarta, Universitas Muhammadiyah Surakarta, 2013.