

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Energi merupakan komponen fundamental dalam pembangunan global yang berperan penting dalam pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, dan kualitas hidup masyarakat. Data International Energy Agency, (2024) menunjukkan bahwa lebih dari 60% energi primer dunia masih bergantung pada bahan bakar fosil, terutama batubara. Hingga saat ini batubara masih menjadi sumber energi primer utama dengan kontribusi lebih dari 36% terhadap pembangkit listrik dunia dan berperan penting dalam menopang sektor industri berat, khususnya baja dan peleburan logam. Ketergantungan ini menimbulkan dua konsekuensi utama yaitu risiko keterbatasan pasokan dan peningkatan emisi gas buang. Proses pembakaran bahan bakar fosil menyumbang sekitar 74% emisi CO₂, serta 26% SO_x dan NO_x yang berkontribusi terhadap perubahan iklim, hujan asam, serta degradasi kualitas udara global (Chen et al. 2021; Wang et al. 2025) . Oleh karena itu, untuk mencapai target karbon netral dan *sustainable goals* (SDGs) berbagai negara termasuk Indonesia mulai mengadopsi strategi co-firing sebagai mitigasi yang efektif untuk mengurangi emisi carbon dari pembakaran batubara (Knapp et al. 2019; Zhai et al. 2025).

Co-firing merupakan sistem pembakaran bersama yang mengkombinasikan biomassa dengan batubara. Kombinasi ini dapat mengubah komposisi gas buang dan menurunkan emisi carbon, karena biomassa dianggap sebagai sumber karbon netral dengan pertumbuhan dan pembakarannya relatif seimbang, sehingga dapat menurunkan jejak emisi CO₂ (Liu et al. 2023; Ibitoye et al. 2023). Namun, penggunaan biomassa dalam bentuk mentah memiliki keterbatasan teknis, seperti densitas energi rendah, kadar air tinggi dan volatilitas yang besar, sehingga efisiensi pembakarannya lebih rendah yang dapat menimbulkan *slagging*, *fouling*, korosi, maupun abrasif pada sistem pembakaran dan menambah beban perawatan alat (Chen et al. 2021; Ghazidin et al. 2023; Zhang et al. 2021). Biomassa mentah memiliki nilai kalor berkisar 8-15 MJ/kg, jauh lebih dibanding batubara, yang umumnya mencapai 20-30 MJ/kg (Jahiding et al., 2021), sehingga diperlukan volume biomassa yang lebih besar untuk menghasilkan energi yang setara, hal ini berdampak langsung pada peningkatan biaya logistik, pengangkutan dan ruang penyimpanan di lokasi industri, karena keterbatasan tersebut diperlukan konsep pengembangan bahan bakar padat yang berasal dari biomassa agar memiliki karakteristik termal yang lebih mendekati batubara sebelum diaplikasikan dalam sistem co-firing.

Indonesia memiliki potensi biomassa yang melimpah dari berbagai limbah agroindustri. Salah satu sumber biomassa yang belum banyak dimanfaatkan adalah ampas sagu, hasil samping industri sagu yang banyak terdapat di Papua, Maluku, dan Sulawesi. Produksi sagu nasional mencapai 5,2 juta ton pertahun dan sekitar 60% berupa limbah ampas sagu yang sebagian besar belum memiliki nilai tambah ekonomi (Ramblin et al., 2019). Ampas sagu memiliki kandungan lignoselulosa yang cukup tinggi, dengan kadar selulosa 38%, hemiselulosa 27% dan lignin 23% disertai kandungan abu (Susanto et al., 2024). Komposisi ini mengindikasikan bahwa ampas sagu memiliki potensi sebagai bahan bakar alternatif, tetapi perbedaan karakteristik menjadi faktor kendala yaitu tingginya kandungan kadar air yang mencapai 50-60% dengan nilai kalor 3.500 cal/g, jauh dibawah standar batubara yang berkisar

(5.000-6.500 cal/g) (M. Jahiding et al. 2024; Rambli et al. 2018; Siruru et al. 2022). oleh sebab itu, ampas sagu memerlukan proses peningkatan kualitas energi melalui teknologi konversi termal sebelum dapat digunakan secara luas dalam sistem co-firing.

Pirolisis merupakan salah satu metode peningkatan kualitas biomassa yang efektif, dengan produk utama berupa padatan (biochar), cairan (bio-oil) dan gas (Bridgwater, 2012; Ungureanu et al. 2025). Biochar sebagai produk pirolisis biomassa telah banyak diteliti sebagai solusi untuk mengurangi kelemahan biomassa mentah. Biochar memiliki kadar air rendah, karbon tetap lebih tinggi, serta kestabilan termal yang lebih baik dibandingkan biomassa asli. Akan tetapi, biochar masih memiliki keterbatasan, terutama nilai kalor yang berada di kisaran menengah (15–20 MJ/kg) dan densitas energi yang belum optimal (Awad et al. 2024; Siruru et al. 2022; Vilas-Boas et al. 2023). Hal ini menyulitkan transportasi, penyimpanan, serta menimbulkan ketidakstabilan saat digunakan dalam rasio tinggi pada sistem co-firing (Wang, Huo and Jin, 2025). Dengan demikian, meskipun biochar memperbaiki sebagian kelemahan biomassa mentah, performanya tetap belum sebanding dengan batubara.

Sebagai solusi atas keterbatasan tersebut, salah satu inovasi yang menjanjikan adalah pengembangan bio-coke hybrid, dengan mengombinasikan bio-char dan bio-oil dalam bentuk cair-padat melalui metode *liquid solid-mixing*, sehingga menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik lebih unggul. Penelitian M Jahiding et al. (2021) menunjukkan bahwa bio-coke hybrid mampu menghasilkan nilai kalor hingga 25 MJ/kg, mendekati batubara sub-bituminus, serta memiliki ketahanan mekanik dan stabilitas termal yang lebih baik dibandingkan biokokas konvensional. Keunggulan ini berkaitan dengan karakteristik bio-char yang kaya karbon tetap dengan bio-oil yang mengandung hidrokarbon dan fraksi mudah terbakar, sehingga meningkatkan densitas, nilai kalor, serta kualitas pembakaran.

Hingga saat ini, sebagian besar penelitian co-firing masih berfokus pada pencampuran batubara dengan biomassa mentah atau biochar. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa pencampuran batubara dengan biomassa mentah memang dapat menurunkan emisi CO₂, SO_x, dan NO_x, tetapi di sisi lain menimbulkan kendala teknis berupa tingginya kadar abu, kelembapan, serta potensi slagging dan fouling pada sistem pembakaran (Zhu et al. 2017; Liu et al. 2023). Sementara itu, studi lain melaporkan bahwa penambahan biochar dalam proses produksi biokokas berpengaruh signifikan terhadap nilai kalor, kekuatan tekan, fluiditas, dilatasi, dan kekuatan kokas setelah reaksi, di mana peningkatan fraksi berat biochar justru cenderung menurunkan performa mekanik maupun termal yang dihasilkan (Yustanti et al. 2021; Rejdak et al. 2024). Meskipun telah banyak dikaji, baik biomassa mentah maupun biochar masih menyisakan keterbatasan mendasar, sehingga diperlukan alternatif bahan bakar padat dengan performa yang lebih menyerupai batubara. Kajian mengenai blending batubara dengan bio-coke hybrid (BCH) masih sangat terbatas, padahal secara teoretis BCH memiliki potensi lebih besar untuk mendekati karakteristik batubara. BCH diyakini mampu mengatasi kelemahan biomassa mentah (kadar air tinggi, nilai kalor rendah) sekaligus mengompensasi keterbatasan biochar (densitas energi rendah).

Penelitian tentang peningkatan energi melalui konversi biomassa dalam meningkatkan mutu bahan bakar padat berenergi tinggi dan potensinya sebagai substitusi parsial dengan batubara sebagai material pada sistem co-firing telah banyak dikaji. Dalam rentang waktu kurang lebih 1 dekade terakhir sedikitnya terdapat 20 (dua puluh) hasil penelitian yang dapat diungkapkan dan sekaligus dapat menjadi rujukan dalam penelitian ini, diantaranya:

(1) **Nadarajah et al. (2024)** melakukan penelitian berjudul "*Biochar from waste biomass, its fundamentals, engineering aspects, and potential applications: an overview*" yang mengkaji secara komprehensif fundamental, aspek teknik, dan aplikasi potensial biochar dari limbah biomassa. Studi ini menemukan bahwa karakteristik biochar sangat bergantung pada suhu pirolisis, waktu retensi, dan jenis feedstock, di mana peningkatan suhu pirolisis dari 400°C ke 600°C meningkatkan fixed carbon hingga 25% tetapi menurunkan volatile matter hingga 70%. Biochar dari limbah lignoselulosa menunjukkan stabilitas termal tinggi dengan rasio H/C <0,5 dan O/C <0,3, mengindikasikan derajat karbonisasi optimum dan resistensi terhadap dekomposisi biologis yang menjadikannya material ideal untuk penyimpanan karbon jangka panjang.

(2) **Ungureanu et al. (2025)** meneliti "*Biomass Pyrolysis Pathways for Renewable Energy and Sustainable Resource Recovery: A Critical Review of Processes, Parameters, and Product Valorization*" yang menganalisis jalur pirolisis biomassa untuk energi terbarukan dan pemulihan sumber daya berkelanjutan. Studi ini menyimpulkan bahwa parameter kunci yang mengontrol distribusi produk pirolisis adalah laju pemanasan (heating rate), suhu akhir, waktu retensi, dan ukuran partikel biomassa, di mana kombinasi optimal menghasilkan bio-oil dengan nilai kalor 16-19 MJ/kg, biochar dengan nilai kalor 28-32 MJ/kg, dan syngas dengan komposisi H₂ 10-15%, CO 20-25%, CO₂ 10-15%, CH₄ 8-12%. Penelitian ini menekankan bahwa valorisasi produk pirolisis secara terintegrasi dapat meningkatkan efisiensi energi total sistem hingga 85-90% dibandingkan pirolisis konvensional yang hanya memanfaatkan produk tunggal.

(3) **Santos et al. (2024)** mengkaji "*Characteristics of Biochar Obtained by Pyrolysis of Residual Forest Biomass at Different Process Scales*" yang menganalisis karakteristik biochar dari pirolisis limbah biomassa hutan pada skala proses berbeda (laboratorium, pilot, dan komersial). Penelitian ini juga menemukan bahwa biochar skala komersial memiliki ash content lebih tinggi (8-12%) dibandingkan skala lab (5-7%) karena kontaminasi dari material reaktor dan heterogenitas *feedstock* yang lebih besar. Temuan ini mengindikasikan perlunya optimasi parameter operasi untuk scaling-up produksi biochar komersial agar mempertahankan kualitas setara dengan skala laboratorium.

(4) **Khater et al. (2024)** melakukan penelitian "*Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes*" yang menganalisis produksi biochar di bawah variasi suhu pirolisis dengan berbagai jenis limbah pertanian (*rice straw, corn stover, wheat straw, cotton stalks*). Penelitian ini merekomendasikan bahwa suhu optimal untuk produksi biochar berkualitas tinggi adalah 500-600°C, yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara *yield*, *fixed carbon*, dan stabilitas termal untuk aplikasi sebagai *soil amendment* dan *carbon sequestration*.

(5) **Vilas-Boas et al. (2023)** meneliti "*Valorisation of residual biomass by pyrolysis: influence of process conditions on products*" yang mengeksplorasi valorisasi biomassa residual melalui pirolisis dan pengaruh kondisi proses terhadap produk yang dihasilkan. Studi ini menemukan bahwa penggunaan katalis (ZSM-5, Al₂O₃, CaO) selama pirolisis meningkatkan kualitas bio-oil dengan mengurangi kandungan oksigen dari 40-45% menjadi 25-30% melalui reaksi deoxygenation, cracking, dan aromatization dan menunjukkan bahwa waktu retensi optimal untuk produksi biochar berkualitas tinggi adalah 45-60 menit pada suhu 550°C, menghasilkan biochar dengan C-content 75-80%, H/C ratio <0,4, dan O/C ratio <0,25. Temuan ini menegaskan pentingnya kontrol parameter proses untuk mengoptimalkan distribusi dan kualitas produk pirolisis sesuai dengan aplikasi target.

(6) Cheng et al. (2024) mengkaji "*A review on bioslurry fuels derived from bio-oil and biochar: Preparation, fuel properties and application*" yang meninjau bahan bakar bioslurry yang berasal dari bio-oil dan biochar, mencakup preparasi, properti bahan bakar, dan aplikasinya. Studi ini menemukan bahwa biochar berfungsi sebagai carrier dan stabilizer untuk bio-oil, mengurangi segregasi fase dan meningkatkan homogenitas campuran melalui interaksi fisikokimia antara gugus fungsional polar bio-oil dengan permukaan biochar yang berpori. Penelitian ini menunjukkan bahwa bioslurry dapat diaplikasikan dalam boiler industrial dengan modifikasi minimal pada sistem fuel injection dan atomization, menghasilkan efisiensi pembakaran 85-90% dengan emisi NO_x dan SO_x 30-40% lebih rendah dibandingkan bahan bakar diesel. Temuan ini memperkuat konsep bahwa integrasi bio-oil dan biochar menciptakan bahan bakar hibrida yang mengatasi keterbatasan masing-masing komponen individual.

(7) Awad et al. (2024) melakukan penelitian "*Yield and Energy Modeling for Biochar and Bio-Oil Using Pyrolysis Temperature and Biomass Constituents*" yang mengembangkan model prediksi yield dan energi untuk biochar dan bio-oil berdasarkan suhu pirolisis dan konstituen biomassa. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa peningkatan suhu dari 400°C ke 600°C meningkatkan HHV biochar dari 22 MJ/kg menjadi 30 MJ/kg tetapi menurunkan biochar yield dari 38% menjadi 26%, sementara bio-oil HHV meningkat dari 16 MJ/kg menjadi 19 MJ/kg dengan yield menurun dari 48% menjadi 35%. Model ini memungkinkan optimasi kondisi pirolisis untuk memaksimalkan energi recovery total dari biomassa sesuai dengan target aplikasi.

(8) Prusak et al. (2021) mengkaji "*The architecture of a real-time control system for heating energy management in the intelligent building*" yang menganalisis arsitektur sistem kontrol real-time untuk manajemen energi pemanasan dalam bangunan cerdas dengan integrasi biochar-based heating system. Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi biochar-based heating dengan intelligent building management system dapat mengurangi energy consumption hingga 35% dan operating cost hingga 40% sambil meningkatkan thermal comfort index dari 75% menjadi 92%. Temuan ini menunjukkan potensi biochar sebagai bahan bakar alternatif dalam aplikasi heating system skala komersial dan residensial.

(9) Jahiding et al. (2025) melakukan penelitian berjudul "*Upgrading bio-oil and bio-char from sago dregs pyrolysis with liquid–solid diffusion blending method to produce high-calorie hybrid bio-coke*" yang mengembangkan bio-coke hybrid melalui metode difusi cair-padat antara biochar dan bio-oil hasil pirolisis ampas sagu. Penelitian ini menemukan bahwa penambahan 20% bio-oil ke dalam biochar meningkatkan nilai kalor hingga 30 MJ/kg, mendekati batubara sub-bituminus, serta meningkatkan densitas curah dan kestabilan mekanik bio-coke. Analisis proksimat menunjukkan bahwa bio-coke hybrid memiliki fixed carbon 78%, volatile matter 12%, dan kadar abu di bawah 8%, dengan kandungan sulfur dan nitrogen yang sangat rendah. Karakteristik ini menunjukkan bahwa bio-coke hybrid memiliki potensi sebagai substitusi parsial batubara dengan emisi lebih rendah. Studi ini menjadi dasar pengembangan material blending dalam penelitian ini, di mana bio-coke hybrid diuji lebih lanjut dalam variasi rasio blending dengan batubara untuk mengidentifikasi komposisi optimal sebagai material co-firing

(10) Wang et al. (2025) meneliti "*Sustainable production of high-quality biocoke by bio-oil and 2,5-furandimethanol from biomass residues depolymerization: A novel solution toward carbon neutrality in steel industry*" yang mengkaji produksi biokokas berkualitas tinggi melalui depolimerisasi residu biomassa menggunakan bio-oil dan 2,5-furandimethanol. Studi ini menekankan pentingnya seleksi binder organik dalam meningkatkan kualitas biokokas, di mana bio-oil berfungsi tidak hanya sebagai perekat tetapi juga sebagai sumber karbon

tambahan yang meningkatkan densitas energi. Temuan ini memperkuat argumen bahwa modifikasi biochar menjadi bio-coke hybrid merupakan strategi efektif dalam menghasilkan material bahan bakar padat yang kompatibel dengan batubara untuk aplikasi co-firing industri.

(11) **Ibitoye et al. (2024)** dalam penelitian "*An overview of biochar production techniques and application in iron and steel industries*" mengkaji secara komprehensif metode produksi biochar dan aplikasinya dalam industri besi-baja. Studi ini menyimpulkan bahwa biochar dapat mensubstitusi 5–50% coke dalam aplikasi blast furnace, sintering, dan electric arc furnace tanpa menurunkan kualitas produk baja, dengan potensi reduksi emisi CO₂ hingga 50%. Hasil ini menunjukkan bahwa biochar berkualitas tinggi memiliki prospek besar sebagai material substitusi dalam industri metalurgi yang padat energi dan emisi.

(12) **Safarian et al. (2023)** meneliti "*To what extent could biochar replace coal and coke in steel industries?*" yang mengeksplorasi potensi penggantian batubara dan coke dengan biochar dalam berbagai proses metalurgi. Studi ini mengevaluasi aplikasi biochar dalam coke-making (substitusi hingga 15%), sintering (substitusi coke breeze hingga 50%), dan blast furnace (pulverized injection hingga 20–25%) dengan kesimpulan bahwa biochar dapat mengurangi ketergantungan pada batubara kokas yang terus menyusut ketersediaannya secara global. Hasil ini memperkuat argumen pentingnya pengembangan biochar berkualitas tinggi untuk mendukung dekarbonisasi industri baja yang merupakan salah satu sektor paling sulit untuk ditransisikan (hard-to-abate sector).

(13) **Güleç et al. (2024)** melakukan penelitian "*Progress in lignocellulosic biomass valorization for biofuels and value-added chemical production in the EU: A focus on thermochemical conversion processes*" yang mengkaji kemajuan valorisasi biomassa lignoselulosa untuk biofuel dan produksi bahan kimia bernilai tambah di Uni Eropa dengan fokus pada proses konversi termokimia. Studi ini menemukan bahwa co-processing lignocellulosic biomass dengan waste plastic melalui co-pyrolysis meningkatkan bio-oil yield dari 45-50% (biomass only) menjadi 60-70% (co-pyrolysis) dengan heating value meningkat dari 18 MJ/kg menjadi 32 MJ/kg akibat synergistic effect antara cellulose depolymerization dan plastic cracking. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa catalytic upgrading menggunakan zeolite-based catalysts (HZSM-5, H-Beta) dapat mengurangi oxygen content bio-oil dari 40-45% menjadi 15-20% melalui deoxygenation reactions, meningkatkan stability dan compatibility dengan fossil fuels untuk co-firing applications. Temuan ini menegaskan pentingnya pendekatan integrated biorefinery dalam memaksimalkan valorisasi biomassa untuk aplikasi energi dan kimia berkelanjutan.

(14) **Liu et al. (2023)** melakukan penelitian berjudul "*Recent advances of research in coal and biomass co-firing for electricity and heat generation*" yang mengkaji perkembangan teknologi co-firing batubara-biomassa untuk pembangkitan listrik dan panas. Penelitian ini menyimpulkan bahwa co-firing dengan rasio biomassa 10–30% mampu mengurangi emisi CO₂ hingga 15–25% tanpa modifikasi signifikan pada sistem boiler konvensional. Namun, penggunaan biomassa mentah pada rasio di atas 30% menyebabkan peningkatan masalah operasional seperti slagging, fouling, dan korosi akibat tingginya kandungan alkali dan klorida pada biomassa. Studi ini juga menemukan bahwa perbedaan karakteristik fisikokimia antara biomassa dan batubara, terutama nilai kalor dan densitas, menjadi tantangan utama dalam mencapai pembakaran homogen dan efisien. Oleh karena itu, preparasi biomassa melalui proses konversi termal direkomendasikan untuk meningkatkan kompatibilitas dengan batubara sebelum diterapkan dalam sistem co-firing.

(15) **Rej dak et al. (2024)** meneliti pengaruh penambahan biochar terhadap kualitas bio-coke dalam penelitian berjudul "*A Study on Bio-Coke Production—The Influence of Biochar*

Addition to the Coking Blend on Bio-Coke Quality Parameters". Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan biochar hingga 10% ke dalam campuran batubara kokas meningkatkan kekuatan tekan dan stabilitas termal bio-coke, namun penambahan biochar di atas 15% justru menurunkan kekuatan mekanik dan meningkatkan porositas produk akhir. Analisis proksimat menunjukkan bahwa peningkatan fraksi biochar meningkatkan kadar abu dan volatile matter, yang berdampak negatif pada efisiensi karbonisasi dan kualitas kokas. Studi ini menyimpulkan bahwa biochar konvensional memiliki keterbatasan sebagai material blending akibat densitas rendah dan porositas tinggi, sehingga diperlukan modifikasi lanjut pada biochar untuk meningkatkan kompatibilitas dengan batubara dalam aplikasi metalurgi dan pembakaran.

(16) Yustanti et al. (2021) mengkaji "*Types and composition of biomass in biocoke synthesis with the coal blending method*" yang menganalisis pengaruh jenis dan komposisi biomassa terhadap karakteristik biokokas hasil blending dengan batubara. Penelitian ini menggunakan tiga jenis biomassa (sekam padi, serbuk gergaji, dan tempurung kelapa) dengan variasi rasio blending 10%, 20%, dan 30% terhadap batubara. Studi ini menegaskan bahwa karakteristik fisikokimia biomassa sangat menentukan performa blending, di mana biomassa dengan struktur karbon stabil dan densitas tinggi lebih kompatibel dengan batubara dalam menghasilkan bahan bakar padat berkualitas.

(17) Wang et al. (2025) meneliti "*Sustainable production of high-quality biocoke by bio-oil and 2,5-furandimethanol from biomass residues depolymerization: A novel solution toward carbon neutrality in steel industry*" yang mengkaji produksi biokokas berkualitas tinggi melalui depolimerisasi residu biomassa menggunakan bio-oil dan 2,5-furandimethanol. Studi ini menekankan pentingnya seleksi binder organik dalam meningkatkan kualitas biokokas, di mana bio-oil berfungsi tidak hanya sebagai perekat tetapi juga sebagai sumber karbon tambahan yang meningkatkan densitas energi. Temuan ini memperkuat argumen bahwa modifikasi biochar menjadi bio-coke hybrid merupakan strategi efektif dalam menghasilkan material bahan bakar padat yang kompatibel dengan batubara untuk aplikasi co-firing industri.

(18) Anand et al. (2023) dalam penelitian "*Bio-coke: A sustainable solution to Indian metallurgical coal crisis*" mengembangkan bio-coke melalui blending batubara inferior dengan biochar dari coconut shell, groundnut shell, sawdust, dan sugarcane bagasse dengan rasio optimal 70:30 dan 80:20. Studi ini menyimpulkan bahwa bio-coke merupakan alternatif berkelanjutan untuk mengatasi krisis batubara kokas di India, di mana deplesi prime coking coal memaksa industri baja untuk mengeksplorasi bahan bakar alternatif yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis. Temuan ini relevan bagi negara-negara berkembang dengan sumber biomassa melimpah namun terbatas cadangan batubara kokas berkualitas tinggi.

(19) Mousa et al. (2016) melakukan penelitian "*Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities*" yang menganalisis pemanfaatan biomassa dalam industri besi-baja dengan fokus pada aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan. Studi ini menunjukkan bahwa substitusi batubara dengan biochar/biocoke pada proses coke-making, sintering, dan blast furnace dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 40% dengan rasio substitusi optimal 20–30%. Namun, tantangan utama terletak pada penyediaan biochar dalam skala besar yang konsisten, integrasi teknologi konversi biomassa dengan proses metalurgi, serta perlunya sinergi antara sektor bioenergy dan steelmaking untuk mencapai implementasi yang ekonomis dan berkelanjutan.

(20) Zhang et al. (2024) meneliti "*Carbonization characteristics of biomass/coking coal blends for the application of bio-coke*" yang menganalisis karakteristik karbonisasi campuran biomassa-batubara kokas dengan variasi rasio biomassa 0–30 wt% pada suhu 500–800 °C. Penelitian ini menemukan bahwa CH₄ dan H₂ merupakan gas utama yang dilepaskan selama

karbonisasi, dengan nilai kalor bio-coke yang dihasilkan mencapai >7000 kcal/kg dan suhu ignition 400–600 °C yang memenuhi standar coke konvensional. Analisis BET dan SEM menunjukkan bahwa penambahan biomassa memodifikasi struktur pori dan morfologi permukaan bio-coke, yang berpengaruh terhadap reaktivitas dan kekuatan mekanik produk akhir.

Dari uraian-uraian tersebut, maka dilakukan penelitian tentang “**Kinerja Nilai Kalor Produk Biomassa Limbah Ampas Sagu Sebagai Material Co-firing Batubara**”. Penelitian ini merupakan serangkaian penelitian eksperimental di laboratorium yang melihat, menganalisis dan mengidentifikasi karakteristik campuran batubara sub-bituminus dengan tiga produk biomassa berbasis ampas sagu yaitu raw biomassa, biochar, dan biocoke hybrid. Serta evaluasi bio-coke hybrid sebagai bahan bakar substitusi batubara yang lebih kompetitif dibandingkan biomassa mentah maupun biochar.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah di atas, maka diambil rumusan masalah:

1. Bagaimana karakteristik bahan bakar padat dari produk biomassa berbasis ampas sagu: pelet ampas sagu (AS), biochar (BC) dan biocoke hybrid (BCH), terhadap parameter fisikokimia?
2. Bagaimana pengaruh blending ketiga produk biomassa (AS, BC dan BCH) dengan batubara sub-bituminus pada tujuh rasio komposisi (10:1, 9:1, 7:3, 1:1, 3:7, 1:9, 0:10) terhadap karakteristik fisikokimia bahan bakar padat?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis karakteristik bahan bakar padat dari produk biomassa berbasis ampas sagu: pelet ampas sagu (AS), biochar (BC) dan biocoke hybrid (BCH), terhadap parameter fisikokimia.
2. Menganalisis pengaruh blending ketiga produk biomassa (AS, BC dan BCH) dengan batubara sub-bituminus pada tujuh rasio komposisi (10:1, 9:1, 7:3, 1:1, 3:7, 1:9, 0:10) terhadap karakteristik fisikokimia bahan bakar padat.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian ini adalah menghasilkan suatu inovasi dalam pengembangan teknologi bahan bakar padat ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah ampas sagu menjadi biocoke hybrid berkalori tinggi sebagai material alternatif substitusi parsial batubara. Serta dapat memberikan kontribusi nyata dalam bidang pengelolaan lingkungan hidup, khususnya dalam pengurangan emisi karbon dan peningkatan efisiensi energi di sektor industri berbasis batubara, serta menjadi referensi ilmiah bagi pengembangan energi terbarukan dari limbah biomassa lokal. Selain itu, penelitian ini diharapkan mampu menambah wawasan dan pengetahuan pembaca mengenai potensi konversi limbah organik menjadi sumber energi bernilai tinggi yang berdaya guna, efektif, dan ekonomis, sekaligus mendorong penerapan konsep ekonomi sirkular dan pembangunan berkelanjutan di Indonesia.

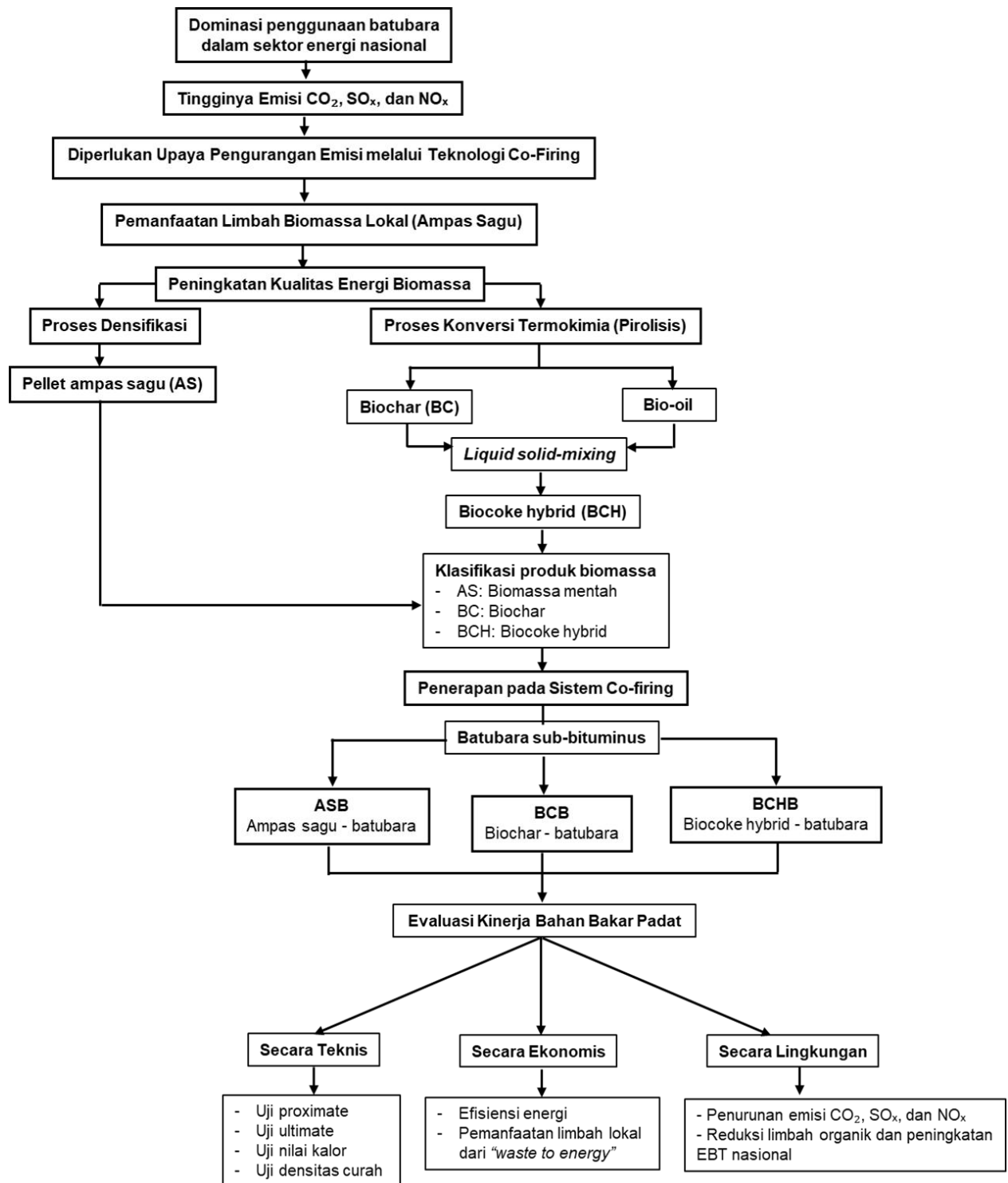
1.6 Kerangka Konseptual

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental di laboratorium dengan fokus pada upaya peningkatan kualitas energi biomassa ampas sagu melalui proses pirolisis dan hibridisasi, serta evaluasi kinerjanya saat diblending dengan batubara sub-bituminus. Tiga jenis bahan bakar padat yang menjadi variabel bebas penelitian yaitu, AS (ampas sagu):

biomassa mentah tanpa konversi termal, hanya melalui proses pengeringan, penggilingan dan pengayakan. BC (biochar) hasil pirolisis ampas sagu pada suhu ± 600 °C yang menghasilkan material dengan kandungan karbon tetap tinggi dan kadar volatil rendah. BCH (biocoke hybrid): bahan bakar padat hasil blending biochar dengan 20% bio-oil terhadap 80% massa biochar, berfungsi sebagai binder sekaligus sumber karbon tambahan untuk memperkuat struktur dan meningkatkan nilai kalor biochar.

Kerangka konseptual penelitian ini berdasarkan teori konversi termokimia biomassa lignoselulosa dan prinsip material blending untuk aplikasi co-firing. Konsep dasar yang digunakan mengacu pada teori pirolisis biomassa yang dikemukakan oleh Bridgwater, (2012), bahwa dekomposisi termal biomassa dalam atmosfer inert menghasilkan tiga fraksi produk: *solid* (biochar), *liquid* (bio-oil), dan gas, dengan distribusi produk bergantung pada suhu, *heating rate*, dan *residence time* (Bridgwater, 2012; Ungureanu et al. 2025). Penelitian ini mengadopsi konsep valorisasi bertahap biomassa melalui tiga tingkatan konversi: (1) biomassa mentah dengan karakteristik lignoselulosa utuh, (2) biochar dengan struktur karbon aromatik terkondensasi, dan (3) bio-coke hybrid dengan pengayaan karbon melalui penambahan bio-oil, yang secara teoretis meningkatkan kerapatan energi dan stabilitas termal material (Osman et al. 2023; Nadarajah et al. 2024).

Proses blending biomassa-batubara dalam penelitian ini berdasarkan pada prinsip *fuel property optimization* melalui material *mixing*, di mana pencampuran dua atau lebih komponen bahan bakar dengan karakteristik berbeda dapat menghasilkan *blend properties* yang optimal untuk aplikasi co-firing (Yustanti et al. 2021; Rejdak et al. 2024). Dalam konteks co-firing, blending bertujuan mencapai keseimbangan antara pengurangan emisi (melalui substitusi biomassa) dan pemeliharaan efisiensi termal (melalui kontribusi batubara), dengan rasio optimal bergantung pada kualitas biomassa yang digunakan (Liu et al. 2023; Zhai et al. 2025).



Gambar 1.1 Kerangka Umum Konseptual Penelitian

BAB II METODE PENELITIAN

2.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Energi dan Lingkungan Universitas Halu Oleo, Kendari, untuk proses pirolisis, pembuatan sampel produk biomassa, analisis proksimat, analisis ultimate, nilai kalor dan pengukuran kerapatan sampel. Analisis ultimat dilakukan di Laboratorium tekMIRA Balai Besar Pengujian Mineral dan Batubara, Kementerian ESDM, Bandung. Penelitian ini dilaksanakan selama empat bulan, mulai Mei hingga September 2025.

2.2. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. Eksperimen dilakukan untuk mengamati perubahan karakteristik fisikokimia tiga jenis produk biomassa berbasis ampas sagu, yaitu pelet ampas sagu (AS), biochar (BC), dan biocoke hybrid (BCH) serta karakteristik fisikokimia tiga seri bahan bakar padat hasil blending biomassa dengan batubara, yaitu ampas sagu – batubara (ASB), biochar – batubara (BCB) dan biocoke hybrid – batubara (BCHB). Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh proses konversi termokimia dan hibridisasi cair-padat, serta pengaruh blending produk biomassa dengan batubara menggunakan berbagai variasi rasio terhadap peningkatan dan perubahan uji analisis proximate, ultimate, nilai kalor dan kerapatan sampel.

2.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2.1 sebagai berikut:

Tabel 2.1 Alat yang digunakan pada penelitian

No	Alat	Fungsi
1	Alat pirolisis	Untuk mengkonversi limbah ampas sagu menjadi biokokas
2	Ayakan	Untuk menyaring sampel dengan ukuran tertentu
3	Bom kalorimeter	Untuk mengukur jumlah kalor yang dibebaskan pada pembakaran sempurna dalam oksigen berlebih suatu sampel
4	Cawan porselin	Untuk wadah sampel yang akan dianalisis
5	Cetakan	Untuk mencetak biokokas
6	Crusher	Untuk menghaluskan sampel
7	Desikator	Untuk mendinginkan sampel yang telah dipanaskan
8	Digital caliper	Untuk mengukur dimensi sampel
9	Gegep	Untuk mengangkat cawan dalam tanur dan oven
10	Karung	Untuk wadah limbah ampas sagu
11	Oven	Untuk mengeringkan sampel agar kadar airnya berkurang
12	Sarung tangan	Untuk melindungi tangan pada saat preparasi sampel
13	Tanur	Untuk menentukan <i>volatile matter</i> dan kadar abu
14	Terpal	Untuk wadah sampel pada saat proses penjemuran
15	Timbangan	Untuk menimbang massa sampel

2.2.2 Bahan Penelitian

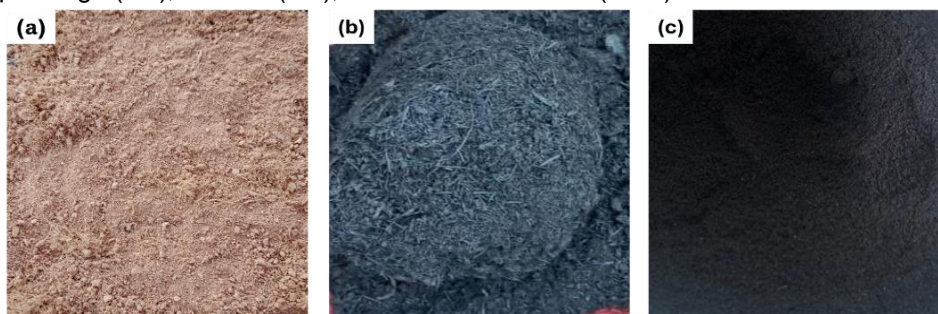
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Ampas sagu diperoleh dari limbah industri pengolahan sagu di Kel. Bao-Bao, Kec. Sampara Kab. Konawe, Prov. Sulawesi Tenggara.
2. Batubara sub-bituminus diperoleh dari Kalimantan Tengah.
3. Aseton diperoleh dari salah satu distributor bahan kimia, yaitu CV. Intraco Makassar, dalam bentuk cairan murni dengan spesifikasi *analytical grade*.
4. Air yang digunakan berasal dari PDAM.

2.2.3 Preparasi Bahan Baku

2.2.3.1 Preparasi Biomassa

Bahan baku biomassa yang digunakan dalam penelitian ini adalah ampas sagu (Gambar 2.1a), Ampas sagu dijemur selama kurang lebih 24 jam untuk mengurangi kadar airnya. Setelah kering, ampas sagu digiling menggunakan crusher dan diayak dengan ayakan 100 mesh (sekitar 0,25 mm). Ampas sagu kemudian diolah menjadi tiga jenis bahan bakar padat, yang menunjukkan peningkatan kualitas energi secara bertahap: biomassa mentah, biomassa terkarbonisasi, dan biomassa hibrida: pelet ampas sagu (AS), biochar (BC), dan biokokas hibrida (BCH).

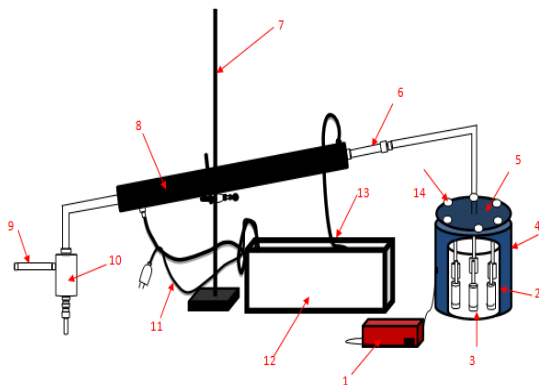


Gambar 2.1 Bahan baku penelitian (a) ampas sagu, (b) biochar, (c) biochar 100 mesh

Penelitian ini menggunakan alat pirolisis untuk mengonversi biomassa ampas sagu menjadi dua fraksi utama, yakni padatan (biochar) dan cairan (bio-oil), pada suhu ± 600 °C dalam atmosfer inert. Tahapan ini bertujuan meningkatkan kandungan karbon tetap serta menurunkan kadar volatil dan kelembapan, sehingga diperoleh bahan bakar padat dengan mutu energi lebih tinggi. Biochar hasil pirolisis selanjutnya digunakan sebagai bahan dasar pembuatan biocoke hybrid (BCH) melalui metode *liquid–solid mixing*, dengan penambahan 20% bio-oil sebagai *binder* sekaligus sumber karbon tambahan. Komposisi tersebut mengacu pada penelitian M Jahiding et al. (2025) yang menunjukkan bahwa integrasi bio-oil dalam proporsi tersebut mampu menaikkan nilai kalor hingga mendekati batubara sub-bituminus serta memperkuat struktur karbon dan homogenitas pori. Oleh karena itu, sinergi biochar dan bio-oil pada rasio tersebut dinilai paling optimal dalam menghasilkan biocoke hybrid berkualitas tinggi untuk aplikasi co-firing ramah lingkungan.

Gambar 2.2 menunjukkan sistem pirolisis yang mencakup reaktor pirolisis (ditandai nomor 4), berbentuk tabung tertutup yang berfungsi sebagai wadah utama untuk memanaskan biomassa pada temperatur 300–500°C tanpa adanya suplai oksigen, menghasilkan bio-coke, bio-oil, dan gas. Reaktor ini didukung oleh furnace atau pemanas listrik (nomor 1), yang menyediakan panas terkontrol dan dilengkapi

termokopel untuk memantau suhu secara real-time. Sistem pengatur gas inert (nomor 2 dan 3), seperti tabung nitrogen dengan katup, memastikan tidak adanya suplai oksigen dengan aliran gas yang diatur melalui pipa (nomor 5). Pipa penghubung (nomor 6 dan 8) berfungsi untuk mengumpulkan produk volatil, seperti bio-oil dan gas, yang dialirkan ke kondensor (nomor 13 dan 14). Pompa vakum (nomor 9 dan 10) digunakan untuk mengatur tekanan dalam sistem dan membantu ekstraksi gas, sementara valve kontrol (nomor 7) mengatur aliran material atau gas. Sistem ini bekerja secara terintegrasi untuk mengoptimalkan pirolisis, dengan reaktor sebagai inti proses.



Keterangan:

1. Pengatur suhu
2. Elemen panas
3. Cetakan
4. Heater
5. Penutup reaktor
6. Pipa tempat mengalirnya asap
7. Statif/penyangga
8. Pipa kondensor
9. Tempat keluarnya asap
10. Penampung air
11. Kabel penghubung
12. Tempat sirkulasi air
13. Pompa air
14. Lubang penutup heater

Gambar 2.2 Alat Pirolisis (M Jahiding, 2017)

2.2.3.2 Preparasi Batubara

Batubara yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis sub-bituminus yang berasal dari Kalimantan Tengah, Indonesia (Gambar 2.3a). Jenis batubara ini dipilih karena umum digunakan pada sektor industri, memiliki kadar air dan *volatile matter* yang relatif tinggi, serta nilai kalor yang termasuk dalam kategori menengah. Sebelum proses pencampuran dilakukan, batubara dipreparasi melalui beberapa tahapan, yaitu pencacahan untuk memperkecil ukuran partikel, pengeringan pada suhu 105°C selama 12 jam guna menurunkan kadar air, kemudian proses penggilingan menggunakan *crusher* dan penyaringan dengan ayakan berukuran 100 mesh hingga diperoleh serbuk halus yang homogen. Tahapan preparasi ini bertujuan untuk memastikan keseragaman ukuran partikel dan kestabilan sifat fisik batubara selama proses *blending* dengan produk biomassa.



Gambar 2.3 Bahan baku penelitian (a) batubara sub-bituminus, (b) cacahan batubara, dan (c) batubara 100 mesh.

2.3 Jenis dan Sumber Data

Data yang digunakan terdiri atas:

1. Data primer, yaitu hasil uji laboratorium terhadap ketiga produk biomassa (AS, BC, BCH) dan tiga seri bahan bakar padat hasil blending produk biomassa – batubara (ASB, BCB, BCHB) meliputi hasil analisis proksimat, ultimat, nilai kalor, dan kerapatan sampel.
2. Data sekunder, yaitu data pendukung yang diperoleh dari literatur ilmiah, jurnal internasional, buku referensi, serta standar pengujian (ASTM) terkait bahan bakar padat biomassa dan pirolisis.

2.4 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan melalui tiga tahapan utama:

2.4.1 Eksperimen Laboratorium

2.4.1.1 Valorisasi Biomassa

Proses ini merupakan valorisasi biomassa yang bertujuan mengubah limbah ampas sagu menjadi bahan bakar padat bernilai tinggi melalui tahapan konversi termokimia dan rekayasa material. Valorisasi dilakukan secara bertahap untuk menghasilkan tiga produk dengan karakteristik energi yang berbeda (Gambar 3.5), yaitu pelet ampas sagu (AS) sebagai biomassa mentah, biochar (BC) sebagai hasil karbonisasi, dan biocoke hybrid (BCH) sebagai hasil modifikasi lanjut melalui proses hibridisasi cair-padat. Setiap tahapan mewakili peningkatan nilai tambah biomassa, baik dari sisi kestabilan termal, kerapatan energi, maupun kandungan karbon tetap.

- Tahap 1 Denfisikasi:

Proses awal dilakukan pembuatan pelet ampas sagu (AS) dengan mencetak serbuk ampas sagu yang sebelumnya sudah dikeringkan dan di ayak menjadi pelet silindris berdiameter 2 cm dan tinggi 8 cm. Pencetakan dilakukan menggunakan alat pengepres hidrolis dengan tekanan 20 Mpa pada suhu 50°C selama 5 menit, sehingga menghasilkan pelet dengan kerapatan energi yang tinggi.

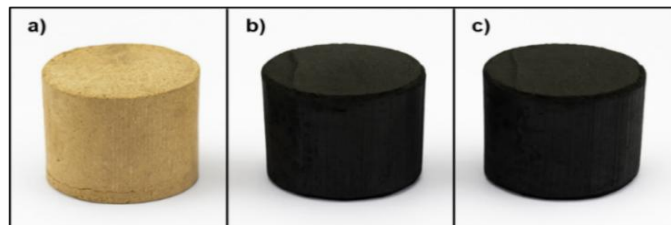
- Tahap 2 Pirolisis:

Selanjutnya untuk menghasilkan biochar (BC), ampas sagu dikonversi melalui proses pirolisis menggunakan reaktor silinder berlapis baja tahan panas berdiameter 15 cm, tinggi 45 cm, dengan kapasitas efektif 7,95 dm³. Reaktor dipanaskan secara tidak langsung menggunakan pemanas listrik, dilengkapi dengan pengendali suhu digital dan kondensor untuk mengumpulkan fraksi cair. Proses pirolisis dijalankan pada suhu ±600 °C dibawah atmosfer inert selama 2–4 jam dalam kondisi terbatas oksigen dengan laju pemanasan 10 °C/menit hingga mencapai suhu maksimum. Tahap ini memicu devolatilisasi biomassa, yaitu pemisahan komponen volatil seperti hemiselulosa, selulosa, dan sebagian lignin menjadi uap organik yang kemudian terkondensasi menjadi fraksi cair (bio-oil) dan fraksi padat (bio-char) material berkarbon tinggi dengan kadar air rendah dan porositas tinggi. Fraksi cair (bio-oil) yang diperoleh dikumpulkan melalui sistem kondensasi untuk menghindari kehilangan komponen volatil, sedangkan gas ringan seperti CO, CO₂, CH₄, dan H₂ dilepaskan ke *venting system* dengan kontrol tekanan untuk menjaga keselamatan proses. Biochar yang diperoleh kemudian didinginkan dalam kondisi inert dan disaring kembali menggunakan ayakan 100 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam dan dipadatkan

menggunakan tekanan 20 MPa pada suhu 50°C selama 5 menit sebelum dikarakterisasi.

- **Tahap 3 Hibridisasi:**

Tahap berikutnya, peningkatan kualitas bahan menjadi hybrid biocoke (BCH) dilakukan dengan memanfaatkan sebagian fraksi cair hasil pirolisis (bio-oil) sebagai binder alami sekaligus sebagai sumber karbon tambahan untuk memperkuat struktur biochar. Formulasi mengacu pada penelitian M Jahiding et al. (2025), yaitu pencampuran biochar hasil pirolisis ± 600 °C dengan 20% bio-oil melalui metode *liquid solid mixing*, campuran tersebut kemudian di homogenkan secara manual menggunakan wadah stainless steel dan spatula logam untuk mencegah kontaminasi serta memastikan homogenitas baik secara visual maupun tekstural dan dipadatkan menggunakan tekanan 20 Ma menggunakan *hydraulic press* pada suhu 50°C selama 5 menit, menghasilkan hybrid biocoke dengan kerapatan energi yang tinggi, ikatan carbon yang kuat dan stabil.



Gambar 2.4 (a) Sampel ampas sagu (AS), (b) biochar (BC), dan (c) biocoke hybrid (BCH) hasil proses pencetakan. Terlihat perbedaan warna dan tekstur pada setiap sampel yang menunjukkan tingkat konversi termal biomassa. AS berwarna cokelat terang, BC abu-abu kehitaman, dan BCH hitam pekat dengan permukaan lebih rapat.

Pemadatan pada ketiga produk biomassa dilakukan hanya pada sampel yang digunakan untuk karakterisasi awal (AS, BC, BCH) guna mengevaluasi pengaruh proses karbonisasi dan hibridisasi terhadap karakteristik fisiokimia dasar bahan bakar yang meliputi analisis proksimat (ASTM D3172-98) menentukan kadar air, zat terbang, abu, dan karbon tetap. analisis ultimat (ASTM D5373) mengetahui komposisi unsur C, H, O, N, dan S sebagai dasar evaluasi karakter kimia bahan bakar. Nilai Kalor (ASTM D5865) mengukur energi bahan bakar padat. Serta kerapatan sampel (ASTM D7481-18) menilai kepadatan energi dan kestabilan fisik bahan bakar.

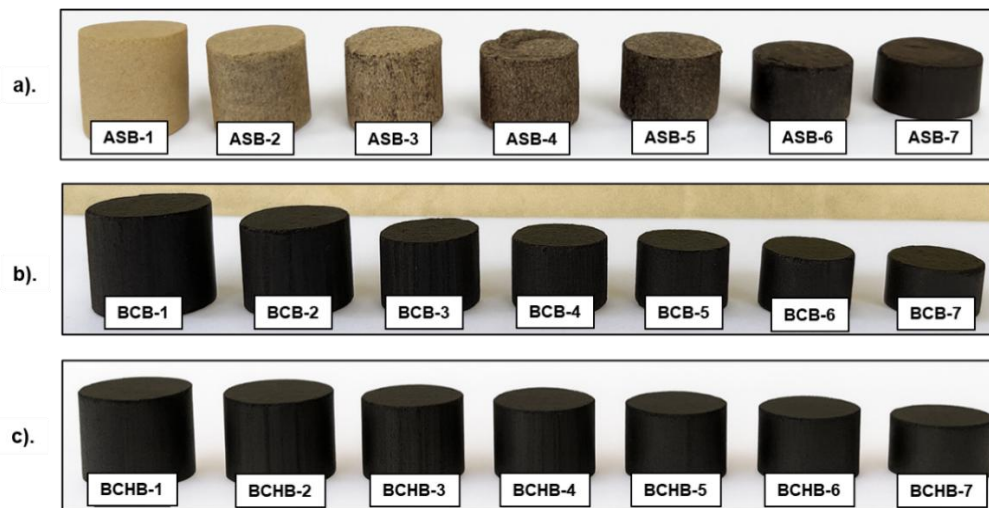
2.4.1.2 Blending Batubara

Proses ini merupakan tahap blending biomassa–batubara, penelitian ini menggunakan tujuh variasi rasio pencampuran antara produk biomassa hasil konversi yaitu pelet ampas sagu (AS), biochar (BC), dan biocoke hybrid (BCH) dengan batubara sub-bituminus. Perbandingan dilakukan berdasarkan berat kering (w/w%), dan seluruh material dipersiapkan dalam bentuk serbuk berukuran seragam 100 mesh guna menjamin homogenitas campuran selama proses blending. Variasi rasio pencampuran yang digunakan meliputi 10:1, 9:1, 7:3, 1:1, 3:7, 1:9, dan 0:10, yang merepresentasikan rentang proporsi biomassa terhadap batubara dari komposisi rendah hingga tinggi, variasi ini dirancang untuk

mengevaluasi pengaruh peningkatan fraksi biomassa terhadap karakteristik fisik, kimia, dan energi bahan bakar hasil campuran. Melalui kombinasi tersebut, dihasilkan tiga seri bahan bakar padat yang masing-masing mewakili jenis biomassa berbeda, yaitu ampas sagu–batubara (ASB), biochar–batubara (BCB), dan biocoke hybrid–batubara (BCHB) yang mempresentasikan tahapan peningkatan kualitas energi dari biomassa mentah hingga bahan berkalori tinggi (hybrid). Setiap seri *blending* diuji untuk mengidentifikasi pengaruh komposisi terhadap karakteristik energi dan fisikokimia bahan bakar padat. Penjelasan singkatan dan rancangan formulasi komposisi disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Desain eksperimen blending biomassa-batubara (ASB, BCB, BCHB)

Sampel	Rasio						
	10:0	9:1	7:3	1:1	3:7	1:9	0:10
ASB	ASB -1	ASB -2	ASB -3	ASB -4	ASB -5	ASB -6	ASB -7
BCB	BCB -1	BCB -2	BCB -3	BCB -4	BCB -5	BCB -6	BCB -7



Gambar 2.5 Karakteristik fisik sampel hasil blending biomassa–batubara: (a) Ampas sagu- batubara, (ASB-1 hingga ASB-7), (b) Biochar-batubara (BCB-1 hingga BCB-7), dan (c) Biocoke hybrid-batubara (BCHB-1 hingga BCHB-7). Variasi kode sampel menunjukkan rasio blending yang berbeda dari 100% biomassa (10:0) hingga 100% batubara (0:10).

Proses pencampuran dilakukan secara manual menggunakan wadah stainless stell dan spatula logam untuk mencegah kontaminasi serta memastikan homogenitas baik secara visual maupun tekstural. Setiap bahan di timbang dengan timbangan analitik berpresisi $\pm 0,01$ g, kemudian di aduk perlahan selama ± 10 menit hingga diperoleh campuran yang seragam. Seluruh prosedur dilakukan dalam kondisi kering pada suhu ruang 27°C untuk menghindari penyerapan kembali kelembapan. Setelah proses blending, sampel campuran biomassa-batubara, di cetak menjadi biokokas silindris menggunakan alat pengepres hidrolik dengan tekanan 20 MPa pada suhu 50°C selama 5 menit. Tahap berikutnya adalah

perlakuan panas (heat treatment) pada suhu ± 150 °C selama 1 jam untuk memperbaiki struktur karbon, menguapkan sisa zat volatil dan meningkatkan kekuatan tekan, dilanjutkan pendinginan cepat (quenching) dengan penyemprotan air selama ± 5 detik. Prosedur ini diadaptasi dari penelitian yang menunjukkan bahwa quenching dapat memperkuat struktur karbon sekaligus mengurangi kerapuhan briket bio-coke (Yustanti *et al.*, 2021). Dengan metode ini, penelitian mampu mengevaluasi secara sistematis performa coal blending ASB (Ampas sagu-batubara), BCB (Biochar-batubara) dan BCHB (Biocoke hybrid-batubara), sekaligus memberikan perbandingan empiris kontribusi masing-masing produk dalam peningkatan kualitas bahan bakar padat.

2.5 Teknik Analisis Data

Data hasil penelitian dianalisis secara deskriptif-kuantitatif untuk mengevaluasi peningkatan mutu energi biomassa akibat proses konversi termokimia, hibridisasi dan blending dengan batubara. Analisis dilakukan terhadap tiga jenis produk biomassa, yaitu pelet ampas sagu (AS), biochar (BC), biocoke hybrid (BCH) dan tiga seri bahan bakar padat hasil blending biomassa dengan batubara, yaitu ampas sagu – batubara (ASB), biochar – batubara (BCB) dan biocoke hybrid – batubara (BCHB). Tujuan utama analisis ini adalah menilai perubahan karakteristik fisikokimia yang mencerminkan kualitas energi dan potensi penerapan bahan bakar padat hasil konversi dalam sistem co-firing batubara.

Analisis fisikokimia dilakukan untuk mengevaluasi kualitas dan potensi energi dari setiap produk biomassa dan tiga seri bahan bakar hasil blending tersebut. Seluruh pengujian mengacu pada standar ASTM untuk menjamin akurasi, reproduibilitas, dan validitas hasil, sehingga data yang diperoleh dapat dijadikan dasar dalam pengembangan material energi biomassa berkelanjutan. Rangkaian analisis mencakup karakterisasi kimia (proximate, ultimate, dan nilai kalor) serta uji fisik berupa kerapatan sampel. Tujuannya adalah memperoleh pemahaman menyeluruh terhadap karakteristik energi, kestabilan termal, dan efisiensi volumetrik bahan bakar padat.

Untuk memperjelas tahapan dan parameter yang diuji, jenis analisis serta metode standar yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut.

Tabel 2.3 Jenis analisis dan standar pengujian bahan bakar padat biomassa blending batubara

Analisis	Parameter	Tujuan Pengujian	Standar ASTM
Proximate	<ul style="list-style-type: none"> - Kadar air (moisture) - Kadar abu (ash) - Zat menguap (volatile matter) - Karbon tetap (fixed carbon) 	Menentukan komposisi dasar bahan bakar padat dan kestabilan termal	ASTM D3172-98
Ultimate	<ul style="list-style-type: none"> - Carbon (C) - Hidrogen (H) - Oksigen (O) - Nitrogen (N) - Sulfur (S) 	Mengetahui komposisi unsur kimia sebagai dasar perhitungan nilai kalor dan potensi emisi	ASTM D5373

Nilai Kalor	Energi pembakaran (Cal/g)	Mengukur jumlah energi yang dilepaskan saat pembakaran	ASTM D5865
Kerapatan	Massa jenis bahan bakar padat (g/cm ³)	Menilai kerapatan energi dan stabilitas fisik bahan bakar	ASTM D7481-18

Hasil dari keempat analisis tersebut dibandingkan antar produk untuk menilai pengaruh tahapan konversi biomassa (AS → BC → BCH) dan menilai pengaruh rasio blending (10:0, 9:1, 7:3, 1:1, 3:7, 1:9, 0:10) terhadap perubahan karakteristik fisikokimia bahan bakar padat (ASB → BCB → BCHB), terutama peningkatan nilai kalor, kandungan karbon tetap, dan kestabilan termal maupun kestabilan fisik bahan bakar. Analisis ini juga digunakan untuk mengidentifikasi produk biomassa dengan performa energi paling optimal dan mengidentifikasi rasio optimum yang menghasilkan keseimbangan terbaik antara efisiensi energi dan kestabilan fisik, serta menentukan potensi substitusi biomassa terhadap batubara dalam implementasi co-firing industri.