

Densifikasi Batubara Dan Biomassa Sekam Padi Menggunakan Teknologi Sintering Dingin

By 03051282126030 Muhammad Ghifa Al Muzhafar

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemanfaatan energi terbarukan menjadi semakin penting di era modern ini untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang tidak ramah lingkungan. Menurut Eni (2021), menyatakan bahwa batubara merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi karbon global, sehingga diperlukan alternatif untuk mengurangi dampak negatif dari penggunaannya. Salah satu solusi yang banyak dikaji adalah pencampuran batubara dengan bahanbiomassa untuk menghasilkan bahan bakar komposit yang lebih ramah lingkungan.

ZA dkk. (2021) menyatakan bahwa briket mempunyai nilai kalor tertinggi sebesar 5.777,7247 Kkal/kg, dan dapat menanggulangi polusi limbah produksi. Penggunaan briket batubara sebagai sumber energi alternatif di sektor rumah tangga dan industri kecil-menengah (IKM) di Indonesia menunjukkan potensi yang signifikan, meskipun Neraca Energi Nasional (2021) mencatat konsumsi briket masih di bawah 10.000 ton per tahun, beberapa estimasi tidak resmi memperkirakan bahwa tingkat pemakaian aktual di sektor rumah tangga dan IKM dapat mencapai 5.000 hingga 10.000 ton per bulan, terutama bila mempertimbangkan potensi produksi dan distribusi dari berbagai daerah seperti Jawa, Sumatera, dan Kalimantan. Kecilnya penggunaan briket ini karena kurangnya sosialisasi pemerintah kepada masyarakat serta kurang menyebarnya pendistribusian briket.

Briket batubara umumnya memiliki bentuk silinder atau kubus, dengan ukuran yang bervariasi untuk memenuhi kebutuhan pengguna. Rindayatno (2017), briket silinder berdiameter 3,8 cm dan tinggi 10,4 cm, sedangkan briket kubus umumnya berukuran sekitar 75 x 75 x 75 mm.

Menurut Restin dkk. (2025) bahwa penggunaan bahan perekat dalam proses pembuatan biobriket merupakan faktor penting untuk mencapai

densifikasi yang optimal, yang berkontribusi pada kekuatan dan stabilitas briket. Namun Teknologi Sintering Dingin ini menawarkan pendekatan yang lebih ramah lingkungan. Menurut Firda dkk. (2021) sintering dingin, yang tidak memerlukan suhu tinggi, dapat digunakan untuk menghasilkan briket komposit dengan kekuatan mekanis yang baik tanpa konsumsi energi yang besar. Hal ini membuat metode ini lebih efisien dari segi energi dan biaya, terutama dibandingkan dengan metode sintering konvensional yang membutuhkan panas dalam jumlah besar. Diharapkan, proses ini dapat menghasilkan biobriket dengan kualitas yang baik sambil mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Maka dari itu perlu adanya investigasi lebih lanjut sehingga penulis melakukan penelitian dengan judul: **DENSIFIKASI BATUBARA DAN BIOMASSA SEKAM PADI MENGGUNAKAN TEKNOLOGI SINTERING DINGIN.**

1.2 Rumusan Masalah

Biobriket batubara-sekam padi memiliki potensi yang bagus, meskipun biobriket ini memiliki prospek yang menjanjikan, tantangan utama terletak pada menentukan rasio campuran batubara dan sekam padi yang ideal, serta metode pembuatan yang efisien.

Teknologi sintering dingin dapat diimplementasikan untuk meningkatkan efisiensi dalam pembuatan briket batubara-sekam padi, meskipun produk tersebut belum tersedia di pasar. Tantangan utama adalah menentukan potensi sintering dingin dalam mengoptimalkan proses pembuatan briket batubara-sekam padi dari segi konsumsi energi, biaya produksi, dan kualitas briket yang dihasilkan.

Bagaimana densifikasi batubara-sekam padi dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efisiensi pembuatan briket. Meskipun batubara-sekam padi menunjukkan potensi sebagai bahan bakar alternatif, tantangan utama adalah menentukan metode densifikasi yang paling efektif untuk meningkatkan kualitas dan kekuatan briket yang dihasilkan.

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian skripsi berjudul "Densifikasi Batubara dan Biomassa Sekam Padi Menggunakan Teknologi Sintering Dingin" mencakup

1. Bahan Baku

Penelitian menggunakan batubara sebagai bahan utama dan sekam padi sebagai bahan biomassa tambahan. Berbagai rasio campuran batubara dan sekam padi diterapkan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi terhadap kualitas briket. Pemilihan bahan didasarkan pada ketersediaan lokal serta tujuan pemanfaatan limbah pertanian sebagai sumber energi alternatif.

2. Teknologi Sintering Dingin

Teknologi sintering dingin diterapkan sebagai metode pembentukan briket tanpa proses pemanasan tinggi. Evaluasi dilakukan untuk mengetahui efektivitas teknologi ini dalam meningkatkan kekuatan mekanik briket dan efisiensi energi proses produksi dibandingkan metode sintering konvensional.

3. Parameter Densifikasi

Penelitian ini menganalisis pengaruh parameter proses seperti tekanan pemampatan, durasi waktu pepadatan, dan suhu lingkungan terhadap hasil densifikasi. Tujuannya adalah untuk menentukan kombinasi parameter optimal yang dapat menghasilkan briket dengan densitas tinggi dan ikatan partikel yang kuat.

4. Karakteristik Briket

Karakteristik fisik dan kimia dari briket hasil sintering dingin dianalisis untuk menilai kelayakan penggunaannya sebagai bahan bakar. Penilaian mencakup kekuatan mekanik, kerapatan fisik (densitas), serta performa pembakaran sebagai indikator utama kualitas briket.

5. Analisis Efisiensi

Penelitian ini juga membandingkan efisiensi energi dan biaya produksi antara proses sintering dingin dan metode pembuatan briket tradisional. Analisis ini dilakukan untuk menilai keunggulan ekonomi dan

keberlanjutan teknologi yang dikembangkan, khususnya dalam skala rumah tangga dan industri kecil-menengah.

6. Pengujian Laboratorium

Untuk mendukung validitas hasil, dilakukan serangkaian pengujian laboratorium, meliputi:

- Uji Densitas, guna melihat kepadatan material.
- Uji Scanning Electron Microscopy (SEM), untuk mengamati untuk mengamati morfologi dan struktur mikro permukaan briket.
- Uji X-Ray Diffraction (XRD) untuk melihat komposisi yang mungkin terbentuk akibat pencampuran batubara dan sekam padi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Membuat briket komposit berbasis campuran batubara dan sekam padi menggunakan metode sintering dingin sebagai alternatif bahan bakar padat yang ramah lingkungan dan efisien.
2. Menganalisis pengaruh variasi komposisi campuran batubara dan sekam padi, berguna untuk menentukan kondisi optimal proses pembentukan briket.
3. Mengkarakteristik sifat fisik dan kimia melalui pengujian Densitas, Scanning Electron Microscopy (SEM), dan X-Ray Diffraction (XRD).

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui bagaimana komposit batubara-sekam padi pada proses sintering dingin.
2. Mempelajari sifat fisik komposit batubara-sekam padi yang baik dan efisien.
3. Mempelajari sifat fisik dan kimia batubara-sekam padi.

BAB 2

TINJUAN PUSTAKA

Dalam beberapa tahun terakhir, pemanfaatan energi terbarukan menjadi semakin penting di era modern ini untuk menanggulangi limbah produksi. Dengan memanfaatkan kombinasi batubara dan limbah pertanian, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi peningkatan densitas serta karakteristik.

2.1 Batubara di Indonesia

Indonesia memiliki cadangan batubara yang cukup besar mencapai ± 186 miliar ton di mana 52% (± 96 miliar ton) berada di Pulau Sumatera (Afin dkk, 2021). Dimana batubara di Sumatera memiliki variasi kualitas, mulai dari batubara berkualitas tinggi dengan kalori tinggi hingga batubara dengan kalori rendah. Bentuk batubara ditunjukkan pada gambar 2.1.

Batubara memiliki unsur utama yakni karbon, hidrogen, dan oksigen. Selain itu, batubara memiliki nilai jual yang tinggi karena merupakan salah satu sumber energi yang banyak diminati oleh investor domestik maupun investor asing. Namun untuk memastikan nilai jual batubara, perlu diketahui klasifikasi jenisnya.

Pada penelitian ini, jenis batubara yang digunakan adalah batubara sub-bituminus yang berasal dari PT Bukit Asam, Tanjung Enim, Sumatera Selatan. Batubara sub-bituminus memiliki kadar air dan zat terbang yang relatif tinggi dengan nilai kalor sedang (sekitar 4.000–4.800 kkal/kg), sehingga cocok digunakan sebagai bahan baku pembuatan briket (Ilya dkk., 2022).

2.1.1 Sifat Fisik dan Kimia Batubara

Batubara dikenal dengan kandungannya yang tinggi, terutama dari unsur karbon yang dominan. Menurut Sardi dkk. (2023) batubara sebagian besar terdiri dari karbon (C) dengan kandungan berkisar antara 70,77% hingga 74,75%, dengan unsur lain seperti hidrogen (H), sulfur (S), nitrogen (N), dan oksigen (O). Kandungan karbon yang tinggi menjadikan batubara sebagai sumber energi utama dalam berbagai aplikasi industri, seperti pembangkit listrik dan bahan bakar komersial.

Batubara tersedia dalam berbagai jenis tergantung pada kandungan karbon dan proses pembentukannya, seperti lignit, sub-bituminus, bituminus, dan antrasit. Menurut Sakti dkk. (2023) jenis batubara mempengaruhi kalori kepadatan dan perilaku pembakaran. Batubara bituminus dan antrasit, misalnya, mempunyai kalor yang lebih tinggi karena kandungan yang lebih tinggi, yang membuatnya lebih efektif bila digunakan dalam komposit batubara-sekam padi untuk pembakaran energi.

Selain itu, sifat fisik batubara dan ukuran partikel juga berperan dalam proses densifikasi. Menurut Hao dkk. (2025) semakin halus ukuran partikel, semakin rendah porositas dan semakin besar ketahanan kompresi. Oleh karena itu partikel yang lebih kecil lebih mudah mengisi ruang kosong antara bahan lainnya, menciptakan struktur yang lebih padat. Batubara yang dihaluskan juga memiliki luas permukaan yang lebih besar, yang mempermudah reaksi kimia selama proses pembakaran, sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih efisien.

Penggunaan batubara pada komposit juga perlu mempertimbangkan kandungan abu yang dihasilkan. Menurut penelitian Febriani dkk. (2024) kadar abu batubara yang tinggi dapat mengurangi efisiensi pembakaran dan meningkatkan residu padat yang tidak diinginkan. Namun, pada komposit batubara-sekam padi, efek ini dapat dikurangi dengan mengoptimalkan komposisi sekam padi, yang dapat mengikat sebagian abu dan menurunkan titik leleh abu, yang memungkinkan pembakaran yang lebih bersih.

Pada penelitian ini, digunakan batubara jenis sub-bituminus karena memiliki kandungan karbon sedang dan nilai kalor yang cukup tinggi, yang menjadikannya sesuai untuk proses sintering dingin. Batubara sub-bituminus merupakan salah satu jenis batubara dengan tingkat maturasi menengah antara lignit dan bituminus. Jenis batubara ini banyak digunakan dalam industri energi dan memiliki potensi besar sebagai bahan baku komposit karena karakteristik fisik dan kimianya yang mendukung proses pemadatan dan pembentukan struktur padat.

Karakteristik fisik dan kimia batubara sub-bituminus dapat memengaruhi perilaku material selama proses sintering dingin. Kandungan karbon yang cukup tinggi mendukung pembentukan fase padat dan kekuatan struktur, sedangkan kelembapan yang tinggi dapat menghasilkan uap saat pemanasan dan memengaruhi struktur pori. Nilai kalor yang berada pada kisaran menengah menjadikannya cocok untuk digunakan dalam proses sintering bersuhu rendah hingga sedang seperti sintering dingin.

Menurut data dari Wikipedia Contributors (2025) merujuk pada *United States Energy Information Administration (EIA)*, komposisi umum batubara sub-bituminus ditampilkan dalam Tabel 2.1 berikut:

Tabel 2.1 Komposisi Batubara Sub-Bituminus

Parameter	Kisaran Nilai
Karbon (C)	35 – 45 %
Kelembapan	15 – 30 %
Nilai Kalor	19,3 – 26,7 MJ/kg

Sumber: Wikipedia Contributors (2025)

Nilai-nilai pada Tabel 2.1 menunjukkan bahwa batubara sub-bituminus memiliki karakteristik yang sesuai untuk digunakan dalam proses sintering dingin. Kandungan karbon yang cukup tinggi dapat membantu meningkatkan kekuatan struktural dari komposit yang dihasilkan, sementara kelembapan yang masih dalam batas wajar tetap dapat ditoleransi dalam proses pemadatan. Selain itu, nilai kalor yang berada dalam kisaran menengah membuat jenis batubara ini cocok digunakan untuk proses termal non-pembakaran seperti sintering dingin, karena tidak membutuhkan energi aktivasi setinggi proses pembakaran penuh. Oleh karena itu, pemilihan batubara sub-bituminus dalam

penelitian ini dinilai tepat untuk mencapai densifikasi material yang optimal, sekaligus menjaga efisiensi proses dan kualitas produk akhir.

2.2 Sekam Padi

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang dihasilkan dari proses penggilingan padi dan memiliki potensi besar sebagai bahan baku dalam berbagai aplikasi, termasuk dalam pembuatan komposit. Menurut Ningrum (2022) sekam padi mengandung komponen kimia seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin, yang memberikan kekuatan dan stabilitas pada material komposit. Selain itu, sekam padi juga kaya akan silika, yang dapat meningkatkan sifat mekanik dan termal dari komposit yang dihasilkan. Penggunaan sekam padi sebagai filler dalam komposit batubara dapat mengurangi penggunaan bahan baku konvensional dan mendukung keberlanjutan lingkungan dengan memanfaatkan limbah pertanian yang biasanya dibakar atau dibuang. Bentuk sekam padi dapat dilihat pada gambar 2.2.

Berdasarkan penelitian Gumirat dkk. (2021) menegaskan bahwa proses pembuatan komposit dengan sekam padi dapat dilakukan dengan mencampurkan sekam padi yang telah dikeringkan dengan bahan lain seperti semen dan lateks. Proses ini tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanik komposit tetapi juga mengurangi biaya produksi hingga 20% dibandingkan dengan komposit konvensional. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penambahan sekam padi dalam campuran beton dapat meningkatkan kuat tekan beton, yang menunjukkan potensi sekam padi dalam aplikasi *structural*.

Lebih lanjut, penelitian oleh Sakti dkk. (2023) menunjukkan bahwa pemanfaatan sekam padi sebagai bahan pengisi tidak hanya menguntungkan dari segi ekonomi tetapi juga berkontribusi pada pengurangan polusi akibat pembakaran limbah pertanian. Dengan memanfaatkan sekam padi, industri dapat mengurangi dampak lingkungan negatif sekaligus menghasilkan produk yang berkualitas tinggi. Oleh karena itu, penelitian tentang densifikasi

komposit batubara-sekam padi pada proses sintering dingin ini sangat relevan untuk menjawab tantangan dalam pengelolaan limbah pertanian dan pengembangan material baru yang berkelanjutan.

2.2.1 Komposisi dan Karakteristik Sekam Padi

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah dan belum dimanfaatkan secara optimal, padahal mempunyai potensi besar sebagai bahan bakar biomassa. Menurut Setyaningsih (2022) sekam padi mengandung karbon komponen utama utama berupa silika (SiO_2) kurang lebih 20%, karbon (C) kurang lebih 50%, serta lignin dan selulosa. Kandungan silika pada sekam padi memberikan keunggulan dalam hal kekuatan mekanik dan stabilitas termal ketika digunakan sebagai bahan penguat dalam komposit.

Dalam konteks energi terbarukan, sekam padi memiliki peran penting dalam pengurangan limbah pertanian dan pemanfaatan energi biomassa. Menurut Vijaya dkk. (2025) menyatakan bahwa sekam padi memiliki energi yang cukup besar, meskipun nilai kalor lebih rendah dibandingkan batubara. Namun, karena kandungan karbonnya yang tinggi, sekam padi dapat berfungsi sebagai penguat didalamnya, sehingga meningkatkan efisiensi termal dan stabilitas komposit batubara-sekam padi selama pembakaran.

Selain itu, karakteristik fisik sekam padi seperti kepadatan rendah dan porositas tinggi menjadikan bahan yang ideal untuk meningkatkan interaksi antara partikel antara komposit. Menurut Apip (2020) mencatat bahwa sifat porositas sekam padi memungkinkan bahan menyerap energi dengan lebih baik dan membantu meningkatkan distribusi panas selama pembakaran. Hal ini memungkinkan proses pembakaran menjadi lebih seragam, sehingga mengurangi emisi polutan seperti karbon dioksida (CO_2) dan sulfur dioksida (SO_2).

Penggunaan sekam padi pada komposit juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan. Menurut Rusmalah dkk. (2022) pemanfaatan sekam padi pada komposit dapat mengurangi pemborosan limbah pertanian yang biasanya dibakar bebas sehingga menghasilkan polusi udara. Selain itu, biomassa seperti

sekam padi merupakan sumber energi terbarukan yang dapat mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca.

Lebih lanjut, menurut penelitian yang dilakukan oleh Gupta dkk. (2025), kandungan kimia utama dalam sekam padi terdiri dari silika (SiO_2), selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komposisi lengkapnya ditampilkan pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Komposisi Kimia Sekam Padi

Komponen	Kandungan (%)
Silika (SiO_2)	20,7
Selulosa	36,5
Hemiselulosa	23,5
Lignin	19,3

Sumber: Gupta dkk., (2025)

Kandungan silika yang mencapai 20,7% memberikan kontribusi dalam peningkatan sifat ketahanan termal dan kestabilan dimensional pada suhu tinggi. Sementara itu, kandungan organik seperti selulosa dan hemiselulosa dapat terurai saat pemanasan dan membantu membentuk pori-pori pada struktur komposit. Oleh karena itu, penggunaan sekam padi sebagai bahan campuran dalam proses sintering dingin sangat mendukung pembentukan struktur yang lebih ringan dan berpori secara alami.

2.3 Densifikasi

Menurut Triandini dkk. (2022) densifikasi adalah proses pengurangan massa jenis suatu bahan dengan penerapan tekanan, yang mengakibatkan peningkatan masa jenis dan sifat mekanik bahan. Densifikasi bertujuan untuk memperkecil jumlah pori-pori material sehingga memperkuat struktur komposit. Sebagai bagian dari penelitian ini, densifikasi dilakukan pada campuran batubara dan sekam padi, dengan tujuan untuk meningkatkan

karakteristik pembakaran, meningkatkan energi, dan memperpanjang umur bahan bakar komposit.

Selain itu, densifikasi juga bisa seperti metode untuk meningkatkan homogenitas suatu material pada partikel-partikel penyusunnya. Menurut Arifiadi dkk. (2022) densifikasi pada material komposit dapat meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan aus, yang merupakan atribut penting dalam bahan bakar padat. Penerapan teknik sintering dingin merupakan inovasi tersendiri, karena memungkinkan pemadatan pada suhu yang lebih rendah dibandingkan metode konvensional, sehingga menghemat energi.

2.3.1 Densifikasi pada Komposit

Densifikasi adalah proses yang digunakan untuk meningkatkan kepadatan suatu material dengan cara volume pori antar partikel yang ada. Dalam konteks pembuatan komposit, proses densifikasi sangat penting karena dapat mempengaruhi sifat mekanik, termal, dan kinerja material secara keseluruhan. Densifikasi dapat dilakukan melalui berbagai metode, termasuk menggunakan tekanan, panas, atau kombinasi (Ardana dkk, 2019). Pada penelitian kali ini, densifikasi dilakukan dengan metode sintering dingin, yaitu sebuah teknik yang menggunakan suhu rendah dan tekanan untuk mengompakkan partikel batubara dan sekam padi dalam membuat briket.

Densifikasi yang berhasil dapat meningkatkan sifat seperti kuat tekanan, kuat tarikan, dan ketahanan termal batubara-sekam padi, yang penting dalam aplikasi pemadatan. Selain itu, Densifikasi yang baik akan meminimalkan bahan material, yang dapat meningkatkan efisiensi pembakaran dan mengurangi produksi abu.

2.4 Pengertian dan Sifat Komposit

Komposit didefinisikan sebagai material yang terbentuk dari dua atau lebih bahan dengan sifat fisik dan kimia yang berbeda, yang dikombinasikan untuk menghasilkan material dengan karakteristik unggul (Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya, 2025). Pada penelitian ini, komposit dibuat dari kombinasi batubara sebagai bahan utama dan sekam padi sebagai penguat atau bahan pelengkap. Menurut Maher dkk. (2015) penggabungan bahan organik seperti sekam padi ke dalam komposit dapat meningkatkan sifat mekanik, seperti kekuatan tarik dan ketahanan termal, serta mengurangi dampak lingkungan dengan menggunakan biomassa.

Komposit batubara-sekam padi berpotensi untuk meningkatkan nilai kalor, efisiensi pembakaran, dan menurunkan emisi yang dihasilkan selama masa pembakaran. Hal ini didukung penelitian Gumelar (2019) yang menunjukkan bahwa penambahan biomassa ke dalam material komposit dapat meningkatkan stabilitas termal dan kualitas pembakaran bahan bakar, khususnya pada komposit yang digunakan sebagai bahan bakar padat. Sifat sekam padi yang kaya akan silika dan karbon menjadikannya pilihan ideal seperti bahan campuran dalam pembuatan komposit.

2.4.1 Aplikasi Densifikasi dalam Material Komposit

Densifikasi memaparkan peran penting dalam penerapan komposit, khususnya dalam pembuatan bahan bakar alternatif seperti briket batubara-sekam padi. Menurut Sandy dkk. (2021) densifikasi yang efektif dapat meningkatkan kekuatan mekanik dari komposit, membuatnya lebih tahan terhadap tekanan eksternal dan abrasi, serta mengurangi keretakan pada proses pembakaran. Selain hal tersebut juga berpengaruh pada peningkatan densitas energi dari bahan bakar, yang penting untuk menghasilkan pembakaran yang lebih efisien dan stabil. Dalam konteks energi terbarukan, penggunaan biomassa sebagai

sekam padi dalam proses densifikasi komposit juga memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi karbon.

Penggunaan metode sintering dingin untuk densifikasi komposit batubara-sekam padi menawarkan beberapa keuntungan, termasuk pengurangan konsumsi energi selama proses produksi dan peningkatan kinerja pembakaran. Menurut Triandini dkk. (2022) sintering dingin memungkinkan material untuk mencapai kepadatan optimal pada suhu yang lebih rendah, sehingga lebih efisien dari segi energi dan biaya produksi.

2.4.2 Interaksi Batubara dan Sekam Padi dalam Komposit

Interaksi antara batubara-sekam padi dalam komposit sangat dipengaruhi oleh komposisi dan distribusi kedua material tersebut. Menurut Azzizzah (2020) mengemukakan bahwa campuran batubara dan sekam padi menghasilkan sinergi yang baik dalam hal peningkatan densitas dan stabilitas termal komposit. Batubara merupakan sumber energi utama, sedangkan sekam padi bertindak sebagai bahan penguat yang membantu mengurangi emisi dan meningkatkan pembakaran. Interaksi ini penting untuk menghasilkan komposit dengan kinerja pembakaran optimal dan lebih ramah lingkungan.

Menurut Firda dkk. (2021) proses sintering dingin dari komposit batubara-sekam padi memungkinkan interaksi yang lebih baik antara kedua material tersebut karena suhu sintering yang lebih rendah memungkinkan distribusi panas yang lebih merata. Hal ini menyebabkan ikatan lebih kuat antara partikel batubara dan sekam padi sehingga meningkatkan kekuatan mekanik komposit. Selain itu, penggunaan sekam padi di dalamnya juga membantu mengurangi konsumsi batubara dan mengurangi produksi abu, sehingga memberikan kontribusi pada pengurangan emisi karbon dan limbah padat.

Penggunaan batubara-sekam padi dalam pemadatan komposit melalui proses sintering dingin menawarkan alternative yang lebih efisien dan ramah lingkungan dibandingkan bahan bakar fosil murni. Kombinasi kedua bahan ini

memberikan solusi untuk memenuhi kebutuhan energi dan pengelolaan limbah biomassa secara berkelanjutan.

2.5 Teknologi Sintering Dingin

Sintering dingin merupakan teknik inovatif yang digunakan untuk memproduksi material dengan cara memadatkan serbuk tanpa memerlukan suhu tinggi yang biasa ditemukan dalam proses sintering konvensional. Sintering dingin adalah metode yang dilakukan pada suhu rendah (kurang dari 300 °C) (Gunawan dkk., 2023). Menurut Elma dkk. (2023) sintering dingin menggunakan kombinasi mekanika untuk memperoleh densifikasi material pada suhu rendah, biasanya di bawah 200°C. Proses ini memungkinkan material memperoleh sifat yang baik sekaligus menghindari kerusakan yang sering terjadi pada suhu tinggi.

Salah satu keuntungan utama dari proses sintering dingin adalah kemampuannya untuk mempertahankan sifat asli dari bahan mentah, khususnya dari segi struktur mikro dan komposisi kimia. Selama proses ini, bahan tambahan seperti air atau pelarut dapat digunakan untuk memfasilitasi pembentukan butiran serbuk, sehingga terjadi interaksi antar partikel dan mempercepat proses densifikasi. Hal ini sangat relevan untuk pembuatan komposit batubara-sekam padi, dimana komposisi dan sifat masing-masing bahan penyusun harus dipertahankan untuk menghasilkan produk akhir yang optimal (Elma dkk, 2023).

Proses sintering dingin juga dikenal lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan teknik konvensional. Menurut Grasso dkk (2020) menunjukkan bahwa dengan suhu yang lebih rendah dan penggunaan bahan mentah yang lebih berkelanjutan, seperti sekam padi, proses tersebut berkontribusi terhadap pengurangan emisi karbon dan penggunaan energi yang lebih efisien. Hal ini menjadikan sintering dingin menjadi metode yang sangat cocok untuk pengembangan material baru yang lebih ramah lingkungan.

Dengan menggunakan teknologi sintering dingin, hal ini bertujuan untuk mengembangkan komposit batubara-sekam padi yang menawarkan kinerja baik dalam aplikasi. Melalui pemahaman menyeluruh tentang proses dan parameter yang terlibat, diharapkan dapat menemukan kombinasi optimal untuk menghasilkan bahan dengan sifat mekanik dan efisiensi pembakaran yang tinggi.

2.5.1 Prinsip Dasar Sintering Dingin

Sintering dingin adalah metode inovatif yang menggunakan tekanan dan kelembapan untuk memadatkan serbuk material pada suhu rendah, umumnya di bawah 200°C. Menurut The American Ceramic Society (2024) prinsip dasar dari sintering dingin adalah penggunaan pelarut, seperti air, untuk meningkatkan konsentrasi partikel dalam fase cair, yang mempercepat proses interaksi antar partikel. Pada suhu rendah ini, bahan berada dalam kondisi kimia yang lebih stabil, sehingga mengurangi risiko degradasi yang sering terjadi pada metode sintering konvensional. Hal ini sangat relevan untuk komposit batubara-sekam padi, di mana mempertahankan sifat unik dari setiap komponen untuk mencapai kinerja yang optimal. Gambar alat sintering dingin dapat dilihat pada gambar 2.3.

2.5.2 Parameter Proses Sintering Dingin

Beberapa parameter penting selama sintering dingin meliputi tekanan, waktu, komposisi campuran, dan kelembapan. Zhu dkk. (2022) menyatakan semakin besar tekanan yang diberikan selama sintering, maka semakin tinggi tingkat densitas akhir yang dicapai. Penelitian menunjukkan bahwa tekanan yang lebih semakin meningkatkan tekanan, tetapi jika terlalu tinggi, dapat merusak struktur material. Selain itu, waktu pemrosesan juga memegang peranan penting; waktu yang terlalu singkat mungkin tidak memberikan waktu yang cukup untuk interaksi antar partikel, sedangkan terlalu lama dapat

menyebabkan degradasi. Dalam penelitian ini, penentuan parameter yang tepat untuk komposit batubara-sekam padi adalah sangat penting untuk mengoptimalkan sifat mekanik dan fisik bahan akhir.

2.5.3 Perbandingan Sintering Dingin dan Sintering Konvensional

Perbandingann antara sintering dingin dan sintering konvensional sangat signifikan dalam hal efisiensi dan dampak lingkungan. Sintering konvensional, yang memerlukan suhu tinggi (sering di atas 1000°C), dapat menyebabkan perubahan struktural yang merugikan pada material, seperti pengurangan kekuatan atau retak. Menurut CoorsTek Editorial Team (2024) menjelaskan bahwa sintering dingin tidak hanya membutuhkan energi yang lebih sedikit, tetapi juga mengurangi emisi gas rumah kaca. Selain itu, sintering dingin memungkinkan penggunaan bahan mentah yang beragam, termasuk bahan seperti sekam padi. Menggunakan sintering dingin untuk komposit batubara-sekam padi, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan sifat sekaligus meningkatkan kelestarian lingkungan.

2.6 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Densifikasi pada Sintering Dingin

Densifikasi merupakan langkah penting dalam pembuatan komposit yang mempengaruhi sifat fisik dan mekanik dari bahan akhir. Pada proses sintering dingin, ada beberapa faktor utama yang mempengaruhi terhadap tingkat densitas, yaitu ukuran partikel. Tekanan dan suhu proses, serta penggunaan bahan aditif atau binder.

2.6.1 Ukuran Partikel dan Komposit Material

Ukuran partikel adalah salah satu factor yang paling berpengaruh terhadap terhadap densifikasi selama sintering dingin. Menurut Fachruzzaki dkk. (2022) menyatakan bahwa partikel dengan ukuran lebih kecil meningkatkan area kontak antara partikel. Hal ini mempercepat proses interaksi antar partikel, hal ini penting untuk mengurangi ruang kosong dan meningkatkan finalitas material. Dalam penelitian ini, ukuran partikel batubara dan sekam padi harus dioptimalkan, ukuran yang lebih kecil dari sekam padi dapat meningkatkan kapasitas ikatan dengan partikel batubara sehingga menghasilkan komposit yang lebih padat.

Komposisi bahan juga memegang peranan penting. Perbandingan yang tepat antara batubara dengan sekam padi dapat mempengaruhi sifat mekanik komposit yang diperoleh. Komposisi yang tidak seimbang dapat mengakibatkan berkurangnya kekuatan atau keawetan material. Oleh karena itu, memahami interaksi antara komponen ini adalah untuk mencapai kinerja yang diinginkan dalam komposit.

2.6.2 Tekanan dan Suhu Proses

Tekanan dan suhu adalah dua parameter utama dalam proses parameter utama dalam proses sintering dingin yang berdampak langsung pada densifikasi. Menurut Fadli (2019) mencatat bahwa peningkatan tekanan dapat meningkatkan kepadatan material, karena tekanan memadatkan partikel dengan lebih efektif. Namun, jika tekanannya terlalu tinggi, maka resiko terhadap struktur material juga meningkat.

Suhu, meskipun lebih rendah dibandingkan dengan sintering konvensional, tetap memiliki peranan penting dalam penting dalam memfasilitasi proses densifikasi. Suhu yang terlalu rendah mungkin tidak cukup untuk terjadinya interaksi yang diperlukan antar partikel, sedangkan suhu yang terlalu tinggi dapat merusak komponen organik dari sekam padi.

Dalam penelitian ini, penting untuk menentukan kombinasi optimal antara tekanan dan suhu untuk mendapatkan komposit batubara-sekam padi dengan sifat mekanik yang kuat dan stabil.

2.6.3 Pengaruh Aditif atau Binder pada Proses Densifikasi

Penggunaan bahan aditif atau binder juga berperan terhadap densifikasi pada saat sintering dingin. Menurut Baroto (2020) menjelaskan bahwa aditif, seperti pelarut atau binder, dapat memperbaiki interaksi antar partikel, mempercepat proses pengikatan, dan meningkatkan densitas akhir dari bahan tersebut. Aditif ini juga dapat membantu dalam mengurangi porositas, yang sering kali mengurangi kekuatan mekanik dari komposit.

Dalam konteks komposit batubara-sekam padi, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi berbagai jenis dan jumlah aditif yang dapat digunakan untuk meningkatkan densifikasi. Menentukan aditif yang tepat akan memungkinkan mengembangkan komposit yang lebih efisien, dengan sifat mekanik dan daya tahan yang lebih baik. Dengan pengetahuan tersebut, diharapkan komposit menjadi lebih ramah lingkungan dan lebih tahan lama.

2.7 Pengembangan Material Ramah Lingkungan

Pengembangan material ramah lingkungan berkat komposit berbasis biomassa telah menjadi salah satu cara inovatif untuk menjawab tantangan lingkungan yang dihadapi saat ini. Komposit ini, yang seringkali terdiri dari kombinasi bahan alami seperti serat tanaman dan matriks polimer, menawarkan alternatif yang lebih berkelanjutan dibandingkan bahan fosil konvensional. Pemanfaatan biomassa, seperti sekam padi, tidak hanya membantu mengurangi limbah pertanian, namun dapat mengurangi emisi gas rumah kaca pada proses daur ulang limbah. Sebagai contoh penelitian Satriawan dkk. (2024) mencatat bahwa penggunaan sekam padi dalam pembuatan komposit

dapat memberikan nilai tambahan ekonomi bagi para petani sekaligus mengurangi polusi yang dihasilkan dari limbah. Keunggulan lainnya adalah sifat mekanik yang baik, ringan, dan mudah terurai secara hayati dari bahan ini, yang menjadikannya pilihan yang ideal untuk berbagai aplikasi, mulai dari konstruksi hingga produk konsumen. Dengan demikian, pengembangan komposit berbasis biomassa tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, namun juga membuka peluang ekonomi dan sosial yang lebih luas.

2.7.1 Biomassa sebagai Energi Terbarukan

Biomassa merupakan sumber energi terbarukan yang mempunyai potensi besar untuk menggantikan bahan bakar fosil. Menurut Taufiqurrohman dkk. (2022) menjelaskan bahwa biomassa dapat diubah menjadi energi melalui berbagai cara, antara lain pembakaran, gasifikasi, dan fermentasi. Dalam konteks pengembangan komposit, sekam padi sebagai salah satu bentuk biomassa dapat berfungsi sebagai bahan baku yang ramah lingkungan. Pemanfaatan sekam padi tidak hanya membantu mengurangi limbah pertanian, namun juga mengurangi ketergantungan terhadap fosil. Dengan menggunakan biomassa, kita dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan mendukung keberlanjutan energi.

2.7.2 Pemanfaatan Limbah Sekam Padi untuk Pengurangan Emisi Karbon

Sekam padi sering dianggap sebagai produk pertanian yang tidak berharga, sehingga dapat menimbulkan masalah lingkungan jika dibakar. Menurut Nisa dkk (2025) penggunaan sekam padi dalam manufaktur komposit dapat membantu mengurangi emisi karbon dengan mengubah limbah tersebut menjadi produk yang bermanfaat. Pada penelitian ini, penggunaan sekam padi sebagai bahan baku dalam komposit pertama dalam batubara-sekam padi diharapkan dapat mengurangi jumlah sampah yang dibakar, sehingga

mengurangi jejak karbon. Dengan cara ini, penelitian ini tidak hanya berfokus pada inovasi material, namun juga pada dampak lingkungan khususnya pengurangan emisi gas rumah kaca.

2.7.3 Keunggulan Material Komposit Ramah Lingkungan

Komposit berbasis biomassa, seperti yang terbuat dari kombinasi batubara dan sekam padi, memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan bahan konvensional. Menurut Arifiadi dkk. (2022) mencatat bahwa komposit yang terbuat dari bahan alami cenderung lebih ringan, kuat, dan dapat terurai secara hayati dibandingkan plastik berbahan minyak bumi. Dalam konteks ini, kombinasi antara batubara dan sekam padi harus menghasilkan material yang tidak hanya memiliki sifat mekanik yang baik, tetapi juga ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi sifat fisik, serta penerapannya di berbagai industri termasuk konstruksi dan energy terbarukan.

2.8 Studi Kasus dan Penelitian Terlebih Dahulu

Dengan tujuan mengembangkan material komposit ramah lingkungan yang efisien, berbagai studi kasus dan penelitian terdahulu telah dilakukan untuk memahami karakteristik dan kualitas material yang digunakan. Penelitian terkait dengan densifikasi batubara, seperti yang dilakukan oleh Mulyadi dkk. (2023) menunjukkan bahwa desain pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batubara dengan proses yang efektif dapat menghasilkan pembakaran yang lebih optimal dan emisi CO₂ yang rendah. Studi ini menyoroti bagaimana teknik-teknik pengolahan dan desain yang tepat, termasuk pendekatan dekarbonisasi dan pemanfaatan panas, dapat meningkatkan efisiensi pembakaran batubara. Hasil tersebut relevan dalam konteks penelitian densifikasi komposit batubara- sekam padi pada proses sintering dingin untuk menghasilkan material yang lebih berkualitas dan ramah lingkungan.

Selain itu, studi mengenai penggunaan sekam padi dalam komposit juga telah memberikan bukti empiris tentang kemampuannya untuk meningkatkan sifat mekanik material. Menurut penelitian oleh Alwie dkk. (2020) menunjukkan bahwa abu sekam padi, ketika digunakan sebagai substitusi *fly ash* dalam betongepolimer, mampu meningkatkan kekuatan tekan, tarik belah, dan modulus elastisitas beton. Penambahan abu sekam padi hingga 8% memberikan hasil yang optimal, menunjukkan peningkatan sifat mekanik beton. Hal ini mengindikasikan bahwa abu sekam padi tidak hanya dapat meningkatkan kualitas beton, tetapi juga berkontribusi dalam pemanfaatan limbah pertanian dengan cara yang berkelanjutan dan ekonomis. Dalam hal efisiensi proses, penelitian oleh membandingkan proses pengerolan dingin dalam fabrikasi kawat superkonduktor berbahan *Magnesium Diboride* (MgB_2) dengan proses sintering konvensional. Hasilnya menunjukkan bahwa pengerolan dingin dapat dilakukan pada suhu yang lebih rendah dan menghasilkan nilai kekerasan tertinggi (377,2 HV) dengan kekuatan tarik sebesar 1381 KN/mm, berkontribusi pada penghematan energi dan efisiensi yang lebih tinggi dalam aplikasi superkonduktor. Penelitian ini menunjukkan potensi besar teknik sintering dingin dalam mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi produksi. Dengan menggunakan hasil dari penelitian tersebut, penelitian ini akan mengeksplorasi proses sintering dingin pada komposit batubara-sekam padi dengan harapan menghasilkan produk yang lebih kuat, efisien, dan ramah lingkungan (Herbirowo dkk, 2021).

2.8.1 Penelitian Terkait Densifikasi Batubara

Densifikasi batubara telah menjadi poros penting dalam penelitian pengembangan material, terutama untuk meningkatkan efisiensi dan kinerja penggunaan batubara sebagai sumber energi. Menurut Azzizzah (2020) menunjukkan bahwa penggunaan biomassa, seperti sekam padi, sebagai campuran batubara dapat menghasilkan produk bahan bakar yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Dalam penelitian tersebut, campuran biomassa dengan batubara menghasilkan bahan bakar yang memiliki karakteristik pembakaran

lebih baik, mengurangi emisi gas rumah kaca, dan mempertahankan sifat-sifat dasar batubara. Hasil ini relevan bagi pengembangan komposit batubara-sekam padi karena menunjukkan bahwa teknik densifikasi dan pencampuran bahan dapat dioptimalkan untuk menghasilkan material komposit yang lebih efisien dan berkualitas tinggi.

2.8.2 Studi Penggunaan Sekam Padi dalam Komposit

Penggunaan sekam padi sebagai bahan pengisi dalam pembuatan komposit telah menunjukkan potensi besar untuk meningkatkan sifat mekanik dan mengurangi dampak lingkungan. Berdasarkan penelitian oleh Prakusya dkk. (2019) menunjukkan bahwa penambahan sekam padi dan *polypropylene* ke dalam komposit semen papan partikel dapat memberikan peningkatan sifat fisis dan mekanis. Penelitian ini menunjukkan bahwa komposisi optimal yang terdiri dari 0,5 phr sekam padi dan 0,5 phr *polypropylene* menghasilkan nilai kuat lentur dan kuat tekan tertinggi masing-masing sebesar 149,29 kgf/cm² dan 523 kgf/cm². Penggunaan sekam padi sebagai bahan pengisi dalam komposit ini tidak hanya membantu menekan biaya produksi tetapi juga memberikan solusi untuk pemanfaatan limbah pertanian secara berkelanjutan.

2.8.3 Kajian Efisiensi Proses Sintering Dingin

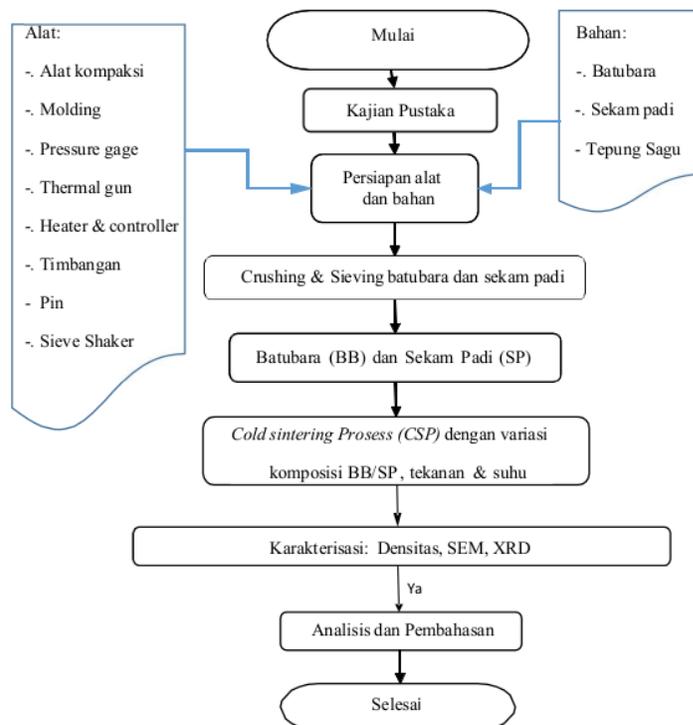
Kajian efisiensi proses sintering dingin juga sangat penting untuk penelitian ini. Menurut Mulyadi dkk. (2023) melakukan penelitian yang menunjukkan bahwa desain dan karakteristik turbin uap yang baik dapat menghasilkan pembakaran yang efektif dan optimal dengan emisi gas CO₂ yang rendah. Penelitian tersebut menyoroti penggunaan metode dekarbonisasi superkritikal dan penangkapan gas CO₂ pasca-pembakaran sebagai cara untuk meningkatkan efisiensi proses pembakaran dan mengurangi emisi karbon. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan teknologi tersebut dapat menghemat energi secara signifikan sambil tetap mempertahankan kinerja

material yang baik. Temuan ini sangat relevan dengan penelitian ini, terutama dalam konteks memproduksi komposit batubara-sekam padi yang lebih ramah lingkungan dan efisien.

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir

Desain penelitian suatu kerangka sistematis dan terencana untuk mengarahkan pelaksanaan suatu penelitian. Desain ini mencakup langkah-langkah yang akan diikuti dalam penelitian, metode yang digunakan, dan bagaimana data akan dikumpulkan serta dianalisis, diagram alir dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah yang komponen paling penting. Berikut adalah beberapa alat dan bahan yang akan digunakan selama proses penelitian:

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini mencakup:

1. Alat Kompaksi untuk memadatkan batubara-sekam padi hingga mencapai kepadatan yang diinginkan.
2. Molding untuk mencetak batubara-sekam padi.
3. *Pressure Gauge* untuk mengukur tekanan batubara-sekam padi.
4. *Heater & Controller* untuk mengatur suhu dan temperature pada proses sintering dingin.
5. Timbangan untuk mengukur berat komposisi batubara-sekam padi.
6. Pin untuk menekan batubara-sekam padi saat di molding.
7. *Sieve Shaker* untuk memisahkan ukuran partikel batubara-sekam padi sesuai ukuran yang ditentukan.

3.2.2 Bahan

Bahan utama dalam penelitian ini meliputi:

1. Batubara sebagai sumber energi utama.
2. Sekam Padi sebagai bahan pengikat dan penambah kekuatan.

3. Tepung Sagu sebagai bahan perekat.

3.3 Tabel Data Penelitian

Proses penelitian ini memiliki komposisi, parameter proses dan pengujian yang perlu diketahui. Dapat kita lihat Tabel data penelitian pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Penelitian

No	komposisi (%)			parameter proses		pengujian		
	batu bara	sekam padi	tekanan (MPa)	temperatur (c)	holding time (menit)	densitas	SEM	XRD
1.	90	10	300	200	10			
2.	80	20	300	200	10			
3.	70	30	300	200	10			

3.4 Proses Penelitian

Prosedur penelitian mengacu pada serangkaian langkah terstruktur yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian. Prosedur ini mencakup semua aktivitas mulai dari persiapan bahan, pembuatan komposit, hingga pengujian karakteristik briket. Menurut Mulyadi dkk. (2023) prosedur yang jelas dan sistematis sangat penting untuk memastikan bahwa penelitian dilakukan secara konsisten dan hasilnya dapat direproduksi. Dengan mengikuti prosedur yang telah ditetapkan, peneliti dapat meminimalkan kesalahan dan memastikan bahwa setiap langkah dilaksanakan sesuai standar yang yang ditentukan. Alur proses dari penelitian dapat kita lihat pada gambar 3.9.

3.4.1 Persiapan Bahan

Proses persiapan bahan meliputi:

1. Penggilingan Batubara menjadi ukuran partikel yang lebih kecil untuk memudahkan proses pencampuran.
2. Penggilingan Sekam Padi untuk menghasilkan ukuran yang lebih kecil untuk mempermudah proses pencampuran.
3. Pengayakan Batubara dilakukan untuk memisahkan partikel batubara berdasarkan ukuran.
4. Pengayakan Sekam padi untuk memisahkan sekam padi berdasarkan ukurannya. Ini membantu menghilangkan partikel yang terlalu besar atau kecil, sehingga ukuran partikel yang dihasilkan lebih seragam.
5. Pencampuran Batubara-Sekam Padi dalam proporsi yang telah ditentukan. Pencampuran yang baik sangat penting untuk memastikan distribusi material yang merata.

3.4.2 Pembuatan Komposit Batubara dan Sekam Padi

Pembuatan komposit Batubara-Sekam padi dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap yang bertujuan untuk menghasilkan material dengan densitas dan kekuatan yang optimal. Proses ini meliputi langkah-langkah berikut:

1. Pengumpulan bahan baku yang digunakan adalah batubara dan sekam padi. Batubara dipilih karena memiliki kandungan karbon tinggi, sedangkan sekam padi sebagai bahan organik memberikan keunggulan dalam mengurangi berat dan meningkatkan sifat mekanik komposit.
2. Penghancuran dan penggilingan batubara maupun sekam padi dihancurkan dan digiling hingga mencapai ukuran partikel yang diinginkan. Ukuran partikel ini penting untuk memastikan homogenitas campuran dan mempengaruhi sifat akhir komposit.

3. Pencampuran batubara, sekam padi dan tepung sagu dalam berbagai rasio (misalnya, 85:5:10, 80:10:10, dan 75:15:10).
4. Proses Sintering Dingin dilakukan setelah proses pencampuran yang kemudian dipadatkan menggunakan tekanan tertentu untuk membentuk pelet atau blok. Proses ini dilakukan pada suhu rendah tanpa mencairkan bahan, sehingga dikenal sebagai sintering dingin. Tujuan dari proses ini adalah untuk meningkatkan densitas dan kekuatan mekanik komposit tanpa merusak struktur bahan.
5. Setelah proses sintering, komposit yang dihasilkan dikeringkan untuk menghilangkan kelembaban yang tersisa. Penanganan akhir dilakukan untuk memastikan komposit siap untuk diuji lebih lanjut.

3.4.3 Proses Sintering Dingin

Sintering dingin adalah metode inovatif untuk memproduksi bahan tanpa pemanasan tinggi, menggunakan tekanan untuk mencapai densifikasi yang efisien. Menurut penelitian Sausan (2022) metode ini dapat menghasilkan struktur mikro yang baik dengan sifat mekanik yang bersaing dengan struktur konvensional serta menjelaskan bahwa selama sintering dingin, tekanan yang diberikan meningkatkan interaksi antar partikel serbuk, sehingga meningkatkan densitas dan integritas struktural. Penelitian mereka menunjukkan bahwa variasi dalam tekanan dan komposisi dapat mempengaruhi sifat akhir material komposit, menjadikannya metode yang fleksibel untuk berbagai aplikasi. Gambar dilakukannya proses sintering dingin dapat dilihat pada gambar 3.10.

Menurut Herbirowo dkk. (2023) mencatat bahwa sintering dingin tidak hanya mengurangi kebutuhan energi, tetapi juga mempercepat proses pengolahan material. Mereka menemukan bahwa bahan yang dihasilkan melalui sintering dingin menunjukkan peningkatan kekuatan dan daya tahan dibandingkan dengan metode tradisional. Selain itu, menekankan pentingnya pemilihan bahan dan kondisi proses dalam sintering dingin untuk menghasilkan material fungsional dengan sifat yang diinginkan. Mereka mengamati bahwa dengan menyesuaikan parameter proses, seperti tekanan dan

waktu, karakteristik komposit dapat disesuaikan untuk aplikasi spesifik. Dengan demikian, sintering dingin memilikipotensi besar dalam pengembangan komposit batubara-sekam padi yang berkelanjutan dan efisien.

Dalam penelitian ini, proses sintering dingin dilakukan pada suhu 60 °C. Pemilihan suhu tersebut didasarkan pada karakteristik termal tepung sagu yang digunakan sebagai bahan perekat, di mana suhu di atas 60 °C berpotensi menyebabkan kerusakan termal. Kerusakan termal merupakan kondisi di mana material mengalami perubahan fisik atau kimia akibat paparan suhu tinggi yang melebihi batas ketahanannya. Pada tepung sagu, hal ini dapat menyebabkan terjadinya karamelisasi atau pembakaran, sehingga perekat kehilangan daya rekatnya dan tidak mampu mengikat partikel batubara dan sekam padi secara optimal. Menurut Kurniawan (2019) tepung sagu mulai mengalami kerusakan struktur polisakarida pada suhu di atas 60–70 °C, yang ditandai dengan penurunan viskositas dan kemampuan adhesinya. Oleh karena itu, penggunaan suhu 60 °C dipilih untuk menjaga kestabilan dan efektivitas tepung sagu selama proses sintering dingin.

3.4.4 Pengujian Densifikasi Komposit

Pengujian densifikasi dilakukan untuk menentukan kepadatan briket yang dihasilkan. Densitas berhubungan langsung dengan efisiensi pembakaran. Menurut Nasrudin dkk. (2024) menekankan pentingnya densitas tinggi dalam briket untuk meningkatkan performa energi.

Selain itu, densitas yang tinggi dapat memperpanjang waktu pembakaran, meningkatkan nilai kalor per satuan volume, serta mempengaruhi kestabilan nyala dan emisi gas hasil pembakaran. Bello dkk. (2020) menyatakan bahwa densitas briket berbanding lurus dengan efisiensi termal karena briket berdensitas tinggi memiliki pori-pori lebih sedikit, sehingga memperlambat laju pembakaran dan meningkatkan daya tahan api.

Sejalan dengan itu, Kimbonguila dkk. (2019) dalam tinjauan literturnya menjelaskan bahwa densifikasi biomassa berperan penting dalam meningkatkan efisiensi penyimpanan, transportasi, serta performa energi dari

briket, menjadikan parameter densitas sebagai salah satu faktor kunci dalam proses pembuatan briket.

3.4.4.1 Pengujian Densitas

Densitas secara teoritis merupakan massa per satuan volume, ¹ massa yang sama tetapi mempunyai volume yang lebih kecil akan menghasilkan densitas yang lebih besar. ¹ Secara umum terjadi peningkatan densitas di setiap kenaikan suhu sintering. Ini terjadi karena semakin tinggi suhu sintering maka densitas semakin meningkat sedangkan untuk porositas sebaliknya (Burgess dkk., 2020). Pada suhu 60°C Batubara-sekam padi mengalami kepadatan. Peningkatan densitas ini terjadi karena viskositas Batubara-sekam padi ¹ semakin mengecil, akibatnya kemampuan alir sekam padi untuk mengisi rongga-rongga antar partikel batubara semakin besar, namun kemampuan sekam padi untuk menahan beban dari luar semakin mengecil, sehingga ketika tekanan IMPa dikenakan pada spesimen komposit Batubara-sekam, terjadi pengecilan pori. ¹ Ini menunjukkan bahwa metode sintering dingin menghasilkan densitas yang lebih besar daripada metode sintering konvensional.

Pengujian densitas ini ² dilakukan dengan membandingkan massa benda uji di udara dan dalam fluida menggunakan timbangan digital (*densimeter*). Dalam tes ini fluida yang dipakai adalah media air quades dengan masa jenis 1,01g/cm³. Pengujian ini mengacu pada standar ASTM B962-15 (*Standard Test Methods for Density and Compacted or Sintering Powder Metallurgy Products Using Archimedes Principle*), yang juga sering digunakan dalam karakterisasi komposit biomassa berbasis briket.

Pengujian ini dilakukan di Laboratorium MDT (Mekanika Desain dan Terapan, Fakultas Teknik, ² Universitas Sriwijaya. Adapun langkah-langkah pengujian densitas adalah sebagai berikut:

1. Mempersiapkan benda uji dan alat uji densimeter yang akan digunakan dalam pengujian densitas.
2. Melakukan kalibrasi pada alat densimeter keangka nol agar mendapatkan hasil pengujian yang akurat.

3. Setelah benda uji dan alat densimeter siap, benda uji ditimbang secara bergantian dengan timbangan digital untuk mengetahui massanya.
4. Timbang spesimen di udara bebas dan berat spesimen didalam cairan.
5. Catat setiap hasil massa yang dihasilkan setiap benda uji untuk menghitung berat jenis setiap spesimen.
6. Kemudian dihitung menggunakan rumus Archimedes.

$$\rho_{\text{apparent}} = \frac{W_{\text{udara}}}{W_{\text{udara}} - W_{\text{fluida}}} \times \rho_{\text{fluida}}$$

$$\rho_{\text{teoritis}} = \frac{\text{komposisi batubara}}{100 - p_{\text{batubara}}} + \frac{\text{komposisi sekam padi}}{100 - p_{\text{sekam padi}}} + \frac{\text{komposisi sagu}}{100 - p_{\text{sagu}}}$$

$$\rho_{\text{relatif}} = \frac{\rho_{\text{apparent}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100 \%$$

3.4.5 Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) digunakan untuk memeriksa struktur mikroskopis dengan prinsip menggambarkan permukaan spesimen menggunakan sinar elektro bertenaga tinggi. Dengan kemampuan perbesaran hingga 300.000 kali, SEM memberikan gambaran yang lebih rinci dalam skala abu-abu. Metode ini efektif dalam menganalisis bahan organik dan anorganik pada rentang skala nanometer hingga mikrometer (μm) (Mohammed dkk., 2018).

Pada penelitian ini menggunakan pengujian *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk melihat retakan pada batubara-sekam padi yang telah dikompaksi. Pengujian ini dilakukan di Dekanat Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya Indralaya. Alat yang digunakan untuk analisis SEM ini bisa dilihat pada Gambar 3.11.

3.4.6 Analisis X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) ini dilakukan di Laboratorium MIPA, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas

Sriwijaya, Inderalaya. Dalam pengujian ini metode analisis yang dikenal sebagai Difraksi Sinar-X atau *X-Ray Diffraction* (XRD) digunakan untuk menentukan fase yang terbentuk pada material dengan menetapkan parameter struktur kisi dan ukuran partikel. Pada penelitian kali ini mekanisme kerja analisis *X-Ray Diffraction* (XRD), yakni sampel batubara-sekam padi diletakkan pada alat *X-Ray Diffraction* (XRD) dan diradiasi dengan Sinar X, berkas sinar X yang saling menguatkan disebut sebagai bekas difraksi. Ilustrasi difraksi dapat dilihat pada Gambar 3.12.

Penyinaran Sinar X berupa spektrum difraksi yang dideteksi oleh detektor *infrared* dan kemudian data difraksi tersebut direkam dan dicatat oleh komputer dalam bentuk grafik intensitas puncak (*peak*). Analisis jarak antara bidang kisi kristalnya dengan menggunakan *software* tertentu sehingga dapat menghasilkan suatu data dapat dilihat pada Gambar 3.13.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Batubara dan Sekam Padi

Pembuatan briket komposit Batubara-Sekam Padi dilaksanakan melalui metode sintering dingin (*cold sintering*) dengan tekanan kompaksi, yakni 600 MPa, pada suhu yang sama yaitu 60°C dengan tiga variasi komposisi bahan yaitu 85% Batubara:5% Sekam Padi:10% Tepung Sagu, 80% Batubara:10% Sekam Padi:10% Tepung Sagu, dan 75% Batubara:15% Sekam Padi:10% Tepung Sagu. Tahapan awal melibatkan pemanasan *molding* hingga mencapai suhu yang 60°C, diikuti dengan penambahan serbuk Batubara, Sekam Padi dan Tepung Sagu ke dalamnya yang sebelumnya sudah ditimbang menggunakan timbangan digital. Kemudian, serbuk tersebut ditekan dengan menggunakan batang penekan, dan proses penahanan (*holding time*) dilakukan selama 10 menit. Gambaran proses sintering dingin dapat dilihat pada gambar 4.1.

Pencetakan sampel menggunakan *molding* dengan ukuran lubang 12 mm dan tinggi 71 mm. Pada *molding* diberi *band heater* sebagai alat pemanas *molding* pada saat dilakukan kompaksi pada proses sintering dingin. Setelah proses sintering dingin dilakukan proses sintering dingin (*cold sintering*) dengan *holding time* selama 10 menit.

4.2 Pengujian Densitas

Pengujian Densitas adalah proses yang dilakukan untuk mengetahui kepadatan suatu spesimen dengan membagi massa spesimen dengan volume yang dimilikinya. Spesimen yang menjadi fokus pengujian adalah briket

batubara-sekam padi. Berikut ini disajikan contoh perhitungan densitas specimen:

Perhitungan densitas yang tampak pada briket Batubara-Sekam Padi dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan 4.1.

$$\rho_{\text{apparent}} = \frac{W_{\text{udara}}}{W_{\text{udara}} - W_{\text{fluida}}} \times \rho_{\text{fluida}} \quad 4.1$$

$$\rho_{\text{apparent}} = \frac{3,35}{3,35 - 0,41} \times 1 \text{ g/cm}$$

$$\rho_{\text{apparent}} = 1,395 \text{ g/cm}^3$$

Perhitungan densitas teoritis briket Batubara-Sekam Padi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4.2.

$$\rho_{\text{teoritis}} = \frac{\text{komposisi batubara}}{100 - p_{\text{batubara}}} + \frac{\text{komposisi sekam padi}}{100 - p_{\text{sekam padi}}} + \frac{\text{komposisi sagu}}{100 - p_{\text{sagu}}} \quad 4.2$$

$$\rho_{\text{teoritis}} = \frac{75}{100 - 1,5} + \frac{15}{100 - 1,3} + \frac{10}{100 - 1,4}$$

$$\rho_{\text{teoritis}} = 1,46 \text{ g/cm}^3$$

Setelah data densitas teoritis dan densitas apparent didapat maka dapat dihitung nilai densitas relatif dengan menggunakan persamaan 4.3.

$$\rho_{\text{relatif}} = \frac{\rho_{\text{apparent}}}{\rho_{\text{teoritis}}} \times 100 \% \quad 4.3$$

$$\rho_{\text{relatif}} = \frac{1,1395}{1,46} \times 100 \%$$

$$\rho_{\text{relatif}} = 0,7804 \text{ g/cm}^3$$

Dimana:

ρ_{apparent}	=	Densitas aktual (g/cm ³)
W_{udara}	=	Berat specimen di udara (g)
ρ_{fluida}	=	Densitas fluida (g/cm ³)
W_{fluida}	=	Berat benda uji di dalam fluida
ρ_{teoritis}	=	Densitas teoritis (g/cm ³)
v_m	=	Berat matriks % (g)
v_f	=	Berat reinforced % (g)

$$\rho_m = \text{Densitas matriks (g/cm}^3\text{)}$$

$$\rho_f = \text{Densitas reinforced (g/cm}^3\text{)}$$

Hubungan antara densitas dan porositas yang terdapat pada Batubara dan Sekam Padi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 4.4 dengan demikian nilai porositas sebagai berikut:

$$\Phi = 100 \% - \rho_{\text{relatif}} \quad 4.4$$

$$\Phi = 100 \% - 78,04 \%$$

$$\Phi = 21,9551 \%$$

Dimana:

$$\Phi = \text{Porositas}$$

$$\rho_{\text{relatif}} = \text{Densitas Relatif}$$

Berikut ini merupakan data nilai densitas dan porositas briket dengan komposisi Batubara dan Sekam Padi, yang disajikan pada Tabel 4.1, Tabel 4.2, dan Tabel 4.3.

Tabel 4.1 Data Nilai Densitas dan Porositas Briket dengan Komposisi Batubara 85%, Sekam Padi 5%, dan Tepung sagu 10%

No	P (MPa)	Wudara (g)	Wair (g)	Densitas Apparent	Densitas Teoritis	Densitas Relatif	Porositas %	Porositas Rata-rata %	Standar Deviasi
1	360	3,42	0,78	1,2974	1,48	0,8766	12,3365	13,1973	1,042131
2		3,42	0,71	1,2615	1,48	0,8524	14,7617		
3		3,41	0,74	1,2772	1,48	0,8629	13,7058		
4		3,42	0,80	1,3053	1,48	0,8820	11,8011		
5		3,41	0,75	1,2820	1,48	0,8662	13,3814		

Tabel 4.2 Data Nilai Densitas dan Porositas Briket dengan Komposisi Batubara 80%, Sekam Padi 10%, dan Tepung sagu 10%

No	P (MPa)	Wudara (g)	Wair (g)	Densitas Apparent	Densitas Teoritis	Densitas Relatif	Porositas %	Porositas Rata-rata %	Standar Deviasi
1	360	3,39	0,63	1,2283	1,47	0,8356	16,4448	16,4827	0,203305
2		3,38	0,62	1,2246	1,47	0,8331	16,6913		
3		3,38	0,62	1,2246	1,47	0,8331	16,6913		
4		3,39	0,64	1,2327	1,47	0,8386	16,1410		
5		3,39	0,63	1,2283	1,47	0,8356	16,4448		

Tabel 4.3 Data Nilai Densitas dan Porositas Briket dengan Komposisi Batubara 75%, Sekam Padi 15%, dan Tepung sagu 10%

No	P(MPa)	Wudara (g)	Wair (g)	Densitas Apparent	Densitas Teoritis	Densitas Relatif	Porositas %	Porositas Rata-rata %	Standar Deviasi
1		3,36	0,46	1,1586	1,46	0,7936	20,6424		
2		3,36	0,43	1,1468	1,46	0,7855	21,4550		
3	360	3,37	0,47	1,1621	1,46	0,7959	20,4062	21,2362	0,606989
4		3,35	0,41	1,1395	1,46	0,7804	21,9551		
5		3,36	0,42	1,1429	1,46	0,7828	21,7221		

Berdasarkan hasil pengujian komposisi 85% Batubara, 5% Sekam Padi, dan 10% Tepung Sagu, diperoleh hasil densitas apparent tertinggi, yaitu mencapai $1,305 \text{ g/cm}^3$, dengan rata-rata densitas apparent sebesar $1,285 \text{ g/cm}^3$ dan porositas rata-rata terendah sebesar 13,20%. Hasil ini menunjukkan bahwa campuran dengan komposisi tersebut menghasilkan struktur briket yang paling padat dan kompak dibandingkan dengan dua komposisi lainnya.

Sementara itu, pada komposisi 80% Batubara, 10% Sekam Padi, dan 10% Tepung Sagu, densitas apparent berada pada kisaran $1,225$ hingga $1,233 \text{ g/cm}^3$, dengan nilai rata-rata sebesar $1,228 \text{ g/cm}^3$, serta porositas rata-rata mencapai 16,48%. Dibandingkan dengan komposisi sebelumnya, terjadi penurunan nilai densitas disertai dengan peningkatan porositas. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan kadar sekam padi dalam campuran menyebabkan berkurangnya tingkat kepadatan briket secara structural.

Adapun pada komposisi 75% Batubara, 15% Sekam Padi, dan 10% Tepung Sagu, nilai densitas apparent menurun secara signifikan, dengan nilai terendah sebesar $1,139 \text{ g/cm}^3$, rata-rata $1,150 \text{ g/cm}^3$, dan porositas tertinggi sebesar 21,24%. Kondisi ini memperlihatkan bahwa semakin besar persentase sekam padi dalam campuran, semakin banyak pula rongga yang terbentuk di dalam struktur briket, sehingga menyebabkan penurunan kepadatan dan kekompakan material. Grafik porositas dapat dilihat pada gambar 4.3

Penurunan densitas apparent dan relatif secara signifikan seiring peningkatan kandungan sekam padi disebabkan oleh sifat sekam padi yang lebih ringan, berpori, dan memiliki struktur serat yang kurang rapat dibandingkan batubara. Hal ini menyebabkan terbentuknya struktur material

yang kurang padat meskipun berada pada tekanan sintering yang sama. Sebaliknya, tingginya kandungan batubara pada komposisi 85% Batubara, 5% Sekam Padi, 10% Tepung Sagu memberikan kontribusi besar terhadap meningkatnya densitas dan menurunnya porositas, karena batubara memiliki massa jenis yang tinggi dan mampu mengisi ruang antarpartikel dengan lebih baik saat diberi tekanan.

Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa peningkatan rasio batubara dalam campuran komposit secara signifikan meningkatkan kerapatan material dan menurunkan tingkat porositas. Hasil ini menegaskan bahwa komposisi bahan baku berperan krusial dalam menentukan kualitas fisik dari komposit yang dihasilkan melalui proses sintering dingin. Oleh karena itu, komposisi 85% Batubara, 5% Sekam Padi, 10% Tepung Sagu menunjukkan performa terbaik dalam hal densifikasi dan potensial untuk menghasilkan komposit dengan sifat mekanik dan termal yang lebih unggul.

4.3 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) merupakan salah satu metode karakterisasi mikrostruktur yang penting dalam mengevaluasi morfologi dan komposisi unsur pada permukaan material hasil sintering dingin. Dalam penelitian ini, pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilakukan untuk menganalisis struktur mikro dan kandungan unsur dari komposit batubara–sekam padi setelah proses densifikasi, dengan tujuan untuk mengetahui distribusi elemen serta indikasi keberhasilan ikatan antar partikel penyusun.

Sampel yang dilakukan pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) adalah briket Batubara Sekam Padi dengan komposisi 75% Batubara, 15% Sekam Padi, 10% Sagu hasil sintering dingin (cold sintering) yang ditahan (holding time) selama 10 menit pada suhu 40 °C dan tekanan kompaksi yaitu 200 MPa, karena komposisi ini memiliki porositas tertinggi, yakni 98,96%.

Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) dilaksanakan di Dekanat Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya dengan tujuan untuk memahami interkoneksi dan porositas yang terbentuk pada pembesaran 500x, 1000x dan 2000x.

Gambar 4.4 merupakan hasil pengujian dengan pembesaran 500x, bagian yang dilingkari merupakan sebagian dari porositas. Dari hasil diatas tampak struktur permukaan yang kasar dan tidak rata, menandakan adanya aglomerasi partikel batubara dan sekam padi. Permukaan menunjukkan adanya pori-pori yang relatif besar dan tersebar tidak merata. Pada perbesaran ini, pori-pori yang diamati memiliki bentuk tak beraturan dan sebagian besar berbentuk elips atau tidak beraturan. Ukuran pori-pori yang dapat terdeteksi pada level ini berada dalam rentang makro, yaitu antara 8,4 μm hingga 21,6 μm . Ini menunjukkan bahwa pada skala ini, proses sintering belum sepenuhnya menutup celah antar partikel besar.

Gambar 4.5 merupakan hasil pengujian dengan perbesaran 1000x, dari bagian yang dilingkari terlihat lebih jelas adanya jaringan pori (porositas) dan retakan mikro yang terbentuk di antara partikel penyusun. Struktur permukaan tampak lebih detail dan memperlihatkan adanya interaksi antara batubara dan abu sekam padi, yang terlihat dari adanya zona transisi antar partikel. Ukuran pori-pori pada perbesaran ini lebih kecil dibanding 500x dan dapat diukur dalam kisaran 4,2 μm hingga 12,5 μm . Pori-pori mulai menunjukkan pola distribusi yang lebih seragam, menandakan bahwa proses sintering telah menyebabkan penyatuan partikel yang lebih baik.

Gambar 4.6 merupakan hasil pengujian dengan perbesaran tertinggi, yaitu 2000x, bagian yang dilingkari merupakan porositas yang terlihat lebih jelas. Dimana morfologi permukaan menunjukkan pori-pori mikro dengan bentuk dan ukuran yang sangat bervariasi. Beberapa pori tampak sangat kecil dan tersebar merata, mengindikasikan terjadinya penyusutan antarpartikel selama proses sintering. Partikel abu sekam padi berfungsi sebagai agen pengikat (binder), yang dapat dilihat dari adanya permukaan halus di beberapa bagian yang menghubungkan pori satu dengan yang lain. Ukuran pori-pori

yang terdeteksi di perbesaran ini berada dalam rentang 1,1 μm hingga 5,7 μm , dengan pori-pori terkecil berukuran sekitar 1,1 μm .

Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa data yang dihasilkan cukup representatif dan stabil dalam menangkap sinyal dari permukaan material. Hasil pemindaian *Scanning Electron Microscope* (SEM) memperlihatkan morfologi permukaan komposit yang tidak seragam dengan adanya pori-pori kecil, retakan mikro, dan permukaan kasar yang tersebar acak. Permukaan ini menunjukkan bahwa partikel batubara dan sekam padi masih terlihat secara individual, namun sebagian telah mengalami penyatuan atau fusi akibat tekanan selama proses sintering dingin. Adanya porositas juga menunjukkan bahwa proses sintering belum sepenuhnya menyatu secara padat, yang merupakan ciri khas dari proses sintering dingin dibandingkan dengan sintering termal konvensional.

Untuk mengetahui kandungan unsur kimia pada material komposit yang telah di sintering dingin, dilakukan analisis menggunakan *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) yang terintegrasi pada instrumen *Scanning Electron Microscope* (SEM). Hasil analisis menunjukkan bahwa unsur karbon (C) merupakan komponen dominan dalam struktur material dengan komposisi sebesar 64,1% secara atomik dan 52,3% secara berat. Selain itu, unsur oksigen (O) juga ditemukan dalam jumlah signifikan, yaitu sebesar 29,8% atomik dan 32,5% berat. Komposisi ini mengindikasikan bahwa material komposit masih mempertahankan karakteristik organik dari bahan penyusunnya, yaitu batubara dan sekam padi, yang secara alami mengandung karbon dan oksigen dalam jumlah tinggi. Kandungan kedua unsur ini sangat memengaruhi sifat pembakaran dan potensi energi dari material, serta menjadi indikator keberhasilan proses pencampuran dan sintering antara komponen batubara dan biomassa. Tabel ringkasan hasil komposisi unsur dari analisis *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Komposisi Unsur dari Analisis *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS)

	Spektrum	% Atomik	% Berat	Net Count	Error Atomik (%)	Error Berat (%)
C (Karbon)	K	64,1	52,3	81.555	0,3	0,3

	Spektrum	% Atomik	% Berat	Net Count	Error Atomik (%)	Error Berat (%)
O (Oksigen)	K	29,8	32,5	23.369	0,3	0,3
Na (Natrium)	K	0,1	0,2	212	0,0	0,0
Mg (Magnesium)	K	0,2	0,3	347	0,0	0,0
Al (Aluminium)	K	1,2	2,2	3.100	0,0	0,1
Si (Silikon)	K	2,1	4,1	5.438	0,0	0,1
S (Sulfur)	K	0,5	1,1	1.135	0,0	0,1
K (Kalium)	K	0,1	0,3	167	0,0	0,1
Ca (Kalsium)	K	0,4	1,1	527	0,0	0,1
Fe (Besi)	K	1,5	5,9	422	0,2	1,0

Berdasarkan data hasil analisis *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS), dapat disimpulkan bahwa unsur utama penyusun komposit batubara–sekam padi adalah karbon (C) dan oksigen (O). Kedua unsur ini berasal dari bahan dasar organik, yakni batubara dan sekam padi, yang dikenal memiliki kandungan karbon tinggi sebagai sumber energi utama dalam proses pembakaran. Dominasi unsur karbon menunjukkan potensi material ini sebagai bahan bakar padat dengan nilai kalor yang tinggi. Sementara itu, keberadaan oksigen dalam jumlah signifikan umumnya berasal dari gugus fungsional dalam struktur lignoselulosa biomassa maupun senyawa oksida pada komponen abu, yang dapat memengaruhi reaktivitas termal material

Selain unsur organik, hasil *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDS) juga mengindikasikan kehadiran beberapa unsur anorganik seperti silikon (Si), aluminium (Al), dan besi (Fe). Kehadiran silikon dan aluminium menandakan kontribusi abu sekam padi, khususnya dalam bentuk senyawa silika (SiO_2), yang memiliki sifat refraktori dan berperan dalam meningkatkan kekuatan struktur komposit. Kandungan besi (Fe) yang relatif tinggi secara berat, yaitu sebesar 5,9%, diduga berasal dari pengotor batubara atau potensi kontaminasi selama proses pencampuran bahan. Unsur ini berpotensi memengaruhi sifat konduktivitas termal serta kekuatan mekanik dari komposit. Di samping itu, unsur minor seperti natrium (Na), magnesium (Mg), kalium (K), dan kalsium

(Ca) juga terdeteksi meskipun dalam jumlah kecil. Keberadaan mineral-mineral alkali ini umum dijumpai dalam biomassa dan abu pembakarannya. Walaupun kadarnya rendah, unsur-unsur tersebut dapat memberikan kontribusi terhadap kestabilan termal, menurunkan titik leleh abu, serta memengaruhi karakteristik pembakaran dari komposit yang dihasilkan.

4.4 Pengujian *X-ray diffraction* (XRD)

X-ray diffraction (XRD) merupakan alat yang sangat efektif dalam menguji zat atau partikel halus serta untuk mengidentifikasi struktur kristalin yang terbentuk pada komposit batubara dan sekam padi setelah proses pencampuran dan sintering dingin. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui jenis-jenis senyawa kristalin yang ada dalam sampel, menentukan posisi puncak-puncak difraksi pada sudut 2θ , mengukur intensitas masing-masing puncak, serta mengevaluasi fase dominan dari setiap bahan penyusun. Informasi ini sangat penting karena struktur kristalin secara langsung memengaruhi sifat fisis dan mekanis material, seperti kekuatan tekan, konduktivitas termal, serta ketahanan terhadap suhu tinggi.

Pengujian *X-ray diffraction* (XRD) dilakukan di Laboratorium Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Sriwijaya, menggunakan alat MiniFlex X-Ray Diffractometer seri 300/600 buatan Rigaku. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip hamburan sinar-X oleh kisi atom dalam struktur kristal, menghasilkan pola difraksi khas yang menjadi dasar identifikasi fasa. Kondisi pengujian meliputi tegangan operasi sebesar 40 kV, arus 15 mA, dengan rentang sudut pemindaian dari 5° hingga 90° 2θ . Kecepatan pemindaian yang digunakan adalah 10° per menit, dan pemindaian dilakukan dalam mode Theta/2-Theta continuous scan.

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh puncak intensitas tertinggi pada sudut $2\theta = 26,6^\circ$ dengan intensitas mencapai 1538 cps, yang mengindikasikan keberadaan fasa Graphite (C) sebagai komponen kristalin dominan. Selain itu,

terdapat pula puncak-puncak sekunder seperti pada sudut $21,2^\circ$ (734 cps) dan $50,4^\circ$ (412 cps) yang menunjukkan keberadaan Quartz (SiO_2), serta beberapa puncak lemah pada $12,7^\circ$ dan $35,0^\circ$ yang teridentifikasi sebagai senyawa organik kompleks, kemungkinan berasal dari bahan pengikat seperti tepung sagu. Data ini menunjukkan bahwa meskipun campuran menggunakan sekam padi, struktur kristalin batubara tetap mendominasi. Pola difraksi yang diperoleh ditampilkan pada Gambar 4.7 berikut:

Untuk memverifikasi temuan ini, dilakukan perbandingan dengan data referensi dari literatur. Grafik referensi *X-ray diffraction* (XRD) batubara menunjukkan bahwa batubara memiliki puncak intensitas tertinggi pada sudut $2\theta = 26,4^\circ$, yang sangat mendekati nilai yang diperoleh dari sampel komposit ($26,6^\circ$). Hal ini menunjukkan bahwa struktur kristalin dari batubara masih terjaga setelah proses pencampuran dan sintering. Gambar referensi pola difraksi batubara ditunjukkan pada Gambar 4.8.

Sebagai pembanding lainnya, *X-ray diffraction* (XRD) sekam padi dari referensi jurnal menunjukkan puncak intensitas tertinggi pada sudut $2\theta = 21,6^\circ$, yang berkaitan dengan fase trydimite, yakni bentuk kristalin dari silika yang umum muncul pada sekam padi yang telah mengalami proses pembakaran atau sintering. Intensitas puncak dari *X-ray diffraction* (XRD) sekam padi relatif lebih rendah dan bentuk puncaknya lebih melebar, yang menunjukkan struktur silika semi-kristalin. Nilai puncak $21,2^\circ$ ini juga muncul dalam hasil *X-ray diffraction* (XRD) meskipun dalam intensitas yang lebih rendah, menunjukkan bahwa silika dari sekam tetap memberikan kontribusi terhadap struktur kristalin material. Pola ini ditunjukkan dalam Gambar 4.9.

Berdasarkan hasil analisis pola difraksi *X-ray diffraction* (XRD), dapat disimpulkan bahwa struktur kristalin dalam komposit batubara–sekam padi hasil sintering dingin didominasi oleh fasa Graphite (C), sebagaimana dibuktikan oleh kemunculan puncak intensitas tertinggi pada $2\theta = 26,6^\circ$, yang identik dengan karakteristik kristal batubara menurut data referensi ($2\theta = 26,4^\circ$). Dominasi puncak ini menunjukkan bahwa sifat kristalin batubara tetap terjaga meskipun telah dicampurkan dengan biomassa dan bahan pengikat. Di sisi lain, kemunculan puncak difraksi sekunder pada $2\theta = 21,2^\circ$ yang

berdekatan dengan puncak silika dari sekam padi ($2\theta = 21,6^\circ$) mengindikasikan bahwa sebagian struktur silika dari sekam padi tetap eksis dalam bentuk fasa Quartz atau Trydimite, walaupun intensitasnya lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa sekam padi memberikan kontribusi fasa minor dalam struktur kristalin akhir. Hasil dari analisis hasil dapat kita lihat pada gambar 4.10.

Dengan demikian, pola difraksi yang dihasilkan menunjukkan bahwa sistem komposit bersifat multifasa, dengan dominasi karbon kristalin dari batubara dan kontribusi tambahan berupa silika dari biomassa. Karakter ini secara struktural menguntungkan, karena Graphite berkontribusi terhadap kestabilan termal, kekuatan tekan, dan konduktivitas listrik, sedangkan silika meningkatkan kekakuan dan ketahanan terhadap reaksi kimia atau oksidasi, terutama pada suhu tinggi. Komposisi kristalin semacam ini sangat penting dalam konteks pengembangan briket bahan bakar atau material teknik, karena mampu memberikan kombinasi karakteristik mekanik dan termal yang stabil serta tahan terhadap degradasi pada suhu kerja menengah hingga tinggi.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi komposisi batubara dan sekam padi terhadap sifat fisik komposit briket yang dihasilkan melalui proses sintering dingin. Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Briket komposit berbasis campuran batubara sub-bituminus dan sekam padi berhasil dibuat melalui metode sintering dingin, yaitu proses pemadatan pada suhu rendah sebesar 60 °C dan tekanan 360 MPa. Metode ini terbukti mampu membentuk briket padat tanpa memerlukan suhu tinggi sebagaimana pada metode sintering konvensional. Keberhasilan proses ini menunjukkan bahwa sintering dingin dapat menjadi alternatif teknologi ramah lingkungan dan hemat energi untuk menghasilkan bahan bakar padat, sekaligus mendukung pemanfaatan limbah biomassa sekam padi sebagai salah satu komponen bahan baku yang berkelanjutan. Teknologi ini memiliki potensi besar dalam mendukung transisi energi bersih karena mampu menekan konsumsi energi termal, mengurangi emisi karbon, serta menghasilkan produk dengan karakteristik fisik yang layak digunakan.
2. Variasi komposisi antara batubara, sekam padi, dan tepung sagu sebagai binder berpengaruh signifikan terhadap sifat fisik dan kepadatan briket yang dihasilkan. Briket dengan komposisi 85% batubara, 5% sekam padi, dan 10% tepung sagu menunjukkan performa terbaik berdasarkan pengujian fisik, dengan nilai densitas apparent sebesar 1,305 g/cm³, densitas relatif 0,8820, dan porositas terendah yaitu 13,20%. Sebaliknya, peningkatan kandungan sekam padi hingga

15% menyebabkan penurunan densitas menjadi $1,150 \text{ g/cm}^3$ dan peningkatan porositas hingga 21,24%, yang menunjukkan bahwa sifat ringan, berserat, dan berpori dari sekam padi memengaruhi struktur internal briket. Hasil ini mengindikasikan bahwa semakin tinggi kandungan batubara dalam komposisi, maka briket yang dihasilkan akan semakin padat dan homogen secara struktur, sehingga memiliki kualitas pembakaran yang lebih baik serta lebih stabil secara mekanik.

3. Hasil karakterisasi sifat fisik dan kimia dilakukan dalam 3 pengujian yaitu:
 - a) Pengujian densitas memperlihatkan bahwa proses sintering dingin secara efektif meningkatkan kerapatan dan mengurangi porositas briket pada komposisi dengan kandungan batubara yang tinggi, menunjukkan efisiensi proses dalam menghasilkan struktur padat yang kompak.
 - b) Hasil analisis *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan sekam padi, maka semakin jelas terlihat peningkatan jumlah dan ukuran pori, retakan mikro, dan ketidakteraturan struktur partikel, meskipun interaksi antarpartikel masih cukup baik berkat tekanan sintering yang tinggi.
 - c) Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD) menunjukkan bahwa meskipun proses dilakukan pada suhu rendah, tetap terbentuk fase kristalin yang stabil. Hal ini membuktikan bahwa sintering dingin mampu memfasilitasi pembentukan struktur kristal yang baik, sehingga produk akhir tetap memiliki kekuatan struktural dan kestabilan fasa padat yang layak untuk aplikasi bahan bakar padat.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemui selama pelaksanaan, maka penulis menyampaikan beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk pengembangan dan penelitian selanjutnya, antara lain:

1. Perlu dilakukan pengujian nilai kalor (kalorimeter) dan uji performa pembakaran langsung pada briket yang dihasilkan. Hal ini penting untuk mengetahui sejauh mana efisiensi energi dan kestabilan termal briket ketika diaplikasikan sebagai bahan bakar alternatif di sektor rumah tangga maupun industri.
2. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas variasi parameter proses sintering dingin, seperti variasi tekanan, suhu, waktu penahanan (holding time), serta penambahan aditif atau binder organik/inorganik lainnya yang mungkin lebih efektif dalam meningkatkan ikatan antar partikel.
3. Diperlukan uji mekanik tambahan, seperti uji tekan, uji impak, atau ketahanan terhadap gesekan, untuk memastikan kekuatan fisik briket dalam kondisi nyata (handling, transportasi, dan pembakaran). Uji ini dapat memberikan gambaran tentang keandalan dan daya tahan produk secara struktural.
4. Aplikasi skala industri atau semi-industri perlu dievaluasi, termasuk studi keekonomian terkait biaya produksi, efisiensi energi, dan peluang komersialisasi briket batubara-sekam padi berbasis sintering dingin. Ini penting agar penelitian tidak hanya bersifat laboratorium, tetapi juga dapat diterapkan dalam skala ril.
5. Perlu adanya dukungan lintas sektor, termasuk dari pemerintah dan pelaku industri energi, untuk mendorong pengembangan teknologi sintering dingin sebagai solusi energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Penggunaan limbah pertanian seperti sekam padi juga dapat menjadi solusi dual problem: mengatasi limbah dan menyediakan energi.

Densifikasi Batubara Dan Biomassa Sekam Padi Menggunakan Teknologi Sintering Dingin

ORIGINALITY REPORT

2%

SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	docplayer.info Internet	80 words — 1%
2	repository.unsri.ac.id Internet	71 words — 1%
3	e-prosiding.poliban.ac.id Internet	66 words — 1%

EXCLUDE QUOTES ON

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES < 1%

EXCLUDE MATCHES < 10 WORDS

SURAT KETERANGAN PENGECEKAN SIMILARITY

Saya yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Muhammad Ghifa Al Muzhafar
Nim : 03051282126030
Prodi : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik

Menyatakan bahwa benar hasil pengecekan similarity Skripsi/Tesis/Disertasi/Lap. Penelitian yang berjudul “Densifikasi Batubara Dan Biomassa Sekam Padi Menggunakan Teknologi Sintering Dingin” adalah 2%.

Dicek oleh operator *:1. Dosen Pembimbing

2. UPT Perpustakaan

Demikianlah surat keterangan ini saya buat dengan sebenarnya dan dapat saya pertanggung jawabkan.

Indralaya, 25 Juli 2025

Menyetujui
Dosen Pembimbing,



Dr. Ir. Gunawan, S.T., M.T.
NIP. 197705072001121001

Yang menyatakan,



Muhammad Ghifa Al Muzhafar
NIM 03051282126030