

BRIKET RAMAH LINGKUNGAN DARI BATANG PINANG: PENGARUH TEKANAN HIDROLIK TERHADAP KECEPATAN PEMBAKARAN

Jefri Waine¹, Jusuf Haurissa^{1a*}, Marthina Mini^{1a}

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin

^{1a*} Dosen Program Studi Teknik Mesin

Universitas Sains dan Teknologi Jayapura,

Email: jhaurissa@yahoo.com

ABSTRAK

Optimalisasi proses pemadatan sangat penting untuk meningkatkan efisiensi termal dan stabilitas pembakaran briket biomassa yang berasal dari residu pertanian yang kurang dimanfaatkan. Briket arang pinang diproduksi dengan formulasi tetap dan dipadatkan secara hidrolik pada tekanan 60, 80, dan 100 kg/cm². Uji pembakaran dilakukan pada pelat pemanas bersuhu terkendali (250 °C), dan waktu tunda penyalaan, profil suhu, suhu puncak, durasi pembakaran, serta perpindahan panas konduktif dicatat. Peningkatan tekanan pemadatan meningkatkan densitas briket, menunda penyalaan akibat berkurangnya porositas, serta meningkatkan perpindahan panas konduktif. Briket yang dipadatkan pada tekanan 100 kg/cm² mencapai suhu puncak tertinggi (~520 °C) dan durasi pembakaran efektif terpanjang, yang menunjukkan retensi panas yang lebih baik dan oksidasi arang yang lebih stabil. Briket bertekanan lebih rendah menyala lebih cepat, tetapi menunjukkan profil termal yang kurang stabil. Pemadatan hidrolik merupakan parameter kendali utama untuk menyesuaikan kinerja termo-pembakaran briket biomassa pinang. Tekanan 100 kg/cm² memberikan keseimbangan terbaik antara keluaran panas dan stabilitas pembakaran, sehingga mendukung pengembangan bahan bakar padat terbarukan berkinerja tinggi untuk sistem energi terdesentralisasi.

Kata Kunci: *Briket biomassa; Limbah pinang; Tekanan Pemadatan hidrolik; Perpindahan panas; Energi terbarukan.*

ABSTRACT

Optimizing densification is critical to improve the thermal efficiency and combustion stability of biomass briquettes derived from underutilized agricultural residues. Areca-palm charcoal briquettes were produced with a fixed formulation and compacted hydraulically at 60, 80, and 100 kg/cm². Combustion tests were performed on a temperature controlled plate (250 °C), and ignition delay, temperature profiles, peak temperature, burning duration, and conductive heat transfer were recorded. Increasing compaction pressure increased briquette density, delayed ignition due to reduced porosity, and enhanced conductive heat transfer. Briquettes compacted at 100 kg/cm² achieved the highest peak temperature (~520 °C) and the longest effective burning duration, indicating superior heat retention and more stable char oxidation. Lower pressure briquettes ignited faster but exhibited less stable thermal profiles. Hydraulic compaction is a key control parameter for tailoring the thermo-combustion performance of areca-palm biomass briquettes. A pressure of 100 kg/cm² provides the most favorable balance between thermal output and burn stability, supporting the development of high-performance renewable solid fuels for decentralized energy systems

Keywords: *Biomass briquettes; Areca palm waste; Hydraulic compaction; Heat transfer; Renewable solid fuel*

I. PENDAHULUAN

Biomassa telah muncul sebagai salah satu sumber energi terbarukan yang paling signifikan secara strategis dalam transisi energi global, menyediakan alternatif berkelanjutan untuk bahan bakar fosil di tengah meningkatnya kekhawatiran mengenai emisi karbon, keamanan energi, dan degradasi lingkungan. Selama dua dekade terakhir, residu pertanian dan agroindustri telah mendapatkan perhatian yang cukup besar karena kelimpahannya, netralitas karbon, dan kapasitasnya untuk diubah menjadi bahan bakar padat, cair, atau gas [1],[2],[3].

Biomassa yang dipadatkan dalam bentuk briket sangat menarik karena menawarkan kepadatan curah yang lebih tinggi, karakteristik penanganan yang lebih baik, biaya transportasi yang lebih rendah, dan efisiensi pembakaran yang lebih baik dibandingkan dengan biomassa lepas [4],[5]. Perluasan teknologi produksi briket semakin memperkuat potensi biomassa sebagai solusi energi terdesentralisasi yang dapat diskalakan untuk aplikasi pedesaan dan industri [6].

Literatur terkini menekankan bahwa kinerja, stabilitas, dan kelayakan komersial briket sangat dipengaruhi oleh sifat fisik dan termalnya, yang pada gilirannya bergantung pada jenis bahan baku, pengikat, dan proses pemadatan yang digunakan. Studi pada berbagai bahan lignoselulosa termasuk ampas kopi, sekam padi, tongkol jagung, ampas tebu, kulit kakao, kulit kelapa, dan jerami gandum secara konsisten menunjukkan bahwa pemadatan meningkatkan integritas struktural, mengurangi kadar air, dan meningkatkan nilai kalor [7], [8], [9], [10]. Ketersediaan residu biomassa yang luas di seluruh wilayah tropis menggarisbawahi perlunya mengoptimalkan kualitas briket melalui kombinasi pemilihan material dan rekayasa proses [11].

Meskipun penelitian ekstensif telah dilakukan mengenai sifat bahan baku dan kinerja pengikat, satu faktor kritis tekanan pemadatan masih belum cukup dieksplorasi dalam kaitannya dengan perilaku pembakaran. Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa tekanan pemadatan secara langsung memengaruhi kepadatan briket, daya tahan mekanik, porositas, dan kandungan energi [12],[5],[13]. Namun, efek spesifiknya pada karakteristik penyalaan, evolusi suhu, durasi pembakaran, dan kinerja perpindahan panas belum dipahami secara komprehensif. Hasil yang berkaitan dengan pembakaran ini merupakan indikator kunci apakah briket dapat berfungsi secara efektif sebagai bahan bakar memasak rumah tangga atau sebagai sumber energi pemanas. Kurangnya bukti empiris terperinci tentang bagaimana tekanan memodulasi dinamika

pembakaran merupakan celah yang signifikan dalam penelitian optimasi briket.

Masalah penelitian utama yang dibahas dalam studi ini berkaitan dengan pengaruh tekanan pemadatan tekan hidrolik pada sifat termal dan pembakaran briket biomassa. Meskipun penekanan hidrolik telah dipelajari untuk meningkatkan kapasitas produksi dan keseragaman briket, hubungan eksplisit antara tekanan dan laju pembakaran masih kurang dipahami. Perbedaan ini signifikan karena tekanan yang terlalu rendah dapat menghasilkan briket yang rapuh dengan durasi pembakaran yang pendek, sedangkan tekanan yang terlalu tinggi dapat membatasi aliran udara dan menunda penyalaan karena porositas yang rendah. Solusi umum untuk masalah ini melibatkan variasi tekanan pemadatan secara sistematis dan mengevaluasi dampaknya pada parameter pembakaran utama untuk menentukan kisaran tekanan optimal guna mencapai penyalaan yang cepat dan pembakaran yang stabil serta berdurasi panjang.

Sejumlah besar literatur telah meneliti faktor-faktor seperti konsentrasi pengikat, distribusi ukuran partikel, dan variabilitas bahan baku, yang semuanya berkontribusi pada kinerja briket. Misalnya, Hijrah Pumama dkk. melaporkan bahwa proporsi pengikat secara signifikan memengaruhi kadar air, zat mudah menguap, densitas, karbon tetap, dan nilai kalor. Briket sekam kakao dengan pengikat 3–7% menunjukkan nilai kalor 4163,11 kal/g dan densitas 0,96 g/cm³, yang menunjukkan pengaruh komposisi terhadap sifat energi. Demikian pula, studi tentang ampas kopi bekas, campuran tongkol jagung, dan komposit biomassa organik menyoroti bahwa teknik produksi memengaruhi pembentukan abu, laju pembakaran, dan emisi [14], peneliti lain telah memvalidasi pentingnya pemadatan terkontrol dalam meningkatkan struktur fisik dan stabilitas termal briket [15],[16].

Secara paralel, investigasi terhadap daya tahan dan kekuatan mekanik briket menunjukkan bahwa tekanan pemadatan meningkatkan ketahanan terhadap fragmentasi, meningkatkan penanganan, dan mengurangi kehilangan partikel halus [7], [17]. Dalam hal perilaku termal, studi menunjukkan bahwa tekanan yang lebih tinggi dapat menghasilkan briket yang lebih padat dengan perpindahan panas konduktif yang lebih baik, sehingga meningkatkan stabilitas pembakaran. Namun, beberapa penulis memperingatkan

bahwa briket yang terlalu padat dapat mengalami penurunan penetrasi oksigen, yang mengakibatkan penyalaan yang lebih lambat dan perkembangan api yang tidak konsisten [18]. Wawasan yang kontradiktif ini semakin menekankan perlunya investigasi yang lebih komprehensif dan berfokus pada tekanan.

Literatur yang terkait erat membahas kinetika pembakaran, perpindahan panas, dan profil suhu briket biomassa. Penelitian tentang briket ampas tebu, tempurung kelapa, dan tempurung kakao mengungkapkan bahwa pembakaran melibatkan tahapan kompleks termasuk pengeringan, dekomposisi volatil, pembakaran api, dan oksidasi arang yang semuanya dipengaruhi oleh densitas dan struktur pori [18][15]. Namun demikian, hanya sedikit penelitian yang mengkuantifikasi bagaimana perubahan densitas yang diinduksi tekanan mengubah evolusi suhu di seluruh tahapan ini. Profil suhu sangat penting untuk memahami perkembangan api, keluaran panas puncak, dan pola oksidasi, namun bidang ini masih kurang berkembang dalam penelitian densifikasi yang ada. Hal ini memperkuat kebutuhan akan studi eksperimental terkontrol yang secara khusus berfokus pada bagaimana tekanan hidrolik membentuk jalur pembakaran ini.

Mengingat keterbatasan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kesenjangan pemahaman dengan menganalisis secara sistematis bagaimana tiga tingkat tekanan mesin pres hidrolik 60 kg/cm², 80 kg/cm², dan 100 kg/cm² memengaruhi perilaku penyalaan, karakteristik perpindahan panas, evolusi suhu, dan durasi pembakaran briket biomassa. Kebaruan penelitian ini terletak pada pendekatan integratifnya: menggabungkan pengujian pembakaran empiris dengan profil termal terperinci di bawah kondisi pemanasan terkontrol, memungkinkan perbedaan kinerja yang bergantung pada tekanan untuk diukur secara tepat. Dengan memanfaatkan temuan yang telah mapan tentang pemadatan, efek pengikat, dan mekanisme pembakaran sambil memperkenalkan eksperimen variasi tekanan yang ketat, penelitian ini memberikan wawasan baru tentang optimasi produksi briket biomassa.

Lingkup penelitian ini terbatas pada briket dengan komposisi seragam pinang dengan pengikat pati tapioka dan dimensi geometris tetap, memastikan bahwa perbedaan kinerja pembakaran yang diamati dapat dikaitkan langsung dengan tekanan pemadatan. Melalui investigasi yang terfokus ini, penelitian ini memperkuat dasar ilmiah untuk merekayasa briket biomassa berkinerja tinggi yang cocok untuk aplikasi rumah tangga dan industri. Temuan ini

pada akhirnya mendukung upaya yang lebih luas untuk memperluas pemanfaatan bahan bakar padat terbarukan di wilayah yang kaya akan residu pertanian, berkontribusi pada pengembangan energi berkelanjutan dan inovasi pengolahan limbah menjadi energi.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Desain dan Durasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain penelitian eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh tekanan pemadatan hidrolik terhadap karakteristik pembakaran dan perpindahan panas briket biomassa. Penelitian ini dilakukan selama tiga bulan, meliputi persiapan material, produksi briket, pengujian pembakaran skala laboratorium, analisis data, dan pelaporan akhir. Semua kegiatan dilakukan di tiga fasilitas laboratorium khusus untuk memastikan konsistensi metodologis dan akurasi teknis: Laboratorium Produksi USTJ untuk persiapan material dan fabrikasi briket, Laboratorium Perpindahan Panas USTJ untuk analisis pembakaran dan perilaku termal, dan Laboratorium Analisis Kimia Pakan di Universitas Hasanuddin untuk mendukung karakterisasi. Lingkungan laboratorium ini menyediakan kondisi terkendali yang diperlukan untuk mengevaluasi efek densifikasi sebagaimana ditekankan dalam penelitian sebelumnya tentang briket biomassa.

Desain penelitian ini didasarkan pada teori densifikasi, yang menyatakan bahwa tekanan pemadatan mengubah struktur fisik, porositas, dan densitas bahan bakar biomassa, sehingga memengaruhi respons termal dan pembakarannya [19]. Struktur penelitian mengikuti pendekatan sekuensial yang dimulai dengan pemrosesan bahan baku, dilanjutkan dengan formulasi briket, pemadatan dengan variasi tekanan terkontrol, dan eksperimen pembakaran yang dilakukan pada suhu pelat tetap. Arsitektur metodologis ini memastikan atribusi akurat perbedaan perilaku termal terhadap variasi tekanan, sebagaimana direkomendasikan dalam analisis briket terkontrol [20],[6].

2.2. Alat dan Instrumen Pengukuran

Percobaan ini menggunakan seperangkat instrumen terkalibrasi untuk memastikan presisi dan reproduktifitas. Pengukuran suhu selama pembakaran dicatat menggunakan termometer infrared (**Gambar 1**), yang penting untuk melacak penyalaan, suhu puncak, dan

pola peluruhan termal, sebagaimana yang dikenal dalam pemodelan pembakaran biomassa. Alat ukur kadar air (Gambar 2) digunakan untuk menentukan kadar air sisa briket sebelum pengujian, karena kadar air sangat memengaruhi penundaan penyalaan, efisiensi pembakaran, dan profil kehilangan massa[1]. Anemometer (Gambar 3) mengukur kecepatan udara di dalam ruang uji untuk memastikan lingkungan dengan turbulensi rendah, suatu persyaratan untuk mengisolasi efek perpindahan panas kondukti. Stopwatch (Gambar 4) mencatat durasi penyalaan dan pembakaran dengan akurasi $\pm 0,01$ detik. Preparasi ukuran partikel dilakukan menggunakan shaker mill (Gambar 5), dan ayakan 100 mesh, mengikuti standar optimasi yang tercantum dalam literatur untuk memastikan kehalusan bahan baku yang seragam. Pengukuran massa dilakukan menggunakan timbangan laboratorium presisi, sementara pengeringan menggunakan penjemuran dan oven listrik dengan suhu terkontrol. Alat-alat ini secara kolektif mendukung pengukuran variabel yang memengaruhi kualitas briket, termasuk kepadatan, porositas, kadar air, dan laju pembakaran, yang konsisten dengan studi briket yang telah ditetapkan [14].



(a)



(b)

Gambar 6. a). Kompor Listrik, b). Kamera

2.3. Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah arang pinang yang berasal dari karbonisasi biomassa batang pinang (Gambar 7), karbonisasi dilakukan dalam tungku drum hingga biomassa mencapai dekomposisi termal sempurna, membentuk arang dengan kandungan karbon tetap yang stabil. Residu pinang dipilih karena kelimpahannya dan potensinya sebagai bahan bakar padat terbarukan, sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa agro-residu memiliki sifat kalor yang baik untuk aplikasi biofuel terdensifikasi.



Gambar 1.
termometer infrared



Gambar 2.
Alat ukur kadar



Gambar 3.
Anemometer



Gambar 4.
Stopwatch



Gambar 6. Batang Pinang

Pati tapioka digunakan sebagai pengikat dengan proporsi tetap 200 g per 800 kg arang. Rasio ini dipilih berdasarkan laporan sebelumnya yang menunjukkan efisiensi pengikat berbasis pati dalam meningkatkan kekuatan mekanis briket tanpa menghambat pembakaran. Air ditambahkan dengan volume konstan 600 ml di semua dijadikan satu untuk menjaga konsistensi plastisitas campuran, faktor penting dalam mencapai pepadatan yang seragam.

2.4. Proses Produksi Briket

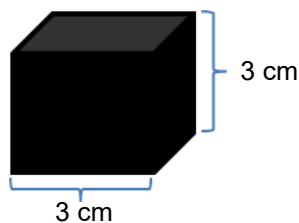
Proses pembuatan briket dirancang mengikuti protokol pepadatan standar yang tercantum dalam literatur. Batang pinang



Gambar 5. Shaker Mills

mentah dijemur selama 3 sampai 6 hari untuk mengurangi kadar air awal, sebuah langkah penting karena kadar air yang tinggi dapat mengurangi efisiensi pemadatan dan memperpanjang waktu penyalaan. Material yang telah dikeringkan mengalami karbonisasi dalam tungku drum hingga terjadi transisi sempurna menjadi arang. Setelah dingin, arang digiling secara mekanis dan diayak melalui saringan 100 mesh untuk mencapai keseragaman partikel, yang meningkatkan sifat pemadatan dan daya tahan briket.

Campuran homogen tersebut terdiri dari 800 g arang, 200 g tepung tapioka, dan 600 ml air. Proporsi ini dipilih untuk memastikan pengikatan dan integritas struktural yang optimal, yang mencerminkan rekomendasi dalam studi kinerja bahan pengikat. Bahan diremas secara menyeluruh untuk memastikan distribusi bahan pengikat yang merata sebelum dicetak ke dalam cetakan seragam berukuran 3 × 3 cm.



Gambar 7. Model Briket Kotak

Pemadatan dilakukan menggunakan alat pres hidrolik pada tiga tingkat tekanan: 60 kg/cm², 80 kg/cm², dan 100 kg/cm². Variasi tekanan ini dirancang untuk menguji efek densifikasi, berdasarkan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa tekanan mekanis memengaruhi porositas, densitas, dan daya tahan briket. Setelah pemadatan, briket dijemur selama 2-3 hari untuk menghilangkan kadar air bebas, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu 100 °C selama 60 menit untuk memastikan keseragaman kadar air sebelum pengujian pembakaran. Proses pengeringan dua tahap ini sejalan dengan strategi optimasi pengeringan yang direkomendasikan untuk briket biomassa.

2.5 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggabungkan variabel independen, dependen, dan terkontrol untuk memastikan interpretasi hasil yang akurat. Variabel independen adalah tekanan pemadatan (60 kg/cm², 80 kg/cm², dan 100 kg/cm²), dipilih karena pengaruh langsungnya terhadap densitas

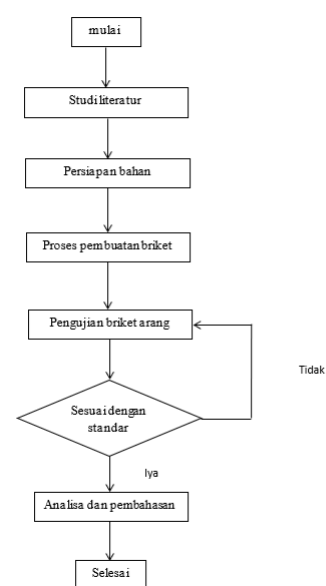
briket dan pemadatan struktural. Variabel dependen adalah laju perpindahan panas yang diamati selama pembakaran, karena perpindahan panas memengaruhi stabilitas api, durasi pembakaran, dan keluaran suhu puncak.

Variabel yang dikontrol meliputi rasio arang terhadap binder, ukuran briket, durasi pengeringan, jenis material, dan lingkungan pembakaran. Semua uji pembakaran dilakukan dalam kondisi ruangan tertutup untuk membatasi variabilitas aliran udara, sesuai dengan standar pemodelan pembakaran.

Kontrol ini memastikan bahwa variasi perilaku termal yang diamati dapat dikaitkan terutama dengan perbedaan tekanan pemadatan, alih-alih faktor eksternal.

2.6 Prosedur Percobaan Pembakaran

Uji pembakaran dilakukan dengan menempatkan setiap sampel briket di atas pelat logam yang telah dipanaskan terlebih dahulu hingga suhu konstan 250°C. Pendekatan ini memungkinkan penilaian langsung perpindahan panas konduktif, sejalan dengan temuan sebelumnya bahwa konfigurasi pemanas pelat memberikan wawasan yang andal tentang difusi termal dalam biomassa yang dipadatkan. Pembacaan suhu dicatat secara terus-menerus sejak awal pemanasan hingga pembakaran sempurna. Diagram alir penelitian (Gambar 8)



Gambar 8. Diagram Alir Penelitian

Setiap sampel memiliki massa awal 63 g dan massa akhir 36 g setelah pembakaran, yang menunjukkan perilaku kehilangan massa yang konsisten di berbagai tingkat tekanan. Waktu penyalaan dan durasi pembakaran diukur menggunakan stopwatch, dengan waktu penyalaan tercatat 13, 17, dan 18 menit serta total durasi pembakaran 110, 110, dan 115 menit untuk sampel dengan tekanan 60, 80, dan 100 psi. Data ini dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Ringkasan ukuran briket, massa, kadar air, waktu penyalaan, dan durasi pembakaran untuk tingkat tekanan 60 kg/cm², 80 kg/cm², dan 100 kg/cm².

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Parameter Eksperimen

Parameter eksperimen yang dikumpulkan selama pengujian dirangkum dalam Tabel 1, yang meliputi dimensi briket, volume air, massa awal dan akhir, waktu penyalaan, durasi pembakaran, dan suhu pelat. Variabel-variabel ini dipilih sebagai indikator pembakaran inti berdasarkan relevansinya dalam penelitian sebelumnya tentang kinerja kalor, kekuatan mekanis, dan daya tahan briket.

Tabel 1. Parameter Eksperimen

No	Keterangan	Briket		
1	Tekanan	60 kg/cm ²	80 kg/cm ²	100 kg/cm ²
2	Bentuk spesimen kubus briket	3 cm x 3 cm	3 cm x 3 cm	3 cm x 3 cm
3	Volume Air	600 ml	600 ml	600 ml
4	Berat awal	63 g	63 g	63 g
5	Berat akhir	36 g	36 g	36 g
6	Temperatur Awal pembakaran briket (plat kompor listrik)	250°C	250°C	250°C
7	Awal briket terbakar	13	17	18
8	Lama proses pembakaran	1 jam 10 menit	1 jam 15 menit	1 jam 30 menit

3.2. Kondisi Uji Pelat Pembakaran

Semua uji pembakaran dilakukan pada pelat pemanas logam yang dijaga pada suhu konstan 250°C. Pelat tersebut berfungsi sebagai sumber panas yang stabil untuk memulai dan mempertahankan proses pembakaran, sehingga memungkinkan peran perpindahan panas konduktif antara permukaan panas dan briket untuk diteliti secara eksplisit. Penelitian sebelumnya telah menekankan pentingnya masukan panas yang terkontrol untuk menganalisis kinetika pembakaran briket biomassa. Untuk memastikan keandalan, pembacaan suhu dikumpulkan secara berkala menggunakan termokopel terkalibrasi dan diverifikasi dengan termometer laboratorium. Aliran udara di lingkungan pengujian dijaga pada

turbulensi minimal untuk mencegah distorsi pada perilaku api. Pendekatan ini memastikan reproduktifitas dan memfasilitasi perbandingan di berbagai tingkat tekanan.

Dalam semua pengujian, briket mengalami serangkaian tahapan termal yang berbeda: pemanasan awal, penguapan air, pelepasan volatil yang disertai pembentukan asap, munculnya api, pembakaran stabil, penyusutan struktur, dan pembentukan abu akhir. Awal dan durasi tahapan ini bervariasi tergantung pada tekanan pemadatan, yang menyoroti peran kepadatan dalam memodulasi perpindahan panas dan kinetika pembakaran.

3.3. Spesifikasi Briket dan Parameter Pembakaran Fundamental

Sebelum diuji pembakarannya, setiap briket diproduksi secara seragam menggunakan campuran 800 gram arang pinang, 200 gram perekat tapioka pati, dan 600 ml air. Semua briket dicetak berbentuk kubus berukuran 3 cm dan dipadatkan pada tiga tingkat tekanan: 60 kg/cm², 80 kg/cm², dan 100 kg/cm². Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, proporsi perekat dan ukuran partikel memainkan peran penting dalam menentukan densitas briket dan kinerja pembakaran (Hijrah Pumama dkk., 2013; Suprpti & Ramlah, 2013). Standarisasi komposisi dan geometri memastikan bahwa variasi karakteristik pembakaran semata-mata disebabkan oleh perbedaan tekanan pemadatan.

Setiap briket memiliki massa awal 63 g sebelum pembakaran dan massa residu akhir 36 g setelah pembakaran sempurna, menunjukkan konversi material yang konsisten di semua sampel. Tabel 2 merangkum parameter pembakaran fundamental untuk ketiga tingkat tekanan.

Waktu penyalaan meningkat seiring dengan tekanan pemadatan: briket yang dipadatkan pada tekanan 60 kg/cm² menyala setelah 13 menit, briket pada tekanan 80 kg/cm² menyala setelah 17 menit, dan briket pada tekanan 100 kg/cm² menyala setelah 18 menit. Temuan ini konsisten dengan laporan literatur bahwa briket yang lebih padat memerlukan fase pemanasan awal yang lebih lama untuk mencapai suhu pelepasan volatil karena porositas yang lebih rendah dan massa termal yang lebih tinggi. Total durasi pembakaran juga menunjukkan tren yang bergantung pada tekanan, meningkat sedikit dari 110 menit untuk briket 60 kg/cm² dan 80 kg/cm² menjadi 115 menit untuk briket 100 kg/cm².

Tabel 2. Data Hasil Proses Pembakaran Briket Batang pinang

Waktu (menit)	Briket batang pinang (°C) 60 kg/cm ²	Briket batang pinang (°C) 80 kg/cm ²	Briket batang pinang (°C) 100 kg/cm ²
5	280	290	290
10	289	367	363
15	352	381	372
20	395	344	423
25	440	417	425
30	410	475	428
35	457	462	432
40	462	450	460
45	430	510	450
50	366	435	375
55	376	455	436
60	456	445	490
65	462	439	520
70	495	435	493
75	457	451	448
80	445	469	416
85	412	452	395
90	413	433	333
95	398	390	332
100	370	385	327
105	350	353	325
110	340	340	320
..		290	315
..		367	290
..		381	290
..		344	363
..		417	372
120			423

3.4. Profil Suhu Pembakaran

Perkembangan suhu setiap briket selama pembakaran disajikan pada Tabel 2. Untuk sampel 60 kg/cm², suhu meningkat dari 250 °C awal pada menit ke 5 hingga mencapai puncak sekitar 509 °C pada menit ke 70. Puncak ini menunjukkan pembakaran fase gas yang intens setelah devolatilisasi sempurna, sebuah tren yang umum diamati pada bahan bakar biomassa. Setelah mencapai suhu puncak, briket menunjukkan penurunan suhu secara bertahap hingga mencapai titik bakar sempurna pada menit ke 110.

Briket 80 kg/cm² menunjukkan pola termal yang lebih kompleks. Suhnya naik dari 250 °C pada menit ke 5 menjadi sekitar 475 °C pada menit ke 30, turun sedikit, lalu melonjak lagi menjadi sekitar 469 °C pada menit ke 80. Perilaku suhu multi puncak ini menunjukkan pembakaran bertahap yang terkait dengan pelepasan volatil dan oksidasi arang secara berurutan. Fenomena ini telah dilaporkan dalam studi briket biomassa komposit, di mana perbedaan struktur internal membentuk jalur dekomposisi termal.

Sebaliknya (Tabel 3), briket 100 kg/cm² mencapai suhu maksimum tertinggi di antara ketiga sampel, mencapai puncaknya sekitar 520 °C sekitar 65 menit. Puncak termal yang tinggi ini disebabkan oleh peningkatan densitas, yang meningkatkan perpindahan panas konduktif dan memungkinkan oksidasi suhu tinggi yang berkelanjutan setelah pembakaran yang menyala terjadi. Pengamatan ini memperkuat klaim sebelumnya bahwa densifikasi meningkatkan

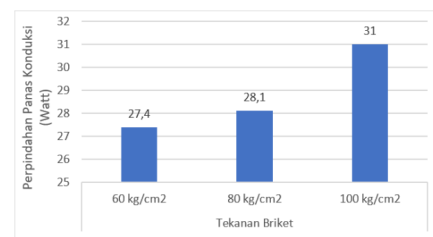
efisiensi termal. Menjelang pembakaran habis, suhu briket 100 kg/cm² menurun secara stabil hingga sekitar 315 °C pada 110 menit.

Tabel 3. Data Hasil Proses Pembakaran Briket Batang pinang

Tekanan (Kg/cm ²)	Temperature Awal (°C)	Temperatur tertinggi (°C)
60	250	490
80	250	495
100	250	520

Tabel 4. Hasil Perhitungan Perpindahan Panas Konduktifitas Briket Kotak batang pinang

Tekanan Briket Kg/cm ²	Perpindahan Panas Konduksi (watt)
60	27
80	28,1
100	31

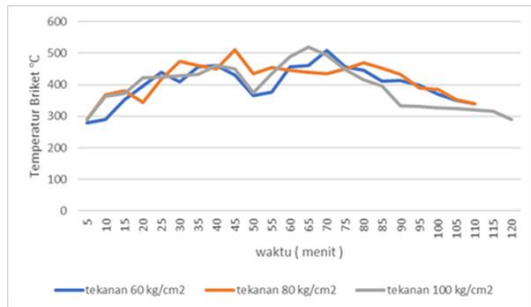


Gambar 9. Tekanan briket Terhadap Perpindahan Panas Konduksi

Hasil penelitian ini menggambarkan perilaku termal, kinerja penyalaan, karakteristik perpindahan panas, dan evolusi pembakaran briket pinang yang dipadatkan pada tiga tekanan hidrolik berbeda 60 kg/cm², 80 kg/cm², dan 100 kg/cm² (Tabel 4). Temuan ini disajikan sesuai dengan struktur rancangan percobaan dan kerangka kerja analitis yang telah ditetapkan pada bagian sebelumnya. Bagian ini bertujuan untuk memberikan analisis yang rinci dan teliti mengenai karakteristik pembakaran briket dalam kondisi pemanasan pelat yang terkontrol.



Gambar 10. Hubungan Tekanan Pencetakan Terhadap Laju Perpindahan Panas



Gambar 11. Grafik Laju Pembakaran Briket Batang pinang

3.5. Perilaku Konduksi Panas

Konduksi panas dari pelat pemanas ke dalam briket meningkat seiring kenaikan tekanan pemadatan. Berdasarkan Tabel 4, laju perpindahan panas konduktif berturut-turut adalah 27 W (60 kg/cm²), 28,1 W (80 kg/cm²), dan 31 W (100 kg/cm²). Kenaikan ini mencerminkan meningkatnya densitas dan berkurangnya porositas, yang memperbaiki kontak antarpartikel arang dan memperbesar jalur konduksi panas. Dengan struktur yang lebih rapat, resistansi termal internal menurun sehingga energi dari pelat pemanas lebih efisien ditransfer ke bagian dalam briket. Tren 60 < 80 < 100 kg/cm² ini konsisten dengan literatur densifikasi biomassa yang menunjukkan bahwa tekanan pemadatan yang lebih tinggi meningkatkan konektivitas termal dan stabilitas pembakaran (Gambar 9).

Tren konduksi panas dapat dinyatakan secara kualitatif sebagai 60 kg/cm² < 80 kg/cm² < 100 kg/cm². Urutan ini mencerminkan perilaku termal yang dipengaruhi oleh kepadatan yang dijelaskan dalam studi briket sebelumnya, yang menunjukkan bahwa tekanan pemadatan yang lebih tinggi menghasilkan ruang hampa yang lebih kecil, konektivitas termal antar partikel yang lebih baik, dan efisiensi perpindahan panas yang lebih baik (Gamabr 10).

3.6. Pengaruh Tekanan terhadap Perilaku Pengapian

Gambar 1 mengilustrasikan hubungan antara tekanan pemadatan dan kinerja penyalaan (Gambar 11). Briket 60 psi mencapai waktu penyalaan tercepat karena densitasnya yang lebih rendah dan porositas yang lebih besar, yang memfasilitasi penetrasi panas yang cepat dari pelat panas. Namun, pada tekanan 80 kg/cm² dan 100 kg/cm², waktu penyalaan meningkat 4 sampai 5 menit, mencerminkan kebutuhan energi termal yang lebih tinggi untuk memulai pelepasan volatil.

Perilaku ini sejalan dengan temuan Suprapti & Ramlah (2013) [21], yang mencatat bahwa briket kulit kakao yang lebih padat membutuhkan pemanasan awal yang lebih lama meskipun

menunjukkan peningkatan integritas struktural. Demikian pula, Mangkau dkk. (2011) mengamati bahwa briket tongkol jagung dengan kepadatan lebih tinggi menyala lebih lambat tetapi terbakar dengan stabilitas termal yang lebih baik [21].

3.7. Durasi Pembakaran dan Tahapan Pembakaran Berkelanjutan

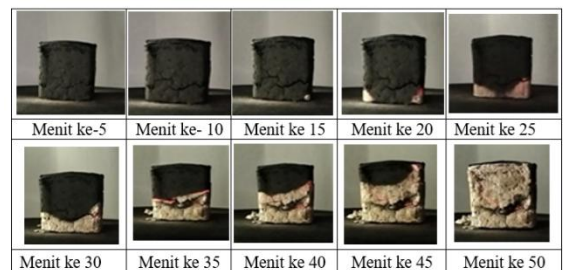
Meskipun penyalaan membutuhkan waktu lebih lama pada tekanan yang lebih tinggi, stabilitas pembakaran dan durasi pembakaran sedikit membaik seiring dengan peningkatan kepadatan pemadatan. Briket 100 kg/cm² menunjukkan durasi pembakaran rata-rata 1 jam 55 menit, lima menit lebih lama daripada briket 60 kg/cm² dan 80 kg/cm². Perbedaan ini menunjukkan bahwa tekanan yang lebih tinggi memperpanjang fase oksidasi arang.

Briket dengan kepadatan lebih tinggi melepaskan kelembapan dan gas volatil lebih lambat karena jalur internal yang terbatas. Efek pelepasan terkendali ini memperpanjang proses pembakaran dan mendistribusikan panas secara lebih merata seiring waktu. Studi pada briket tempurung kelapa juga melaporkan durasi pembakaran yang lebih lama pada tekanan pemadatan yang lebih tinggi, sementara Soffanul Huda dkk. (2018) menekankan bahwa kepadatan memengaruhi retensi zat volatil dan oksidasi karbon tetap [21].

3.8. Evolusi Pembakaran Visual

Dokumentasi visual menangkap perilaku pembakaran berurutan setiap jenis briket.

Untuk briket 60 kg/cm², nyala api tampak muncul antara menit ke-15 dan ke-25, bertepatan dengan pelepasan senyawa volatil. Intensitas nyala api mencapai puncaknya sekitar menit ke-40, bertepatan dengan pembacaan suhu sekitar 488 °C. Setelah itu, nyala api perlahan-lahan berkurang hingga padam (Gambar 11).

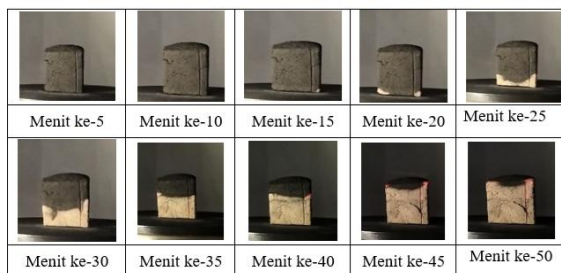


Gambar 11. Evolusi nyala bara tekanan 60 kg/cm²

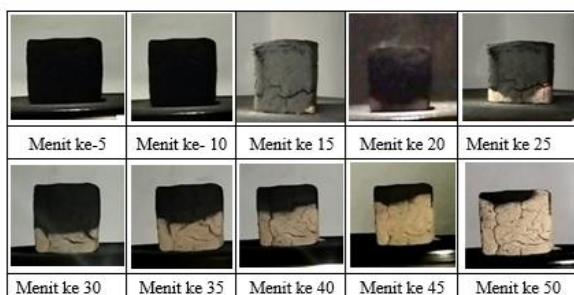
Briket 80 kg/cm² menyala sekitar 15 sampai 30 menit, meskipun suhu puncak terjadi

kemudian sekitar 50 menit, dengan suhu maksimum 425 °C (Gambar 12).

Briket 100 kg/cm² menunjukkan penyalan paling lambat, dengan api terlihat sekitar menit ke 18. Suhu puncaknya, 470 °C, terjadi mendekati menit ke-50. Degradasi struktural terjadi lebih lambat dibandingkan briket lainnya, dan baru terlihat setelah 50 menit, indikator pembakaran yang lebih lambat namun lebih berkelanjutan (Gambar 13).



Gambar 12. Evolusi nyala bara tekanan 80 kg/cm²



Gambar 13. Evolusi nyala bara tekanan 100 kg/cm²

3.9. Interpretasi Urutan Pembakaran

Semua briket mengikuti pola pembakaran yang secara umum serupa: pemanasan bertahap, pengasapan awal, pelepasan volatil, pembentukan api, pembakaran api yang intens, oksidasi arang yang membara, dan akhirnya terbakar habis. Namun, waktu dan intensitas setiap tahap berbeda berdasarkan tekanan pemadatan.

Briket bertekanan rendah bertransisi lebih cepat dari pemanasan ke pembakaran karena porositas yang lebih besar dan difusi panas internal yang lebih mudah. Sebaliknya, briket bertekanan tinggi menunjukkan permulaan api yang tertunda tetapi menghasilkan fase suhu tinggi yang lebih intens dan stabil karena peningkatan retensi panas internal dan berkurangnya pelepasan volatil prematur. Dinamika ini konsisten dengan literatur tentang pemadatan biomassa, yang menghubungkan kekompakan struktural dengan penundaan

penyalan dan peningkatan efisiensi pembakaran [22].

Di semua kondisi, keruntuhan struktural akhir briket menjadi abu terjadi hanya setelah sebagian besar karbon tetap telah dikonsumsi, yang mengonfirmasi perilaku oksidasi lengkap serupa dengan yang dilaporkan dalam studi pembakaran briket sebelumnya.

3.10. Ringkasan Tren Kinerja Keseluruhan

Secara keseluruhan, tekanan pemadatan hidrolik menunjukkan pengaruh yang terukur dan konsisten terhadap parameter pembakaran utama. Tekanan yang lebih tinggi mengurangi porositas, meningkatkan densitas, menunda penyalan, meningkatkan suhu puncak, meningkatkan konduksi termal, dan memperpanjang durasi pembakaran. Temuan ini mendukung dan memperluas pengamatan sebelumnya dalam literatur mengenai pentingnya densifikasi untuk meningkatkan kualitas briket [21], [23]

Analisis gabungan profil suhu, waktu penyalan, laju perpindahan panas, dan pola pembakaran visual menegaskan bahwa tekanan hidrolik merupakan parameter penting dalam mengoptimalkan kinerja briket pinang. Penelitian ini berkontribusi pada pemahaman yang lebih luas tentang perilaku bahan bakar biomassa terbarukan dan memperkuat potensi residu pinang sebagai sumber daya bioenergi yang efektif.

IV. KESIMPULAN

Temuan penelitian ini menegaskan bahwa tekanan pemadatan hidrolik merupakan parameter kunci yang menentukan kinerja pembakaran briket biomassa pinang. Peningkatan tekanan dari 60 kg/cm² menjadi 100 kg/cm² menghasilkan briket dengan densitas lebih tinggi, konduktivitas termal lebih baik, dan durasi pembakaran yang lebih panjang. Meskipun briket berdensitas tinggi menunjukkan fase pemanasan awal yang lebih lama akibat porositas yang lebih rendah dan penetrasi oksigen yang terbatas, setelah penyalan tercapai, briket tersebut memperlihatkan pola pembakaran yang lebih stabil, suhu puncak yang lebih tinggi, serta laju oksidasi yang lebih terkendali. Dalam hal ini, briket pada tekanan 100 kg/cm² mencatat suhu maksimum tertinggi dan waktu pembakaran terlama, yang menunjukkan bahwa pemadatan meningkatkan retensi panas, efisiensi termal, dan stabilitas reaksi pembakaran. Hasil ini menegaskan pentingnya optimasi tekanan pemadatan untuk menyeimbangkan kemudahan penyalan dan pembakaran

berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini memperluas pemahaman tentang hubungan antara densitas, porositas, dan respons termal dalam sistem briket biomassa. Secara khusus, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan mengevaluasi secara sistematis perilaku termal briket berbahan limbah pinang, sumber biomassa yang masih kurang dimanfaatkan namun memiliki potensi energi terbarukan yang besar, terutama di wilayah tropis seperti Papua. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengeksplorasi pengaruh aliran udara, geometri briket, pengkondisian kadar air, serta sistem pengikat hibrida, serta mengkaji interaksi antara kompor dan briket dalam kondisi penggunaan nyata. Secara keseluruhan, studi ini menegaskan kelayakan teknologi briket pinang sebagai solusi energi terbarukan yang efisien, terukur, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Dinesha P., Shiva Kumar, and Marc A RosenArticle, "Biomass Briquettes as an Alternative Fuel: A Comprehensive Review", doi: 10.1002/ente.201801011.
- [2] M. Dadi *et al.*, "A comprehensive review of advances in bioenergy including emerging trends and future directions," *Discov. Energy*, vol. 5, no. 1, 2025, doi: 10.1007/s43937-025-00095-3.
- [3] K. Polipalli, S. Suraboyina, M. Kashimalla, and A. Polumati, "A review on value addition of Agricultural Residues by Chemical and Bio-chemical Processes to abate environmental pollution," *Green Technol. Sustain.*, vol. 3, no. 4, p. 100241, 2025, doi: 10.1016/j.grets.2025.100241.
- [4] S. Y. Kpalo, M. F. Zainuddin, L. A. Manaf, and A. M. Roslan, "A review of technical and economic aspects of biomass briquetting," *Sustain.*, vol. 12, no. 11, 2020, doi: 10.3390/su12114609.
- [5] S. E. Ibitoye, R. M. Mahamood, T. C. Jen, and E. T. Akinlabi, "Combustion, Physical, and Mechanical Characterization of Composites Fuel Briquettes from Carbonized Banana Stalk and Corn cob," *Int. J. Renew. Energy Dev.*, vol. 11, no. 2, pp. 435–447, 2022, doi: 10.14710/ijred.2022.41290.
- [6] H. M. P. Marreiro, R. S. Peruchi, R. M. B. P. Lopes, S. L. F. Andersen, S. A. Eliziário, and P. R. Junior, "Empirical studies on biomass briquette production: A literature review," *Energies*, vol. 14, no. 24, pp. 1–40, 2021, doi: 10.3390/en14248320.
- [7] R. I. Muazu and J. A. Stegemann, "Effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs," *Fuel Process. Technol.*, vol. 133, pp. 137–145, 2015, doi: 10.1016/j.fuproc.2015.01.022.
- [8] M. Lubwama, A. Birungi, A. Nuwamanya, and V. Andrew, "Characteristics of rice husk biochar briquettes with municipal solid waste cassava , sweet potato and matooke peelings as binders," pp. 243–254, 2024.
- [9] A. Seco, S. Espuelas, S. Marcelino, A. M. Echeverría, and E. Prieto, "Characterization of Biomass Briquettes from Spent Coffee Grounds and Xanthan Gum Using Low Pressure and Temperature," 1939, doi: 10.1007/s12155-019-10069-8.
- [10] C. H. A. I. Raju, K. Prem, K. Sunil, K. S. Bhimareddy, and C. Ramya, "Materials Today: Proceedings Studies on densification and conversion of wastes as fuel briquettes for power generation," *Mater. Today Proc.*, vol. 44, pp. 1090–1107, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.184.
- [11] J. L. Chukwuneke, A. C. Umeji, J. E. Sinebe, and O. B. Fakiyesi, "Optimization of Composition of Selected Biomass for Briquette Production," vol. 8, no. 4, pp. 227–236, 2020, doi: 10.13189/ujme.2020.080408.
- [12] J. S. Tumuluru, "Effect of Moisture Content and Hammer Mill Screen Size on the Briquetting Characteristics of Woody and Herbaceous Biomass †," no. June, pp. 1–11, 2018, doi: 10.14356/kona.2019009.
- [13] L. Abdullahi, M. Abubakar, and B. Ndagi, "Original Research Article Effect Of Compaction Pressure And Biomass Type (Rice Husk And Sawdust) On Some Physical And Combustion Properties Of Briquettes," vol. 17, no. March, pp. 61–70, 2021.
- [14] S. Espuelas, S. Marcelino, A. M. Echeverría, J. M. Castillo, and A. Seco, "Low energy spent coffee grounds briquetting with organic binders for biomass fuel manufacturing," *Fuel*, vol. 278, no. June, p. 118310, 2020, doi: 10.1016/j.fuel.2020.118310.
- [15] and B. B. Majid Salehi Siahdashti, Mohammad Talaeipour, * Habibollah Khademieslam, "Investigation of Physical and Thermal Properties of Fuel Briquettes Made of Bagasse." doi: DOI:

- 10.15376/biores.17.2.2053-2073.
- [16] Dwi Danang, Budiyo Aris, and Ervando Mochamad, "Karakterisasi Briket Dari Limbah Pengolahan Kayu Sengon Dengan Metode Cetak Panas," *J. Mech. Eng. Learn.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2013, [Online]. Available: file:///C:/Users/user/Downloads/1942-Article Text-3862-1-10-20130924.pdf
- [17] J. S. Tumuluru, L. G. Tabil, Y. Song, and K. L. Iroba, "Impact of process conditions on the density and durability of wheat , oat , canola , and barley straw briquettes," pp. 388–401, 2015, doi: 10.1007/s12155-014-9527-4.
- [18] S. Mustafa and S. Ibrahim, "Bioresources and Environment Thermal and Physical Properties of Briquette Fuels from Coconut Shells and Cocoa Shells," vol. 1, no. 3, pp. 45–53, 2023.
- [19] A. Journal, G. Alp, and G. Kağan, "Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi Effect of moisture content , particle size and pressure on some briquetting properties of hazelnut residues," vol. 35, pp. 330–338, 2020, doi: 10.7161/omuanajas.736851.
- [20] A. Gebrekidan, M. Goitom, G. Berhe, and M. Berhe, "Production and characterization of briquettes from sugarcane bagasse of Wonji Sugar Factory , Oromia , Ethiopia," *Mater. Renew. Sustain. Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 27–43, 2024, doi: 10.1007/s40243-023-00248-1.
- [21] S. Huda, G. Rubiono, and I. Qiram, "Pengaruh Variasi Tekanan Dan Komposisi Bahan Terhadap Pembakaran Briket Kulit Kopi (Coffea Canephora) Banyuwangi," *J. V-Mac*, vol. 0112, no. 2, pp. 28–31, 2018.
- [22] A. Kaur, M. Roy, and K. Kundu, "Review Article Densification Of Biomass By Briquetting: A Review," vol. 8, pp. 20561–20568, 2017, doi: 10.24327/IJRSR.
- [23] S. Syarif, R. B. Cahyono, and M. Hidayat, "Pemanfaatan Limbah Kulit Kakao Menjadi Briket Arang sebagai Bahan Bakar Alternatif dengan Penambahan Ampas Buah Merah," *J. Rekayasa Proses*, vol. 13, no. 1, p. 57, 2019, doi: 10.22146/jrekpros.41517.