

ANALISIS KAJIAN PROSES PENGHANCURAN POLUTAN OKSIDA TOKSIK NO_x MELALUI REKAYASA TEKNOLOGI PLASMA SEBAGAI GREEN TECHNOLOGY

Nanang Arif Guntoro*

Universitas Negeri Jakarta, Fakultas Teknik, Jl. Rawamangun Muka Raya, Jakarta, 13220

* Email: nanangarifguntoro@yahoo.co.id

Abstrak

Penelitian ini sangat urgen dilakukan di kota-kota besar di Indonesia, khususnya Jakarta, sebagai salah satu kota besar terpolusi di dunia. Emisi gas buang sarana transportasi menghasilkan polutan oksida toksik seperti NO_x yang mengancam kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan. Penelitian ini dimaksudkan untuk menganalisis kajian proses penghancuran NO_x melalui rekayasa teknologi plasma sebagai *green technology*. Penelitian dilakukan di Laboratorium Fisika Terapan, Jurusan Teknik Elektro, FT, UNJ. Gas yang ditinjau adalah aliran udara terdiri dari 80% N₂ dan 20% O₂ dengan kandungan 400ppm NO_x pada tekanan atmosfer dan temperatur ruang. Model memperhitungkan reaksi-reaksi kimia terpilih yang dominan dalam penghancuran NO_x. Metode M.U.S.C.L digunakan untuk menyelesaikan persamaan dinamika gas netral reaktif terhadap fluks transport difusif dengan kriteria kestabilan numerik CFL. Hasil penelitian yang diperoleh adalah: (1) radikal-radikal N, O, dan O₃ tercipta melalui disosiasi molekul mayoritas gas sebagai hasil dampak ionik dan elektronik; (2) mekanisme penghancuran NO_x berlangsung dalam waktu beberapa milisekon di mana penghancuran NO_x akibat reaksi dengan radikal-radikal aktif untuk membentuk asam H₂SO₄ dan HNO₃; dan (3) fenomena difusi berpengaruh signifikan terhadap kinetika kimia dalam mereduksi NO_x pada kanal *discharge*. Pemahaman terhadap hasil penelitian memungkinkan dilakukannya optimasi reduksi NO_x dalam upaya merancang desain penghancuran polutan NO_x guna mewujudkan transportasi bebas polusi.

Kata kunci: pollution control, reduction process, plasma technology

I. PENDAHULUAN

Tingkat polusi di kota Jakarta dan sekitarnya sudah sangat tinggi dan jauh berada di atas ambang batas. Lebih sepuluh juta kendaraan bermotor bersama-sama mengeluarkan asap pembuangan setiap harinya dan minimnya ruang terbuka hijau, menyebabkan warga kota terpaksa menghirup gas polutan seperti oksida nitrogen (NO_x), oksida karbon (CO_x), oksida sulfur (SO_x), hidro karbon (HC), timah hitam (Pb), dan partikulat (PM) atau debu. Berdasarkan hasil kajian akademis sektor transportasi merupakan penyumbang emisi gas polutan terbesar yang mencapai sekitar 92%, industri sebesar 5%, pemukiman 2%, dan sampah 1%. Keadaan ini diperparah dengan tidak seimbangnya pertumbuhan jumlah moda transportasi dan luas jalan yang dilalui kendaraan. Prediksi perbandingan jumlah kendaraan bermotor dan luas jalan sampai tahun 2016, jika pertumbuhan kendaraan bermotor tetap 9% per tahun dan pertumbuhan luas jalan tetap 0,01% per tahun [1] seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Kondisi real tersebut mengakibatkan kemacetan di jalan-jalan semakin meningkat dari tahun ke tahun sehingga menyebabkan polusi udara semakin parah, terlebih emisi polutan gas buang sarana transportasi pada saat macet bertambah 12 kalinya dibandingkan saat kendaraan berjalan normal. Berbagai cara telah dilakukan untuk mereduksi emisi gas polutan di antaranya melalui penghijauan kota. Strategi ini belum solutif sebab tidak imbangnya kuantitas emisi polutan yang dikeluarkan dengan proses fotosintesis pohon yang ditanam di tengah kota. Dibutuhkan teknologi yang mampu mengurangi emisi gas polutan transportasi jalan untuk mengendalikan dampak lingkungan. Rekayasa teknologi plasma sebagai *green technology* merupakan salah satu upaya inovatif yang mampu mengoptimalkan reduksi emisi gas polutan NO_x [2] untuk mewujudkan transportasi bebas polusi. Penelitian ini dimaksudkan untuk menganalisis kajian proses penghancuran NO_x melalui rekayasa teknologi plasma.

Tabel 1: Prediksi perbandingan jumlah kendaraan dan luas jalan provinsi DKI Jakarta

Tahun	Jumlah kendaraan terdaftar (STNK)	Jumlah kendaraan di jalan (asumsi 70%)	Luas kendaraan di jalan (m ²)	Luas jalan(m ²)
2007	5.798.002	4.058.601	27.334.680	40.077.740
2008	6.325.620	4.427.934	29.822.136	40.081.748

Tahun	Jumlah kendaraan terdaftar (STNK)	Jumlah kendaraan di jalan (asumsi 70%)	Luas kendaraan di jalan (m ²)	Luas jalan(m ²)
2009	6.901.252	4.830.876	32.535.951	40.085.756
2010	7.529.266	5.270.100	35.496.722	40.089.765
2011	8.214.429	5.750.100	38.726.924	40.093.774
2012	8.961.942	6.273.359	42.251.074	40.097.783
2013	9.777.478	6.844.235	46.095.922	40.101.793
2014	10.667.229	7.467.060	50.290.651	40.105.803
2015	11.627.279	8.090.885	54.485.386	40.109.832
2016	12.673.734	8.712.700	58.680.112	40.113.911

Sumber: Kementerian Perhubungan, 2013

II. METODE PENELITIAN

Model diasumsikan gas netral pada temperatur dan tekanan tetap serta tidak ada pergerakan konvektif gas. Model ini mendeskripsikan evolusi campuran gas netral reaktif melalui persamaan konservasi massa dari setiap kerapatan unsur-unsur kimia:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (n_i V_i) = S_i \quad , \quad i \in (n_p-1) \quad (1)$$

di mana, n_i adalah kerapatan unsur i dan n_p jumlah unsur kimia yang menyusun campuran gas. r adalah arah tegak lurus sumbu streamer. Kerapatan total n diberikan oleh persamaan gas ideal:

$$P = nkT \quad (2)$$

P adalah tekanan (pascal), k konstanta Boltzmann dan T temperatur mutlak (°K). $n_i V_i$ pada persamaan (1) adalah fluks difusi massa unsur i dalam campuran gas. V_i adalah kecepatan difusi unsur i , dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$n_i V_i = D_i \frac{\partial n_i}{\partial r} \quad (3)$$

D_i adalah koefisien difusi unsur i dalam campuran gas. Pada model ini, D_i diformulasikan oleh hukum Blanc:

$$D_i = \left[\sum_{j \neq i} \left(\frac{n_j/n}{D_{ij}} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

D_{ij} adalah koefisien difusi unsur kimia i dan j yang bersesuaian dalam campuran biner. D_{ij} dapat dihitung dengan persamaan klasik teori kinetik gas [3], dengan asumsi bahwa potensial interaksi antara dua partikel yang bertumbukan merupakan tipe Lennard-Jones 6-12. Dalam hal ini, D_{ij} diberikan oleh hubungan:

$$D_{ij} = 0,0026280 \frac{\sqrt{T^3 (M_i + M_j) / 2 M_i M_j}}{P \sigma_{ij}^2 \Omega_{ij} (KT / \epsilon_{ij})} \quad (5)$$

Ω_{ij} adalah integral tumbukan (tanpa dimensi), sebagai

fungsi temperatur rendah kT/ϵ_{ij} . M_i dan M_j massa molekuler (gmol^{-1}) dan P merupakan tekanan gas total yang dinyatakan dalam atmofir. σ_{ij} adalah diameter tumbukan, sedangkan ϵ_{ij} energi maksimum. Diameter tumbukan σ_{ij} dihitung dengan pendekatan rata-rata aritmatika dari nilai σ untuk masing-masing unsur dalam campuran gas di mana $\sigma_{ij} = (\sigma_i + \sigma_j)/2$, dan ϵ_{ij} adalah pendekatan rata-rata geometri dari energi ϵ untuk setiap unsur di mana $\epsilon_{ij} = \sqrt{\epsilon_i \epsilon_j}$. Notasi S_i pada persamaan (1) bersesuaian dengan pembentukan maupun penghancuran unsur i melalui reaksi-reaksi kimia dalam campuran gas.

Analisis simetri rotasional di sekitar sumbu discharge dilakukan dengan cara mengintegrasikan persamaan transport (1) kedalam geometri silindris satu-dimensi pada arah radial r . Fluks difusi dikoreksi dengan metode MUSCL [4] untuk membatasi difusi numerik. Metode ini memberikan determinasi evolusi selang waktu setiap unsur kimia. Kinetik kimia memengaruhi efek difusi terhadap gradien konsentrasi dalam selang waktu yang sangat singkat. Evolusi selang waktu ini dihitung sehingga variasi maksimum berbagai unsur kurang dari 2% dengan memperhitungkan efek difusi maupun kinetika kimia. Selang ini dapat dihitung kembali, dan jika tidak memenuhi syarat dilakukan verifikasi lagi dengan kriteria numerik klasik CFL.

Penelitian dilakukan di Lab Fisika Terapan, Jurusan Teknik Elektro, FT, UNJ. Gas yang ditinjau adalah aliran udara terdiri dari 80% N_2 dan 20% O_2 dengan kandungan 400ppm NO_x pada tekanan atmosfer dan temperatur ruang. Karakteristik discharge berbentuk geometri silinder kawat dengan jarak antar elektroda 11mm, durasi pulsa 10ns, dan potensial maksimum $V_{max} = 10\text{kV}$. Model memperhitungkan 8 unsur kimia netral (atom N dan O, serta molekul-molekul N_2 , O_2 , NO, O_3 , NO_2 , dan NO_3) melibatkan 57 reaksi yang dominan dalam reduksi NO_x . Tabel 2 menunjukkan

nilai-nilai parameter potensial Lennard-Jones yang digunakan untuk menghitung koefisien difusi biner.

Tabel 2: Nilai-nilai parameter potensial Lennard-Jones yang diperlukan untuk menghitung koefisien difusi biner

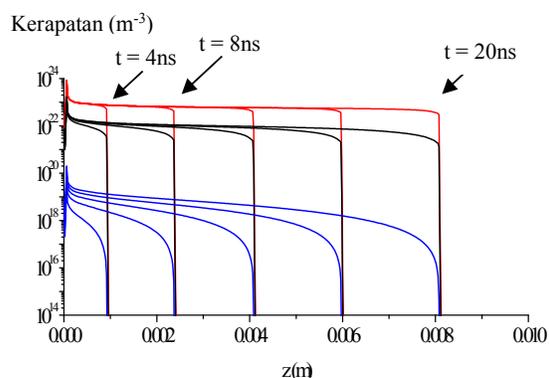
	σ (Å)	ϵ/k (°K)	Referensi
N ₂	3.681	91.5	[3]
O ₂	3.433	113.0	[3]
NO	3.470	119.0	[3]
N	3.298	71.4	[5]
O	3.050	106.7	[5]
O ₃	3.875	208.4	[6]
NO ₂	3.765	210.0	[5]
NO ₃	3.770	395.0	[6]

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menganalisis proses reduksi oksida toksik NOx pada fenomena difusi melalui rekayasa teknologi plasma, akan ditunjukkan terlebih dahulu bagaimana terciptanya radikal-radikal primer dan sekunder serta mekanisme penghancuran NOx oleh berbagai radikal tersebut.

1. Analisis Proses Pembentukan Radikal

Penelitian dilakukan dengan memberikan potensial sebesar 10kV selama 20ns. Gambar 1 menunjukkan penyebaran kerapatan radikal primer N dan O serta radikal sekunder O₃ pada selang waktu discharge dari t = 4ns sampai t = 20ns, karakteristik discharge anoda pada jarak z=0 dan katoda pada z = 0,01m.



Gambar 1: Sebaran kerapatan radikal primer N (—); O (—); dan sekunder O₃ (—) dari selang waktu t = 4ns sampai t = 20ns

Kerapatan radikal N dan O masing-masing sekitar 10²⁴ m⁻³ dan 10²³ m⁻³ relatif lebih tinggi dibandingkan dengan radikal O₃ yang mencapai 10²⁰ m⁻³, sehingga radikal-radikal primer N dan O berperan penting dalam mereduksi NOx. Nampak pada gambar bahwa

kuantitas kerapatan berbagai radikal ini cukup konstan menuju katoda sampai selang waktu 20 ns. Hal ini dapat menjamin kestabilan pasokan radikal dalam proses penghancuran NOx. Berbagai reaksi kimia yang bertanggungjawab dalam proses terbentuknya radikal-radikal N, O, dan O₃ selama fase discharge dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

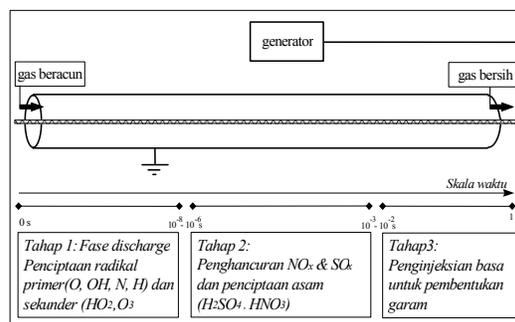
Tabel 3: Reaksi-reaksi kimia yang bertanggungjawab pada evolusi kerapatan radikal primer dan sekunder

Kinetika kimia radikal primer dan sekunder		
	muka ionisasi	kanal ionisasi
N	e+N ₂ → e+N+N	
O	e+O ₂ → O+O+e e+O ₂ → O+ O(¹ D)+e	
O ₃		O+O ₂ +N ₂ → O ₃ +N ₂ O+2O ₂ → O ₃ +O ₂

Radikal primer N diciptakan pada muka ionisasi terutama oleh disosiasi molekul N₂ sebagai hasil dampak elektronik melalui reaksi kimia N₂+e → 2N+e. Radikal primer O tercipta oleh reaksi e+O₂ → O+O+e dan e+O₂ → O+O(¹D)+e melalui dampak elektronik. Radikal sekunder O₃ sebagian besar terbentuk pada kanal ionisasi melalui interaksi antara atom O dan molekul O₂ melalui reaksi kimia O+O₂+M → O₃+M dengan M adalah molekul-molekul gas N₂ atau O₂. Proses berlangsungnya kinetika kimia selama fase discharge menjelaskan terciptanya berbagai radikal primer dan sekunder. Informasi ini sangat penting untuk mengoptimalkan proses reduksi NOx sebab efisiensi penghancurannya sangat tergantung pada banyaknya radikal yang tercipta.

2. Mekanisme Penghancuran NOx

Mekanisme penghancuran oksida nitrogen NOx oleh radikal-radikal primer dan sekunder seperti nampak pada Gambar 2 berikut.



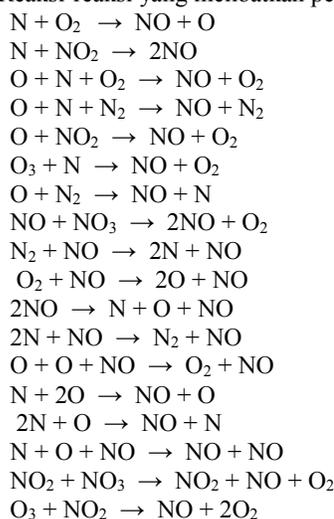
Gambar 2: Mekanisme penghancuran oksida nitrogen NOx oleh radikal-radikal primer dan sekunder

Mekanisme penghancuran NOx pada reaktor plasma melalui tiga tahapan utama yaitu fase discharge, fase setelah discharge (post-discharge phase), dan fase

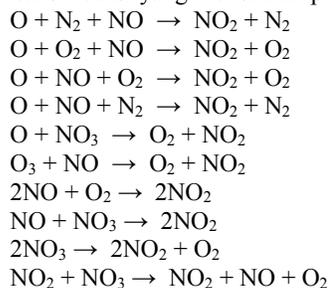
penginjeksian basa. Komposisi gas sebagian besar terdiri dari N₂, O₂, CO₂, dan H₂O serta beberapa ppm NO_x. Energi elektron bebas bervariasi antara 5-20kV diciptakan dalam gas dengan generator tegangan tinggi pada anoda. Generator ini membangkitkan tegangan tinggi, yaitu sekitar 2.000-10.000V hingga terbentuk kondisi plasma. Pada fase plasma, materi tidak lagi berbentuk molekul namun terurai menjadi ion dan elektron yang bersifat radikal berenergi tinggi sehingga bersifat sangat reaktif.

Dalam fase *discharge* tercipta radikal N, O, dan O₃ yang berlangsung dalam beberapa nanosekon. Pada tahapan ini juga terbentuk NO_x yang berasal dari hasil reaksi dengan berbagai radikal dalam campuran gas.

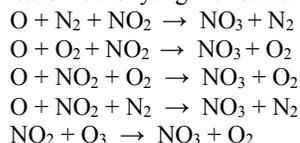
➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan pembentukan NO:



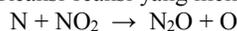
➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan pembentukan NO₂



➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan pembentukan NO₃:

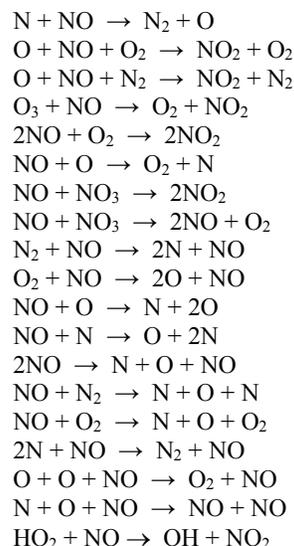


➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan pembentukan N₂O:

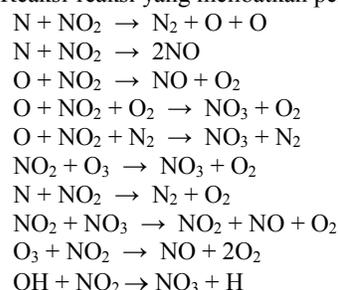


Tahapan kedua adalah fase setelah *discharge* (*post discharge phase*), yang berlangsung hanya beberapa milisekon. Fase ini merupakan fase penghancuran NO_x melalui reaksi dengan berbagai radikal. Pada fase ini terjadi disosiasi oksida polutan NO_x.

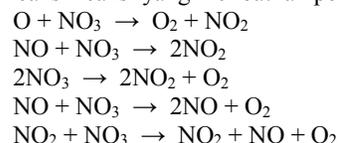
➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan penghancuran NO:



➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan penghancuran NO₂:



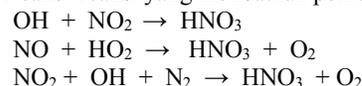
➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan penghancuran NO₃:



Seperti nampak pada hasil reaksi kimia di atas bahwa radikal-radikal primer maupun sekunder dari berbagai reaksi kimia bertanggung jawab pada penghancuran NO_x dan disosiasi kinetika kimia sebelum gelombang ionisasi pada bagian hulu dan hilir kanal ionisasi.

Pada fase setelah *discharge* tidak hanya terjadi reaksi reduksi NO_x tetapi juga terbentuknya asam nitrat (HNO₃) oleh radikal-radikal aktif.

➤ Reaksi-reaksi yang melibatkan pembentukan HNO₃

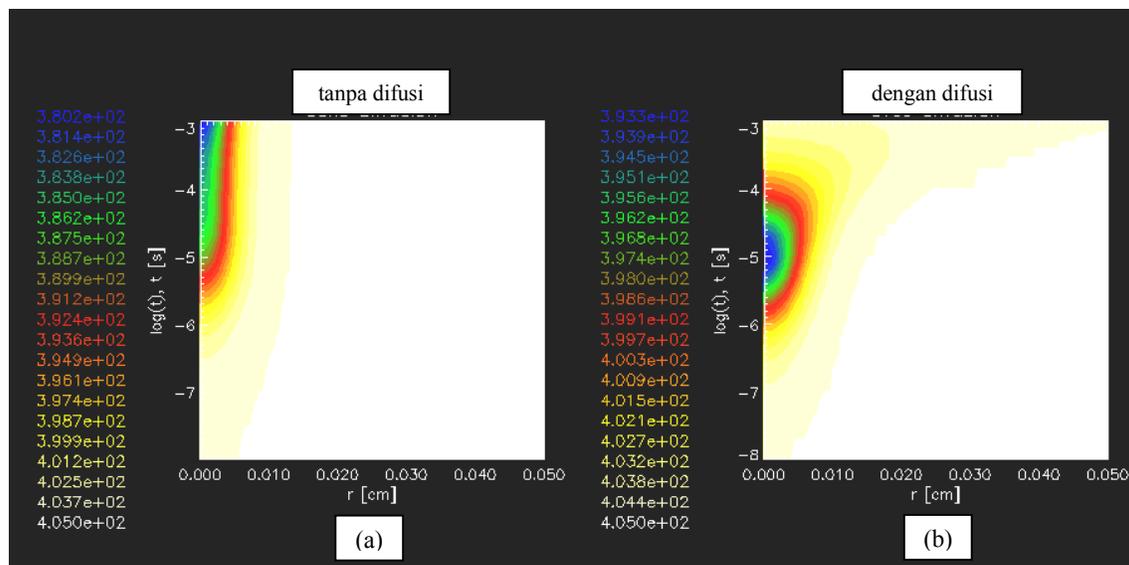


Selama tahapan ini, waktu penghancuran NO_x akibat reaksi dengan berbagai radikal lebih lama daripada waktu difusi antar unsur-unsur kimia. Oleh sebab itu, pengembangan radial dari campuran gas pada kanal *discharge* berpengaruh secara signifikan terhadap kinetika kimia. Tahapan ketiga merupakan fase penginjeksian basa menjadi garam. Akhirnya gas bersih yang terhindar dari toksik keluar ke udara.

3. Pengaruh Efek Difusi pada Penghancuran NOx

Untuk memberikan penjelasan tentang bagaimana pengaruh fenomena difusi campuran gas pada reduksi oksida toksik, berikut ini ditampilkan hasil penelitian evolusi radial kerapatan oksida NO pada jarak 1mm

dari anoda seperti nampak pada Gambar 3(a) tanpa memperhitungkan fenomena difusi, dan Gambar 3(b) dengan memperhitungkan fenomena difusi. Sumbu mendatar adalah jarak radial dari sumbu *discharge*, dalam cm, dan sumbu vertikal merupakan skala logaritma waktu mulai dari 10ns sampai dengan 1ms.



Gambar 3: Evolusi radial kerapatan spasial dan temporal dari oksida NO (a). tanpa fenomena difusi; dan (b). dengan fenomena difusi

Konsentrasi mula-mula NO adalah homogen kira-kira 400ppm (Gambar 3 pada 10ns). Sampai 8 μ s, oksida NO berkurang sebab bereaksi dengan radikal N. Setelah itu, NO ditransformasikan menjadi NO₂ oleh reaksi oksidasi ($O_3+NO \rightarrow NO_2+O_2$ dan $O+NO+M \rightarrow NO_2+M$). Reaksi-reaksi ini cukup dominan dengan maupun tanpa difusi. Pada fenomena tanpa difusi, kerapatan NO berkurang menjadi 378ppm pada 1ms di sumbu *discharge* (Gambar 3(a)), dan mencapai 389ppm pada 10 μ s ketika efek difusi diperhitungkan (Gambar 3(b)). Berkurangnya kerapatan NO yang disebabkan reaksi oksidasi diimbangi oleh difusi NO pada perbatasan *discharge* terhadap sumbu. Efek ini terjadi setelah 10 μ s. Pada saat yang sama konsentrasi NO cukup tinggi untuk memperluas fluks difusi radial terhadap sumbu. Akibatnya, kerapatan NO meningkat pada sumbu dan menjadi lebih homogen di kanal *discharge* (Gambar 3(b)). Kecenderungan ini nampak jelas setelah 100 μ s, karena radikal O dihancurkan sehingga tidak ada penambahan NO yang berdifusi terhadap gas di sumbu *discharge*. Selanjutnya, difusi radikal O₃ membatasi oksidasi NO di sekitar sumbu melalui reaksi $O_3+NO \rightarrow NO_2+O_2$. Oleh sebab itu, pada 1ms dan nilai kerapatan NO hampir sama dengan keadaan awalnya yaitu sekitar 400ppm pada 10ns.

IV. KESIMPULAN

Dari analisis hasil penelitian disimpulkan bahwa (1) radikal-radikal primer N, O, dan sekunder O₃ tercipta

melalui disosiasi molekul mayoritas gas sebagai hasil dampak ionik dan elektronik; (2) mekanisme reduksi NOx berlangsung dalam hanya beberapa milisekon di mana penghancuran oksida NOx akibat reaksi dengan radikal-radikal aktif membentuk asam H₂SO₄ dan HNO₃; dan (3) efek difusi berpengaruh signifikan terhadap kinetika kimia dalam penghancuran NOx di kanal *discharge*. Pemahaman terhadap hasil penelitian memungkinkan dilakukannya optimasi reduksi NOx dalam upaya merancang desain reduksi polutan NOx guna mewujudkan transportasi bebas polusi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Perhubungan, Lap Tahunan, *Data Prediksi Pertumbuhan Jumlah Kendaraan 2007-2016 di Provinsi DKI Jakarta*, (2013)
- [2] Guntoro, N.A. *Pemanfaatan Teknologi Plasma dalam Pengendalian Dampak Lingkungan Udara dari Emisi Polutan NOx pada Perspektif Pembangunan Transportasi Berkelanjutan*. Penelitian Stranas (2012)

- [3] J.O. Hirschfelder, F.E. Curtiss dan R.B. Bird, *Molecular Theory of Gases and Liquids*, John Wiley-New York, Chapman et Hall, London, (1954)
- [4] B. Van Leer, *J. Comput. Phys.* 32, 101, (1979)
- [5] A.R. Svehla dan R.S. Brokaw, NASA Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, NASA Technical Note, NASA TN D-3327, (1996)
- [6] W.J. Massman, *Atmospheric Environment*, 32, pp.1111-1127, (1998)