BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peralihan menuju sistem energi yang berkelanjutan telah menjadi agenda strategis global seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi dan menurunnya kualitas lingkungan. Sistem energi yang hingga saat ini masih didominasi oleh bahan bakar fosil menghadapi berbagai keterbatasan, baik dari aspek keberlanjutan sumber daya, keandalan pasokan, maupun dampak lingkungan yang ditimbulkan, terutama emisi gas rumah kaca. Pada saat yang sama, intensifikasi aktivitas manusia juga menyebabkan peningkatan timbulan limbah dalam jumlah besar, khususnya limbah biomassa dan limbah plastik, yang pengelolaannya masih belum optimal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa persoalan energi dan lingkungan saling berkaitan dan memerlukan pendekatan teknologi yang mampu menjawab kedua tantangan tersebut secara simultan melalui pemanfaatan sumber daya terbarukan dan limbah sebagai bahan baku energi alternatif (1).

Pertumbuhan kebutuhan energi global yang masih bergantung pada bahan bakar fosil menimbulkan berbagai risiko jangka panjang terhadap keberlanjutan pasokan energi, stabilitas ekonomi, dan peningkatan emisi karbon. Berbagai negara dan sektor industri dihadapkan pada tuntutan untuk melakukan dekarbonisasi serta meningkatkan kontribusi energi terbarukan dalam bauran energi nasional. Upaya tersebut tidak hanya didorong oleh komitmen terhadap perlindungan lingkungan, tetapi juga oleh kebutuhan untuk memperkuat ketahanan energi terhadap fluktuasi harga bahan bakar dan potensi gangguan pasokan energi primer (1).

Sejalan dengan persoalan energi tersebut, peningkatan akumulasi limbah biomassa dan plastik berkembang menjadi tantangan lingkungan yang semakin kompleks. Biomassa lignoselulosa yang berasal dari residu pertanian maupun tanaman energi tersedia dalam jumlah besar, tetapi pemanfaatannya masih relatif terbatas. Apabila tidak dikelola secara tepat, biomassa tersebut berpotensi menjadi sumber emisi akibat pembakaran terbuka atau proses dekomposisi

alami. Di sisi lain, limbah plastik, khususnya High Density Polyethylene (HDPE), merupakan salah satu jenis sampah yang memiliki tingkat konsumsi tinggi dan bersifat sukar terdegradasi secara alami. Keterbatasan sistem daur ulang menyebabkan limbah HDPE terus terakumulasi dan menjadi salah satu penyumbang utama pencemaran lingkungan dalam jangka panjang (2).

Hubungan antara ketergantungan terhadap energi fosil dan peningkatan timbulan limbah tersebut membuka peluang bagi pengembangan teknologi konversi energi berkelanjutan yang mampu mentransformasi limbah menjadi produk energi dan material bernilai tambah. Teknologi termokimia, seperti pirolisis dan ko-pirolisis, dipandang memiliki relevansi tinggi karena mampu mengolah berbagai jenis bahan baku organik tanpa memerlukan proses pemisahan yang rumit serta menghasilkan produk berupa minyak mentah, arang, dan gas yang memiliki potensi pemanfaatan lebih lanjut. Pendekatan ini sejalan dengan konsep transisi energi, ekonomi sirkular, dan upaya pengurangan emisi karbon melalui pemanfaatan kembali sumber daya yang sebelumnya dianggap sebagai limbah (3).

Pirolisis merupakan proses dekomposisi termal material organik pada kondisi minim atau tanpa oksigen sehingga menghasilkan fraksi cair, padat, dan gas. Dibandingkan dengan metode konversi lainnya, pirolisis menawarkan fleksibilitas terhadap jenis bahan baku dan memungkinkan pemanfaatan biomassa maupun limbah plastik dalam satu sistem proses. Produk cair berupa minyak mentah berpotensi digunakan sebagai bahan bakar alternatif atau bahan baku industri kimia, sedangkan arang memiliki peluang aplikasi yang luas sebagai bahan bakar padat, adsorben, amelioran tanah, material karbon, hingga bahan pengisi pada komposit polimer (3).

Salah satu biomassa yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai bahan baku pirolisis adalah rumput gajah (*Pennisetum Purpureum*). Tanaman ini dikenal memiliki laju pertumbuhan yang cepat, produktivitas biomassa tinggi, dan mampu tumbuh pada berbagai kondisi lahan, termasuk lahan marginal. Selain banyak dimanfaatkan sebagai tanaman pakan ternak,

rumput gajah juga mulai dikembangkan sebagai tanaman energi karena ketersediaannya yang melimpah dan kandungan lignoselulosanya yang tinggi (4).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa *Pennisetum Purpureum* memiliki potensi yang baik untuk dikonversi melalui proses pirolisis. Pirolisis rumput gajah mampu menghasilkan uap pirolisis yang dapat ditingkatkan mutunya melalui proses katalitik (5), sedangkan arang hasil pirolisis lambat rumput gajah memiliki struktur karbon yang berpotensi untuk berbagai aplikasi lanjutan (6). Penelitian lain juga mengungkapkan bahwa karakteristik produk pirolisis rumput gajah dipengaruhi oleh kondisi operasi dan perlakuan bahan baku (7).

Meskipun demikian, pirolisis biomassa lignoselulosa murni masih menghadapi beberapa kendala. Minyak mentah yang dihasilkan umumnya mengandung kadar oksigen dan air yang relatif tinggi sehingga memiliki nilai kalor yang lebih rendah, sifat korosif, kestabilan penyimpanan yang kurang baik, dan memerlukan peningkatan mutu sebelum dapat dimanfaatkan secara luas sebagai bahan bakar cair. Selain itu, distribusi produk pirolisis biomassa sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia bahan baku, sehingga diperlukan strategi untuk memperbaiki karakteristik produk yang dihasilkan (8).

Salah satu pendekatan yang berkembang untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah ko-pirolisis biomassa dengan limbah plastik. HDPE dipilih karena memiliki kandungan karbon dan hidrogen yang tinggi serta kandungan oksigen yang sangat rendah, sehingga berpotensi menghasilkan senyawa hidrokarbon dengan nilai kalor tinggi. Selama proses ko-pirolisis, HDPE diperkirakan berperan sebagai donor hidrogen yang dapat berinteraksi dengan senyawa hasil degradasi biomassa dan mendorong terbentuknya produk cair dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan pirolisis biomassa tunggal (9).

Fenomena sinergi pada ko-pirolisis biomassa dan plastik telah menjadi fokus berbagai penelitian dalam beberapa tahun terakhir. Interaksi antara radikal bebas hasil pemutusan rantai polimer HDPE dan senyawa volatil biomassa dapat memengaruhi distribusi produk, menurunkan pembentukan senyawa beroksigen, serta meningkatkan kandungan hidrokarbon dalam minyak mentah. Selain

memengaruhi produk cair, interaksi tersebut juga dapat mengubah struktur karbon, porositas, dan karakteristik energi arang yang dihasilkan (10).

Perhatian terhadap arang hasil ko-pirolisis juga terus meningkat karena material ini tidak hanya dimanfaatkan sebagai bahan bakar padat, tetapi juga sebagai produk bernilai tambah dengan berbagai aplikasi. Arang dapat dimanfaatkan untuk penyimpanan karbon, pengendalian pencemaran lingkungan, media adsorben, serta sebagai bahan pengisi pada komposit berbasis polimer. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa penambahan arang pada matriks HDPE mampu meningkatkan sifat mekanik, termal, dan fungsional material komposit (11). Dengan demikian, karakteristik arang yang dihasilkan dari ko-pirolisis menjadi aspek penting yang perlu dikaji secara mendalam.

Dari perspektif konsep biorefinery dan ekonomi sirkular, pemanfaatan minyak mentah dan arang secara bersamaan memberikan peluang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya dan nilai ekonomi proses. Minyak mentah dapat diarahkan sebagai sumber energi cair atau bahan baku industri kimia, sedangkan arang dapat dimanfaatkan sebagai material karbon multifungsi. Pendekatan ini memungkinkan seluruh fraksi hasil konversi termokimia dimanfaatkan secara lebih optimal dan mendukung pengembangan sistem energi rendah karbon (1).

Meskipun penelitian mengenai pirolisis biomassa, pirolisis plastik, dan ko-pirolisis keduanya telah banyak dilakukan, sebagian besar studi masih menitikberatkan pada satu produk utama, khususnya minyak mentah, sedangkan arang sering diperlakukan sebagai produk samping dengan pembahasan yang terbatas pada rendemen atau karakteristik dasar. Keterkaitan antara perubahan mutu Minyak Mentah dan sifat arang sebagai dua produk utama yang dihasilkan secara simultan dari satu sistem ko-pirolisis masih relatif sedikit dikaji secara terpadu.

Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu lebih banyak mengkaji pengaruh temperatur, jenis katalis, atau waktu tinggal terhadap distribusi produk, sementara evaluasi mengenai pengaruh variasi rasio biomassa dan HDPE terhadap karakteristik Minyak mentah dan arang secara bersamaan masih

terbatas. Hubungan antara komposisi bahan baku dengan sifat fisik, kimia, dan energi kedua produk tersebut belum banyak dijelaskan dalam satu kerangka analisis yang komprehensif. Kesenjangan penelitian ini menunjukkan perlunya studi yang mampu mengintegrasikan analisis minyak mentah dan arang sebagai luaran utama dari proses ko-pirolisis biomassa-plastik.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian mengenai "Pengaruh Variasi Rasio Rumput Gajah (*Pennisetum Purpureum*) dan Limbah Plastik HDPE terhadap Karakteristik Minyak Mentah dan Arang Hasil Ko-pirolisis" menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini difokuskan pada pengaruh variasi rasio bahan baku *Pennisetum Purpureum* dan limbah plastik HDPE terhadap karakteristik minyak mentah dan arang dalam satu sistem ko-pirolisis. Melalui penelitian ini diharapkan dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara komposisi bahan baku dengan mutu produk yang dihasilkan, sekaligus memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan teknologi konversi biomassa dan limbah plastik yang mendukung transisi energi berkelanjutan dan penerapan ekonomi sirkular. Hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah bahwa penambahan HDPE pada campuran bahan baku pirolisis dapat meningkatkan kualitas inyak mentah dan arang yang dihasilkan dibandingkan dengan pirolisis rumput gajah murni.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan paparan mengenai keterbatasan mutu minyak mentah dari pirolisis biomassa murni, potensi sinergi termokimia pada ko-pirolisis biomassa plastik, serta masih terbatasnya kajian terintegrasi yang mengaitkan rasio bahan baku dengan karakter produk, maka permasalahan penelitian dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi rasio bahan baku *Pennisetum Purpureum* dan limbah plastik HDPE terhadap sifat Minyak Mentah yang dihasilkan melalui proses ko-pirolisis?
2. Bagaimana pengaruh variasi rasio bahan baku *Pennisetum Purpureum* dan limbah plastik HDPE terhadap sifat arang yang dihasilkan melalui proses ko-pirolisis?

3. Bagaimana keterkaitan antara rasio bahan baku dengan karakteristik minyak mentah dan arang dalam satu sistem ko-pirolisis biomassa plastik?

Rumusan masalah ini menempatkan rasio bahan baku sebagai variabel kunci dan memandang minyak mentah serta arang sebagai produk yang saling terkait dalam satu sistem, bukan sebagai entitas yang berdiri sendiri.

1.3 Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi hubungan antara variasi rasio bahan baku dengan karakteristik minyak mentah dan arang sebagai produk ko-pirolisis biomassa-plastik.
2. Menganalisis sifat minyak mentah yang dihasilkan dari ko-pirolisis *Pennisetum Purpureum* dan limbah plastik HDPE pada berbagai variasi rasio bahan baku.
3. Menganalisis sifat arang yang dihasilkan dari ko-pirolisis *Pennisetum Purpureum* dan limbah plastik HDPE pada berbagai variasi rasio bahan baku.

Tujuan penelitian ini bersifat deskriptif dan analitis, sehingga tidak menimbulkan klaim berlebihan namun tetap mencerminkan kedalaman kajian ilmiah.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penelitian dan menghindari perluasan kajian di luar tujuan yang telah ditetapkan, batasan masalah dalam penelitian ini meliputi:

1. Penelitian dibatasi pada proses ko-pirolisis biomassa *Pennisetum purpureum* dan limbah plastik HDPE sebagai bahan baku utama.
2. Variabel utama yang dikaji adalah variasi rasio bahan baku biomassa-HDPE, sedangkan parameter proses lainnya dijaga tetap atau tidak menjadi fokus analisis utama.
3. Produk ko-pirolisis yang dianalisis dibatasi pada minyak mentah dan arang, sementara fraksi gas tidak dianalisis secara mendalam.

4. Karakterisasi produk difokuskan pada sifat fisik, kimia, dan energi minyak mentah serta arang sesuai dengan metode analisis yang digunakan.
5. Penelitian ini tidak mencakup tahap peningkatan mutu lanjutan (*upgrading*), seperti hidrodeoksigenasi atau reforming, serta tidak membahas analisis keekonomian dan skala industri.

Penelitian dilakukan pada skala laboratorium, sehingga hasil yang diperoleh belum merepresentasikan kondisi operasi pada skala pilot maupun industri.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi baik dari sisi keilmuan maupun penerapan praktis dalam pengembangan teknologi konversi energi berbasis biomassa dan limbah plastik. Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini meliputi:

1. Memberikan pemahaman mengenai pengaruh variasi rasio biomassa *Pennisetum Purpureum* dan limbah plastik HDPE terhadap karakteristik Minyak Mentah dan arang pada proses ko-pirolisis.
2. Menyediakan data terintegrasi minyak mentah dan arang yang masih terbatas dalam kajian ko-pirolisis biomassa-plastik, sehingga dapat menjadi rujukan bagi penelitian lanjutan.
3. Menjadi dasar teknis dan ilmiah dalam penentuan rasio biomassa-HDPE untuk menghasilkan minyak mentah dan arang dengan karakteristik tertentu.
4. Mendukung pemanfaatan limbah biomassa dan plastik secara simultan melalui pendekatan ko-pirolisis sebagai bagian dari pengembangan energi terbarukan.
5. Memberikan masukan awal bagi pengembangan dan penerapan teknologi pirolisis serta ko-pirolisis dalam kerangka ekonomi sirkular.