

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Populasi manusia yang terus meningkat setiap waktu memengaruhi peningkatan konsumsi energi (Larki dkk., 2023). Secara global, sebanyak 80% konsumsi energi berasal dari bahan bakar fosil dan biomass, selain energi baru terbarukan (Cao dkk., 2020). Salah satu sumber energi primer adalah Batubara. Batubara mengandung unsur seperti Carbon (C), hidrogen (H), sulfur (S), dan nitrogen (N). Selama proses pembakaran, unsur ini bereaksi dengan oksigen membentuk polutan berupa Sulfur Oksida (SO_x), Nitrogen Oksida (NO_x) dan Karbon Oksida (CO_x) (Larki dkk., 2023). Emisi SO_x , CO_x dan NO_x menyebabkan masalah serius bagi lingkungan dan berdampak pada kesehatan. Emisi ini menghasilkan polutan yang menciptakan efek rumah kaca sehingga terjadi pemanasan global dan perubahan iklim (Lisi dkk., 2023). Polutan yang terhirup juga menyebabkan penyakit pada sistem pernapasan dan kardiovaskular (Larki dkk., 2023). Kondisi ini mendorong pemerintah berbagai negara untuk memberlakukan standar emisi guna mengendalikan polutan (Tekir dkk., 2025).

Upaya pengendalian emisi NO_x , SO_x dan CO_x bergantung pada mekanisme kimia melalui jalur oksidasi dan reduksi. Berbagai metode konvensional telah diimplementasikan untuk mengurangi polutan seperti *Selective Catalytic Reduction* (SCR), *Flue Gas Desulfurization* (FGD) dan penangkapan karbon (Cui dkk., 2019; Córdoba dkk., 2015). Meskipun tingkat efisiensi metode konvensional untuk menghilangkan polutan dapat diterima, metode konvensional tetap memiliki kekurangan. Kekurangan tersebut meliputi kompleksitas tinggi, stabilitas rendah, masalah penyimpanan, menenajemen kebocoran dan pengisian ulang infrastruktur jaringan. Selain itu biaya konstruksi dan operasional yang sangat mahal menjadi hambatan sehingga penelitian teknologi alternatif yang lebih baik menjadi kebutuhan (Y. Wang dkk., 2022).

Teknologi alternatif yang sedang giat dikembangkan untuk mereduksi polutan adalah dengan memanfaatkan teknologi plasma. Secara fisis, plasma merupakan fase keempat dari materi gas yang terdiri dari elektron, ion, atom dan

molekul dalam keadaan dasar, metastabil dan tereksitasi (D. Li dkk., 2025). (Nur, 2011). Plasma diklasifikasikan menjadi dua jenis berdasarkan temperatur yaitu plasma termal dan plasma *non-termal* (NTP). Secara fisis NTP memiliki keunikan yaitu temperatur elektron sebesar 10^4 – 10^5 K dan sedangkan temperatur gas yaitu 300–1000 K (S. Li dkk., 2020; Okubo, 2022). Secara kimia, lingkungan NTP sangat reaktif karena tanpa memanaskan seluruh volume gas, NTP mampu menghasilkan spesies reaktif pada suhu ruang dan tekanan atmosfer. Karakteristik ini menyebabkan NTP dianggap menjanjikan untuk aplikasi lingkungan terutama pengendalian polutan gas seperti NO_x , SO_x , dan CO_x (Pedrosa dkk., 2025).

Penelitian terdahulu telah menguji pemanfaatan teknologi NTP pada skala pilot hingga industri untuk mencapai efisiensi penghilangan polutoan. Contoh penerapan NTP adalah korona yang telah diuji secara ekstensif untuk mereduksi polutan gas. Penelitian Han dkk pada tahun 2013 yang berhasil menyisihkan emisi SO_x dan NO_x hingga 80% menggunakan reaktor berkelanjutan berkonfigurasi elektroda tipis dengan lapisan hidrofilik (Han dkk., 2013). Penelitian lainnya oleh Du dkk pada tahun 2019 melaporkan bahwa penggunaan *Pulsed Corona Discharge* dengan geometri elektroda pelat-kawat mampu mencapai efisiensi penyisihan senyawa organik volatil (VOC) hingga 97% dengan efisiensi energi sebesar 0,91 g/kWh (Du dkk., 2019). Meskipun efektivitas pengurangan sangat tinggi, metode plasma korona masih menghadapi kendala teknis yang fundamental dalam implementasi industri. Keterbatasan utama sistem korona meliputi konsumsi daya listrik yang sangat tinggi, kapasitas pemrosesan volume gas yang relatif rendah serta risiko pembentukan produk sampingan berbahaya yang muncul selama proses dekomposisi molekuler berlangsung (Du dkk., 2019).

Teknologi NTP lainnya adalah *Dielectric Barrier Discharge* (DBD) yang memanfaatkan penghalang dielektrik untuk membatasi arus listrik serta mencegah transisi lucutan menuju fase *arc* yang merusak. Dibandingkan dengan metode korona yang memerlukan catu daya pulsa nanodetik yang kompleks untuk menghindari percikan, keunggulan sistem DBD berupa plasma yang stabil dan konfigurasi geometris yang sederhana sehingga mudah dikembangkan pada skala industri (Misra dkk., 2016). Penelitian terdahulu mengintegrasikan reaktor DBD

dengan katalis logam seperti MnCe/Ti, HZSM-5 dan perovskit untuk mencapai efisiensi penyisihan polutan hingga 100% (Cai dkk., 2018; Sharif dkk., 2019). Implementasi tersebut masih memerlukan konsumsi daya yang besar dan biaya operasional katalis yang mahal. Penelitian yang menyinergikan pengukuran konsentrasi makroskopis secara *real-time* dengan analisis diagnostik spektroskopi mikro secara simultan pada sistem reaktor DBD murni masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dikembangkan untuk mengeksplorasi mekanisme transisi energi dari jalur eksitasi radiatif menuju jalur disosiasi non-radiatif guna mengoptimalkan reduksi emisi batubara secara lebih efisien (Kogelschatz, 2003).

Meskipun pemanfaatan reaktor DBD dengan katalis telah menunjukkan efisiensi pereduksian yang menjanjikan, namun eksplorasi mekanistik pada sistem non-katalitik dengan parameter *Optical Emission Spectroscopy* (OES) dan ECOM D secara simultan masih sangat terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menguantifikasi tingkat pereduksian polutan gas batubara NO_x, SO_x dan CO_x secara *real-time*, mengidentifikasi spesies kimia transisional yang terbentuk di zona plasma, serta memetakan migrasi rute reaksi dari jalur eksitasi radiatif menuju jalur disosiasi non-radiatif.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian “Pemanfaatan Plasma DBD untuk Mereduksi Limbah NO_x, SO_x dan CO_x pada Cerobong Pembuangan Pembakaran Batubara” ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan nilai efisiensi pereduksian emisi gas buang batubara yaitu SO_x, CO_x dan NO_x secara *real-time*.
2. Menganalisis karakteristik kelistrikan reaktor dan korelasi *Specific Energy Input* (SEI) terhadap performa reduksi molekul.
3. Mendiagnosis mekanisme kinetika plasmakimia berdasarkan transisi elektronik spesies aktif dan produk antara

1.3 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk mengurangi limbah gas yang terbentuk saat terjadi proses pembakaran sehingga lingkungan tinggal lebih bebas dari zat yang bersifat racun melalui metode yang lebih efisien.