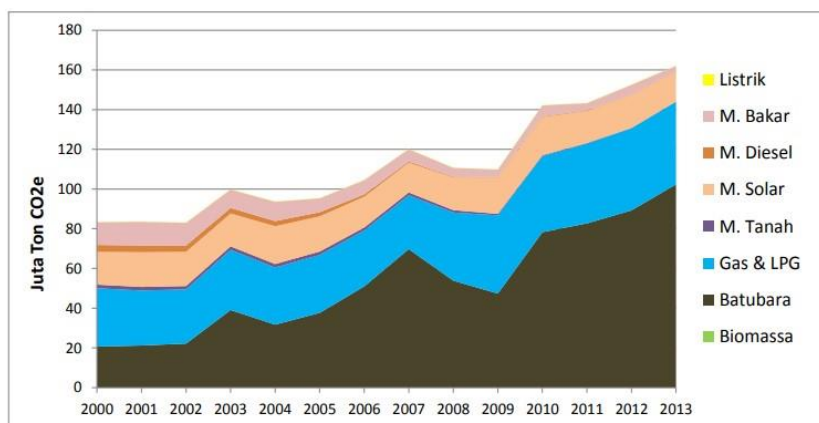


BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring meningkatnya aktivitas manusia sejak revolusi industri, emisi karbon dioksida (CO₂) antropogenik yang terutama berasal dari pembakaran bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam terus mengalami peningkatan secara signifikan. Akumulasi CO₂ di atmosfer selama lebih dari dua abad telah menyebabkan peningkatan konsentrasi gas rumah kaca yang berdampak pada terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim. Karbon dioksida (CO₂) merupakan gas rumah kaca dominan yang menyumbang sekitar setengah dari total emisi gas rumah kaca (Pakaya et al., 2024). Pemicu peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer yang paling utama adalah aktivitas manusia terutama di sektor energi. Berdasarkan Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca sektor energi tahun 2019, kategori industri produsen energi merupakan penyumbang emisi terbesar dengan proporsi sekitar 46,35%, diikuti oleh transportasi dan industri manufaktur serta konstruksi (Sunarti et al., 2019). Emisi gas rumah kaca (GRK) pada sektor industri mengalami kenaikan signifikan, dari 83 juta ton CO₂(e) pada tahun 2013 menjadi 162 juta ton CO₂(e) pada tahun 2035. Selama periode 22 tahun tersebut, rata-rata pertumbuhan emisi mencapai sekitar 5,2% per tahun. Pada tahun 2013, kontribusi emisi terbesar berasal dari penggunaan batubara dengan pangsa sekitar 62%, kemudian diikuti oleh gas dan LPG sebesar 26%, serta minyak solar sebesar 9%. Dari segi laju pertumbuhan, emisi yang bersumber dari batubara menunjukkan peningkatan paling tinggi, yakni sekitar 13% per tahun dalam periode 2000–2013. Hal ini terjadi akibat harga batubara yang relatif lebih murah dibandingkan sumber energi lainnya, sehingga banyak industri beralih ke teknologi berbasis batubara. Kondisi ini kemudian berimplikasi terhadap adanya keterkaitan masalah antara energi dan lingkungan, sehingga diperlukan usaha mitigasi emisi karbon yang sejalan dengan pengembangan sumber energi terbarukan untuk menekan laju pemanasan global. Data emisi gas rumah kaca (GRK) berdasarkan sektor penggunaan energi pada periode 2000–2013 disajikan pada Gambar 2.1. Gambar

tersebut menunjukkan bahwa sektor batubara dan gas & LPG memberikan kontribusi emisi terbesar dibandingkan sektor energi lainnya, serta terjadi kecenderungan peningkatan total emisi GRK dari tahun ke tahun.



Gambar 2.1 Emisi GRK Sektor Industri

(Sumber: Prasetyo dkk, 2022)

Salah satu upaya mitigasi yang dapat dilakukan adalah dengan menerapkan teknologi *Carbon Capture and Storage (CCS)*, yang bertujuan untuk menangkap dan menyimpan CO₂ sebelum dilepaskan ke atmosfer. Metode penangkapan CO₂ dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan, seperti absorpsi, adsorpsi, dan pemisahan membran. Di antara metode tersebut, adsorpsi menggunakan material padat menjadi salah satu metode yang menjanjikan karena memiliki keunggulan berupa konsumsi energi yang lebih rendah, proses yang lebih sederhana, serta potensi regenerasi material adsorben. Potensi biomassa di Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 146,7 juta ton per tahun (Primadanty et al., 2023). Selain dimanfaatkan sebagai sumber energi, biomassa juga dapat diolah menjadi biochar, yaitu material karbon padat hasil pirolisis biomassa. Biochar memiliki luas permukaan spesifik yang besar, struktur berpori, serta mengandung berbagai gugus fungsi permukaan yang mendukung proses adsorpsi (Wang et al., 2017). Selain itu, biochar juga memiliki keunggulan berupa biaya produksi yang rendah, ketersediaan bahan baku yang melimpah, serta sifatnya yang berkelanjutan. Salah satu sumber biomassa yang potensial adalah limbah kulit kopi, yang jumlahnya cukup besar di negara penghasil kopi seperti Indonesia. Pemanfaatan limbah ini menjadi biochar tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga memberikan nilai tambah sebagai material

fungsional.

Pada umumnya, biochar hasil proses pirolisis biomassa masih memiliki keterbatasan dalam hal luas permukaan spesifik dan keberagaman gugus fungsi permukaan. Salah satu faktor yang sangat penting untuk menilai kinerja biochar adalah keberadaan mikropori. Namun, struktur pori pada biochar tanpa aktivasi seringkali belum berkembang secara optimal. Menurut Esteves et al., (2020), biochar tanpa aktivasi memiliki luas permukaan dan porositas yang terbatas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa biochar memerlukan upaya peningkatan karakteristik agar dapat berfungsi secara optimal sebagai adsorben.

Metode peningkatan karakteristik biochar pada umumnya dilakukan melalui proses aktivasi. Proses aktivasi dapat dilakukan melalui proses kimia dan fisika. Aktivasi secara kimia diketahui mampu meningkatkan luas permukaan dan porositas biochar. Namun, menurut Sakhiya et al., (2020) pengontrolan yang sangat cermat dan hati-hati diperlukan untuk menghindari kerusakan dan keruntuhan struktur biochar dikarenakan aktivitas agen aktivasi yang tinggi. Aktivasi secara kimia juga berpotensi melibatkan bahan-bahan korosif dan menimbulkan limbah sekunder yang kurang ramah lingkungan. Oleh sebab itu, muncul alternatif metode modifikasi lain yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu metode yang cenderung baru dan berpotensi digunakan untuk aktivasi biochar adalah *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP). Perlakuan plasma dapat meningkatkan jumlah gugus fungsi aktif serta memperbaiki sifat permukaan sehingga meningkatkan interaksi dengan molekul CO₂. Plasma dikenal sebagai bentuk materi keempat setelah padat, cair, dan gas. Berdasarkan karakteristik suhunya, plasma dibedakan menjadi *superheated plasma* yang memiliki temperatur sangat tinggi hingga jutaan derajat celsius, serta *low temperature plasma* yang beroperasi pada kondisi suhu yang relatif rendah. Jenis plasma bersuhu rendah ini, yang sering disebut sebagai *Cold Plasma* (CP), banyak dimanfaatkan dalam proses rekayasa permukaan material karena kemampuannya dalam memodifikasi sifat permukaan tanpa merusak struktur dasar material, termasuk pada biochar.

Dalam perkembangannya, berbagai metode *Cold Plasma* telah diterapkan dalam bidang ilmu material, seperti *Dielectric Barrier Discharge* (DBD), *Plasma Jet*,

dan *Glow Discharge*. Salah satu teknologi yang cukup menonjol adalah *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP), yang bekerja pada kondisi tekanan rendah dengan memanfaatkan gas di sekitarnya sebagai media. Pada proses ini, gas seperti oksigen atau argon akan mengalami ionisasi akibat adanya energi listrik, sehingga terbentuk plasma dingin yang mengandung berbagai partikel aktif seperti elektron berenergi tinggi, ion, radiasi ultraviolet (UV), radikal bebas, serta spesies reaktif seperti *Reactive Oxygen and Nitrogen Species* (RONS). Hal ini sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Wijaya, et al., (2025) dengan judul *Remediation of Boron-Contaminated Soil Using Biochar from Cocoa Pod Husk Waste Modification by Low-Pressure Cold Plasma* menunjukkan hasil setelah perlakuan *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP), morfologi permukaan biochar menjadi jauh lebih kasar dengan banyak terbentuk retakan mikro dan strukturnya yang menjadi lebih berpori.

Selain itu, penambahan senyawa berbasis amina seperti *polyethyleneimine* (PEI) juga diketahui efektif dalam meningkatkan kapasitas adsorpsi CO₂. PEI merupakan senyawa polimer sintesis memiliki gugus amina yang mampu berinteraksi secara kimia dengan CO₂ melalui pembentukan karbamat atau bikarbonat, sehingga meningkatkan efisiensi penangkapan CO₂ dibandingkan adsorpsi fisik semata. Hal ini didukung dengan penelitian berjudul *Polyethyleneimine modified porous wood ceramics for efficient and high-capacity adsorption of CO₂ in flue gas and air*, dimana hasil percobaan menunjukkan bahwa material keramik kayu yang dimodifikasi dengan *polyethyleneimine* memiliki kapasitas adsorpsi 2,2 kali lebih tinggi dibandingkan dengan keramik kayu tanpa modifikasi dengan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar 3,06 mmol/g dalam N₂ dengan 15% volume CO₂ (Guo et al., 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *polyethyleneimine* (PEI) dan modifikasi *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) terhadap kapasitas adsorpsi dan desorpsi CO₂ pada biochar berbahan kulit kopi. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menentukan model isoterm adsorpsi yang paling sesuai dalam menggambarkan mekanisme serta laju adsorpsi CO₂ pada biochar termodifikasi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan

kontribusi dalam pengembangan adsorben yang efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan untuk penyerapan CO₂.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang tersebut, berikut merupakan rumusan masalah dalam penelitian ini:

1. Bagaimana pengaruh penambahan *polyethyleneimine* (PEI) terhadap kapasitas adsorpsi dan desorpsi CO₂ pada biochar?
2. Bagaimana pengaruh modifikasi *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) terhadap kinerja adsorpsi dan desorpsi CO₂ pada biochar?
3. Apa model isoterm adsorpsi yang paling sesuai untuk menggambarkan mekanisme adsorpsi CO₂ pada biochar yang dimodifikasi dengan *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) dan *Polyethyleneimine* (PEI)?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dipaparkan, penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan *polyethyleneimine* (PEI) terhadap kapasitas adsorpsi dan desorpsi CO₂.
2. Mengevaluasi pengaruh modifikasi *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) pada variasi daya terhadap kinerja adsorpsi dan desorpsi CO₂ pada biochar.
3. Menentukan model isoterm adsorpsi yang paling sesuai untuk menggambarkan mekanisme adsorpsi CO₂ pada biochar yang dimodifikasi dengan *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) dan *polyethyleneimine* (PEI).

1.4 Manfaat

Berkiblat pada latar belakang yang telah disampaikan, penelitian ini memiliki manfaat sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh modifikasi *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) dan penambahan *polyethyleneimine* (PEI) terhadap peningkatan kinerja adsorpsi dan desorpsi CO₂ pada biochar.

2. Memberikan informasi ilmiah mengenai karakteristik isoterm dan kinetika adsorpsi CO₂ pada biochar termodifikasi LPCP dan PEI sebagai dasar pengembangan adsorben berbasis biochar.
3. Menjadi referensi dalam pengembangan penelitian selanjutnya terkait teknologi adsorpsi CO₂ dan modifikasi material berbasis biomassa.

1.5 Batasan Masalah

Berikut merupakan batasan-batasan masalah dari penelitian agar studi ini memiliki fokus yang jelas.

1. Bahan baku yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan limbah kulit kopi yang berasal dari kota Banyuwangi.
2. Penambahan bahan kimia dibatasi pada penggunaan *polyethyleneimine* (PEI) tanpa membandingkan dengan jenis amina lainnya.
3. Modifikasi biochar hanya dilakukan dengan dua metode, yaitu *Low Pressure Cold Plasma* (LPCP) dan *polyethyleneimine* (PEI).
4. Gas yang digunakan dalam proses adsorpsi dan desorpsi hanya terbatas pada CO₂.
5. Model isoterm adsorpsi yang diuji terbatas pada model Langmuir, Freundlich, dan Temkin.
6. Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dan tidak mencakup skala industri.