

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Energi fosil masih menjadi salah satu sumber energi yang paling banyak digunakan di Indonesia untuk menunjang berbagai aktivitas, baik dalam sektor transportasi, industri, rumah tangga, maupun kegiatan ekonomi lainnya. Tingginya ketergantungan tersebut terlihat dari kondisi pada tahun 2023, ketika batu bara, minyak bumi, dan gas alam secara keseluruhan masih menyumbang sekitar 65% dari kebutuhan energi nasional. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses peralihan menuju sistem energi yang lebih bersih masih menghadapi berbagai tantangan, terutama karena sebagian besar kegiatan produktif di Indonesia masih menggunakan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama.

Penggunaan energi fosil dalam jumlah besar juga menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan, khususnya yang berkaitan dengan peningkatan emisi gas rumah kaca. Pada tahun 2023, Indonesia tercatat sebagai negara dengan emisi CO₂ from fuel combustion tertinggi ke-4 di kawasan Asia Pasifik. Berdasarkan data tersebut, pembakaran bahan bakar padat, terutama batu bara, menjadi penyumbang terbesar dengan persentase mencapai 53% (IEA, 2026). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa ketergantungan terhadap bahan bakar fosil tidak hanya berkaitan dengan kebutuhan energi, tetapi juga berpengaruh terhadap peningkatan emisi karbon yang dapat mempercepat pemanasan global, memengaruhi perubahan pola cuaca, serta menimbulkan berbagai permasalahan lingkungan yang berpotensi mengganggu keberlanjutan ekosistem dan kehidupan manusia.

Oleh karena itu, diperlukan upaya untuk mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil melalui diversifikasi sumber energi, salah satunya dengan memanfaatkan sumber energi terbarukan. Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi untuk dikembangkan karena dapat berasal dari berbagai sumber bahan organik yang tersedia di lingkungan. Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi alternatif tidak hanya dapat mendukung upaya peningkatan ketahanan energi nasional, tetapi juga sejalan dengan konsep pembangunan berkelanjutan (sustainable development). Pengembangan tersebut diharapkan mampu mengurangi penggunaan

bahan bakar fosil sekaligus berkontribusi dalam upaya pengendalian dampak perubahan iklim.

Biomassa memiliki karakteristik yang menjadikannya cukup fleksibel untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi karena dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk produk energi melalui jalur termokimia, biokimia, maupun kimia. Pada proses konversi secara termokimia, biomassa dapat menghasilkan beberapa jenis bahan bakar, baik dalam bentuk cair, gas, maupun padat. Produk berupa bahan bakar gas dapat menghasilkan senyawa seperti metana (CH_4) dan hidrogen (H_2), sedangkan konversi dalam bentuk padat dapat menghasilkan arang maupun briket. Sementara itu, konversi biomassa juga dapat menghasilkan bahan bakar cair dengan produk berupa aerosol (Wibowo et al., 2020). Kemampuan biomassa untuk menghasilkan beragam bentuk energi tersebut menjadikannya sebagai salah satu sumber energi alternatif yang dapat diterapkan untuk memenuhi kebutuhan energi pada berbagai tingkat penggunaan, mulai dari rumah tangga dan industri skala kecil hingga sektor industri dengan kebutuhan energi yang lebih besar.

Indonesia memiliki peluang yang besar dalam pengembangan energi berbasis biomassa karena didukung oleh kondisi geografis dan karakteristiknya sebagai negara agrikultur. Aktivitas pada sektor pertanian, perkebunan, dan kehutanan menghasilkan biomassa dalam jumlah yang melimpah. Berdasarkan estimasi yang tersedia, potensi biomassa dari berbagai sektor tersebut mencapai sekitar 146,7 ton per tahun. Besarnya jumlah tersebut menunjukkan bahwa sumber biomassa di Indonesia memiliki peluang untuk dimanfaatkan lebih lanjut sebagai sumber energi alternatif. Berbagai limbah organik berlignoselulosa, seperti tempurung kelapa, sekam padi, cangkang kelapa sawit, serbuk kayu, hingga cangkang kemiri, dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku energi apabila melalui proses pengolahan yang sesuai (Dani & Wibawa, 2018). Selain menghasilkan sumber energi alternatif, pemanfaatan limbah biomassa juga memberikan nilai tambah terhadap material yang sebelumnya kurang termanfaatkan. Upaya tersebut dapat mendukung penerapan konsep ekonomi sirkular (circular economy) melalui pengurangan jumlah limbah sekaligus meningkatkan efisiensi dalam pemanfaatan sumber daya yang tersedia (Maryana, 2025).

Salah satu jenis limbah biomassa yang berpotensi untuk dikembangkan sebagai bahan bakar padat adalah cangkang kemiri (*Aleurites moluccana*). Meskipun tanaman kemiri memiliki nilai ekonomi yang cukup tinggi, pemanfaatannya selama ini lebih

banyak berfokus pada bagian biji yang digunakan sebagai bahan baku dalam berbagai bidang, termasuk industri farmasi, kosmetik, dan cat. Sementara itu, cangkang kemiri sebagai bagian yang tersisa dari pemanfaatan biji umumnya belum memperoleh perhatian yang sebanding dan masih sering dianggap sebagai limbah tanpa nilai ekonomi yang optimal (Sabani, 2023). Padahal, karakteristik kimia cangkang kemiri menunjukkan adanya potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku energi. Cangkang kemiri diketahui memiliki kandungan holoselulosa sebesar 49,22% dan lignin sebesar 54,46%. Kandungan lignin yang relatif tinggi tersebut berperan dalam pembentukan arang dengan kandungan karbon yang tinggi, sehingga berpotensi menghasilkan bahan bakar padat dengan karakteristik nilai kalor yang baik (Wulandari, 2025). Dengan demikian, pemanfaatan cangkang kemiri tidak hanya dapat mengurangi permasalahan limbah, tetapi juga membuka peluang pemanfaatan sumber biomassa yang selama ini belum dimanfaatkan secara maksimal sebagai sumber energi.

Pemanfaatan cangkang kemiri sebagai bahan bakar padat perlu didukung dengan pengujian terhadap kualitas arang yang dihasilkan. Karakteristik utama yang dapat digunakan untuk menentukan kualitas arang meliputi kadar air, kadar abu, volatile matter, fixed carbon, dan nilai kalor. Parameter tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi kelayakan arang sebagai bahan bakar dengan mempertimbangkan ketentuan Standar Nasional Indonesia (SNI) 01-6235-2000 mengenai briket arang kayu (Malik & Mukhtar, 2023). Kandungan air dan abu yang terlalu tinggi dapat memberikan pengaruh negatif terhadap kualitas bahan bakar karena dapat mengurangi efisiensi proses pembakaran serta menurunkan energi efektif yang dihasilkan. Sebaliknya, tingginya nilai kalor dan kandungan fixed carbon menunjukkan karakteristik arang yang lebih baik dalam menghasilkan energi selama proses pembakaran (Ihsanudin, 2022). Oleh sebab itu, diperlukan pengolahan dan optimasi yang tepat untuk meningkatkan karakteristik arang cangkang kemiri sehingga kualitasnya dapat memenuhi standar yang ditetapkan dan memiliki prospek untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif.

Salah satu strategi yang dapat ditempuh untuk meningkatkan kualitas arang adalah melalui penambahan zat aditif tertentu selama proses pengolahan. Zeolit, misalnya, telah terbukti mampu menurunkan kadar air pada arang, sekaligus berperan sebagai katalis yang berfungsi meningkatkan efektivitas proses pembakaran serta memperbaiki stabilitas penyimpanan arang dalam jangka waktu yang lebih lama (Fardhyanti dkk., 2024).

Temuan ini menjadi landasan penting bagi berkembangnya berbagai penelitian lanjutan mengenai penambahan beragam jenis zat aditif pada arang, dengan tujuan untuk terus meningkatkan kualitas dan daya saing arang sebagai bahan bakar padat berbasis biomassa.

Kajian mengenai pemanfaatan cangkang kemiri sebagai bahan bakar padat telah berkembang dalam beberapa tahun terakhir dengan berbagai pendekatan pengolahan. Dewi dan Hudha (2022), misalnya, memanfaatkan teknologi *microwave* dalam proses karbonisasi cangkang kemiri dan memperoleh arang dengan nilai kalor sebesar 6875 kal/g, kadar air 4,93%, kadar abu 4,01%, *volatile matter* 9,12%, serta *fixed carbon* sebesar 72,78%. Penelitian lain dilakukan oleh Yasinta (2025) melalui pembuatan briket cangkang kemiri dengan memvariasikan komposisi dan ukuran partikel. Hasil terbaik dari penelitian tersebut menghasilkan nilai kalor sebesar 6373 kal/g dengan kadar air dan kadar abu masing-masing sebesar 2%. Sementara itu, Sadir dkk. (2025) menggunakan molase sebagai bahan perekat dalam pembuatan briket berbahan dasar arang cangkang kemiri. Hasil penelitian menunjukkan bahwa briket yang diperoleh telah memenuhi persyaratan mutu berdasarkan SNI 01-6235-2000. Berbagai hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa cangkang kemiri memiliki karakteristik yang mendukung pemanfaatannya sebagai bahan bakar padat dan masih memiliki peluang untuk dikembangkan sebagai salah satu sumber energi alternatif berbasis biomassa.

Meskipun penelitian mengenai pengolahan cangkang kemiri telah dilakukan dengan berbagai metode, kajian yang secara khusus membahas penggunaan zeolit 4A sebagai bahan tambahan pada arang cangkang kemiri masih relatif terbatas. Penelitian terdahulu umumnya diarahkan pada pengembangan arang aktif, biochar, dan briket, termasuk kajian mengenai karakteristik bahan serta pengaruhnya terhadap aspek lingkungan. Sementara itu, pemanfaatan zeolit 4A secara spesifik sebagai aditif untuk memengaruhi karakteristik energetik arang cangkang kemiri belum banyak dibahas secara mendalam. Kondisi tersebut menunjukkan adanya celah penelitian (*research gap*) yang masih dapat dikembangkan, khususnya mengenai bagaimana keberadaan zeolit 4A dapat memengaruhi karakteristik arang yang dihasilkan.

Zeolit 4A merupakan salah satu jenis zeolit sintesis yang memiliki struktur kristal *Linde Type A* (LTA). Struktur tersebut tersusun atas unit tetrahedral yang berasal dari silika (SiO_4) dan alumina (AlO_4), yang kemudian saling terhubung melalui atom oksigen

sehingga membentuk kerangka kristal tiga dimensi (Bielecki, 2023). Susunan struktur tersebut menyebabkan zeolit 4A memiliki sejumlah karakteristik yang mendukung pemanfaatannya sebagai material adsorben, salah satunya adalah kemampuan melakukan adsorpsi secara selektif yang banyak diterapkan dalam proses pengeringan dan pemisahan. Selain itu, zeolit 4A memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi yang relatif baik sehingga struktur kristalnya dapat dipertahankan pada kondisi pemanasan dan memungkinkan material tersebut diregenerasi melalui perlakuan termal (BASF, 2024; Król & Jeleń, 2021). Karakteristik tersebut memberikan dasar ilmiah untuk mengkaji penggunaan zeolit 4A sebagai bahan aditif pada arang cangkang kemiri. Interaksi antara material karbon pada arang dengan sifat fisikokimia zeolit diperkirakan dapat memberikan pengaruh terhadap karakteristik pembakaran dan sifat energetik arang yang dihasilkan.

Untuk mengetahui kesesuaian karakteristik zeolit 4A yang digunakan dengan sifat material yang diharapkan, diperlukan tahap karakterisasi sebelum digunakan dalam penelitian. Karakterisasi dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) sebagaimana digunakan dalam penelitian Hamid et al. (2023). Analisis XRD digunakan untuk mengidentifikasi pola difraksi dan puncak-puncak kristalin yang menjadi indikasi keberadaan struktur kristal zeolit. Sementara itu, analisis FTIR digunakan untuk mengamati karakteristik pita serapan serta mengidentifikasi gugus fungsi, termasuk keberadaan gugus hidroksil pada material zeolit. Hasil dari kedua metode karakterisasi tersebut dapat memberikan informasi mengenai struktur kristal dan karakteristik gugus fungsi zeolit 4A, sehingga dapat digunakan sebagai dasar untuk memahami keterkaitannya dengan perubahan sifat arang cangkang kemiri setelah penambahan zeolit.

Berdasarkan hasil kajian terhadap penelitian terdahulu, pemanfaatan cangkang kemiri sebagai bahan baku energi biomassa telah banyak dikembangkan, demikian pula penggunaan zeolit dalam berbagai aplikasi sebagai adsorben maupun material pendukung. Namun, penelitian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh penambahan zeolit 4A terhadap karakteristik energetik arang cangkang kemiri masih relatif jarang ditemukan. Oleh karena itu, kebaruan (*novelty*) penelitian ini diarahkan pada pemanfaatan zeolit 4A teraktivasi sebagai bahan aditif pada arang cangkang kemiri serta pengkajian pengaruhnya terhadap karakteristik energetik material tersebut. Pendekatan ini memiliki

perbedaan dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada penggunaan teknologi *microwave* dalam proses karbonisasi (Dewi & Hudha, 2022), pengaruh variasi komposisi dan ukuran partikel pada briket (Yasinta, 2025), maupun pemanfaatan molase sebagai bahan perekat (Sadir dkk., 2025). Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan perspektif baru dalam pengembangan bahan bakar padat berbasis cangkang kemiri melalui pemanfaatan zeolit 4A teraktivasi sebagai bahan aditif.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dan mengevaluasi secara mendalam pengaruh penambahan zeolit 4A teraktivasi terhadap karakteristik energetik arang cangkang kemiri, yang meliputi kadar air, kadar abu, *volatile matter*, *fixed carbon*, serta nilai kalor. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh informasi mengenai komposisi zeolit 4A yang paling sesuai dan optimal dalam meningkatkan mutu arang cangkang kemiri sebagai bahan bakar padat berbasis biomassa. Lebih jauh lagi, hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan energi alternatif berbasis limbah pertanian, tetapi juga dapat menjadi referensi yang bermanfaat bagi penelitian-penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pengembangan material karbon berbasis biomassa, sekaligus mendukung upaya nasional dalam mewujudkan ketahanan energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang tersebut, maka rumusan masalah yang didapatkan dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan zeolit 4A terhadap karakteristik energetik arang cangkang kemiri sebagai bahan bakar biomassa?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi zeolit 4A terhadap kadar air (*moisture content*), kadar abu (*ash content*), *volatile matter*, *fixed carbon*, serta nilai kalor arang cangkang kemiri?
3. Kombinasi komposisi manakah yang menghasilkan karakteristik energetik terbaik pada arang cangkang kemiri sebagai bahan bakar biomassa?

1.3. Tujuan

Penelitian yang dilakukan ini memiliki tujuan utama antara lain:

1. Mengetahui pengaruh penambahan zeolit 4A terhadap karakteristik energetik arang cangkang kemiri sebagai bahan bakar biomassa.

2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi zeolit 4A terhadap kadar air (*moisture content*), kadar abu (*ash content*), *volatile matter*, *fixed carbon*, serta nilai kalor arang cangkang kemiri.
3. Mengetahui kombinasi komposisi yang menghasilkan karakteristik energetik terbaik pada arang cangkang kemiri sebagai bahan bakar biomassa.

1.4. Luaran yang Diharapkan

Adapun luaran yang diharapkan dari penelitian ini, antara lain:

1. Mendapatkan informasi mengenai pengaruh penambahan zeolit 4A terhadap karakteristik energetik arang cangkang kemiri.
2. Mendapatkan komposisi zeolit 4A yang optimum dalam menghasilkan arang cangkang kemiri dengan kualitas bahan bakar biomassa yang lebih baik.
3. Mempublikasikan hasil yang didapat pada penelitian ini pada jurnal ilmiah nasional terakreditasi atau dipresentasikan dalam seminar.

1.5. Kegunaan

Hasil penelitian yang telah dilakukan, diharapkan dapat memberikan manfaat bagi semua pihak, antara lain:

1. Memberikan alternatif pemanfaatan limbah cangkang kemiri menjadi bahan bakar biomassa dengan nilai tambah.
2. Memberikan informasi mengenai penambahan zeolit 4A sebagai bahan tambahan dalam meningkatkan kualitas arang dari biomassa.
3. Mendukung upaya pemanfaatan sumber daya yang melimpah menjadi energi alternatif yang ramah lingkungan.