

High Pressure and Long Compression Improve the Quality of Coffee Waste Biopellets : Tekanan Tinggi dan Kompresi Lama Meningkatkan Kualitas Biopellet Limbah Kopi

Syarif Adhika Adhin Nurzati

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering,
Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Depok,
Indonesia

Damora Rhakasywi

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering,
Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Depok,
Indonesia

Fahrudin

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering,
Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, Depok,
Indonesia

General Background The increasing demand for renewable energy highlights the potential of biomass waste as a sustainable energy source. **Specific Background** Spent coffee grounds represent an abundant biomass material with high calorific potential, yet their utilization efficiency depends strongly on processing parameters during pelletization. **Knowledge Gap** Previous studies have not fully elucidated how compaction pressure and pressing duration affect the physicochemical characteristics of coffee-ground biopellets according to the SNI 8021:2014 standard. **Aims** This study investigates the effects of varying pressure (500, 750, and 1000 kgf) and pressing duration (30 s and 180 s) on the quality attributes of biopellets composed of 92.5% coffee waste and 7.5% tapioca adhesive. **Results** Findings indicate that higher pressure and longer pressing duration significantly improve density, reduce moisture and volatile matter, and enhance fixed carbon content, though the ash content remains above the acceptable limit. The optimal combination of 1000 kgf and 180 s produced biopellets meeting the SNI standards for calorific value and bound carbon. **Novelty** This research provides quantitative insights into the synergistic role of mechanical compaction and pressing time in optimizing biofuel quality from coffee waste. **Implications** The results support the advancement of circular bioenergy production in Indonesia by transforming coffee waste into high-quality renewable fuel.

Highlights:

- ♦ High pressure and longer compression improve biopellet quality.
- ♦ Only 1000 kgf–180 s meets SNI standards for bound carbon and calorific value.
- ♦ High ash content remains the main limitation of coffee waste biopellets.

Keywords: Biopellet, Coffee Waste, Pressure, Compression Time, Renewable Energy

Pendahuluan

Kebutuhan energi global terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan ekonomi. Di Indonesia, tingginya konsumsi energi fosil menjadi tantangan serius karena sumbernya semakin menipis, sementara permintaan energi terus bertambah. Pemerintah menargetkan peningkatan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) hingga 31% pada tahun 2050 sebagai langkah dekarbonisasi dan pengurangan ketergantungan terhadap energi fosil [1]. Salah satu alternatif EBT yang potensial adalah biomassa, terutama dalam bentuk briket atau biopellet yang berasal dari limbah pertanian dan peternakan [2].

Biopellet merupakan bahan bakar padat hasil pengempaan biomassa yang ramah lingkungan dan memiliki nilai kalor tinggi. Ampas kopi, sebagai salah satu limbah industri yang melimpah, berpotensi besar dijadikan bahan baku biopellet. Penelitian menunjukkan bahwa ampas kopi memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan kandungan selulosa hingga 8,6%, sehingga layak digunakan sebagai sumber energi terbarukan [3], [4]. Selain ampas kopi, limbah lain seperti pelepah kelapa sawit, ampas tebu, serta campuran serbuk rotan dan gergaji juga dapat dimanfaatkan untuk produksi biopellet berkualitas [5], [6].

Efisiensi pembakaran biopellet lebih tinggi dibandingkan bahan bakar fosil, serta menghasilkan emisi PM_{2.5}, CO, dan CO₂ yang lebih rendah [7], [8]. Kualitas biopellet sangat dipengaruhi oleh tekanan dan durasi penekanan selama proses produksi. Tekanan yang lebih tinggi dapat meningkatkan densitas dan kekuatan biopellet, sementara durasi tekan yang tepat mencegah degradasi bahan organik yang dapat menurunkan nilai kalor [4], [9], [10].

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik biopellet dari ampas kopi melalui variasi tekanan dan durasi penekanan guna memperoleh kombinasi optimal. Hasil penelitian diharapkan dapat meningkatkan efisiensi produksi biopellet serta mendukung pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

Metode

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh faktor-faktor proses terhadap karakteristik biopellet yang dihasilkan. Bahan baku utama yang digunakan adalah ampas kopi yang diperoleh dari Kopi Pasteu di Cilandak, serta tepung tapioka yang berfungsi sebagai bahan perekat. Setiap sampel biopellet dibuat dengan komposisi 92,5% ampas kopi dan 7,5% tepung tapioka.

Proses pembuatan biopellet dilakukan dengan metode pengepresan menggunakan mesin hydraulic press. Variasi tekanan yang digunakan adalah 500 kgf, 750 kgf, dan 1000 kgf, dengan masing-masing tekanan diberi dua variasi waktu penekanan, yaitu 30 detik dan 180 detik. Proses penekanan dilakukan menggunakan cetakan biopellet berdiameter 8 mm. Setelah proses penekanan, biopellet dikeringkan menggunakan oven digital hingga kadar airnya berkurang.

Peralatan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi hydraulic press, oven digital, dan cetakan biopellet berdiameter 8 mm. Sementara itu, alat ukur yang digunakan untuk pengujian meliputi timbangan digital untuk mengukur massa biopellet dan jangka sorong digital untuk menentukan dimensi biopellet.

A. Model Formula

1. Densitas

Standar nilai densitas pada SNI 8021:2014 minimum 0,8g/cm³, dengan rumus yaitu

$$\text{densitas } \rho = \frac{\text{massa pelet (g)}}{\text{volume pelet (cm}^3\text{)}}$$

2. Kadar Air

Standar nilai kadar air pada SNI 8021:2014 maksimal 12%, dengan rumus yaitu

$$\text{kadar air \%} = \frac{(\text{massa awal pelet (g)} - \text{massa pelet setelah pemanasan } 107^{\circ}\text{C (g)})}{\text{massa awal pelet (g)}} \times 100\%$$

3. Kadar Abu

Standar nilai kadar abu pada SNI 8021:2014 maksimal 1.5%, dengan rumus yaitu

$$\text{kadar abu \%} = \frac{\text{massa pellet setelah pemanasan } 750^{\circ}\text{C (g)}}{\text{massa awal pelet (g)}} \times 100\%$$

4. Kadar Zat Terbang

Standar nilai kadar zat terbang pada SNI 8021:2014 maksimal 80%, dengan rumus yaitu

$$\text{zat menguap \%} = \frac{(\text{massa setelah pemanasan } 107^{\circ}\text{C (g)} - \text{massa setelah pemanasan } 950^{\circ}\text{C (g)})}{\text{massa awal pelet (g)}} \times 100\%$$

5. Nilai Karbon

Standar nilai karbon pada SNI 8021:2014 minimal 14%, dengan rumus yaitu

$$\text{fixed carbon} = 100\% - \% \text{ kadar air} - \% \text{ kadar abu} - \% \text{ zat menguap}$$

6. Nilar Kalor

Standar nilai kalor pada SNI 8021:2014 minimum 4000cal/g, dengan rumus yaitu

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Dengan,

Q : panas yang diserap (kJ)

m : massa air di dalam *bomb calorimeter* (g)

C_p : *specific heat* 4,168 kJ/kg °C

ΔT : perbedaan temperature (°C)

B. Research Design

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rancangan Acak Kelompok Faktorial. Percobaan menggunakan dua faktor. 3 variasi faktor tekanan dan 2 variasi faktor waktu menghasilkan 6 sampel percobaan.

Table 1. Desain Percobaan Biopelet

Tekanan	Waktu	
	30s	180s
500kgf	A1	A2
750kgf	B1	B2
1000kgf	C1	C2

C. Research Procedure

Ampas kopi dikeringkan di oven dengan suhu 105°C selama 2 jam kemudian diayak dengan kawat mesh ukuran 20. Selanjutnya dicampur dengan tepung tapioca sebesar 7,5% yang telah dilarutkan air panas dengan rasio 1:20. Campuran tersebut akan dicetak menggunakan molding dengan diameter 8mm.

D. Testing Method

Pada tahap pengujian, seluruh prosedur dilakukan berdasarkan standar yang berlaku. Pengujian dilakukan sesuai dengan standar SNI 8021:2014, meliputi parameter densitas yang juga mengacu pada standar tersebut. Parameter kadar air, kadar abu, kadar zat menguap (*volatile matter*), dan karbon tetap (*fixed carbon*) dianalisis berdasarkan standar SNI 01 : 2891:1992, sedangkan pengujian nilai kalor menggunakan alat *Oxygen Bomb Calorimeter*.

E. Data Analys

Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel 2016 dan SPSS, dengan metode uji ANOVA (*Analysis of Variance*) untuk mengetahui pengaruh variasi tekanan dan durasi penekanan terhadap karakteristik biopelet yang dihasilkan.

Hasil dan Pembahasan

Pengujian biopellet ampas kopi dilakukan berdasarkan standar SNI 8021:2014. Parameter yang diuji meliputi densitas, kadar air, kadar abu, zat terbang, karbon terikat, dan nilai kalor.

A. Densitas

Densitas merupakan parameter fisik yang menentukan kualitas biopellet karena berhubungan langsung dengan efisiensi logistik, nilai energi per volume, dan karakteristik pembakaran yang seragam. Tekanan kompaksi menjadi faktor dominan yang memaksa partikel biomassa saling mendekat, mengurangi ruang kosong, dan membentuk ikatan solid untuk menghasilkan pellet yang padat [11].

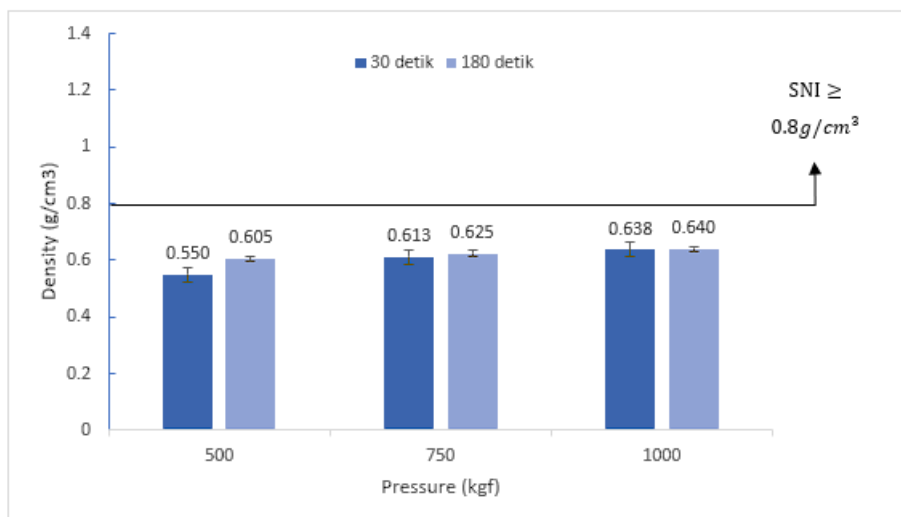


Figure 1. Diagram perbandingan densitas antara Tekanan dan Durasi Penekanan

Berdasarkan Figure 1, bahwa nilai densitas tertinggi yang dapat dicapai hanya 0.640 g/cm³ pada perlakuan 750 kgf dan durasi 180 detik, sementara nilai terendah adalah 0.550 g/cm³ (500 kgf, 30 detik). Meskipun tidak memenuhi standar, grafik tetap menunjukkan adanya tren positif di mana peningkatan tekanan secara konsisten menaikkan nilai densitas. Statistik ANOVA mengonfirmasi bahwa pengaruh tekanan sangat signifikan ($p=0.004$) dalam meningkatkan densitas. Hal ini terjadi karena tekanan tinggi memaksa partikel ampas kopi mengalami deformasi, mengurangi ruang kosong antarpartikel. Sebaliknya, meskipun grafik menunjukkan sedikit fluktuasi, hasil ANOVA membuktikan bahwa pengaruh durasi penekanan tidak signifikan secara statistik ($p=0.162$), yang mengindikasikan bahwa proses pemadatan utama terjadi dengan cepat setelah tekanan diaplikasikan. Analisis juga menunjukkan tidak adanya interaksi yang signifikan ($p=0.191$) antara kedua faktor. Sebaliknya, meskipun grafik menunjukkan adanya sedikit kecenderungan peningkatan densitas saat durasi diperpanjang dari 30 ke 180 detik, hasil ANOVA membuktikan bahwa pengaruh durasi penekanan tidak signifikan secara statistik ($p = 0,075$). Hal ini mengindikasikan bahwa sebagian besar proses pemadatan partikel terjadi secara cepat sesaat setelah tekanan diaplikasikan. Analisis juga menunjukkan tidak adanya interaksi yang signifikan ($p = 0,649$) antara kedua faktor tersebut.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa meskipun tekanan terbukti secara signifikan meningkatkan densitas, rentang perlakuan yang diuji dalam penelitian ini tidak cukup untuk menghasilkan biopellet yang memenuhi standar mutu SNI 8021:2014. Kegagalan ini kemungkinan disebabkan oleh beberapa faktor, seperti karakteristik inheren dari ampas kopi yang mungkin memerlukan bahan pengikat untuk mencapai kepadatan yang diinginkan.

B. Kadar Air

Kadar air adalah parameter yang secara signifikan mempengaruhi nilai kalor. Kadar air yang rendah akan menyerap sebagian energi panas untuk proses penguapan selama pembakaran, yang akan mengurangi energi. tekanan atau suhu kompaksi berperan dalam mengurangi kadar air pada pellet biomassa, di mana tekanan tinggi memaksa air keluar dari struktur internal partikel [12].

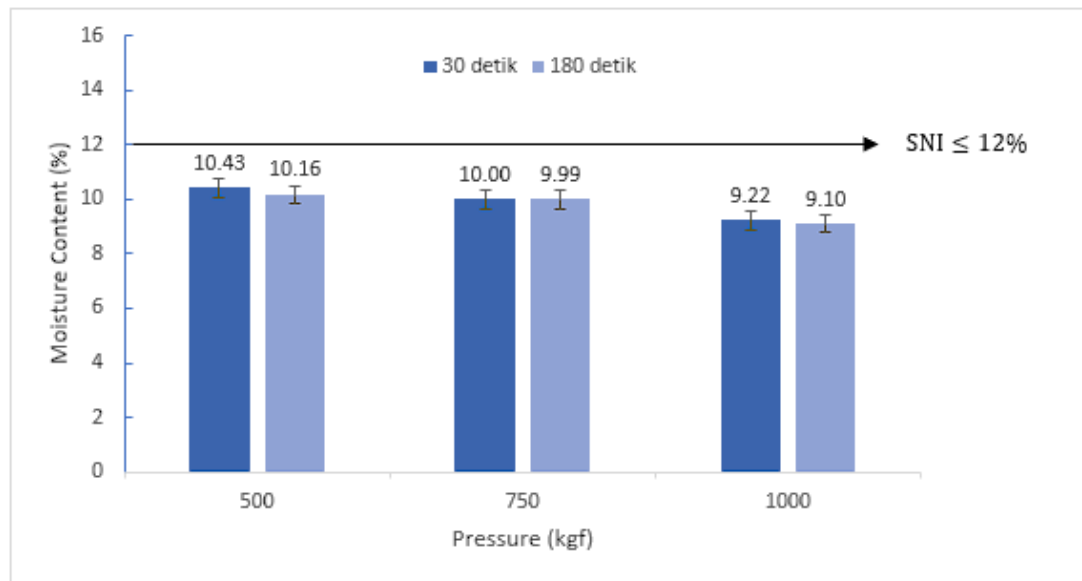


Figure 2. Diagram perbandingan kadar air antara Tekanan dan Durasi Penekanan

Berdasarkan Figure 2, Kadar air tertinggi tercatat sebesar 10.43% pada kombinasi perlakuan tekanan terendah dan durasi tersingkat (500 kgf, 30 detik), sedangkan kadar air terendah mencapai 9.10% pada perlakuan tekanan tertinggi dan durasi terlama (1000 kgf, 180 detik). Grafik menunjukkan tren penurunan kadar air yang konsisten seiring dengan meningkatnya tekanan dan durasi penekanan. Hasil analisis statistik ANOVA, bahwa pengaruh tekanan ($p < 0,001$) dan pengaruh durasi ($p = 0,015$) keduanya signifikan secara statistik dalam menurunkan kadar air.

Peningkatan tekanan secara langsung memaksa molekul air bebas (free moisture) keluar dari matriks biomassa. Sementara itu, durasi penekanan yang lebih lama memberikan waktu yang lebih cukup bagi panas yang dihasilkan akibat friksi antarpartikel untuk menguapkan sebagian air yang terikat (*bound moisture*), sehingga kadar air total menjadi lebih rendah. Analisis ANOVA juga menunjukkan tidak adanya interaksi yang signifikan ($p = 0,322$) antara tekanan dan durasi, yang mengindikasikan bahwa kedua faktor ini bekerja secara independen dalam menurunkan kadar air. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa seluruh biopellet yang dihasilkan telah memenuhi standar mutu SNI 8021:2014 untuk parameter kadar air, dengan kombinasi perlakuan tekanan 1000 kgf dan durasi 180 detik menjadi yang paling efektif untuk menghasilkan kadar air terendah.

C. Kadar Abu

Kadar abu adalah persentase residu anorganik yang tersisa setelah pembakaran sempurna biomassa. Kadar abu yang tinggi akan mengakibatkan masalah operasional pada tungku pembakaran, seperti pembentukan kerak (slagging) dan penyumbatan (fouling).

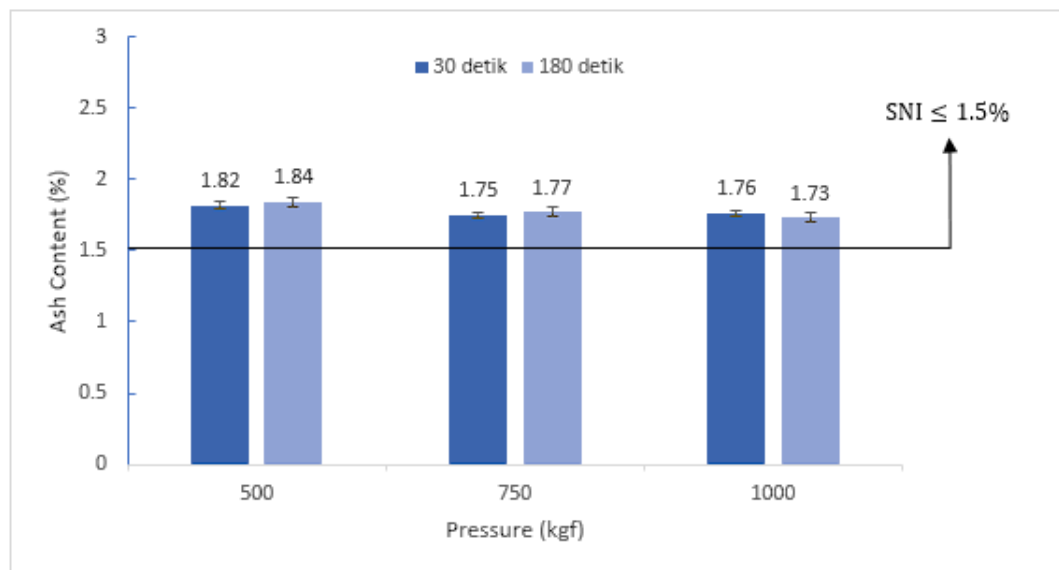


Figure 3. Diagram perbandingan kadar abu antara Tekanan dan Durasi Penekanan

Pada Figure 3, Nilai kadar abu terendah yang dicapai adalah 1.73% (1000 kgf, 180 detik), sementara yang tertinggi adalah 1.84% (500 kgf, 180 detik). Pada tekanan 500 kgf dan 750 kgf, peningkatan durasi justru sedikit menaikkan kadar abu. Sebaliknya, pada tekanan 1000 kgf, peningkatan durasi berhasil menurunkannya. Pola visual yang tidak paralel ini merupakan indikasi kuat adanya efek interaksi antara kedua faktor perlakuan.

Hasil analisis statistik ANOVA, yang menemukan adanya efek interaksi yang sangat signifikan ($p < 0,001$) antara tekanan dan durasi terhadap kadar abu. Adanya interaksi ini menegaskan bahwa pengaruh durasi penekanan terhadap kadar abu sangat bergantung pada tingkat tekanan yang diaplikasikan. Meskipun proses kompaksi tidak mengubah jumlah total mineral, efek interaktif ini kemungkinan memengaruhi konsentrasi relatif abu melalui mekanisme pelepasan senyawa organik volatil yang berbeda pada setiap kombinasi perlakuan.

Seluruh variasi perlakuan menghasilkan biopelet dengan kadar abu yang melebihi batas maksimal yang ditetapkan oleh SNI 8021:2014. meskipun kombinasi tekanan 1000 kgf dan durasi 180 detik merupakan yang paling efektif untuk menurunkan kadar abu, bahan baku ampas kopi yang digunakan secara alami memiliki kandungan abu yang terlalu tinggi untuk dapat memenuhi standar mutu. Hal ini dikarenakan Kandungan mineral dari ampas kopi dan penambahan perekat tepung tapioca sangat berpengaruh dalam kadar biopelet ampas kopi [13].

D. Kadar Zat Terbang

Kadar zat terbang merepresentasikan fraksi massa dari biopelet yang akan menguap dalam bentuk gas ketika dipanaskan pada suhu tinggi tanpa kehadiran oksigen. Kadar zat terbang yang tinggi memfasilitasi penyalaan yang lebih cepat (mudah terbakar), namun cenderung menghasilkan nyala api yang panjang dan berasap. Sebaliknya, kadar zat terbang yang lebih rendah berkorelasi dengan kandungan karbon tetap (*fixed carbon*) yang lebih tinggi, menghasilkan pembakaran yang lebih lambat dan stabil seperti arang [14].

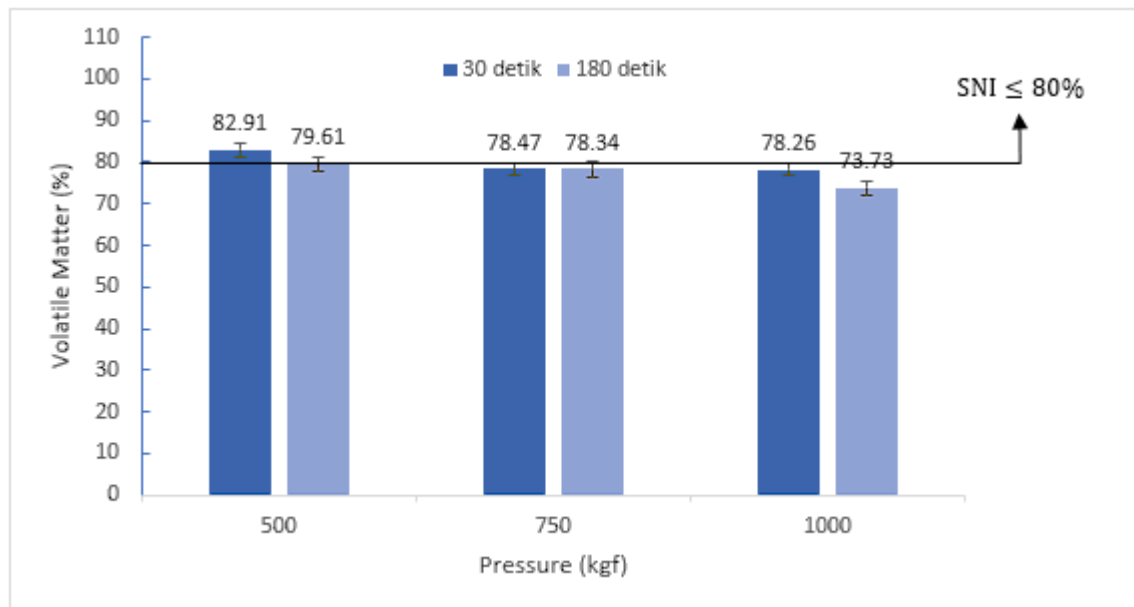


Figure 4. Diagram perbandingan kadar zat terbang antara Tekanan dan Durasi Penekanan

Berdasarkan figure 4, Terlihat adanya penurunan kadar zat terbang seiring dengan meningkatnya tekanan dan lamanya durasi penekanan. Nilai kadar zat terbang tertinggi tercatat sebesar 82.91% pada perlakuan tekanan terendah dan durasi tersingkat (500 kgf, 30 detik), sementara nilai terendah mencapai 73.73% pada kondisi tekanan tertinggi dan durasi terlama (1000 kgf, 180 detik). Penurunan yang konsisten ini mengindikasikan bahwa kedua faktor perlakuan berperan aktif memengaruhi kadar zat terbang.

Hasil analisis statistik ANOVA mengonfirmasi bahwa baik pengaruh tekanan ($p = 0,019$) maupun pengaruh durasi ($p = 0,050$). keduanya signifikan secara statistik dalam menurunkan kadar zat terbang. Analisis juga menunjukkan tidak adanya interaksi yang signifikan ($p = 0,735$) antar kedua faktor. Dari hasil yang didapatkan, hanya satu variasi perlakuan, yaitu kombinasi tekanan terendah dan durasi tersingkat (500 kgf, 30 detik), yang gagal memenuhi standar dengan nilai rata-rata 82.91%. Namun, lima variasi perlakuan lainnya berhasil memenuhi standar SNI 8021:2014.

E. Kadar Karbon Tetap

Kadar karbon tetap atau *fixed carbon* adalah fraksi padat yang tersisa setelah senyawa volatil dihilangkan dari biomassa [15]. Parameter ini merepresentasikan porsi energi utama dari biopellet yang akan terbakar dalam fase padat (seperti bara api), memberikan pelepasan panas yang stabil dan berkelanjutan. Nilai karbon yang tinggi diperlukan karena menunjukkan biopellet memiliki potensi energi yang terkonsentrasi dan durasi pembakaran yang lebih lama [16].

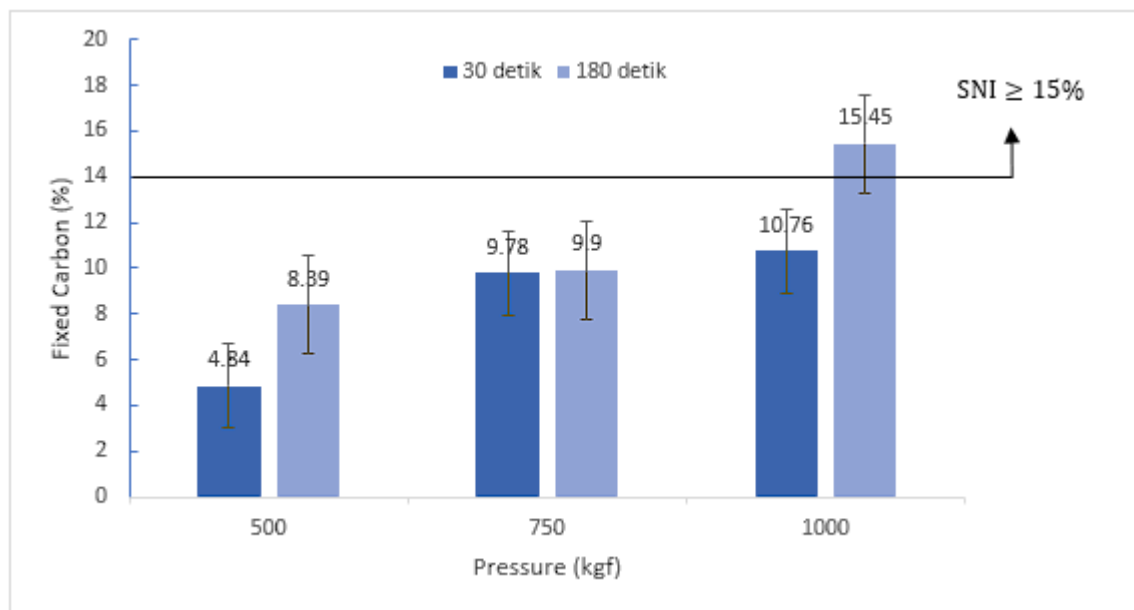


Figure 5. Diagram perbandingan kadar karbon tetap antara Tekanan dan Durasi Penekanan

Berdasarkan Figure 5, hasil pengujian menunjukkan bahwa hanya satu variasi perlakuan yang berhasil memenuhi standar minimum SNI, yaitu pada kombinasi tekanan tertinggi dan durasi terlama (1000 kgf, 180 detik) dengan nilai 15.45%. Seluruh kombinasi perlakuan lainnya masih berada di bawah ambang batas standar. Nilai terendah sebesar 4.84% pada kondisi tekanan terendah dan durasi tersingkat (500 kgf, 30 detik). Peningkatan tekanan dan perpanjangan durasi secara konsisten meningkatkan kadar karbon tetap pada biopelet. Peningkatan paling signifikan terlihat pada tekanan 1000 kgf, di mana perpanjangan durasi mampu meningkatkan karbon tetap dari 10.76% menjadi 15.45%.

hasil analisis statistik ANOVA, bahwa pengaruh tekanan ($p = 0,007$) dan pengaruh durasi ($p = 0,022$) keduanya signifikan secara statistik dalam meningkatkan kadar karbon tetap. Peningkatan kadar karbon tetap ini merupakan konsekuensi langsung dari penurunan kadar zat terbang. Analisis juga menunjukkan tidak adanya interaksi yang signifikan ($p = 0,282$) antara kedua faktor. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa untuk mencapai standar mutu SNI 8021:2014 untuk karbon tetap, diperlukan kondisi proses yang paling intensif, yaitu dengan tekanan 1000 kgf dan durasi 180 detik, yang secara efektif memaksimalkan pelepasan komponen volatil dari biopelet ampas kopi.

F. Nilai Kalor

Nilai ini merepresentasikan jumlah energi panas yang dilepaskan per satuan massa bahan bakar selama pembakaran sempurna [17]. Studi ini menggunakan alat Bomb Calorimeter sebagai alat uji, dengan hasil sebagai berikut,

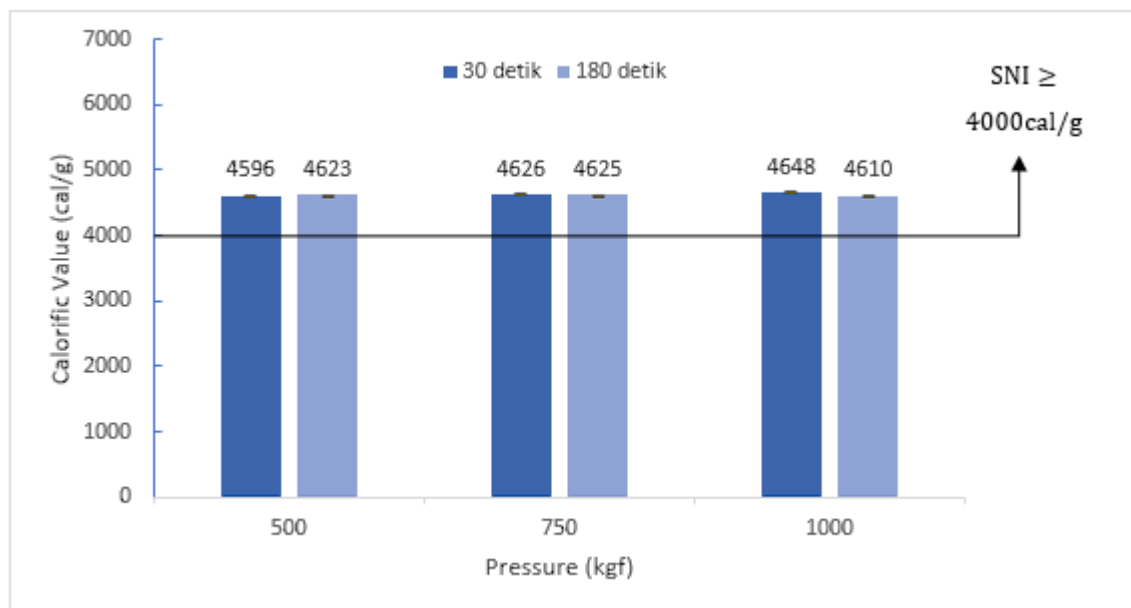


Figure 6. Diagram perbandingan nilai kalor antara Tekanan dan Durasi Penekanan

Berdasarkan Figure 6, Nilai kalor terendah tercatat sebesar 4596 kal/g (500 kgf, 30 detik), sementara nilai tertinggi mencapai 4648 kal/g (1000 kgf, 30 detik). Grafik menunjukkan adanya peningkatan nilai kalor yang tidak signifikan seiring dengan meningkatnya tekanan dari 500 kgf ke 1000 kgf. Pengaruh durasi penekanan tampak tidak menunjukkan pola yang konsisten. Pada tekanan 500 kgf durasi yang lebih lama, sedikit meningkatkan nilai kalor, sementara pada tekanan 750 kgf dan 1000 kgf justru sedikit menurunkannya.

Hasil analisis statistik ANOVA menunjukkan bahwa baik pengaruh tekanan ($p = 0,646$) maupun pengaruh durasi ($p = 0,811$) tidak signifikan secara statistik. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun ada sedikit fluktuasi, perbedaan nilai kalor antar perlakuan tidak cukup besar untuk dianggap sebagai dampak nyata dari perubahan tekanan atau durasi, melainkan lebih disebabkan oleh variasi acak dalam sampel. Nilai kalor secara inheren lebih banyak ditentukan oleh komposisi kimia dasar dari bahan baku (ampas kopi) itu sendiri, seperti rasio karbon dan hidrogen, yang tidak banyak berubah hanya melalui proses kompaksi fisik tanpa perlakuan termal yang signifikan [18].

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa peningkatan tekanan dan durasi penekanan secara signifikan mampu meningkatkan kualitas biopellet yang dihasilkan. Parameter tersebut terbukti efektif dalam menaikkan densitas, menurunkan kadar air dan zat terbang, serta meningkatkan kadar karbon terikat. Kombinasi perlakuan terbaik diperoleh pada tekanan 1000 kgf dengan durasi penekanan selama 180 detik, karena merupakan satu-satunya kombinasi yang menghasilkan biopellet sesuai standar SNI 8021:2014 untuk kadar karbon terikat, yakni sebesar 15,45%. Secara umum, seluruh variasi biopellet telah memenuhi standar mutu untuk kadar air dan nilai kalor, serta sebagian besar memenuhi standar kadar zat terbang. Namun, seluruh sampel masih belum memenuhi standar untuk parameter densitas dan kadar abu, di mana nilai densitas tertinggi hanya mencapai 0,640 g/cm³ (di bawah standar minimum 0,8 g/cm³) dan kadar abu terendah sebesar 1,73% (melebihi batas maksimum 1,5%). Tingginya kadar abu menjadi kendala utama dalam penelitian ini yang diduga disebabkan oleh kandungan mineral alami dari bahan baku utama, yaitu ampas kopi dan perekat tapioka.

Referensi

- [1] L. Rahayu and J. Windarta, "Tinjauan Potensi dan Kebijakan Pengembangan PLTA dan PLTMH di Indonesia," *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, vol. 3, no. 2, pp. 88–98, 2022, doi: 10.14710/jebt.2022.13327.

- [2] F. Rahmadiano, G. Pohan, and E. Susanto, "Analisis Campuran Lumpur dan Tetes Tebu pada Briket Tinja Hewan dengan Metode Taguchi," *Journal of Mechanical Engineering, Manufacturing, Materials, and Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 91–95, 2021, doi: 10.31289/jmemme.v5i1.4283.
- [3] V. D. Pratiwi, "Effect of Burning Temperature on the Quality of Alternative Bio-Energy from Coffee Waste," *ELKOMIKA Journal of Electrical Energy Engineering, Telecommunications, and Electronics*, vol. 8, no. 3, p. 615, 2020, doi: 10.26760/elkomika.v8i3.615.
- [4] M. Muazzinah, M. Meriatna, S. Bahri, N. ZA, and I. Ishak, "Pemanfaatan Limbah Ampas Kopi Menjadi Biomassa Pelet (Biopellet) sebagai Sumber Energi Terbarukan," *Chemical Engineering Journal of Storage*, vol. 2, no. 3, pp. 85–94, 2022, doi: 10.29103/cejs.v2i3.6518.
- [5] R. S. Harjanti, "Pemanfaatan Limbah Pabrik Pengolahan Kelapa Sawit dan Pabrik Gula sebagai Sumber Energi Biopellet dengan Perakat Tepung Tapioka," *Jurnal Pengelolaan Perkebunan*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2022, doi: 10.54387/jpp.v1i1.25.
- [6] R. Jannah, E. Sribudiani, and S. Somadona, "Biopellet dari Limbah Biomassa Serbuk Serutan Rotan dan Serbuk Gergaji Campuran Menggunakan Perakat Sagu sebagai Sumber Energi Alternatif," *Wahana Forestra: Jurnal Kehutanan*, vol. 17, no. 2, pp. 147–161, 2022, doi: 10.31849/forestra.v17i2.9628.
- [7] F. Goembira, D. Aristi, D. Nofriadi, and N. Putri, "Analisis Konsentrasi PM2.5, CO, dan CO2 serta Laju Konsumsi Bahan Bakar Biopellet Sekam Padi dan Jerami pada Kompor Biomassa," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 19, no. 2, pp. 201–210, 2021, doi: 10.14710/jil.19.2.201-210.
- [8] M. H. Darussalam, I. Rusnadi, and Z. Zurohaina, "Uji Kompor Gas Biomassa Menggunakan Berbagai Jenis Isolator Ditinjau dari Efisiensi Termal dengan Metode Water Boiling Test," *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia*, vol. 2, no. 1, pp. 547–551, 2022, doi: 10.52436/1.jpti.133.
- [9] V. D. Pratiwi and I. Mukhaimin, "Pengaruh Suhu dan Jenis Perakat terhadap Kualitas Biobriket dari Ampas Kopi dengan Metode Torefaksi," *CHEESA: Chemical Engineering Research Articles*, vol. 4, no. 1, pp. 39–50, 2021, doi: 10.25273/cheesa.v4i1.7697.
- [10] A. S. Fajar, "Pengaruh Durasi Penekanan dan Ukuran Partikel terhadap Kualitas Pelet Serbuk Gergaji," Undergraduate Thesis, Faculty of Agriculture, Department of Agricultural Engineering, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia, 2022.
- [11] N. Iskandar, S. Sulardjaka, M. Munadi, S. Nugroho, R. C. Muhamadin, and D. F. Fitriyana, "The Effect of Water Content and Binder Made from Cassava Starch and Densification Pressure on the Quality of Rice Husk Bio-Pellets," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1569, IOP Publishing, 2020, p. 012019, doi: 10.1088/1742-6596/1569/1/012019.
- [12] J. Triatmoko, F. Arifin, and Y. Bow, "Comparison of Moisture of Biopellet from Sugarcane Bagasse and Coconut Dregs as Raw Materials for Co-Firing Power Plant," *Journal of Mechanical, Civil, and Industrial Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 34–39, 2023, doi: 10.32996/jmcie.2023.4.2.5.
- [13] A. Syarief, A. Nugraha, and M. N. Ramadhan, "Variasi Komposisi dan Jenis Perakat terhadap Sifat Fisik dan Karakteristik Pembakaran Briket Limbah Arang Kayu Alaban," in *Proceedings of the National Seminar on Hazardous Waste Management (Seminar Nasional Limbah B3)*, 2021, pp. 1–12.
- [14] A. Colantoni, et al., "Spent Coffee Ground Characterization, Pelletization Test and Emissions Assessment in the Combustion Process," *Scientific Reports*, vol. 11, no. 1, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-84772-y.
- [15] N. Sukarta and P. S. Ayuni, "Analisis Proksimat dan Nilai Kalor pada Pellet Biosolid yang Dikombinasikan dengan Biomassa Limbah Bambu," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 5, no. 1, pp. 728–735, 2016, doi: 10.23887/jstundiksha.v5i1.8278.
- [16] D. C. Hakika, S. Jamilatun, S. Zahira, R. Setyarini, A. Rahayu, and R. S. Ardiansyah, "Combustion Quality Analysis of Bio-Briquettes from Mixture of Coconut Shell Waste and Coal with Tapioca Flour Adhesive," *Indonesian Journal of Chemical Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 1–10, 2023, doi: 10.26555/ijce.v1i1.452.

- [17] A. R. Pratama and D. H. Praswanto, "Analisa Laju Pembakaran pada Briket Ampas Kopi dan Serbuk Kayu dengan Campuran Minyak Sawit," in *Proceedings of SENIATI*, 2022, pp. 250–258, doi: 10.36040/seniati.v6i2.4986.
- [18] G. A. Kristanto and H. Wijaya, "Assessment of Spent Coffee Ground (SCG) and Coffee Silverskin (CS) as Refuse Derived Fuel (RDF)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 195, IOP Publishing, 2018, p. 012056, doi: 10.1088/1755-1315/195/1/012056.