



Pengaruh Jenis Biomassa dalam Proses Karbonisasi terhadap Efisiensi Burner Tipe GT40

Hadi Prayitno¹, Ragil Alvin Dinata², Amrul³, Dondi Kurniawan⁴, Rizal Nazarudin⁵, Eko Wahyu Saputra⁶
^{1,2,3,4,5,6}Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung
¹hadi.prayitno@eng.unila.ac.id

Abstract

The use of biochar as an organic fertilizer has gained significant attention in the agricultural field. Biochar application can enhance soil fertility and promote agricultural sustainability. Converting agricultural waste into biochar can reduce dependency on chemical fertilizers. Incorporating biochar into the soil improves water retention and nutrient availability. This study aims to evaluate the effect of biomass types (bromelain and bamboo) during the carbonization process on burner efficiency in biochar production. The study utilized bromelain biomass, bamboo biomass, and a mixture of the two at a 50% bromelain and 50% bamboo ratio. The raw materials were carbonized using a rotary drum reactor. The reactor operated with heat supplied by a High-Speed Diesel (HSD)-fueled burner. The carbonizer reached a maximum temperature of 600°C. In addition to biochar, the carbonization process also produced syngas, which was subsequently used to substitute HSD as a fuel source. The results indicated that the type of biomass significantly influenced burner efficiency during the carbonization process. Biochar derived from bamboo tended to have a higher cellulose content, whereas biochar from bromelain exhibited greater thermal decomposition stability. This study provides new insights into the potential of utilizing bromelain and bamboo biochar as sustainable strategies for agricultural soil management. The research demonstrated that biomass type selection during carbonization had a substantial impact on burner efficiency, which ranged from 81.15% to 84.45%. The HSD consumption of the burner was recorded at 35.03 kJ/hour. The use of biochar as an organic fertilizer offers an environmentally friendly and sustainable solution. Converting agricultural waste into biochar can serve as a strategic agenda for agricultural waste management.

Keywords: biochar, bromelain, bamboo, carbonization, sustainable

Abstrak

Penggunaan *biochar* sebagai pupuk organik telah mendapatkan perhatian dalam bidang pertanian. Penggunaan *biochar* dapat meningkatkan kesuburan tanah dan keberlanjutan pertanian. Konversi limbah perkebunan sebagai *biochar* dapat mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia. Penggunaan *biochar* ke dalam tanah dapat meningkatkan retensi air dan nutrisi tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jenis biomassa (*bromelain* dan bambu) dalam proses karbonisasi terhadap efisiensi *burner* dalam produksi *biochar*. Penelitian ini memanfaatkan biomassa *bromelain*, biomassa bambu, serta campuran keduanya dengan perbandingan 50% *bromelain* dan 50% bambu. Bahan baku dikarbonisasi menggunakan reaktor berbentuk *rotary drum*. Reaktor yang digunakan menggunakan panas yang bersumber dari *burner* berbahan bakar *High Speed Diesel* (HSD). *Carbonizer* yang digunakan beroperasi sampai temperatur 600 °C. Selama proses karbonisasi selain menghasilkan *biochar* juga menghasilkan *syngas*. Kemudian, *syngas* tersebut digunakan untuk mensubstitusi HSD sebagai bahan bakar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jenis biomassa memberikan pengaruh terhadap efisiensi *burner* dalam proses karbonisasi. *Biochar* dari bambu cenderung memiliki kandungan selulosa yang lebih tinggi, sementara *biochar* dari *bromelain* menunjukkan sifat yang lebih stabil terhadap dekomposisi termal. Studi ini memberikan wawasan baru tentang potensi penggunaan *biochar* dari *bromelain* dan bambu sebagai strategi berkelanjutan dalam pengolahan tanah pertanian. Penelitian ini menunjukkan bahwa pilihan jenis biomassa dalam proses karbonisasi berpengaruh signifikan terhadap efisiensi *burner* yang dihasilkan. Proses konversi biomassa menjadi *biochar* menunjukkan efisiensi *burner* antara 81,15 hingga 84,45%. Konsumsi HSD pada *burner* mencapai 35,03 kJ/jam. Penggunaan *biochar* sebagai pupuk organik menawarkan solusi berkelanjutan yang ramah lingkungan. Konversi limbah perkebunan ini menjadi *biochar* dapat dijadikan agenda pengolahan limbah perkebunan.

Kata kunci: *biochar*, *bromelain*, bambu, karbonisasi, berkelanjutan.

1. Pendahuluan

Dalam bidang pertanian berkelanjutan dan pengelolaan tanah, pemanfaatan *biochar* telah mendapat perhatian besar karena potensi manfaatnya dalam meningkatkan kesuburan tanah dan penyerapan karbon [1,2]. *Biochar* adalah arang yang dihasilkan dari konversi termal biomassa melalui proses pirolisis. Pirolisis adalah proses konversi termal biomassa tanpa oksigen [3]. Karbonisasi adalah proses pirolisis dengan hasil *fix carbon* yang lebih dominan [4]. Sedangkan, torefaksi adalah proses pirolisis dengan produk yang memiliki kandungan zat *volatile* yang masih tinggi [5,6]. *Biochar* yang digunakan sebagai pupuk organik dalam *sustainable agriculture* adalah yang mengandung *fix carbon* tinggi dan zat *volatile* yang rendah [7].

Teknologi karbonisasi *biochar* telah menjadi pilihan yang dalam meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas pertanian [8]. Karbonisasi adalah proses termokimia yang melibatkan pemanasan biomassa pada suhu antara 300°C hingga 800°C dalam kondisi minim oksigen untuk menghindari pembakaran lengkap. Proses ini menghasilkan *biochar*, gas, dan cairan pirolisis (*bio-oil*) [9]

Biochar dicirikan oleh kandungan karbonnya yang tinggi dan struktur berpori, yang berkontribusi terhadap kemampuannya menahan air dan unsur hara di dalam tanah [10]. Penggunaan *biochar* sebagai pupuk organik selain memberikan dampak pada peningkatan kualitas juga sebagai pilihan solusi *sustainable waste management* [11]. *Biochar* dari *bromelain* dan bambu banyak digunakan sebagai media penyubur tanah [12,13]. *Bromelain*, yang diekstraksi dari batang dan buah nanas, serta bambu, rumput abadi yang tumbuh cepat, merupakan sumber biomassa melimpah yang dapat dimanfaatkan untuk produksi *biochar*.

Bromelain, ekstrak enzim yang berasal dari batang dan buah nanas [14], serta bambu, yang dikenal karena pertumbuhannya yang cepat dan komposisi lignoselulosa yang kuat, merupakan dua sumber biomassa yang menjanjikan untuk produksi *biochar*. Residu yang kaya *bromelain* dan biomassa bambu dapat melalui proses pirolisis terkontrol untuk mengubahnya menjadi *biochar* [12,13].

Kemampuan *biochar* untuk mengurangi pencucian unsur hara dan meningkatkan pH tanah menjadikannya sangat berharga di lingkungan pertanian tropis seperti perkebunan nanas, di mana keasaman tanah sering kali membatasi produktivitas. *Biochar* ini jika diterapkan pada perkebunan nanas berpotensi memperbaiki struktur tanah, retensi unsur hara, dan kapasitas menahan air. Residu *bromelain* dan biomassa bambu tidak hanya menawarkan alternatif berkelanjutan untuk bahan baku *biochar*

namun juga mengatasi tantangan pengelolaan limbah pertanian di daerah penghasil nanas [15].

Aspek yang menjadi kunci dalam konversi termal biomassa menjadi *biochar* adalah efisiensi *burner*. Efisiensi *burner* menentukan kualitas dan kuantitas *biochar* yang dihasilkan. Selain itu, efisiensi *burner* pengaruh pada laju konsumsi bahan bakar sekaligus dan emisi yang dihasilkan selama proses [16]. Penelitian ini menganalisis pengaruh bahan baku biomassa pada proses karbonisasi terhadap efisiensi *burner*. *Burner* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tipe GT40 yang memiliki kapasitas bahan bakar (*High Speed Diesel*) 45 kg/jam.

2. Metode Penelitian

2.1. Material

Penelitian ini menggunakan bahan baku berupa biomassa *bromelain*, biomassa bambu, dan campuran dari kedua jenis biomassa tersebut dengan perbandingan yang sama, yaitu 50% *bromelain* dan 50% bambu. Pemilihan bahan ini dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik dan potensi masing-masing biomassa, baik secara individu maupun dalam campuran, sehingga dapat diketahui pengaruh perbedaan komposisi terhadap hasil penelitian. Masing-masing biomassa tersebut memiliki panas spesifik 3,25, 1,76 dan 2,24 kJ/kg °C. *Bromelain* yang digunakan ada limbah yang berasal dari perkebunan nanas.

2.2. Blower

Pada penelitian ini memerlukan *blower* yang digunakan sebagai udara pembakaran sekaligus untuk meniupkan udara panas ke dalam ruang *carbonizer*. *Blower* yang digunakan mempunyai spesifikasi seperti Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi blower

Tabel 1. Spesifikasi blower	
Spesifikasi	
Tegangan	380 V
Kuat arus	4,6 A
Daya	2,2 kW
Putaran	2850 rpm
Frekuensi	50 Hz
Torsi	14 N.m

2.2. Burner

Burner yang digunakan dalam penelitian ini beserta spesifikasinya dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi burner

Tabel 2. Spesifikasi burner	
Spesifikasi Burner	
Tipe Burner	iT40
Kaliber boiler (mm)	55
Ukuran pemasangan flensa diagonal persegi (mm)	25

Burner yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Burner Tipe GT40

2.4. Bahan Bakar

Bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah HSD yang memiliki *Low Heating Value* (LHV) sebesar 42.800 kJ/kg. Pada saat proses karbonisasi telah menghasilkan *syngas* penggunaan HSD dihentikan beralih ke *syngas*. *Syngas* yang dihasilkan memiliki nilai kalor sebesar 11.000 kJ/kg.

2.5. Perhitungan Efisiensi Burner

Efisiensi *burner* umumnya diukur dalam persentase. Berikut persamaan-persamaan yang digunakan dalam menganalisis *efisiensi burner*:

$$\eta = \frac{Q_{out}}{(Q_{in} + W_{in})} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

η = efisiensi (%)

Q_{out} = panas keluar (kW)

Q_{in} = Panas masuk (kW)

W_{in} = kerja masuk (kW)

Panas keluar dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{out} = \dot{m}_{biomassa} \times C_{pbiomassa} \times \Delta T_{biomassa} \dots (2)$$

Dimana:

Q_{out} = panas keluar (kW)

(\dot{m}) = laju aliran biomassa (kg/s)

C_p = Panas spesifik (kJ/kg.°C)

ΔT = Perbedaan temperatur (°C)

Kemudian panas masuk didapatkan dari persamaan berikut:

$$Q_{in} = (\dot{m}) \times LHV \dots\dots\dots (3)$$

Dimana:

Q_{in} = panas masuk (kW)

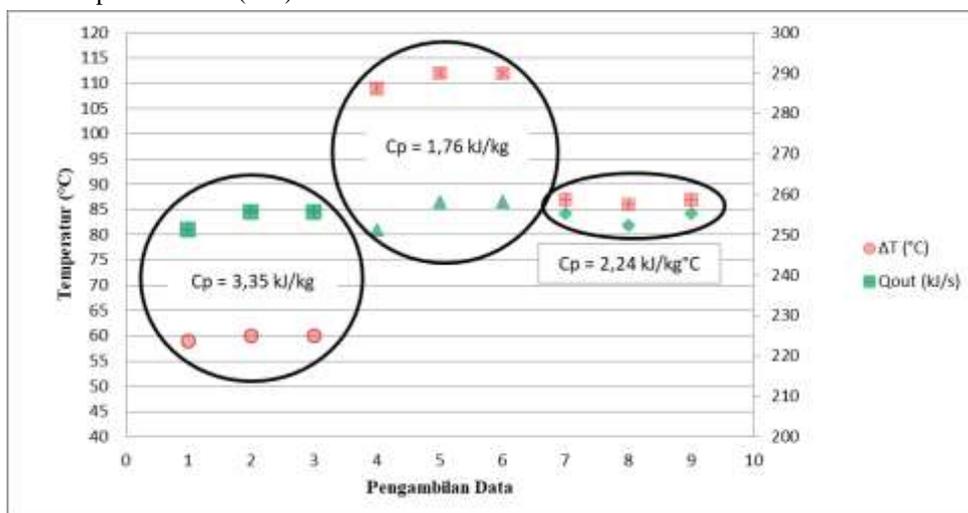
\dot{m} = laju aliran biomassa (kg/s)

LHV = *Low Heating Value* (kJ/kg)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengamatan Burner

ksperimen karbonisasi biomassa dilakukan dengan menggunakan tiga jenis material, yaitu biomassa bromelain, biomassa bambu, dan campuran keduanya dengan perbandingan 50:50. Menunjukkan perbedaan signifikan dalam karakteristik produk karbonisasi, termasuk perubahan warna, tekstur, dan bentuk, yang mencerminkan respons terhadap suhu dan durasi karbonisasi.



Gambar 2. Pengaruh jenis biomassa terhadap panas keluar burner

Bromelain menunjukkan kecenderungan untuk mengalami perubahan warna yang lebih gelap dan tekstur yang lebih rapuh, yang mengindikasikan degradasi yang lebih tinggi pada suhu tinggi. Sebaliknya, bambu mempertahankan struktur fisiknya dengan ketahanan yang lebih baik terhadap suhu ekstrem, menghasilkan produk karbon yang lebih keras dan stabil. Pada campuran *bromelain* dan bambu, perubahan yang teramati mengindikasikan adanya interaksi kompleks antara kedua biomassa, yang kemungkinan mempengaruhi efisiensi karbonisasi serta karakteristik produk akhir.

Hasil eksperimen ini mengindikasikan bahwa campuran *bromelain* dan bambu dengan perbandingan 50:50 menghasilkan karakteristik karbonisasi yang berbeda secara signifikan dibandingkan dengan biomassa tunggal. Interaksi antara kedua komponen biomassa ini tampaknya mempengaruhi laju pembakaran dan proses degradasi, yang pada gilirannya menghasilkan produk karbon dengan kualitas yang lebih baik dan efisiensi yang lebih tinggi. Penurunan laju pembakaran pada campuran ini menunjukkan bahwa interaksi kimia dan fisik antara komponen-komponen biomassa dapat mengoptimalkan kualitas produk karbon yang dihasilkan. Konsumsi bahan bakar tersebut, dapat dilihat di Tabel 3.

Tabel 3. Konsumsi bahan bakar

Tanggal	Konsumsi bahan bakar (kg/jam)
10 Agustus 2023	34,2
11 Agustus 2023	34,4
12 Agustus 2023	34,6
18 Agustus 2023	35,0
19 Agustus 2023	35,9
20 Agustus 2023	35,6
28 Agustus 2023	34,7
29 Agustus 2023	35,1
30 Agustus 2023	34,8

3.2. Panas Keluar *Burner*

Jenis biomassa yang digunakan dalam proses karbonisasi memberikan pengaruh jumlah panas yang dikeluarkan. Panas yang dikeluarkan dalam proses konversi termal biomassa dipengaruhi oleh panas spesifik yang terkandung oleh biomassa tersebut. Pada proses karbonisasi *bromelain*, reaktor beroperasi dengan temperatur awal 35°C dan keluar dengan temperatur 95°C. kemudian, bambu yang memiliki panas spesifik 1,76 kJ/kg.°C beroperasi dengan perbedaan temperatur 109-112 °C. Campuran bambu dan *bromelain* yang memiliki panas spesifik 2,24 kJ/kg dapat beroperasi 38 hingga 125 °C ($\Delta T=87$ °C) seperti pada tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4. Hasil pengamatan karbonisasi biomassa

Bahan Baku	ΔT (°C)	C_p (kJ/kg.°C)	Q_{out} (kJ/s)
<i>Bromelain</i>	59	3,25	251
	60	3,25	253

Bambu	60	3,25	253
	109	1,76	256
	112	1,76	258
Campuran	87	2,24	255
	86	2,24	254
	87	2,24	255

Panas rata-rata yang dikeluarkan dalam proses karbonisasi paling rendah adalah 253 kJ/s yaitu dengan menggunakan bahan baku *bromelain*. Sedangkan, yang paling tinggi adalah 256 kJ/s yaitu pada proses karbonisasi bambu. Semakin besar panas spesifik biomassa yang dikarbonisasi semakin rendah temperatur operasi pada *carbonizer* yang digunakan seperti pada gambar 3 di atas.

3.3. Kebutuhan Panas Karbonisasi

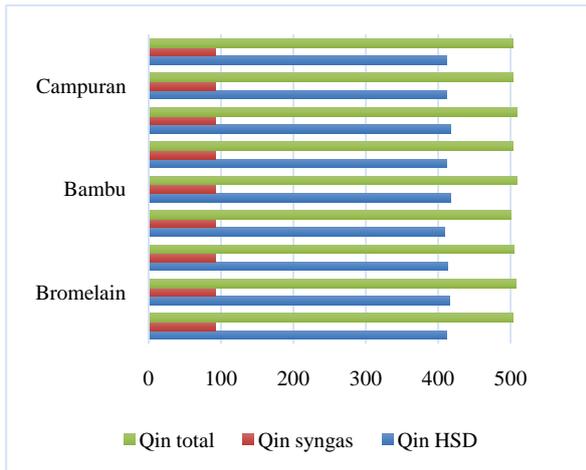
Burner yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan bahan bakar HSD. Produk sampingan dari proses karbonisasi biomassa ini adalah *syngas*. Setelah *syngas* telah dihasilkan dapat digunakan untuk mensubstitusi penggunaan HSD sebagai sumber energi *burner*. Dalam penelitian ini HSD digunakan selama 18 jam, sisanya 6 jam menggunakan *syngas* produk karbonisasi seperti pada tabel berikut:

Tabel 4. Kebutuhan panas karbonisasi biomassa

Jenis Biomassa	Q_{in} HSD (kJ/s)	Q_{in} <i>syngas</i> (kJ/S)	Q_{in} total (kJ/s)
<i>Bromelain</i>	411,69	91,67	503,36
	415,70	91,67	507,37
	412,84	91,67	504,51
Bambu	408,69	91,67	500,36
	416,55	91,67	508,22
	411,64	91,67	503,31
Campuran	416,46	91,67	508,13
	411,15	91,67	502,82
	411,00	91,67	502,67

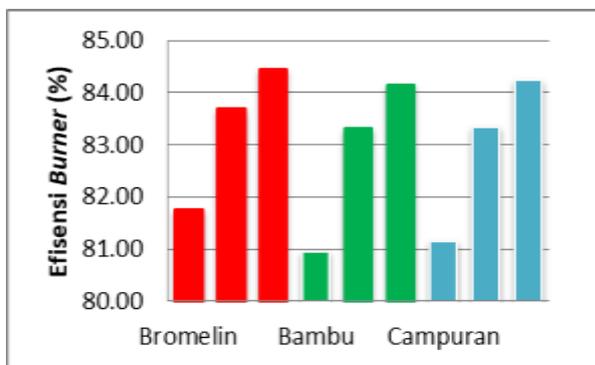
Rata-rata panas yang masuk ke dalam reaktor karbonisasi berbeda-beda untuk setiap jenis biomassa yang diuji. Nilai rata-rata panas masuk untuk masing-masing biomassa adalah sebagai berikut: *bromelain* sebesar 505,08 kJ/s, bambu 503,96 kJ/s, dan campuran *bromelain*-bambu 504,54 kJ/s. Meskipun terdapat perbedaan nilai panas yang masuk untuk masing-masing biomassa, perbedaan tersebut tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kebutuhan energi yang diperlukan dalam proses karbonisasi. Hal ini menunjukkan bahwa jenis biomassa yang digunakan tidak berperan besar dalam mempengaruhi total energi yang diperlukan selama proses karbonisasi.

Perbandingan lebih lanjut mengenai distribusi energi dan perbedaan kebutuhan energi untuk masing-masing biomassa dapat dilihat secara lebih rinci pada Gambar 3.



Gambar 3. Panas masuk Carbonizer

3.4. Efisiensi Burner



Gambar 4. Efisiensi Burner

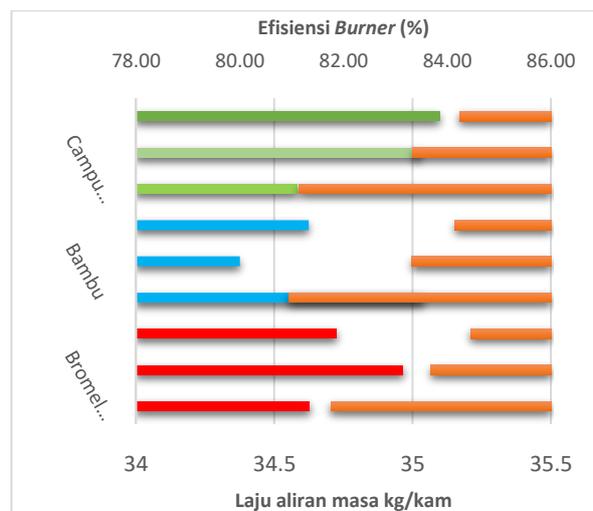
Setelah dilakukan analisis terhadap efisiensi burner pada proses karbonisasi biomassa, diperoleh hasil yang menunjukkan variasi signifikan antara jenis biomassa yang diuji (lihat gambar 4). Efisiensi burner tertinggi tercatat pada proses karbonisasi *bromelain*, dengan nilai efisiensi sebesar 84,45%. Sebaliknya, efisiensi terendah ditemukan pada proses karbonisasi bambu, yang mencapai 81,15%.

Rata-rata efisiensi burner untuk masing-masing jenis biomasbiosa adalah sebagai berikut: untuk *bromelain*, efisiensi rata-rata mencapai 83,30%, sementara pada campuran *bromelain* dan bambu (dengan komposisi 50:50), efisiensi rata-rata sedikit lebih rendah, yaitu 82,91%. Efisiensi rata-rata pada bambu saja tercatat sebesar 81,80%.

Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun ada variasi dalam efisiensi antara jenis biomassa yang digunakan, karbonisasi *bromelain* menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan bambu, baik secara individu maupun dalam campuran. Penurunan efisiensi pada campuran *bromelain* dan bambu dapat disebabkan oleh interaksi kompleks antara kedua biomassa tersebut, yang mungkin memengaruhi proses degradasi dan pemanfaatan energi selama karbonisasi.

Gambar 5 menunjukkan pengaruh signifikan dari jenis biomassa terhadap efisiensi burner dalam proses karbonisasi. Perbedaan efisiensi ini terutama dipengaruhi oleh variasi dalam sifat fisik dan termal biomassa, termasuk kapasitas panas spesifik yang berbeda antara masing-masing jenis biomassa. Setiap jenis biomassa menyerap energi dengan cara yang berbeda, yang pada gilirannya memengaruhi bagaimana energi tersebut digunakan dalam proses karbonisasi.

Berdasarkan hasil analisis yang ditampilkan pada Gambar 5, penggunaan *bromelain* sebagai bahan baku biochar memerlukan jumlah bahan bakar (HSD) paling sedikit, yaitu antara 34,2 hingga 34,6 kg/jam. Hal ini menunjukkan bahwa *bromelain* memiliki efisiensi pembakaran tertinggi, dengan nilai efisiensi pembakaran mencapai 84,45%. Keunggulan ini dapat dijelaskan oleh kapasitas panas spesifik *bromelain* yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan bambu atau campuran keduanya. Dengan kata lain, *bromelain* memerlukan lebih sedikit energi untuk mencapai suhu yang diperlukan dalam proses karbonisasi, yang mengarah pada penggunaan bahan bakar yang lebih efisien.



Gambar 5. Perbandingan konsumsi HSD dengan efisiensi burner

Sebaliknya, biomassa bambu, yang memiliki kapasitas panas spesifik lebih rendah, membutuhkan lebih banyak energi untuk mencapai suhu optimal untuk karbonisasi, yang mengakibatkan efisiensi pembakaran yang lebih rendah. Pada campuran *bromelain* dan bambu, meskipun ada peningkatan efisiensi dibandingkan dengan bambu murni, nilai efisiensi pembakaran (sekitar 82%) masih lebih rendah dibandingkan dengan *bromelain* tunggal, yang dapat disebabkan oleh interaksi fisik dan kimia antara kedua biomassa yang mempengaruhi proses pembakaran dan degradasi.

Gambar 5 memberikan gambaran visual yang jelas mengenai hubungan antara konsumsi bahan bakar (HSD) dan efisiensi burner untuk berbagai jenis

biomassa yang diuji. Grafik ini menegaskan pentingnya pemilihan biomassa yang tepat dalam proses karbonisasi untuk mengoptimalkan efisiensi energi dan mengurangi konsumsi bahan bakar. Dengan memilih biomassa dengan kapasitas panas spesifik yang lebih tinggi, seperti *bromelain*, proses karbonisasi dapat lebih efisien dalam hal penggunaan energi dan pengurangan biaya operasional.

Gambar 5 memberikan gambaran visual yang jelas tentang perbedaan ini, dengan memperlihatkan variasi efisiensi *burner* pada berbagai jenis biomassa yang diuji. Hal ini menegaskan pentingnya pemilihan biomassa yang tepat dalam proses karbonisasi untuk mengoptimalkan efisiensi energi dan mengurangi konsumsi bahan bakar.

Limbah *bromelain* nanas memiliki kandungan selulosa sebesar 24,5%, hemiselulosa 28,5%, dan lignin 5,78% [17]. Sedangkan, bambu memiliki kandungan hemiselulosa sebesar 21,58%, selulosa 40,37% dan lignin 25,92% [18]. Hemiselulosa terdekomposisi pada temperatur 225-300 °C, sedangkan selulosa dan lignin pada temperatur 305-375 °C dan 250-500 °C [19]. Kandungan lignoselulosa dari biomassa mempengaruhi proses karbonisasi yang dilakukan. Semakin besar kandungan hemiselulosa maka semakin kecil energi yang diperlukan dalam proses dekomposisi biomassa tersebut.

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan :

1. Campuran biomassa bromelain dan bambu dengan perbandingan 50:50 menghasilkan efisiensi karbonisasi tertinggi sebesar 89,6% pada suhu 475°C dengan waktu karbonisasi 65 menit, melebihi efisiensi yang dicapai oleh biomassa bromelain (72,5% pada suhu 450°C, waktu 60 menit) dan bambu (85,2% pada suhu 500°C, waktu 75 menit).
2. Interaksi antara biomassa bromelain dan bambu dalam campuran tersebut meningkatkan efisiensi dan kualitas hasil karbonisasi, menjadikannya lebih optimal dibandingkan penggunaan biomassa tunggal.
3. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan campuran biomassa dapat meningkatkan efisiensi konversi energi dalam proses karbonisasi, sehingga memberikan potensi pengembangan yang lebih baik dalam aplikasi energi terbarukan.

Daftar Rujukan

- [1] Singh Yadav, S. P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., Oli, B., 2023. Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11 (100498), pp.1-13.
- [2] Mustafa, A., Brtnicky, M., Hammerschmiedt, T., Kucerik, J., Kintl, A., Chorazy, T., Naveed, M., Skarpa, P., Baltazar, T., Malicek, O., Holatko, J., 2022. Food and agricultural wastes-derived *biochars* in combination with mineral fertilizer as sustainable soil amendments to enhance soil microbiological activity, nutrient cycling and crop production. *Frontiers in Plant Science*, 13 (1028101), pp.1-11.
- [3] Bushra, B., Remya, N. (2024). *Biochar* from pyrolysis of rice husk biomass—characteristics, modification and environmental application. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14 (5), pp.5759–5770.
- [4] Romano, P., Stampone, N., Di Giacomo, G., 2023. Evolution and Prospects of Hydrothermal Carbonization. *Energies*, 16 (7). Pp.1-11.
- [5] Prayitno, H., Amrul., Lesrtari, R., Kurniawansyah, R., 2024. Potential Torrefaction of Tropical Forest Fruits Waste. *Journal of Physics, Conference Series* 2739 (2024) 012005.
- [6] Mamvura, T. A., & Danha, G. 2020. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. In *Heliyon*. 6(3), pp.1-17.
- [7] Chen, J., Li, J., Yang, X., Wang, C., Zhao, L., Zhang, P., Zhang, H., Wang, Y., & Li, C. 2023. The Effects of *Biochar*-Based Organic Fertilizer and Mineral Fertilizer on Soil Quality, Beet Yield, and Sugar Yield. *Agronomy*, 13(9), pp.2423.
- [8] Riyanti, A., Hadrah, H., & Fitria, R. R. D. 2023. *Biochar* dari Limbah Tatal Karet Sebagai Media Filtrasi Pada Pengolahan Air Gambut. *Jurnal Daur Lingkungan*, 6 (1), pp.29-33
- [9] Zhuang, X., Liu, J., Zhang, Q., Wang, C., Zhan, H., & Ma, L. 2022. A review on the utilization of industrial biowaste via hydrothermal carbonization. In *Renewable and Sustainable Energy Review*, 154(2), pp.111877.
- [10] Zhang, W. M., Xiu, L. Q., Wu, D., Sun, Y. Y., Gu, W. Q., Zhang, H. G., Meng, J., & Chen, W. F. 2021. Review of *biochar* structure and physicochemical properties. In *Acta Agronomica Sinica(China)*, 47(1), pp.248-254
- [11] Dahal, R. K., Acharya, B., & Farooque, A. 2021. a sustainable solution for solid waste management in agro-processing industries. *Biofuels biochar*, 12 (2), pp.237-245.
- [12] Lestiyani, A., Purnomo, E., Widyaningsih, S., & Fadillah, K. 2023. Investigating the Effects of Bamboo *Biochar* on Fertile Soil for Improving the Production of Brassica Oleraceae. *Agric*, 35 (2), pp.2423.
- [13] Selvarajoo, A., & Hanson, S. 2014. Pyrolysis of Pineapple Peel: Effect of Temperature, Heating Rate and Residence Time on the Bio-char Yield. *Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Applied Science and Environmental Engineering - ASEE 2014*, 2(1), pp.24-28.
- [14] Varilla, C., Marcone, M., Paiva, L., & Baptista, J. 2021. Bromelain, a group of pineapple proteolytic complex enzymes (*Ananas comosus*) and their possible therapeutic and clinical effects. a summary. In *Foods*, 10 (10), pp.2249
- [15] Hanyabui, E., Frimpong, K. A., Annor-Frempong, F., & Atiah, K. 2024. Effect of pineapple waste *biochar* and compost application on the growth and yield of pineapple varieties in Ghana. *Frontiers in Agronomy*. 6(1), pp.1-11.
- [16] Pelaez-Samaniego, M. R., Garcia-Perez, T., Yadama, V., Mood, S. H., Garcia-Perez, M., & Garcia-Nunez, J. 2022. Biomass carbonization technologies. In *Sustainable Biochar for Water and Wastewater Treatment*, pp.39-92

- [17] Pardo, M. E. S., Cassellis, M. E. R., Escobedo, R. M., & García, E. J. 2014. Chemical Characterisation of the Industrial Residues of the Pineapple (*Ananas comosus*). *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 3(2), pp.53-36
- [18] Liang, Z., Neményi, A., Kovács, G. P., & Gyuricza, C. 2023. Potential use of bamboo resources in energy value-added conversion technology and energy systems. In *GCB Bioenergy* 15(8), pp.936-953
- [19] Basu, P. 2024. In Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction. *Practical Design*, 4(2), pp.27-55