



Research Articles

Rancang Bangun dan Uji Eksperimental Performa Burner Biomassa Berbahan Bakar Limbah Nyamplung (*Calophyllum Inophyllum*) dan Pelet Kayu

Design, Fabrication, and Performance Test of Biomass Burner Using Nyamplung Kernel Cake (*Calophyllum Inophyllum*) and Wood Pellet

Mochamad Syamsiro^{1,2*}, Nurcaya Putra Anwar¹, Siti Rochmah Ika², Agus Mulyono², Feri Febria Laksana³, Fadmi Rina³

¹Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra, Jl. TR Mataram 55-57 Yogyakarta 55231

²Center for Waste Management and Bioenergy, Universitas Janabadra, Jl. TR Mataram 55-57 Yogyakarta 55231

³Fakultas Teknologi Informasi, Universitas Nahdlatul Ulama Yogyakarta, Jl. Ringroad Barat, Dowangan, Banyuraden, Gamping, Sleman, Yogyakarta 55293
**corresponding author, email: syamsiro@janabadra.ac.id*

Manuscript received: 16-10-2024. Accepted: 22-12-2024

ABSTRAK

Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki potensi biomassa yang melimpah karena tanaman dapat tumbuh sepanjang tahun. Diantara beberapa jenis biomassa, limbah nyamplung memiliki potensi tinggi untuk digunakan sebagai sumber energi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengembangkan burner biomassa dan menguji performanya menggunakan limbah nyamplung dan pelet kayu sebagai pembanding. Uji performa burner dirancang untuk mengkaji pengaruh laju aliran massa udara terhadap nyala api pembakaran, laju pelepasan kalor, dan efisiensi termal untuk kedua jenis biomassa. Efisiensi termal burner dihitung menggunakan metode *water boiling test* (WBT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limbah nyamplung menghasilkan nyala api pembakaran yang lebih panjang pada laju aliran udara 146 dan 219 g/s. Semakin tinggi laju aliran udara, semakin panjang nyala api. Pembakaran limbah nyamplung dan pelet kayu menghasilkan nyala api terpanjang, yaitu 80 cm dengan laju aliran massa udara 290 g/s. Hasil eksperimen juga menunjukkan bahwa pelet kayu menghasilkan suhu yang lebih tinggi daripada limbah nyamplung. Temperatur pembakaran tertinggi dihasilkan oleh pelet kayu, mencapai 818,1°C dengan laju aliran massa udara 290 g/s. Dari kedua jenis biomassa yang dievaluasi, pembakaran pelet kayu menghasilkan lebih banyak panas daripada limbah nyamplung. Laju pelepasan panas tertinggi sebesar 35,46 kW dicapai pada laju aliran massa udara 290 g/s. Pembakaran limbah nyamplung menghasilkan efisiensi termal maksimum, 30,35% pada laju aliran massa udara 219 g/s.

Kata kunci: burner; biomassa; limbah nyamplung; pelet kayu; efisiensi termal

ABSTRACT

As a tropical country, Indonesia has abundant biomass potential because plants grow all year. Among the several types of biomass, nyamplung kernel cake (NKC) has a high potential for use as an energy source. The goal of this research was to develop a biomass burner and evaluate its performance using NKC and wood pellets (WP) as comparisons. The burner performance test is designed to investigate the effect of air mass flow rate on combustion flame, heat release rate, and thermal efficiency for both types of biomass. The thermal efficiency of the burner was calculated using the water boiling test (WBT). The results revealed that using NKC resulted in a longer combustion flame at air flow rates of 146 and 219 g/s. The higher the air flow rate, the longer the flame. The combustion of NKC and WP produced the longest flame, measuring 80 cm with an air mass flow rate of 290 g/s. The experiment also demonstrated that WP produced a higher temperature than NKC. The highest combustion temperature was produced by WP, reaching 818.1°C with an air mass flow rate of 290 g/s. From the two types of biomass evaluated, WP combustion produced more heat than NKC. The highest heat release rate of 35.46 kW was achieved with an air mass flow rate of 290 g/s. The burning of NKC resulted in the maximum thermal efficiency, 30.35% at an air mass flow rate of 219 g/.

Key words: burner; biomass; nyamplung kernel cake; wood pellets; thermal efficiency

PENDAHULUAN

Selain energi fosil seperti minyak bumi dan batubara, Indonesia juga mempunyai sumber energi terbarukan yang melimpah diantaranya biomassa, surya (Călin et al., 2021), angin (Desalegn et al., 2022), air (Sonjaya et al., 2023), dan panas bumi (Lund & Toth, 2021). Diantara sumber energi terbarukan ini, biomassa memiliki potensi yang sangat melimpah karena posisi Indonesia yang ada di daerah tropis, sehingga tanaman dengan mudah tumbuh sepanjang tahun. Berbagai sumber biomassa telah dimanfaatkan seperti dari limbah padi berupa sekam dan jerami (Chen et al., 2021), ampas tebu (Manatura, 2020), limbah kelapa sawit (Syamsiro et al., 2019), limbah sagu (Syamsiro et al., 2020), limbah nyamplung (Syivarulli et al., 2021), dan masih banyak lagi yang lainnya.

Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi dapat dilakukan secara langsung maupun dengan proses pre-treatment untuk memperbaiki karakteristiknya seperti menurunkan kadar air dan meningkatkan kadar karbon terikat melalui beberapa proses seperti torrefaksi (Yu et al., 2019; Syamsiro et al., 2019), dan hydrothermal treatment (Surahmanto et al., 2021). Dengan demikian maka nilai kalor biomassa akan meningkat dan proses pembakaran menjadi lebih baik.

Pengembangan buah nyamplung sebagai bahan bakar telah dikembangkan oleh Wijaya et al. (2023) dalam bentuk biobriket dan kemudian dikaji laju pembakaran, densitas, dan nilai kalornya. Sementara itu, cangkang nyamplung juga telah diteliti sebagai campuran briket tempurung kelapa dengan menganalisis nilai kalor dan laju pembakarannya (Irbah et al., 2022). Metode pirolisis juga telah dilakukan untuk menghasilkan bio-oil dari limbah pressan biji nyamplung. Nilai kalor bio-oil yang dihasilkan bisa mencapai 8922 cal/g (Devitra et al., 2022).

Untuk menjamin proses pembakaran yang sempurna pada biomassa, maka proses pembakaran tradisional digantikan dengan pembakaran menggunakan tungku atau burner dengan suplai udara dari blower. Beberapa model tungku dan burner telah diujikan oleh sejumlah peneliti diantaranya yaitu Jain dan Sheth (2019) dengan melakukan pengujian *water boiling test* (WBT) menggunakan pelet biomassa. Hasilnya menunjukkan bahwa pengaturan variasi aliran udara sepanjang proses pembakaran akan meningkatkan efisiensi termal tungku.

Segun et al. (2024) melakukan studi performa tungku biomassa modifikasi menggunakan tiga jenis briket. Hasilnya menunjukkan bahwa tungku model baru ini dapat menurunkan asap secara signifikan dibandingkan dengan tungku biasa. Hal ini dikarenakan karena terjadi pembakaran sempurna di dalam ruang bakar dengan kehilangan panas yang minimal karena penggunaan lapisan tanah liat sebagai isolatornya. Sementara itu Victorio & Siregar (2022) melakukan pengujian kompor gasifikasi biomassa menggunakan tempurung kelapa sebagai bahan bakarnya. Efisiensi termal terbaik diperoleh pada kompor dengan diameter lubang burner 12 mm. Pengaruh variasi lubang udara pada kompor biomassa telah diteliti oleh Pambudi et al. (2019) dan hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi termal tertinggi sebesar 78% diperoleh pada variasi 18 lubang. Suplai udara yang semakin banyak menyebabkan efisiensi termal semakin meningkat.

Namun demikian, dari sekian banyak pengujian tungku dan burner biomassa, belum ada yang mengujinya menggunakan bahan dari limbah nyamplung. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini untuk membuat rancang bangun burner biomassa dan menguji performanya menggunakan limbah nyamplung dan pelet kayu (*wood pellet*) sebagai pembandingnya yang potensinya besar untuk dijadikan bahan bakar tungku. Burner biomassa ini dapat digunakan sebagai pemanas pada proses pirolisis plastik sebagai pengganti LPG (Susilo & Teja Kusuma, 2022) dengan pertimbangan biaya yang lebih murah. Hal ini dikarenakan biaya energi ini menjadi komponen utama pada proses pirolisis yang sangat berpengaruh pada keekonomian proses tersebut. Penggunaan burner biomassa ini juga dapat menggantikan kompor minyak tanah dan gas sehingga akan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil menuju transisi energi yang berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Rancang Bangun Burner Biomassa

Penelitian ini dimulai dengan melakukan perancangan dan fabrikasi burner biomassa. Rancangan ini dibuat dengan mempertimbangkan beberapa aspek seperti biaya, ketersediaan material, kemudahan fabrikasi dan operasional, sehingga dapat dikerjakan oleh bengkel lokal. Kemudahan perawatan juga menjadi pertimbangan dalam rancang bangun burner biomassa ini. Perancangan mesin ini dilakukan per bagian dari keseluruhan unit yang meliputi : hopper dan feeder biomassa, suplai udara, ruang bakar utama,udukan burner, dan ruang penampungan abu sisa pembakaran. Setelah seluruh bagian selesai dirancang, maka kemudian dilanjutkan dengan proses fabrikasi.

Bahan Penelitian

Bahan baku yang digunakan sebagai bahan bakar burner biomassa adalah limbah nyamplung hasil dari perasan biji nyamplung dan pelet kayu. Kedua material tersebut mewakili biomassa dengan densitas energi yang rendah dan tinggi. Limbah perasan biji nyamplung diperoleh dari Badan Usaha Milik Desa (BUMDes) Panggung Lestari, Kecamatan Sewon, Kabupaten Bantul dimana di lokasi ini terdapat unit pengolahan nyamplung untuk dijadikan bahan baku industri kosmetik. Pelet kayu didapatkan dari PT. Mahya Bioenergi, Boyolali selaku produsen pelet kayu yang berorientasi ekspor. Bentuk dari kedua bahan baku tersebut dapat dilihat pada Gambar 1. Pelet kayu yang diproduksi memiliki spesifikasi: material dari campuran kayu (albasia dan mahoni), nilai kalor 4000-4600 kcal, diameter pelet 6 mm, dan

tingkat kekeringan 7-9 %. Ukuran pelet kayu tersebut merupakan dimensi standar komersial yang berlaku di seluruh dunia.



Gambar 1. Limbah nyamplung dan pelet kayu yang digunakan pada uji performa burner.

Pengujian Performa Burner

Pengujian performa burner bertujuan untuk mengetahui pengaruh laju aliran massa udara terhadap nyala api pembakaran, laju pelepasan panas, dan efisiensi termal untuk kedua jenis biomassa. Pengukuran laju aliran udara menggunakan anemometer digital berdasarkan bukaan blower untuk mendapatkan kecepatan udara masuk ke ruang bakar. Kemudian laju aliran udara diperoleh berdasarkan persamaan berikut ini :

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \tag{1}$$

dimana :

- \dot{m} = laju aliran massa udara (kg/dtk)
- ρ = densitas (kg/m³)
- A = luas penampang (m²)
- V = kecepatan aliran (m/dtk)

Selanjutnya laju pelepasan panas diperoleh berdasarkan persamaan berikut ini :

$$HRR = \dot{m} \times LHV \tag{2}$$

dimana :

- HRR = laju pelepasan panas (kW)
- LHV = nilai kalor biomassa (kJ/kg)

Efisiensi termal burner dihitung menggunakan uji *water boiling test* (WBT) yang umum digunakan pada pengujian efisiensi tungku biomassa. Termokopel tipe-K digunakan untuk mengukur temperatur api dan temperatur air yang dimasak. Diagram alir proses uji performa burner biomassa ditunjukkan oleh Gambar 2.

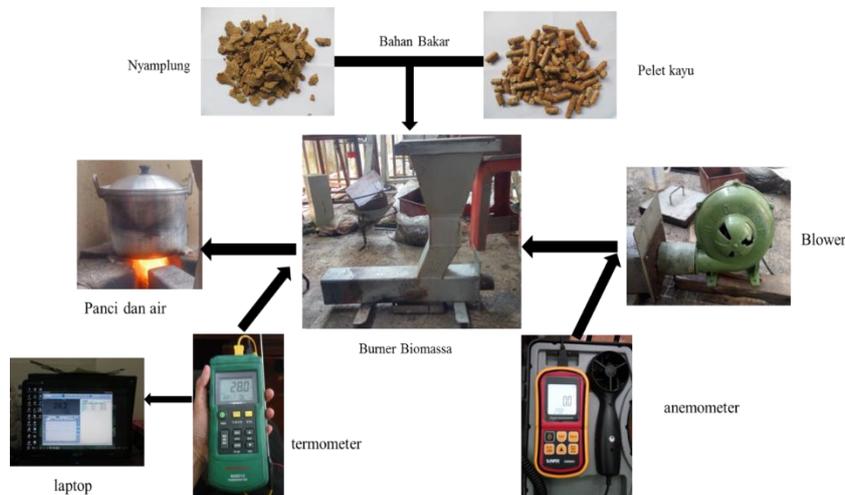
Efisiensi termal burner dihitung menggunakan formula sebagai berikut :

$$\eta_{th} = \frac{4,186 \cdot (P_{cl} - P_c) \cdot (T_{cf} - T_{ci}) + 2260 \cdot W_{cv}}{F_{ci} \times LHV} \times 100\% \tag{3}$$

dimana :

- η_{th} = efisiensi termal (%)
- P_{cl} = massa awal panci & air (kg)
- P_c = massa panci (kg)
- T_{ci} = temperatur air mula-mula (°C)
- T_{cf} = temperatur air setelah pengujian (°C)
- W_{cv} = massa air yang menguap (kg)

F_{ci} = massa bahan bakar (kg)

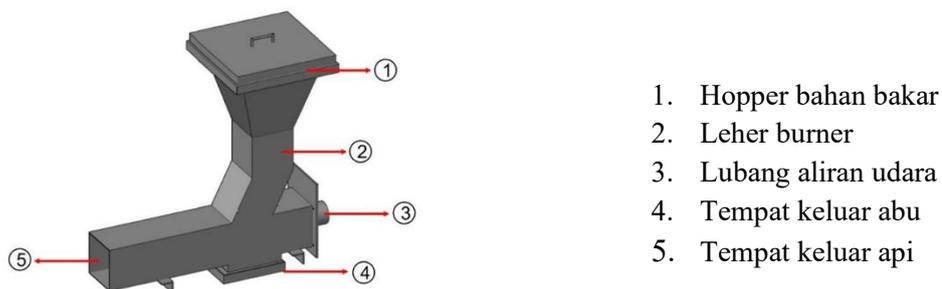


Gambar 2. Diagram alir proses uji coba performa burner biomassa berbahan bakar limbah nyamplung dan pelet kayu.

HASIL DAN PEMBAHASAN

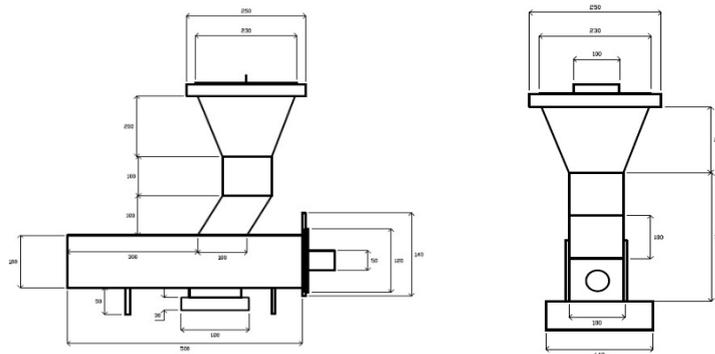
Model burner yang dirancang pada penelitian ini berbahan bakar biomassa dengan menggunakan blower sebagai pensuplai udara pada saat proses pembakaran. Dalam merancang burner biomassa diperlukan komponen-komponen yang memiliki fungsi masing-masing sehingga mampu memenuhi kebutuhan yang diharapkan. Hasil rancangan tiga dimensi burner biomassa ditunjukkan oleh Gambar 3.

Pada bagian atas terdapat hopper sebagai tempat masuknya bahan bakar biomassa. Hopper ini dilengkapi dengan tutup burner yang didesain dengan kelengkapan alur air untuk mencegah kebocoran dan memblok asap atau udara tidak keluar melalui bagian atas ini. Leher burner didesain berbentuk elbow atau miring engan mempertimbangkan beberapa faktor yaitu, agar tidak terjadinya udara balik ketika proses pembakaran, dan berfungsi juga ketika proses masuknya bahan bakar agar tidak langsung mengenai api ketika proses pembakaran yang dapat mengakibatkan matinya api karena tertutup oleh bahan bakar baru.



Gambar 3. Hasil rancangan burner biomassa.

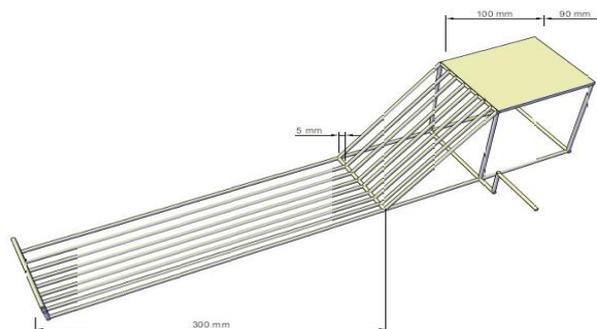
Pada lubang masuknya udara, diameter disesuaikan dengan diameter dari blower sebagai penyuplai udara pada proses pembakaran dan penempatan lubang masuknya udara juga di desain di belakang burner agar proses pembakaran bisa terjadi secara maksimal.



Gambar 4. Gambar tampak depan dan tampak samping desain 2D burner biomassa.

Tempat air di bagian bawah burner berfungsi sama dengan tempat air pada bagian atas burner, yaitu sebagai media pengeblokan asap. Selain itu air yang ada berguna sebagai pengeblokan abu dari bahan bakar yang sudah terbakar agar tidak terbang kemana-mana.

Ruang bakar dilengkapi dengan rangka yang terbuat dari batang besi yang telah didesain ukuran kerapatannya lebih kecil dari pada besarnya bahan bakar yang digunakan, kerapatannya yaitu 5mm. Fungsi dari rangka batang besi ini berguna untuk pembuangan abu dari biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar ketika proses pembakaran. Ruang bakar pada burner ini juga mempunyai kapasitas sebesar 4 kg sesuai dari perhitungan kapasitas ruang bakar.



Gambar 5. Desain rangka pembuangan abu.



Gambar 6. Hasil fabrikasi burner biomassa.

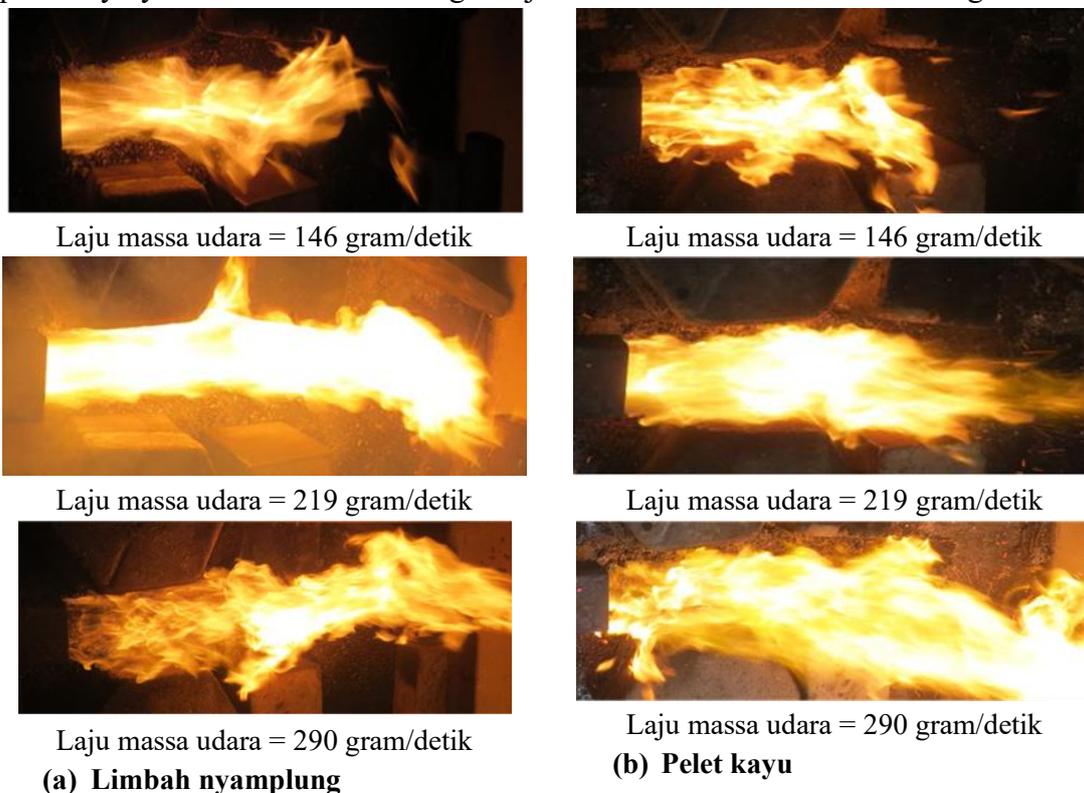
Uji Performa Burner Biomassa

Uji performa burner dilakukan untuk mengetahui karakteristik nyala api dan temperature yang dapat dicapai dari burner tersebut. Gambar 7(a) menunjukkan nyala api untuk pembakaran pada burner menggunakan limbah nyamplung, sedangkan Gambar 7(b) adalah

nyala api menggunakan pelet kayu. Hasilnya menunjukkan bahwa penggunaan limbah nyamplung menghasilkan penyalaan api yang lebih panjang pada laju aliran udara 146 dan 219 gram/detik.

Hal ini kemungkinan disebabkan karena pada limbah nyamplung tidak dilakukan proses pembriketan, sehingga densitasnya lebih rendah dan ini berakibat pada mudah terbakarnya bahan bakar dikarenakan kontak permukaan bahan bakar dan oksigen yang lebih luas dan potensi oksigen menembus sela-sela bahan bakar.

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa semakin tinggi laju aliran udara, maka nyala api akan semakin panjang. Hal ini dikarenakan oleh suplai oksigen yang semakin banyak pada laju aliran yang lebih tinggi, sehingga proses reaksi pembakaran menjadi lebih cepat dan menghasilkan api besar. Oleh karena dorongan udara yang semakin besar, maka nyala api pun menjadi semakin panjang. Nyala api terpanjang diperoleh pada pembakaran limbah nyamplung dan pelet kayu yaitu sebesar 80 cm dengan laju aliran massa udara sebesar 290 gram/detik.



Gambar 7. Nyala api pembakaran burner biomassa menggunakan limbah nyamplung dan pelet kayu.

Sementara dari karakteristik apinya sendiri nampak tidak ada perbedaan yang mencolok antara kedua jenis bahan bakar. Komposisi biomassa yang secara umum hampir sama sehingga menghasilkan api yang tidak jauh berbeda.

Untuk melihat seberapa banyak energi panas yang ditransfer, maka dapat dilihat temperatur api yang dihasilkan. Tabel 1 menunjukkan temperatur api hasil pembakaran pada burner di dua titik yang berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa pelet kayu menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan limbah nyamplung. Hal ini dikarenakan oleh densitas pelet kayu yang lebih tinggi akibat proses pembriketan, sehingga menghasilkan densitas energi yang lebih tinggi. Sehingga energi yang dilepas per satuan waktunya menjadi lebih banyak dan berdampak pada temperatur api yang lebih tinggi. Nyala api burner ini

menghasilkan temperatur yang relatif lebih rendah dibandingkan dengan eksperimen yang dilakukan oleh Nurhadi et al. (2023) dimana temperaturnya mencapai angka 800-900°C. Hal ini dimungkinkan karena dalam eksperimen tersebut menggunakan campuran batubara dimana nilai kalornya lebih tinggi dari biomassa.

Tabel 1. Temperatur dan panjang nyala api burner biomassa menggunakan limbah nyamplung dan pelet kayu.

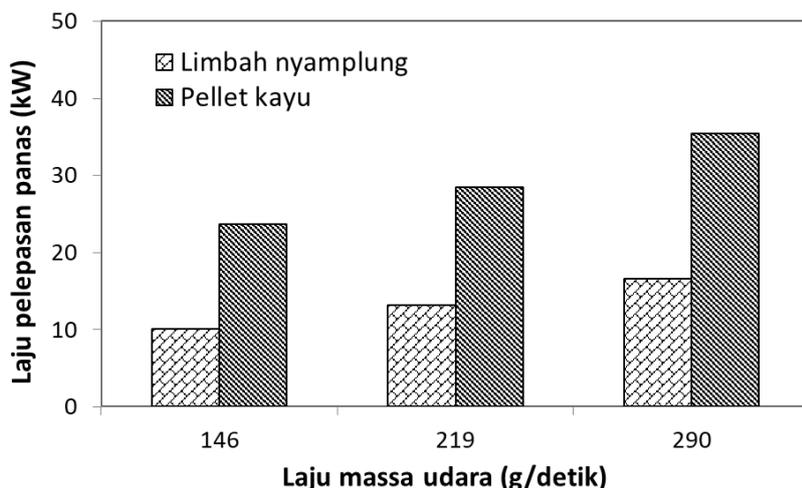
Bahan bakar	Laju aliran udara (gram/detik)	Temperatur api (°C)		Panjang nyala api (cm)
		Titik 1	Titik 2	
Limbah nyamplung	146	742,4	672,3	55
	219	779,4	727,3	70
	290	865,1	816,3	80
Pelet kayu	146	764,5	686,2	40
	219	837,6	746,8	60
	290	872,0	818,1	80

Hasil lainnya menunjukkan bahwa semakin tinggi laju aliran udara, maka temperatur api pembakaran juga akan semakin tinggi. Semakin banyaknya suplai oksigen yang terkandung di dalam udara menyebabkan proses reaksi pembakaran menjadi semakin intens, sehingga dapat menghasilkan api dengan temperatur yang lebih tinggi. Nyala api tertinggi diperoleh pada pembakaran pelet kayu yaitu mencapai 818,1°C dengan laju aliran massa udara sebesar 290 gram/detik.

Dari pengukuran di dua titik dapat dilihat bahwa titik 1 dimana posisinya pada luaran api dari burner, menghasilkan temperatur yang lebih tinggi. Sedangkan titik 2 yang berjarak 20 cm menghasilkan temperatur yang lebih rendah. Hal ini menjadi pertimbangan penting di dalam penempatan burner sehingga dapat menghasilkan temperatur yang diinginkan pada proses pemanasan tersebut.

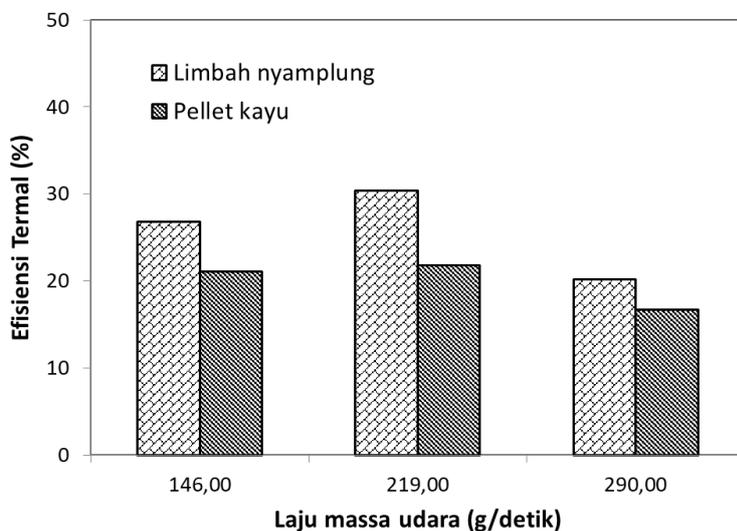
Tingginya temperatur nyala api seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 sangat tergantung pada seberapa besar laju panas yang dilepaskan dari proses pembakaran biomassa. Gambar 8 menunjukkan laju pelepasan panas dari kedua biomassa pada laju aliran udara yang berbeda. Hasilnya menunjukkan bahwa semakin tinggi laju aliran massa udara, maka laju pelepasan panasnya juga akan semakin tinggi. Hal tersebut sesuai dengan teori pembakaran bahwa semakin banyak suplai oksigen menyebabkan reaksi pembakaran semakin mudah dan intens seperti telah dijelaskan sebelumnya.

Dari kedua jenis biomassa yang diuji, terlihat bahwa laju pelepasan panas pembakaran pelet kayu lebih tinggi dari limbah nyamplung. Hal ini dikarenakan oleh dua hal. Yang pertama karena nilai kalor pelet kayu lebih tinggi dari limbah nyamplung, sehingga panas yang dihasilkan pun lebih tinggi. Kedua karena densitas pelet kayu yang lebih tinggi, sehingga semakin meningkatkan densitas energi seperti yang telah dijelaskan di atas. Laju pelepasan panas tertinggi sebesar 35,46 kW diperoleh pada pembakaran pelet kayu dengan laju aliran massa udara sebesar 290 gram/detik.



Gambar 8. Laju pelepasan panas pembakaran limbah nyamplung dan pelet kayu pada burner.

Efisiensi termal hasil pembakaran biomassa pada burner ditunjukkan oleh Gambar 9. Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa pembakaran limbah nyamplung menghasilkan efisiensi termal yang lebih tinggi dibandingkan dengan pelet kayu. Rendahnya efisiensi termal pada pelet kayu disebabkan oleh tingginya laju pelepasan panas, sementara laju penyerapan panas oleh air di dalam panci terbatas, hal ini mengakibatkan banyak panas yang terbuang ke lingkungan sekitarnya. Hasil yang tidak jauh berbeda diperoleh pada pembakaran kompor briket biomassa menggunakan kayu mangga, tempurung kelapa, dan kayu ranting dimana diperoleh efisiensi termal 22-36% pada tahap *cold start* (Nayan et al., 2022).



Gambar 9. Efisiensi termal pembakaran burner biomassa menggunakan limbah nyamplung dan pelet kayu.

Hasil yang agak berbeda dapat dilihat dari pengaruh laju aliran massa udara dimana efisiensi termal tertinggi diperoleh pada laju aliran udara 219 gram/detik. Pada laju aliran udara yang lebih tinggi, semakin banyak panas yang dilepaskan dari proses pembakaran biomassa, sehingga sebagian panas tidak terserap ke dalam air di dalam panci dan terbuang ke lingkungan. Sedangkan pada laju aliran massa udara yang lebih rendah, temperatur yang dihasilkan lebih rendah sehingga proses pemanasan air menjadi lebih lama dan mengakibatkan banyak panas yang terbuang. Efisiensi termal tertinggi didapatkan dari pembakaran limbah nyamplung yaitu

sebesar 30,35% pada laju aliran massa udara 219 gram/detik. Hal ini menjadi sangat penting untuk mengatur panas dan laju pembakaran yang sesuai dengan kebutuhan pemanasan agar tidak banyak panas yang terbuang dan efisiensi menjadi meningkat. Penggunaan burner biomassa sangat potensial untuk dikomersialisasikan sebagai pengganti kompor LPG dan minyak tanah pada industri kecil. Hasil kajian ekonomi penggunaan burner gasifikasi (GasMin) menunjukkan bahwa nilai NPV (*net present value*) secara ekonomi menguntungkan dengan *payback period* (PP) hanya 3 tahun 8 bulan (Suherman, 2020).

KESIMPULAN

Rancang bangun dan uji performa burner biomassa telah dilakukan menggunakan bahan bakar limbah nyamplung dan pelet kayu. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan limbah nyamplung menghasilkan penyalaan api yang lebih panjang pada laju aliran udara 146 dan 219 gram/detik. Semakin tinggi laju aliran udara, maka nyala api akan semakin panjang. Nyala api terpanjang diperoleh pada pembakaran limbah nyamplung dan pelet kayu yaitu sebesar 80 cm dengan laju aliran massa udara sebesar 290 gram/detik.

Hasil eksperimen juga menunjukkan bahwa pelet kayu menghasilkan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan limbah nyamplung. Nyala api tertinggi diperoleh pada pembakaran pelet kayu yaitu mencapai 818,1°C dengan laju aliran massa udara sebesar 290 gram/detik. Dari kedua jenis biomassa yang diuji, terlihat bahwa laju pelepasan panas pembakaran pelet kayu lebih tinggi dari limbah nyamplung. Laju pelepasan panas tertinggi sebesar 35,46 kW diperoleh pada laju aliran massa udara sebesar 290 gram/detik. Efisiensi termal yang lebih tinggi dihasilkan limbah nyamplung dibandingkan dengan pelet kayu. Efisiensi termal tertinggi didapatkan dari pembakaran limbah nyamplung yaitu sebesar 30,35% pada laju aliran massa udara 219 gram/detik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan burner biomassa khususnya pada industri kecil, sehingga dapat meningkatkan produktivitas usahanya. Pengembangan riset lanjutan dapat dilakukan untuk mengembakan sistem otomatisasi burner baik dari sisi penyalaan maupun pengaturan temperatur pembakaran.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah membiayai penelitian ini melalui skema Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM) No. kontrak 192/IV/KS/11/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Călin, C., Ion, I. V., Rusu, E., & Frățița, M. 2021. Performance analysis of a RDF gasification and solar thermal energy based CCHP system. *Energy Reports*, 7, 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.06.032>
- Chen, C., Qu, B., Wang, W., Wang, W., Ji, G., & Li, A. 2021. Rice husk and rice straw torrefaction: Properties and pyrolysis kinetics of raw and torrefied biomass. *Environmental Technology and Innovation*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101872>

- Desalegn, B., Gebeyehu, D., & Tamirat, B. 2022. Wind energy conversion technologies and engineering approaches to enhancing wind power generation: A review. *Heliyon*, 8(11), e11263. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11263>.
- Devitra, F. A., Syuriadi, A., & Nuriskasari, I. 2022. Analisis Nilai Kalor pada Bio-Oil Jenis Biomassa Limbah Kotoran Hewan dan Limbah Pressan Biji Nyamplung Hasil Pirolisis. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 1283–1289. <http://prosiding.pnj.ac.id>.
- Irbah, Y. N., Nufus, T. H., & Hidayati, N. 2022. Analisis Nilai Kalori dan Laju Pembakaran Briket Campuran Cangkang Nyamplung dan Tempurung Kelapa. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 689–694. <http://prosiding.pnj.ac.id>.
- Jain, T., & Sheth, P. N. 2019. Design of energy utilization test for a biomass cook stove: Formulation of an optimum air flow recipe. *Energy*, 166, 1097–1105. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.180>
- Lund, J. W., & Toth, A. N. 2021. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review. *Geothermics*, 90, 101915. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915>
- Manatura, K. 2020. Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties. *Case Studies in Thermal Engineering*, 19(December 2019), 100623. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100623>.
- Nurhadi, N., Kornarius, Y. P., Handoko, S., K. Sirait, J., & Azhar Lutfi, M. 2023. Gasification Burner Performance Test Using Bio-Coal Fuel. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 4(12), 2333–2423. <https://doi.org/10.59141/jjist.v4i12.826>.
- Pambudi, P., Widodo, S., & Suharno, K. 2019. Pengaruh Variasi Jumlah Lubang Udara Terhadap Efisiensi Kompor Biomassa. *Jurnal Mer-C*, 2(1), 1–7. <https://jom.untidar.ac.id/index.php/merc/article/view/468>
- Segun, B. R., Olorunnisola, A. O., Omoniyi, T. E., & Onilude, M. A. 2024. Development of an Improved Biomass Stove and Performance Evaluation Using Three Types of Briquettes. *Singapore Journal of Scientific Research*, 14(1), 1–12. <https://doi.org/10.3923/sjsr.2024.01.12>.
- Setiawan, A., Nayan, A., Farhan, M. F., & Arieandi, Y. A. 2022. Penerapan Teknologi Tepat Guna Kompor Roket Biomassa Sebagai Solusi untuk Penghematan Penggunaan Kayu Bakar. *Jurnal ABDI: Media Pengabdian Kepada Masyarakat*, 8(1), 22–28. <https://doi.org/10.26740/abdi.v8i1.14182>.
- Sonjaya, A. N., Nugroho, F. S., & Vindiawan, M. V. 2023. Perencanaan Turbin Pelton Untuk Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Kapasitas 100 watt. *Jurnal Teknologi*, 11(1), 100–109. <https://doi.org/10.31479/jtek.v11i1.266>.
- Suherman, I. 2020. Economic analysis of mini coal gasifier (GasMin) commercialization for small and medium industries (SMIs). *Indonesian Mining Journal*, 23(1), 43–56. <https://doi.org/10.30556/imj.vol23.no1.2020.699>.
- Surahmanto, F., Nurhadiyanto, D., Mujiyono, Areeprasert, C., & Syamsiro, M. 2021. Hydrothermal treatment of herb residue for solid fuel production. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 21(1), 83–92. <https://doi.org/10.22146/ajche.62594>
- Susilo, G. B., & Teja Kusuma, T. Y. 2022. Analisis Pembuatan Bahan Bakar dari Pirolisis Thermal dan Katalitik Limbah Plastik Low Density Polyethylene. In *Quantum Teknika* :

- Jurnal Teknik Mesin Terapan (Vol. 3, Issue 2, pp. 53–58).
<https://doi.org/10.18196/jqt.v3i2.14141>
- Syamsiro, M., Aridito, M. N., & Ma'arif, S. 2020. Potential Application of Sago Pulp Briquette for Electricity Generation Using Gasification Technology in Papua Province, Indonesia. *Key Engineering Materials*, 849(1), 20–26. www.scientific.net.
- Syamsiro, M., Nasution, R. M. A., Surono, U. B., Pambudi, N. A., & Kismurtono, M. 2019. Dry and wet torrefaction of empty fruit bunch to produce clean solid fuel for cooking application. *Journal of Physics: Conference Series*, 1175(1).
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1175/1/012272>
- Syivarulli, R., Pambudi, N. A., Syamsiro, M., & Saw, L. H. 2021. Upgrading the quality of solid fuel made from nyamplung (*Calophyllum inophyllum*) wastes using hydrothermal carbonization treatment. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 118(1), 189–197. <https://doi.org/10.32604/EE.2020.010493>
- Victorio, V. T. H., & Siregar, I. H. 2022. Rancang Bangun Dan Pengujian Kompor Biomass Dengan Generator. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 10(3), 61–68.
- Wijaya, A. H. P., Ahzan, S., & Pangga, D. 2023. Efektivitas Bahan Biobriket Buah Nyamplung Sebagai Bahan Bakar Alternatif Terhadap Laju Pembakaran Dan Nilai Kalor. *ORBITA: Jurnal Pendidikan dan Ilmu Fisika*, 9(1), 187.
<https://doi.org/10.31764/orbita.v9i1.14248>.
- Yu, S., Park, J., Kim, M., Kim, H., Ryu, C., Lee, Y., Yang, W., & Jeong, Y. G. 2019. Improving Energy Density and Grindability of Wood Pellets by Dry Torrefaction. *Energy and Fuels*, 33(9), 8632–8639. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b01086>