

**PERMODELAN PENCEMARAN UDARA AKIBAT
LALU LINTAS DI JALAN ARTERI
(Studi Kasus Ruas Jalan Soekarno-Hatta di Kota Bandung)**



Tesis

DJOKO HOESODO

L4K002047

**PROGRAM MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG
2004**

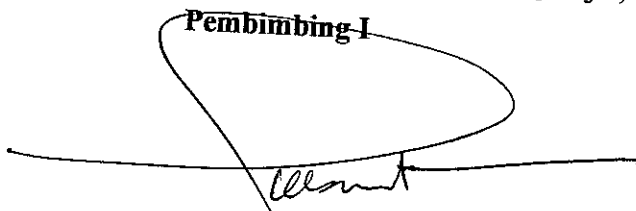
IPT-PUSTAK-UNDIP

Judul Tesis : Permodelan Pencemaran Udara Akibat Lalu Lintas di
Jalan Arteri (Studi Kasus Ruas Jalan Soekarno-Hatta
di Kota Bandung)
Nama Mahasiswa : Djoko Hoesodo
NIM : L4K002047
Program Studi : Magister Ilmu Lingkungan
Konsentrasi : Rekayasa Lingkungan

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal 16 Juni 2004
dan dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima

Menyetujui,

Pembimbing I



Dr. Ir. Purwanto, DEA

Pembimbing II



Ir. Danny Soetriszanto, M. Eng

Penguji I



Ir. Agus Hadiyanto, MT

Penguji II



Ir. Nasrullah, MS

Ketua Program

Magister Ilmu Lingkungan



Dr. Sudharto P. Hadi, MES

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan di dalamnya tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi dan Lembaga Pendidikan lainnya.

Semua informasi dan pengetahuan yang diperoleh dari hasil penerbitan maupun yang belum atau tidak diterbitkan, dengan ataupun dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak, telah diberikan penghargaan dimana sumbernya dijelaskan di dalam tulisan dan pustaka dan isi tesis ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Semarang, Juni 2004

Penulis



Djoko Hoesodo

NIM. L4K002047

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan syukur alhamdulillah kehadiran Allah SWT, berkat rahmat dan hidayat-Nya penulis telah mampu menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini merupakan syarat untuk kelulusan Magister Ilmu Lingkungan, Program Pasca Sarjana, Universitas Diponegoro Semarang. Tesis yang berjudul **PERMODELAN PENCEMARAN UDARA AKIBAT LALU LINTAS DI JALAN ARTERI (Studi Kasus Ruas Jalan Soekarno-Hatta di Kota Bandung)** telah disidangkan dan diperbaiki sebagai tanggapan dan koreksi dari tim penguji dan pembimbing untuk penyempurnaan.

Selama penulisan tesis ini telah banyak bimbingan dan masukan yang diberikan baik dari pembimbing, penguji, pengelola MIL dan lainnya. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Sudharto P.Hadi, MES sebagai Ketua Program Magister Ilmu Lingkungan.
2. Bapak Dr. Ir. Purwanto, DEA sebagai Pembimbing I.
3. Bapak Ir. Danny Soetrisnanto, M. Eng. sebagai Pembimbing II.
4. Bapak Ir. Agus Hadiyanto, MT sebagai Penguji I.
5. Bapak Ir. Nasrullah, MS sebagai Penguji II.
6. Bapak Ir. Muktar Napitupulu, MSc, MIHT sebagai Pemimpin Proyek Pembinaan Manajemen Prasarana Wilayah, Ditjen. Prasarana Wilayah, Dept. Kimpraswil.

7. Bapak Tauhid Ridwan, S.ST beserta karyawan lainnya di Puslitbang Prasarana Transportasi, Departemen Kimpraswil yang telah banyak membantu dalam pengumpulan data untuk penulisan tesis.
8. Serta lainnya yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan, masukan dan dorongan.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih bisa dikembangkan lebih jauh. Namun demikian, harapan penulis tesis ini mampu memberikan masukan kepada pihak yang berkepentingan sesuai dengan tujuan. Segala pertanyaan dan tanggapan akan selalu terbuka demi lebih sempurnanya tesis ini. Semoga ketulusan dan kebaikan hati Bapak/Ibu/Saudara mendapatkan imbalan dari Allah SWT, amin.

Abstrak

Jalan Soekarno-Hatta merupakan salah satu jalan utama di kota Bandung yang berdasarkan fungsinya berklasifikasi jalan arteri primer. Sebagai jalan utama jalan tersebut dibebani arus aliran atau volume lalu lintas yang cukup tinggi. Dengan tingginya volume lalu lintas menyebabkan pencemaran udara yang membebani lingkungan disekitarnya.

Studi ini bertujuan untuk menganalisa karakteristik pencemaran udara sebagai akibat adanya arus lalu lintas. Dari hubungan antara konsentrasi dengan volume lalu lintas kemudian dapat ditentukan model konsentrasi yang mencerminkan sifat dinamis aliran lalu lintas pada ruas jalan Soekarno-Hatta.

Metode yang digunakan adalah dengan menganalisa karakteristik lalu lintas yang terjadi, membandingkan konsentrasi polutan yang didapat melalui pengukuran dan perhitungan dan melakukan validasi terhadap model dispersi Gaussian.

Analisa terhadap data pengukuran menunjukkan variasi volume lalu lintas, yaitu pada pagi hari terjadi volume yang tinggi, kemudian volume mengalami penurunan pada waktu sekitar tengah hari dan terjadi kenaikan kembali volume lalu lintas menjelang sore hari. Volume lalu lintas yang bervariasi ini menimbulkan konsentrasi polutan yang besarnya sebanding/berbanding lurus dengan volume. Hasil validasi terhadap model dispersi Gaussian mendapatkan nilai koefisien dispersi rata-rata $\sigma_z(\text{CO}) = 10,46$ m dan $\sigma_z(\text{NO}_x) = 12,18$ m. Sedangkan persamaan yang menunjukkan hubungan antara konsentrasi polutan dengan volume lalu lintas sebagai berikut, $C(\text{CO}) = 2646,4 (n/u)$ dan $C(\text{NO}_x) = 119,53 (n/u)$, dimana C adalah konsentrasi polutan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), n adalah volume lalu lintas (smp/s) dan u adalah kecepatan angin (m/s).

Kata kunci : permodelan, pencemaran udara, volume lalu lintas, emisi, konsentrasi polutan

ABSTRACT

Jalan Soekarno-Hatta is a main road in Bandung functioning as primary arterial road. As a main road, jalan Soekarno-Hatta is loaded by highly traffic flow or volume. That highly volume traffic causes air pollution burdening the surrounding environment.

This study aims to analyze air pollution characteristic as a result of road traffic. Based on the relation between concentration and traffic volume, it can be determined concentration model indicating dynamics characteristic of traffic flow on the jalan Soekarno Hatta.

Methods which are used in the study are by analyzing the variation of traffic volume on that road, comparing pollutant concentration taken from measurement and calculation, and validating the Gaussian dispersion model.

The analyzing on measurement data shows traffic volume variation. It increases in the morning, decreases in the day and reincreases in the afternoon. This variation of traffic volume make a pollutant concentration which is equivalent with the volume. Result of validation on Gaussian dispersion model is an average value of dispersion coefficient σ_z (CO) = 10,46 m and σ_z (NO_x) = 12,18 m. While the equation showing the relation between pollutant concentration and traffic volume are: $C(\text{CO}) = 2646,4 (n/u)$ and $C(\text{NO}_x) = 119,53 (n/u)$, where C is pollutant concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), n is traffic volume (cpu/s) and u is wind speed (m/s).

Keywords : modelling, air pollution, traffic volume, emissions, polutant concentration

Daftar Isi

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
Pernyataan	iii
Kata Pengantar	iv
Abstrak	vi
Daftar Isi	viii
Daftar Tabel	xi
Daftar Gambar	xii
Daftar Lampiran	xv
BAB I - PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	8
1.3. Tujuan Penelitian	9
1.4. Manfaat Penelitian	9
BAB II - TINJAUAN PUSTAKA	11
2.1. Landasan Teori	11
2.1.1. Klasifikasi Fungsi Jalan	11
2.1.2. Emisi Kendaraan Bermotor	12
2.1.3. Model Empiris Emisi Kendaraan Bermotor	16
2.1.4. Model Kualitas Udara	21
2.1.5. Laju Emisi (Q)	35
2.1.6. Stabilitas Atmosfir	36
2.1.7. Angin	44
2.1.8. Parameter-parametr Dispersi Sumber Garis	46
2.1.9. Kriteria Polutan	49

2.1.10. Fotokimia	52
2.1.11. Volume Lalu Lintas (n)	54
2.1.12. Karakteristik Hubungan Kecepatan-Volume	56
2.1.13. Karakteristik Kendaraan Operasional	59
2.1.14. Metode Simulasi	60
2.2. Originalitas Penelitian	61
 BAB III - METODE PENELITIAN	 63
3.1. Ruang lingkup Penelitian	63
3.2. Prosedur Pengerjaan	64
3.3. Instrumen Penelitian	64
3.3. Metode Analisis	66
3.4. Metode Validasi	67
3.5. Lokasi Penelitian	68
3.6. Diagram Alir Dalam Metode Regresi	71
3.6. Pengumpulan Data	72
 BAB IV - HASIL PENELITIAN	 73
4.1. Rona Lingkungan	73
4.1.1. Kondisi Jalan Soekarno-Hatta	73
4.1.2. Kondisi Transportasi Kota Bandung	78
4.2. Analisa Data	80
4.2.1. Karakteristik Lalu Lintas	80
4.2.2. Emisi Lalu Lintas	83
4.2.3. Konsentrasi Polutan	88
4.2.4. Stabilitas Atmosfir	93
4.2.5. Korelasi Konsentrasi Terhadap Volume Lalu Lintas	94
4.2.6. Perbandingan Konsentrasi Perhitungan dan Pengukuran	96
4.3. Validasi Model Gaussian	99

BAB V - KESIMPULAN DAN REKOMENDASI	106
5.1. Kesimpulan	106
5.2. Rekomendasi	107
Daftar Pustaka	110
Lampiran	113

Daftar Tabel

Tabel 2.1. Konsentrasi emisi gas buang berdasarkan moda pengoperasian	15
Tabel 2.2. Faktor emisi untuk kendaraan bermesin bensin dan diesel	16
Tabel 2.3. Pengaruh meteorologi terhadap stabilitas	43
Tabel 2.4. Faktor konversi untuk volume kendaraan	56
Tabel 3.1. Pencemaran udara dan volume lalu lintas di beberapa ruas jalan di kota Bandung	69
Tabel 4.1. Kondisi dan panjang jalan di kota Bandung	79
Tabel 4.2. Koefisien dispersi σ_z hasil validasi	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Emisi CO untuk kendaraan > 2000 cc	19
Gambar 2.2.	Diagram proses terjadinya pencemaran udara	22
Gambar 2.3.	Volume kontrol	24
Gambar 2.4.	Model box. (a) Model box standar; (b) Model box tertutup	31
Gambar 2.5.	Pembagian ruang di atas kota ke dalam sel-sel	34
Gambar 2.6.	(a) Stabil; (b) netral; (c) tidak stabil pada <i>Environmental Lapse Rate</i>	39
Gambar 2.7.	Profil temperatur atmosfer dan range stabilitas	41
Gambar 2.8.	Koefisien dispersi horizontal σ_y sebagai fungsi dari jarak titik di bagian hilir arah angin ke sumber untuk berbagai kelas stabilitas	46
Gambar 2.9.	Koefisien dispersi vertikal σ_z sebagai fungsi dari jarak titik di bagian hilir arah angin ke sumber untuk berbagai kelas stabilitas	47

Gambar 2.10. Jarak efektif	48
Gambar 2.11. Karakteristik volume-kecepatan	57
Gambar 2.12. Karakteristik volume-kecepatan untuk kasus kondisi standard dan tidak standard	58
Gambar 3.1. Diagram alir alur pemikiran proses validasi model	67
Gambar 3.2. Jalan Soekarno-Hatta	70
Gambar 3.3 Diagram alir regresi dalam validasi model	71
Gambar 4.1. Tata guna lahan di segmen jalan Soekarno-Hatta (terminal Leuwipanjang)	75
Gambar 4.2. Letak titik reseptor	76
Gambar 4.3. Penampang melintang jalan dan posisi reseptor	77
Gambar 4.4. Variasi Volume Lalu lintas	82
Gambar 4.5. Variasi Emisi CO Akibat Lalu lintas	84
Gambar 4.6. Variasi Emisi Nox Akibat Lalu lintas	84
Gambar 4.7. Variasi Konsentrasi CO	89
Gambar 4.8. Variasi Konsentrasi NOx	89

Gambar 4.9. Variasi Konsentrasi CO Terhadap Volume	90
Gambar 4.10. Variasi Konsentrasi NOx Terhadap Volume	90
Gambar 4.11. Korelasi Konsentrasi CO Terhadap Volume Lalu lintas	95
Gambar 4.12. Korelasi Konsentrasi NOx Terhadap Volume Lalu lintas	95
Gambar 4.13. Konsentrasi CO hasil perhitungan dan pengukuran terhadap waktu	97
Gambar 4.14. Konsentrasi NOx hasil perhitungan dan pengukuran terhadap waktu	97
Gambar 4.15. Konsentrasi CO hasil pengukuran dan perhitungan terhadap volume lalu lintas	98
Gambar 4.16. Konsentrasi NOx hasil pengukuran dan perhitungan terhadap volume lalu lintas	98
Gambar 4.17. Regresi Konsentrasi CO terhadap n/u	103
Gambar 4.18. Regresi Konsentrasi NOx terhadap n/u	103

DAFTAR LAMPIRAN

L.1. Volume lalu lintas per arah	114
L.2. Volume lalu lintas untuk 2 arah	115
L.3. Emisi dan konsentrasi polutan	116
L.4. Meteorologi	117
L.5. Contoh perhitungan konsentrasi	118
L.6. Situasi lalu lintas dan lingkungan di jalan Soekarno-Hatta, kota Bandung	119
L.7. Baku mutu udara ambient	121
L.8. Hasil pengujian emisi kendaraan	122

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Jalan berfungsi sebagai prasarana untuk memindahkan / transportasi orang dan barang. Dalam dimensi yang lebih luas, jaringan jalan mempunyai peranan yang besar dalam pengembangan wilayah baik wilayah nasional, regional, kabupaten maupun kota sesuai dengan fungsi dari jaringan jalan tersebut. Jaringan jalan merupakan urat nadi untuk mendorong pertumbuhan ekonomi, sosial, budaya dan stabilitas nasional, serta upaya pemerataan dan penyebaran pembangunan.

Disamping fungsinya yang sangat penting, keberadaan jalan juga menimbulkan dampak yang berbahaya yang membebani lingkungan. Salah satu dampak penting akibat transportasi jalan adalah timbulnya pencemaran udara akibat emisi polutan dari lalu lintas kendaraan bermotor. Pencemaran dari kendaraan bermotor menjadi isu yang utama, hal ini karena terjadinya peningkatan terus menerus baik dalam jumlah kendaraan yang berada di jalan raya maupun peningkatan jarak perjalanan yang ditempuh oleh tiap kendaraan. Semenjak tahun 1960-an jumlah kendaraan bermotor di dunia tumbuh dengan cepat, lebih cepat dari pertumbuhan jumlah penduduk. Tahun 1950 ada 50 juta mobil untuk 3,5 milyar manusia. Sekarang ada 600 juta mobil untuk 6 milyar manusia, dengan produksi kendaraan sebanyak 45 juta kendaraan per tahun. Pada tahun

2020 diperkirakan akan ada 1 milyar kendaraan. Laju pertumbuhan kendaraan bermotor sekarang sekitar 5 %, dibandingkan dengan laju pertumbuhan penduduk sebesar 1 - 2 %. Populasi diperkirakan akan stabil sebanyak 9 - 10 milyar penduduk antara tahun 2030 sampai 2050, tetapi jumlah kendaraan akan terus bertambah [Jeremy Colls, 2002].

Polutan tidak hanya berbahaya bagi kesehatan manusia, tapi juga berbahaya bagi hewan, tanah, tumbuhan dan mempengaruhi iklim dan cuaca. Dari pencemaran udara yang terjadi, kendaraan bermotor jalan raya memberikan kontribusi sebanyak 60 persen emisi CO, dan 30 persen emisi HC dan NO_x terhadap total emisi secara nasional [Noel de Nevers, 2000].

Polutan udara utama yang dihasilkan dari emisi lalu lintas kendaraan adalah Karbon Monoksida (CO), senyawa Hidrokarbon (HC), Nitrogen Oksida (NO_x), logam berat dan asap partikulat. Salah satu jenis polutan yang sangat berbahaya adalah Karbon Monoksida (CO) ditinjau dari tingginya jumlah emisi yang dibangkitkan dan dampaknya terhadap kesehatan. Karbon Monoksida bahkan dalam jumlah yang kecil akan berdampak pada kesehatan manusia dan hewan. Bersenyawa dengan hemoglobin di dalam darah maka akan menghambat pasokan oksigen di pembuluh, dan ini dapat menyebabkan gangguan sistem syaraf pusat.

Polutan lainnya yang berbahaya adalah nitrogen oksida. Nitrogen oksida dihasilkan dari reaksi antara nitrogen yang berada di dalam udara atmosfer dengan oksigen pada temperatur dan tekanan tinggi seperti yang terjadi pada mesin pembakaran internal (*internal combustion engine*). Pada pembakaran tersebut dihasilkan nitrit oksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO₂). Persentase nitrit oksida yang

diemisikan lebih banyak dibandingkan dengan nitrogen oksida, tapi nitrit oksida di dalam udara ambient teroksidasi menjadi nitrogen dioksida, sehingga jumlah konsentrasi NO di udara sekitar jalan raya adalah sebanyak jumlah NO₂. Dilihat dari sifat racunnya (*toxicity*) nitrogen dioksida lebih beracun dibandingkan dengan nitrit oksida.

Konsentrasi ambang batas yang diijinkan untuk keberadaan (*exposure*) selama 8 jam untuk nitrit oksida adalah 25 ppm dan nitrogen oksida adalah 5 ppm. Level normal di jalan-jalan di perkotaan adalah sekitar 1 persen dari nilai ambang batas di atas dengan keberadaan (*exposure*) yang tidak menerus (*intermittent*) [L.H. Watkins, 1981]. Tapi walaupun kecil, tetap berbahaya bagi kesehatan, efeknya terhadap kesehatan bersifat lebih permanen dibandingkan dengan karbon dioksida. Keberadaan yang terus menerus pada level polutan oksida nitrogen yang kecil ini dapat menyebabkan efek jangka panjang yang mengkhawatirkan bagi kesehatan. Mengingat dampaknya yang serius yang diakibatkan oleh polutan, hal ini mendorong perlunya dilakukan studi-studi yang berkaitan dengan emisi polutan oleh kendaraan bermotor di jalan raya.

Emisi gas buang kendaraan bermotor adalah gas yang ditimbulkan akibat proses pembakaran pada sistem penggerak/tenaga kendaraan bermotor. Sehingga semakin besar pembakaran yang berlangsung semakin besar pula emisi gas buang yang dihasilkan. Studi-studi yang berkaitan dengan emisi kendaraan bermotor telah dilakukan baik di luar negeri maupun di dalam negeri. Salah satunya adalah pengujian yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Jalan, Balitbang, Departemen Pekerjaan Umum (sekarang Departemen Kimpraswil) [I. G. W. Samsi Gunarta, et. al, 1999].

Penelitian tersebut memberikan beberapa hasil sebagai berikut : pengaruh kecepatan kendaraan terhadap emisi, dan pengaruh cc (kapasitas ruang bakar) dan tahun atau umur kendaraan terhadap emisi yang dihasilkan. Yang menjadi sasaran dalam pengujian tersebut adalah merumuskan hubungan aljabar yang memungkinkan untuk memprediksi emisi kendaraan jika kecepatan kendaraan diketahui.

Suatu ruas jalan memiliki karakteristik hubungan volume-kecepatan tertentu. Karakteristik-volume kecepatan adalah hubungan kecepatan dan volume lalu lintas yang terjadi pada suatu ruas jalan pada saat tertentu. Hubungan ini antara satu jalan dengan jalan lainnya dapat berbeda. Perbedaan karakteristik tersebut disebabkan oleh perbedaan dalam kondisi fisik, geometrik, pelayanan, maupun perbedaan dalam penerapan regulasi lalu lintas pada masing-masing ruas jalan tersebut. Sebagai ilustrasi dapat ditunjukkan sebagai berikut. Jalan tol adalah jalan yang memiliki hambatan samping (*side friction*) yang paling rendah. Hambatan samping adalah kondisi fisik atau aktivitas yang terdapat di bagian samping jalan yang mengganggu kelancaran lalu lintas. Kondisi atau aktivitas disamping jalan tersebut misalnya adalah adanya pasar, pedagang kaki lima, trotoar, tempat parkir di bahu jalan dan lain-lain yang semuanya menimbulkan hambatan arus lalu lintas. Dibandingkan dengan jalan tol, maka jalan kolektor memiliki hambatan samping yang lebih besar. Oleh karena itu pada volume tertentu kecepatan di jalan tol lebih tinggi dari pada di jalan kolektor. Adanya perbedaan kecepatan ini berdampak pada perubahan tingkat kualitas udara yang dibangkitkan. Jika perubahan tersebut menyebabkan pencemaran udara yang semakin besar maka ini akan menjadi isu lingkungan yang cukup berarti.

Salah satu langkah penting yang dilakukan dalam proses studi lingkungan jalan adalah melakukan prediksi dampak pada suatu komponen lingkungan. Dalam perencanaan suatu pembangunan konstruksi jalan maka diperlukan prediksi kualitas udara yang akan terjadi. Perencanaan transportasi yang baik tidak hanya memecahkan masalah akan kebutuhan lalu lintas saja, tetapi juga perlu mempertimbangkan aspek lingkungan.

Prediksi intensitas pencemaran udara umumnya dilakukan untuk memperkirakan konsentrasi pencemaran udara yang diterima lingkungan proyek akibat lalu lintas pada saat konstruksi maupun oleh lalu lintas rencana pada saat proyek dioperasikan. Dampak adanya proyek terhadap kualitas udara di masa mendatang dikalkulasi menggunakan model kualitas udara. Model dipergunakan untuk mengevaluasi dampak dari sumber emisi lalu lintas terhadap kualitas lingkungan. Selain untuk memprediksi konsentrasi polutan di masa depan model juga digunakan untuk mengestimasi konsentrasi manakala data kualitas udara hasil pengukuran belum tersedia.

Untuk memprediksi kualitas udara telah dikembangkan beberapa model kualitas udara. Model merupakan ekspresi matematis dari proses dilusi, transport, dan percampuran dari polutan yang diemisikan terhadap udara di sekelilingnya. Model-model tersebut antara lain adalah model dispersi Gaussian, model Box, dan model numerik. Model-model tersebut menunjukkan bahwa besarnya konsentrasi polutan dipengaruhi oleh banyaknya emisi yang dikeluarkan oleh sumber. Semakin banyak emisi maka konsentrasi polutan pada suatu titik semakin besar untuk kondisi meteorologi tertentu. Sedangkan pada kasus jalan raya emisi yang dikeluarkan oleh kendaraan bermotor dipengaruhi oleh karakteristik lalu lintas.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan kecepatan berpengaruh terhadap besarnya emisi oleh kendaraan. Begitu juga besarnya volume lalu lintas di jalan raya berpengaruh pada jumlah emisi yang dibangkitkan kendaraan di jalan raya [Jeremy Colls, 2002; Aji Tatang, et. al, 2000]. Untuk jalan raya jumlah emisi yang dihasilkan merupakan hasil kali dengan banyaknya arus aliran kendaraan atau volume lalu lintas. Dalam periode satu hari arus aliran kendaraan ini bervariasi sesuai dengan karakteristik siklus aktivitas sosial manusia. Oleh karena itu dalam hal pencemaran udara di sekitar jalan raya dengan panjang tertentu pengendalian utama terhadap emisi lalu lintas adalah dengan melakukan kontrol terhadap volume lalu lintas.

Dari uraian di atas disebutkan emisi merupakan faktor yang dominan yang berpengaruh pada konsentrasi pencemaran udara di suatu lokasi. Tetapi karena karakteristik emisi dan lalu lintas antara satu wilayah dengan wilayah lainnya berbeda-beda, maka untuk mendapatkan model kualitas udara yang lebih akurat yang lebih cocok digunakan untuk suatu wilayah diperlukan studi-studi yang lebih mendalam.

Selain faktor emisi faktor lainnya yang mempengaruhi konsentrasi pencemaran udara adalah interaksi atmosfer. Berkombinasi dengan tipe polutan primer yang diemisikan dari sumber, maka interaksi atmosfer akan menentukan kualitas udara di titik reseptor. Termasuk dalam faktor atmosfer adalah pengaruh meteorologi (yang berperan dalam proses dilusi, transport dan pencampuran pada polutan), dan proses kimia (yang berperan terjadinya reaksi transformasi dari polutan primer yang tidak stabil menjadi polutan sekunder). Tingkat besarnya dilusi, transport, pencampuran (*mixing*) dan perubahan kimiawi yang terjadi diantara sumber dan reseptor

akan menentukan besarnya kualitas udara yang terbentuk. Semakin jauh jarak sumber dengan titik reseptor yang ditinjau kualitas udaranya maka proses pencampuran dan dilusi polutan umumnya semakin meningkat. Sejalan dengan menurunnya konsentrasi polutan primer (karena jarak), maka dengan bertambahnya waktu tingkat penurunan ini akan bertambah disebabkan terjadinya proses generasi polutan sekunder.

Penerapan model kualitas udara pada suatu jalan raya kemungkinan akan memperoleh hasil yang tidak akurat. Agar supaya akurasi penggunaan model kualitas udara untuk memprediksi konsentrasi dapat ditingkatkan, maka validasi pada model perlu dilakukan. Validasi dilakukan agar model dapat diterapkan untuk kondisi yang bersesuaian.

Faktor utama yang mempengaruhi konsentrasi adalah emisi kendaraan. Semakin besar emisi semakin besar konsentrasi pencemaran udara. Variabel emisi sebagai salah satu variabel dalam model kualitas udara dalam penerapannya pada model dispersi jika menggunakan faktor emisi empiris yang ada, besar kemungkinannya menghasilkan nilai prediksi yang kurang akurat. Untuk mengeliminasi kesalahan yang terjadi, diperlukan validasi pada persamaan dispersi, yaitu dengan memodifikasi atau menyesuaikan (*tuning*) terutama pada variabel emisi dan faktor meteorologi.

Studi-studi dalam bidang emisi kendaraan bermotor di Indonesia masih terbatas. Estimasi kualitas udara menggunakan model masih mengadopsi hasil-hasil penelitian yang dilakukan di luar negeri, terutama pada faktor emisinya. Sehingga jika diterapkan untuk suatu ruas jalan di Indonesia maka hasil analisisnya masih menimbulkan keraguan.

Dengan demikian, studi dalam bidang ini, khususnya untuk merumuskan pola emisi yang sesuai dengan kondisi di Indonesia sangat dibutuhkan.

Untuk memprediksi konsentrasi pencemaran udara yang ditimbulkan oleh emisi lalu lintas perlu diketahui karakteristik emisi pada jalan yang bersangkutan. Karakteristik emisi ini dipengaruhi oleh besarnya arus aliran lalu lintas. Sehingga untuk memperoleh emisi yang akurat perlu juga dipelajari karakteristik perjalanan kendaraan pada suatu ruas jalan.

1.2. Perumusan Masalah

Dari uraian latar belakang di atas dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut :

1. Jalan arteri merupakan ruas jalan yang menghubungkan kawasan-kawasan yang mempunyai fungsi primer dalam sistem jaringan transportasi di perkotaan. Sebagai jalan primer maka jalan arteri akan mengalami pembebanan arus aliran lalu lintas yang tinggi. Sementara itu data mengenai seberapa besar beban arus lalu lintas yang beroperasi pada suatu ruas jalan arteri dan bagaimana variasi volume lalu lintasnya belum diketahui khususnya untuk periode jam-jam sibuk yaitu selama periode 8 jam dari jam 8.00 sampai dengan jam 16.00.
2. Emisi polutan oleh kendaraan bermotor pada transportasi jalan raya akan mengalami penyebaran dan menimbulkan pencemaran udara. Sedangkan besarnya emisi polutan yang dibangkitkan oleh transportasi jalan dipengaruhi oleh banyaknya volume lalu lintas yang beroperasi di jalan

tersebut. Tetapi bagaimana hubungan antara volume lalu lintas dengan konsentrasi polutan di lingkungan ambien yang terjadi pada suatu ruas jalan arteri belum diketahui.

3. Kualitas udara pada suatu lokasi tertentu dapat ditentukan dengan melakukan pengukuran. Tetapi dengan cara pengukuran ini akan memerlukan biaya dan waktu. Cara yang lebih mudah dalam memprediksi kualitas udara adalah dengan mengkalkulasi konsentrasi polutan menggunakan model kualitas udara. Walaupun demikian penerapan model prediksi kualitas udara untuk suatu ruas jalan dengan kondisi lalu lintas dan meteorologi tertentu kemungkinan memberikan hasil prediksi yang kurang akurat. Disamping itu kekurangan lainnya adalah belum adanya bentuk model dispersi gas polutan yang sederhana yang dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi polutan CO dan NOx sebagai fungsi dari volume lalu lintas.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dalam studi ini adalah :

1. Mengidentifikasi volume lalu lintas pada suatu ruas jalan selama periode 8 jam yaitu pada jam-jam sibuk antara jam 8.00 dan 16.00.
2. Menganalisa bagaimana variasi volume lalu lintas mempengaruhi konsentrasi polutan yang ada di lingkungan ambien.
3. Merumuskan model dispersi polutan yang mencerminkan sifat dinamis volume lalu lintas yang cocok untuk kondisi jalan dengan karakteristik lalu lintas tertentu.

1.4. Manfaat Penelitian

Sasaran studi adalah mendapatkan model konsentrasi polutan secara empiris dari lalu lintas pada suatu kondisi jalan tertentu. Model dapat diterapkan sebagai alternatif bagi pihak terkait seperti Pemerintah Pusat maupun Pemerintah Daerah dalam rangka mengambil kebijakan pembangunan sistem transportasi jalan, yaitu pembangunan transportasi yang juga mempertimbangkan mengenai perbaikan kualitas udara yang antara lain dapat dilakukan melalui pengendalian volume lalu lintas.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Landasan Teori

2.1.1. Klasifikasi Fungsi Jalan

Peraturan perundangan yang ada yaitu UU nomor 13 tahun 1980 tentang jalan dan PP nomor 26 tahun 1985 tentang jalan membagi ruas jalan menurut peranannya atau fungsinya dalam 2 sistem jaringan yaitu Sistem Primer dan Sistem Sekunder.

Sistem jaringan jalan primer dikelompokkan menjadi :

- a. Jalan Arteri Primer, yaitu ruas jalan yang menghubungkan kota jenjang kesatu dan kota jenjang kesatu lainnya yang berdampingan, serta ruas jalan yang menghubungkan kota jenjang ke satu dengan kota jenjang kedua.
- b. Jalan Kolektor Primer, yaitu ruas jalan yang menghubungkan kota jenjang kedua dengan kota jenjang kedua lainnya, serta kota jenjang kedua dengan kota jenjang ketiga yang berada di bawah pengaruhnya.
- c. Jalan Lokal Primer yaitu jalan yang menghubungkan kota jenjang ketiga dengan kota jenjang ketiga lainnya, kota jenjang kesatu dengan persil, kota jenjang kedua dengan persil serta ruas jalan yang menghubungkan kota jenjang ketiga dengan kota jenjang di bawahnya sampai dengan persil.

Sistem jaringan jalan sekunder diatur mengikuti pengaturan tata ruang kota yang menghubungkan kawasan-kawasan yang mempunyai fungsi primer, fungsi sekunder kesatu, kedua, ketiga dan seterusnya sampai ke perumahan.

Sistem jaringan jalan sekunder dibagi dalam :

- a. Jalan Arteri Sekunder, yaitu ruas jalan yang menghubungkan kawasan primer dengan kawasan sekunder kesatu, atau menghubungkan kawasan sekunder kesatu dengan kawasan sekunder kesatu atau menghubungkan kawasan sekunder kesatu dengan kawasan sekunder kedua.
- b. Jalan Kolektor Sekunder, yaitu ruas jalan yang menghubungkan kawasan sekunder kedua dengan kawasan sekunder kedua atau menghubungkan kawasan sekunder kedua dengan kawasan sekunder ketiga.
- c. Jalan Lokal Sekunder, yaitu ruas jalan yang menghubungkan kawasan sekunder kesatu dengan perumahan, menghubungkan kawasan sekunder kedua dengan perumahan, kawasan sekunder ketiga dan seterusnya sampai ke perumahan.

Klasifikasi jalan menurut fungsinya yaitu arteri, kolektor dan lokal memiliki spesifikasi dimensi penampang melintang minimum yang sesuai dengan standard yang ditetapkan.

2.1.2. Emisi Kendaraan Bermotor

2.1.2.1. Pembakaran Bahan Bakar

Emisi kendaraan bermotor merupakan gas buang (*exhaust gas*) hasil reaksi pembakaran dari suatu senyawa (dalam hal ini bahan bakar fosil) dengan oksigen (O_2). Namun karena oksigen

yang terdapat dalam udara juga mengandung nitrogen, maka reaksi pembakaran di sini juga melibatkan nitrogen (N₂). Perbandingan nitrogen dan oksigen di udara sekitar 78 % berbanding 21 %, sisanya adalah unsur-unsur lain.

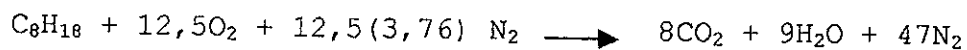
Dalam pembakaran bensin (dianggap terdiri atas oktana murni) di dalam mesin mobil terjadi pembakaran sebagai berikut :



Angka 3,76 adalah harga perbandingan nitrogen dan oksigen di udara. Berdasarkan keseimbangan reaksi, harga x, a dan b dapat dihitung. Hasilnya adalah :

$$x = 12,5 \quad ; \quad a = 8 \quad ; \quad b = 9$$

sehingga reaksi tersebut di atas secara lengkap adalah :



Bila reaksi yang terjadi seperti tersebut di atas, maka reaksi pembakarannya disebut proses pembakaran yang stoikiometris dimana semua atom oksigen bereaksi sempurna dengan bahan bakar.

Berdasarkan persamaan reaksi di atas bisa ditentukan berapa perbandingan kebutuhan udara yang tepat untuk bahan bakar yang ada, atau perbandingan udara bahan bakar (*Air Fuel Ratio*) disingkat dengan AFR.

Kalau jumlah mol adalah N, maka :

$$AFR = N \text{ udara} / N \text{ bahan bakar}$$

$$= [12,5 - 3,76 (12,5)] / 1$$

$$\text{AFR} = 59,5 \text{ mol udara} / \text{mol bahan bakar}$$

Bila AFR tersebut didasarkan pada perhitungan berat diperoleh hasil :

$$\text{AFR} = 59,5 (28,95) / 1 (114)$$

$$= 15 \text{ bagian udara} / \text{bagain bahan bakar}$$

Harga AFR = 15 adalah khusus untuk digunakan dalam perhitungan pembakaran hidrokarbon. Jadi kalau kita punya 1 kg bahan bakar, maka udara yang diperlukan untuk pembakaran adalah 15 kg udara.

Apabila jumlah kendaraan bermotor yang terdapat di suatu ruas jalan diketahui dan rata-rata pemakaian bahan bakarnya diketahui, maka jumlah gas buangan hasil pembakaran yang dilepaskan ke udara per hari dapat dihitung. Kalau hasil pembakarannya tidak sempurna dan dianggap 1 % dari hasil pembakaran berupa polutan, maka jumlah polutan yang dilepaskan ke udara per hari dapat diperkirakan. Anggapan bahwa 1 % akan menjadi pencemar udara adalah terlalu baik. Kenyataannya akan jauh lebih besar dari angka tersebut karena penetapan prosentase polutan dari gas buangan hasil pembakaran kendaraan bermotor yang keluar dari kanalpot belum ditentukan.

Reaksi pembakaran yang stoikiometris seperti tersebut di atas secara teoritis dapat terjadi, namun dalam kenyataannya seringkali terjadi reaksi pembakaran yang tidak sempurna dan tidak hanya menghasilkan CO₂ dan H₂O saja. Hasil-hasil reaksi lainnya antara lain H, C, CO, NH₃, NO, NO₂, SO₂, SO₃, H₂SO₄, OH dan O₃.

2.1.2.2. Konsentrasi Emisi

Tingkat konsentrasi emisi gas buang yang dihasilkan melalui proses reaksi pembakaran yang terjadi di dalam mesin kendaraan baik pada mesin diesel maupun mesin bensin dapat dilihat pada tabel 2.1. Pada tabel tersebut ditunjukkan tingkat emisi yang dihasilkan sangat sensitiv tergantung dari mode pengoperasian, apakah mode *idle*, percepatan, perlambatan atau penjelajahan (*cruising*). Sedangkan pengaruh jenis bahan bakar antara diesel dengan bensin pada faktor emisi dapat dilihat pada table 2.2.

Tabel 2.1. Konsentrasi emisi gas buang berdasarkan moda pengoperasian
Sumber : L. H. Watkins, 1981.

Bahan bakar dan polutan	Emisi gas buang (ppm)			
	Idle	Percepatan	Jelajah	Perlambatan
Bensin				
CO	69000	29000	27000	39000
HC	5300	1600	1000	10000
NO _x	30	1020	650	20
Diesel				
CO	Trace	1000	Trace	Trace
HC	400	200	100	300
NO _x	60	350	240	30

Dengan konsentrasi emisi yang $10^4 - 10^5$ kali lebih besar dari konsentrasi ambien pada jarak puluhan sentimeter saja di atas sumber emisi menunjukkan bahwa proses penyebaran atau

dispersi merupakan hal yang esensial dan sangat berpengaruh pada tingkat konsentrasi polutan di udara ambien.

Tabel 2.2. Faktor emisi untuk kendaraan bermesin bensin dan diesel
Sumber : Jeremy Colls, 2002.

Tipe Kendaraan	Emisi rata-rata di jalan raya (g/km)			
	CO	HC	NO _x	Partike 1
Bensin, tanpa timbang	27.0	2.8	1.7	0.02
Bensin, berkatalis	2.0	0.2	0.4	0.01
Diesel	0.9	0.3	0.8	0.15

2.1.3. Model Empiris Emisi Kendaraan Bermotor

Konsentrasi polutan pada suatu titik di dalam lingkungan ditentukan oleh laju emisi yang dikeluarkan oleh sumber. Emisi yang dikeluarkan ke udara atmosfer akibat adanya lalu lintas di jalan raya terutama bersumber dari gas buang kendaraan bermotor. Emisi ini membawa spesies polutan utama yaitu karbon monoksida, nitrogen oksida dan campuran timbal yang menimbulkan pencemaran udara di sekitar jalan raya. Sumber gas buang mengemisikan sebanyak 100 persen karbon monoksida, nitrogen oksida dan timbal. Sedangkan untuk hidrokarbon gas buang mengemisikan sebanyak 70 persen, sisanya diemisikan dari semburan uap oleh rumah mesin (*crankcase blowby*), penguapan dari karburator dan tangki bahan bakar [L. H. Watkins, 1981; Edmund F. Obert, 1973].

Untuk mengkalkulasi jumlah emisi kendaraan yang dibangkitkan suatu jalan dengan panjang tertentu diperlukan pertimbangan bermacam-macam faktor yang mempengaruhi. Jika ditinjau dari kinerja mesin maka besarnya emisi pada sebuah kendaraan tergantung pada karakteristik mesin kendaraan tersebut yang memiliki variabel-variabel seperti *Air Fuel Ratio*, efisiensi volumetrik, konsumsi bahan bakar, kecepatan/rpm, temperatur mesin, temperatur system pemasukan dan pengeluaran (*inlet and exhaust system*), tipe mesin (mesin diesel atau mesin bensin) dan jenis bahan bakar.

Sedangkan jika dilihat dari pengoperasian kendaraan maka emisi dipengaruhi oleh kecepatan kendaraan, mode pengemudian (*percepatan, perlambatan, idle or cruising*), kategori kendaraan (mobil penumpang, bus, truk, dll.) dan perawatan mesin. Untuk suatu ruas jalan dengan panjang tertentu potensi emisi yang dihasilkan dipengaruhi oleh komposisi tipe kendaraan dan banyaknya kendaraan yang lewat per satuan waktu atau volume lalu lintas. Karena kompleksnya faktor-faktor yang mempengaruhi laju emisi maka diperlukan studi atau pengujian untuk mendapatkan model empiris emisi kendaraan bermotor.

Pengujian-pengujian baik di luar negeri maupun di dalam negeri telah dilakukan untuk mendapatkan hubungan matematis yang memungkinkan untuk memprediksi berapa emisi yang dihasilkan oleh kendaraan pada suatu kecepatan tertentu yang berjalan pada satu satuan panjang jalan tertentu. Beberapa pengujian yang telah didapat menunjukkan hubungan antara emisi dengan tipe kendaraan dan kecepatan kendaraan (v). Pada pengujian menggunakan persamaan umum emisi yang didekati dengan bentuk persamaan kuadrat, yaitu

$$q = a + b v + c v^2 \quad (2.1)$$

Dimana q adalah emisi yang memiliki satuan g/km dan v adalah kecepatan kendaraan dalam km/jam. Persamaan di atas kemudian digunakan dengan memasukkan data-data pengukuran. Dari pengujian dengan pendekatan kuadratik tersebut seringkali memberikan hasil yang kurang bagus. Hal ini karena bermacam pengujian untuk satu kendaraan memberikan hasil yang bervariasi, begitu juga pengujian pada bermacam kendaraan pada satu kategori memberikan hasil yang bervariasi.

Satuan emisi adalah g/km. Pada kondisi *idle* atau kecepatan $v = 0$ (*stationary*) berarti mesin kendaraan menghasilkan massa polutan yang tak terhingga (*infinite*) per kilometer jalan. Jadi persamaan 2.1 di atas tidak dapat menangani situasi ini. Sehingga dengan alasan tersebut maka kondisi *idle* atau stasioner emisi kendaraan dianggap sama dengan kondisi pada kecepatan sangat rendah. Daerah (*range*) kecepatan pada persamaan emisi, dimulai dari kecepatan 5 atau 10 km/jam. Massa emisi per satuan waktu pada kondisi kecepatan rendah diasumsikan berlaku untuk kendaraan pada keadaan stasioner.

Salah satu pengujian menghasilkan model empiris sebagai berikut [Jeremy Colls, 2002],

$$q = 9,846 - 0,2867 v + 0,0022 v^2 \quad (2.2)$$

Persamaan ini cukup valid sampai dengan kecepatan terendah 10 km/jam. Pada kecepatan 10 km/jam ini jika dimasukkan ke persamaan 2.2 menghasilkan emisi

$$9,846 - (0,2867 \times 10) + (0,0022 \times 10^2) = 7,2 \text{ g/km}$$

Pada kecepatan 10 km/jam, laju emisi adalah $7,2 \times 10 = 72$ g/jam. Jadi ini adalah laju emisi kendaraan pada keadaan stasioner yaitu $72 \text{ g/jam} = 0,2 \text{ g/s}$, yang dapat diperlakukan sebagai sumber titik.

Kategori kendaraan berat meliputi truk besar, truk sedang, bus besar dan bus sedang. Mereka keseluruhannya menggunakan mesin diesel yang berbahan bakar solar. Pola emisi dari kendaraan berat berdasarkan hasil studi dapat didekati dengan fungsi polynomial yang mempunyai bentuk umum sebagai berikut,

$$E = K + av + bv^2 + cv^3 + \frac{d}{v} + \frac{e}{v^2} + \frac{f}{v^3} \quad (2.3)$$

dimana,

E = emisi, g/km

K = konstanta

a - f = koefisien

v = kecepatan kendaraan rata-rata, km/jam

Studi lainnya mengenai emisi kendaraan bermotor dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Departemen Kimpraswil. Pada studi ini telah diukur emisi tiap kendaraan dari berbagai merk dan tipe. Jumlah sampel kendaraan yang berhasil dikumpulkan untuk pengukuran adalah sebanyak 240 buah. Pengukuran dilakukan untuk mendapatkan emisi kendaraan sebagai fungsi dari kecepatan, cc (volume ruang bakar kendaraan) dan umur kendaraan. Hasil studi mendapatkan model empiris emisi

dengan memasukkan variabel kecepatan rata-rata kendaraan v (km/jam) pada ruas jalan yang diprediksi dengan persamaan sebagai berikut [I. G. W. Samsi Gunarta, et. al, 1999; Pedoman Teknik, No. 017/T/BM/1999, 1999],

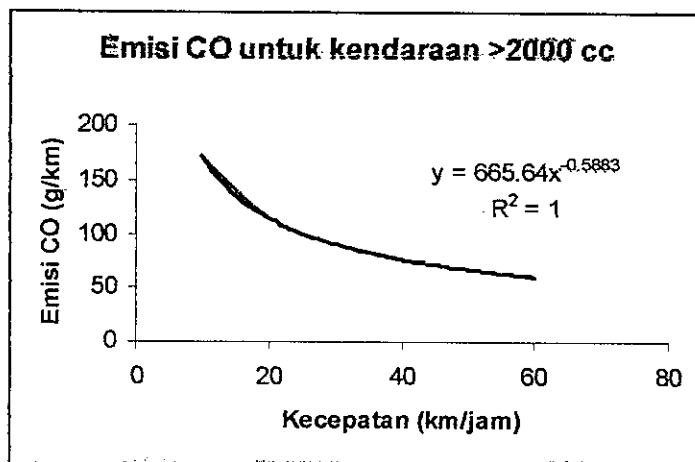
$$q_{CO} = 867,92 v^{-0,8648} \quad (2.4)$$

dan

$$q_{NO_x} = 0,0005 v^2 - 0,0656 v + 3,0586 \quad (2.5)$$

Persamaan-persamaan emisi di atas menggunakan sampel untuk kendaraan penumpang. Gambar 2.1 menunjukkan hubungan emisi dengan kecepatan untuk kendaraan 2000 cc.

Salah satu faktor yang mempengaruhi karakteristik emisi gas buang kendaraan adalah kecepatan operasional kendaraan.



Gambar 2.1. Emisi CO untuk kendaraan > 2000 cc
Sumber : [I.G.W. Samsi Gunarta, et. al, 1999]

Berdasarkan hasil uji skala besar yang dilakukan di Inggris pada tahun 1968, 1976, dan 1992, ditemukan beberapa fenomena bahwa emisi CO, CO₂, dan HC terjadi pada lokasi-lokasi kemacetan dan lalu lintas dengan kecepatan rendah. Sedangkan emisi NO_x tertinggi ditemukan pada lokasi lalu lintas dengan kecepatan tinggi. Berdasarkan fenomena tersebut dapat digeneralisasi bahwa : semakin rendah kecepatan kendaraan, konsentrasi CO dan HC akan semakin tinggi, sebaliknya semakin tinggi kecepatan kendaraan, konsentrasi HC dan CO semakin rendah. Sedangkan kenaikan konsentrasi emisi nitrogen oksida sebanding dengan kenaikan kecepatan.

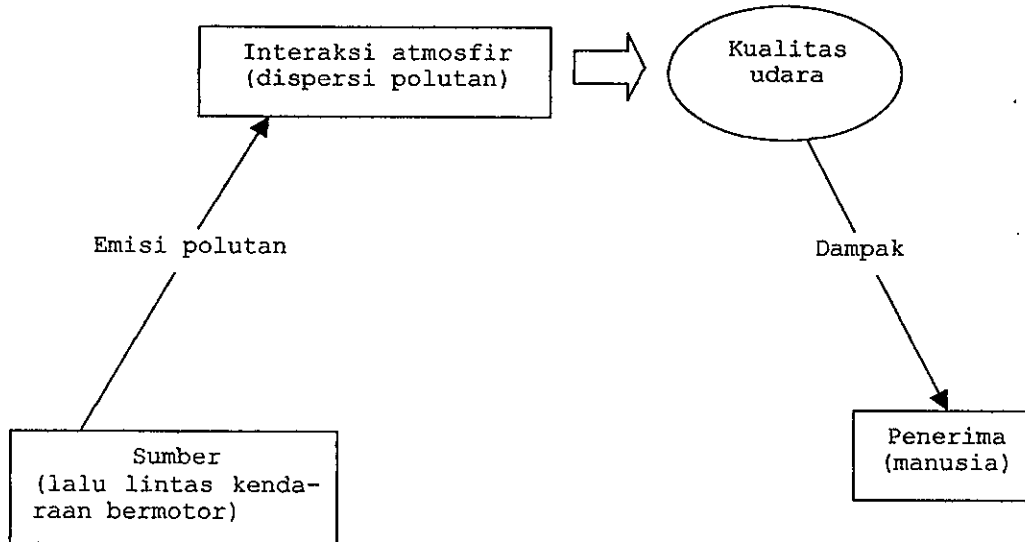
2.1.4. Model Kualitas Udara

2.1.4.1. Diagram Pencemaran Udara

Dampak dari sumber polutan yang berasal dari transportasi jalan raya terhadap kualitas udara diekspresikan ke dalam diagram proses terjadinya pencemaran udara. Gambar 2.2 menunjukkan model simulasi yang menyatakan hubungan antara emisi polutan yang dikeluarkan oleh sumber arus aliran lalu lintas kendaraan bermotor dan dampaknya terhadap kualitas udara di sekitar jalan raya.

Pencemaran udara diawali dengan sumber lalu lintas kendaraan bermotor yang mengemisikan polutan, lalu emisi polutan dengan adanya interaksi di atmosfer mengalami proses penyebaran (dispersi polutan), selanjutnya dengan adanya dispersi ini akan menurunkan kualitas udara di sekitar jalan raya. Degradasi kualitas udara ini akan memberikan dampak

negatif pada manusia yang berada pada tata guna lahan di sekitar jalan raya.



Gambar 2.2. Diagram proses terjadinya pencemaran udara

Dalam gambar 2.2 interaksi atmosfer yang berupa proses dispersi polutan dapat dirumuskan ke dalam model matematis kualitas udara. Sebagai input pada model ini mencakup unsur-unsur emisi, meteorologi dan kimia udara. Beberapa model yang dapat digunakan untuk memprediksi kualitas udara antara lain adalah model dispersi Gaussian, model box dan model numerik.

2.1.4.2. Model Dispersi Gaussian

Polutan yang diemisikan dari setiap sumber yang ada akan tersebar di atmosfer melalui proses transport massa polutan dan transformasi kimiawi. Transport polutan terjadi melalui

suatu proses yang terdiri dari adveksi dan dispersi. Sedangkan transformasi kimiawi yang sangat berpengaruh terjadi di alam terutama berupa proses reaksi fotokimia. Adanya proses tersebut menyebabkan transport polutan di dalam atmosfer akan terjadi dalam tiga dimensi (arah koordinat x, y, z), baik horizontal sesuai dengan arah angin (adveksi), transversal maupun vertikal ke lapisan atas atmosfer bumi. Masing-masing proses dapat dijelaskan sebagai berikut di bawah ini.

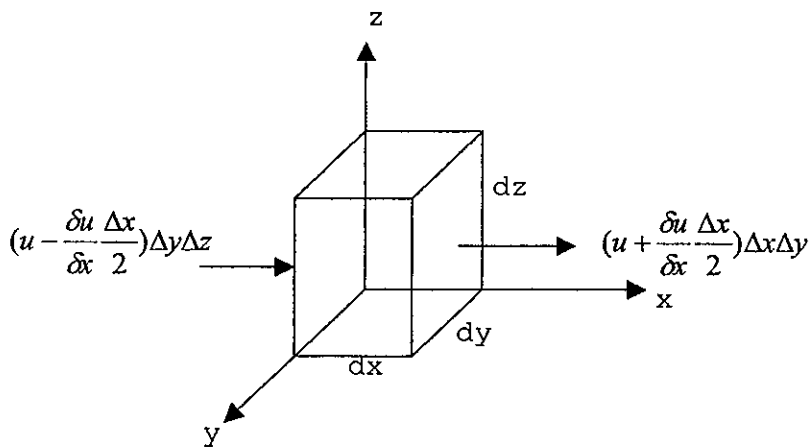
Adveksi adalah proses transport bahan pencemar udara karena unsur meteorologi yaitu adanya angin. Dispersi adalah proses penyebaran polutan yang dapat terjadi bahkan pada kondisi tidak adanya angin sekalipun. Transport dispersi dicirikan oleh adanya proses difusi molekuler, dimana pencemar menyebar di udara karena adanya perbedaan konsentrasi (*concentration gradient*), dan proses turbulensi pencampuran senyawa-senyawa polutan dengan udara.

Transformasi fotokimia adalah proses reaksi fisika kimia yang mengubah gas-gas yang diemisikan sumber menjadi zat polutan yang membahayakan. Reaksi ini terutama dipengaruhi oleh naiknya temperatur atau adanya radiasi matahari. Transformasi mengubah pencemar/polutan primer menjadi unsur gas atau partikulat bentuk lain yang dikenal sebagai pencemar sekunder. Zat dominan yang terbentuk dari proses fotokimia adalah ozon.

Dampak dari emisi sumber-sumber pencemar terhadap kualitas udara dievaluasi dengan menggunakan model transport polutan. Model transport didasarkan pada hukum kesetimbangan materi (*material balances*), dimana materi dalam konteks ini adalah polutan. Model ini telah memperhitungkan faktor adveksi

yaitu kecepatan angin, dispersi turbulen dan stabilitas atmosfer. Persamaan kesetimbangan massa atau konservasi dapat ditulis sebagai berikut,

$$\left[\begin{array}{l} \text{Laju aliran} \\ \text{masa ter-} \\ \text{akumulasi} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Laju aliran masa} \\ \text{yang masuk} \\ \text{batas sistem} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Laju aliran masa} \\ \text{yang keluar} \\ \text{batas sistem} \end{array} \right] + / - \left[\begin{array}{l} \text{Laju reaksi} \\ \text{di dalam sistem} \end{array} \right] \quad (2.6)$$



Gambar 2.3. Volume kontrol

Sekarang batas sistem diartikan sebagai volume kontrol, perhatikan gambar 2.2. Sekarang kita pandang komponen aliran transport searah sumbu x. Neto volume aliran persatuan waktu yang melewati kedua sisi adalah,

$$V = (\delta u / \delta x) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.7)$$

dimana u adalah kecepatan pada arah x . Maka neto massa per satuan waktu yang ada di dalam kontrol volume untuk tinjauan arah x adalah,

$$m = C (\delta u / \delta x) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.8)$$

dimana C adalah konsentrasi dalam satuan g/m^3 .

m adalah transport massa karena adveksi dalam arah x . Sedangkan di atmosfer juga terjadi proses dispersi, yang menurut hukum Fick persamaannya adalah,

$$J_{disp} = -D \frac{\delta C}{\delta x} \quad (2.9)$$

dimana,

J_{disp} = flux dispersi yang melewati bidang pada arah x

D = koefisien dispersi, m^2/s

C = konsentrasi polutan, g/m^3

x = jarak dispersi polutan yang ditinjau, m

Sehingga jika aliran adveksi dan dispersi semuanya dijumlahkan untuk ketiga arah x , y , dan z maka persamaan kesetimbangan atau konservasi massa adalah menjadi sebagai berikut,

$$\begin{aligned} & \frac{\delta}{\delta x} (VC_x) + \frac{\delta}{\delta x} (C_x u dy dz) dx + \frac{\delta}{\delta y} (C_y v dz dx) dy + \frac{\delta}{\delta z} (C_z w dx dy) dz \\ & - \frac{\delta}{\delta x} (D_x dz dy \frac{\delta C_x}{\delta x}) - \frac{\delta}{\delta y} (D_y dz dx \frac{\delta C_y}{\delta y}) - \frac{\delta}{\delta z} (D_z dx dy \frac{\delta C_z}{\delta z}) \\ & - R_j dx dy dz = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

dimana,

V = volume kontrol volume, m^3

C_j = konsentrasi spesies polutan j , g/m^3

u = kecepatan rata-rata konveksi dalam arah x , m/s

v = kecepatan rata-rata konveksi dalam arah y , m/s

w = kecepatan rata-rata konveksi dalam arah z , m/s

D_x = koefisien pencampuran turbulen dalam arah x , m^2/s

D_y = koefisien pencampuran turbulen dalam arah y , m^2/s

D_z = koefisien pencampuran turbulen dalam arah z , m^2/s

R_j = spesies polutan j yang menghilang atau terbentuk,
 kg/s

Dalam persamaan di atas aliran massa identik dengan konsentrasi. Kemudian $V = dx dy dz$. Dan jika koefisien pencampuran, D_x , D_y , dan D_z mendekati konstan terhadap waktu dan lokasi, kemudian diasumsikan fluida adalah tak termampatkan (*incompressible*) sehingga berlaku persamaan kontinuitas sebagai berikut,

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.11)$$

Jika laju reaksi adalah berupa degradasi polutan karena reaksi kimia atmosfer (transformasi kimiawi), maka secara matematis persamaan kesetimbangan materi dapat ditulis sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \frac{dC_j}{dt} + u \frac{dC_j}{dx} + v \frac{dC_j}{dy} + w \frac{dC_j}{dz} \\ - D_x \frac{d^2 C_j}{dx^2} - D_y \frac{d^2 C_j}{dy^2} - D_z \frac{d^2 C_j}{dz^2} - R_j = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Persamaan 2.12 adalah persamaan dasar untuk membentuk model dispersi untuk spesies polutan yang berinteraksi diatmosfir.

Penyelesaian persamaan 2.12 menjadi persamaan yang disebut dengan model dispersi Gauss dengan menerapkan asumsi-asumsi sebagai berikut,

- $dC_j/dt = 0$, kondisi keadaan tunak
- $v, w = 0$, arah dan kecepatan angin bersifat uniform dan tak berubah terhadap waktu
- $u (dC_j/dx) \gg D_x (d^2C_j/dx^2)$, transport pada arah x (arah angin) ditentukan hanya oleh adveksi

Penerapan asumsi di atas akan mereduksi persamaan 2.12 menjadi bentuk sebagai berikut,

$$u \frac{\partial C_j}{\partial x} = D_x \frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C_j}{\partial y^2} + R_j \quad (2.13)$$

Persamaan 2.13 mengandung unsur konveksi, dispersi dan transformasi. Konsentrasi C_j pada suatu titik (x, y, z) di bagian hilir arah angin yang bergerak melewati sumber emisi akan tergantung dari konveksi spesies polutan oleh transport angin, penyebaran arah vertikal dan lateral spesies karena dispersi turbulen, dan pembentukan atau penghilangan spesies karena reaksi kimia.

Jika persamaan 2.13 dipecahkan dengan menerapkan asumsi-asumsi sebagai berikut :

- konsentrasi pada bidang x, z mengikuti distribusi normal (distribusi gauss)
- laju emisi dari sumber pencemar adalah tetap sebesar Q_j , g/s
- $R_j = 0$, tidak terjadi reaksi kimia di dalam sistem (terjadi pada polutan yang konservativ)

Diperoleh hasil berupa persamaan yang disebut dengan model dispersi Gaussian, dimana ekspresinya untuk sumber titik adalah sebagai berikut [J. G. Rau dan D. C. Wooten, 1980],

$$C_j(x,y,z) = \frac{Q_j}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (2.14)$$

dimana,

- $C_j(x,y,z)$ = konsentrasi polutan pada titik x, y, z yang ditinjau, g/m³
- Q_j = laju emisi spesies j yang dikeluarkan sumber emisi, g/s
- σ_y = koefisien gauss untuk dispersi lateral (arah y), m
- σ_z = koefisien gauss untuk dispersi vertical (arah z), m

Persamaan 2.14 disebut juga dengan *Gaussian Plume Equation* yang menyatakan konsentrasi polutan oleh transport gas yang diemisikan sumber dengan laju Q_j . Jika sumber yang mengemisikan polutan adalah berasal dari sumber bergerak arus lalu lintas kendaraan yang berbentuk garis (*line*

source) seperti pada jalan raya, maka modifikasi dari persamaan 2.14 menjadi sebagai berikut,

$$C_j(x,z) = \frac{2Q_j/L}{(2\pi)^{1/2}u\sigma_z} \exp(-z^2/2\sigma_z^2) \quad (2.15)$$

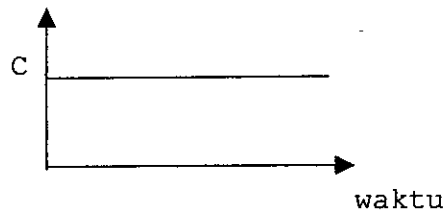
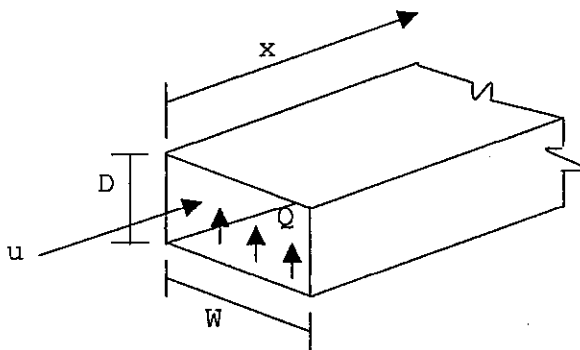
dimana, Q_j/L adalah laju emisi per unit panjang jalan raya dalam $g/(s.m)$, u adalah kecepatan angin dalam arah x atau tegak lurus sumbu jalan dalam m/s , dan z adalah tinggi di titik konsentrasi yang ditinjau. Perhitungan model ini didasarkan pada asumsi bahwa emisi polutan di jalan raya adalah sebuah garis yang tak terbatas, sehingga setiap titik yang memiliki jarak yang sama dari garis tengah jalan akan menerima polusi dengan konsentrasi yang sama. Emisi dari kendaraan di jalan raya dilihat sebagai sumber garis yang uniform dan penyebaran berjalan dalam arah dua dimensi x dan y . Variasi konsentrasi dalam arah y dianggap tidak terjadi. Hal ini karena proses difusi polutan pada arah y akan dicegah oleh adanya konsentrasi molekul polutan yang berada disampingnya pada arah y .

Model dispersi Gauss di atas berguna untuk mengestimasi distribusi konsentrasi kualitas udara manakala data-data pengukuran atau monitoring kurang memadai jumlahnya. Kalau pengukuran berguna dalam memberikan informasi konsentrasi pada suatu lokasi tertentu, maka model berguna untuk memprediksi konsentrasi untuk masa yang akan datang atau pada lokasi dimana data pengukuran belum ada. Jadi selain untuk mengestimasi kualitas udara di suatu titik oleh adanya emisi dari sumber tertentu, model juga digunakan untuk memprediksi kualitas udara sebagai dampak suatu proyek yang

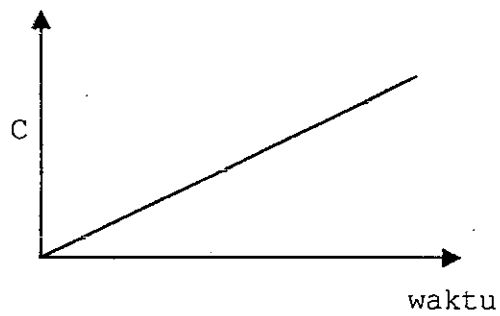
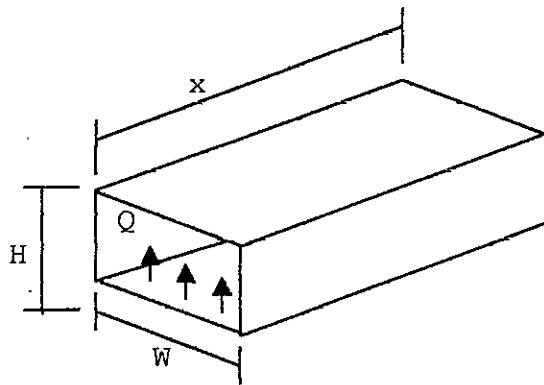
akan dilaksanakan. Penggunaan model Gauss sangat baik untuk memprediksi kualitas udara pada skala lokal maupun subregional. Pada kasus dimana sumber-sumber emisi memberikan dampak pada kualitas udara lokal maka penggunaan model tersebut adalah sangat bermanfaat.

2.1.4.3. Model Box

Model transport polutan lainnya yang lebih sederhana adalah model Box. Model ini ditunjukkan dalam gambar 2.4 dibawah ini,



(a)



(b)

Gambar 2.4. Model box. (a) Model box standar; (b) Model box tertutup.

Model box seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.a, mengasumsikan bahwa polutan diemisikan di dalam box dengan volume tertentu yang dibatasi dengan sisi-sisi di bagian atas dan samping. Udara ditransportasikan masuk ke dalam volume dengan kecepatan rata-rata u , dan polutan diasumsikan

bercampur secara instan dan uniform di keseluruhan volume box. Konsentrasi keadaan tunak (*steady state*) di relasikan terhadap Q yang diekspresikan pada persamaan berikut ini,

$$C_j = \frac{Q_j}{uWD} \quad (2.16)$$

dimana,

C_j = konsentrasi polutan spesies j , g/m^3

u = kecepatan angin yang diasumsikan konstan, m/s

W = lebar box normal terhadap arah angin, m

Q_j = laju emisi polutan spesies j , g/s

Model box cukup layak untuk sumber *ground level* yang terdistribusi secara uniform pada seluruh area kecil. Sebagai contoh model box dapat diterapkan untuk jalur jalan raya, area parkir kendaraan, dan daerah permukiman.

Model box mendemonstrasikan secara grafis bahwa polutan di injeksikan ke dalam dan bercampur pada volume tertentu dari udara. Kasus yang lebih khusus pada model box adalah kasus dimana kecepatan angin adalah nol dan konsentrasi polutan diijinkan untuk terus bertambah di dalam box. Dispersi polutan sekarang dicegah untuk keluar dari box. Box berfungsi sebagai box tertutup. Model ini disebut dengan model box tertutup seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.b Persamaannya adalah sebagai berikut,

$$C_j = \frac{Q_j t}{xWD} \quad (2.17)$$

dimana,

x = panjang box, m

t = waktu dari dimulainya emisi, s

Model box dapat diterapkan untuk mengestimasi kualitas udara untuk situasi dimana kecepatan angin nol dan dispersi dibatasi. Situasi ini sebagai contoh dapat diterapkan pada jalur kanyon (*small canyon*), seperti pada jalur jalan yang dibatasi bukit. Pada pagi hari, inversi radiasi dapat mencegah terlepasnya udara dari dalam kanyon dan dengan tidak adanya kecepatan angin maka mencegah terjadinya dispersi pada arah horizontal.

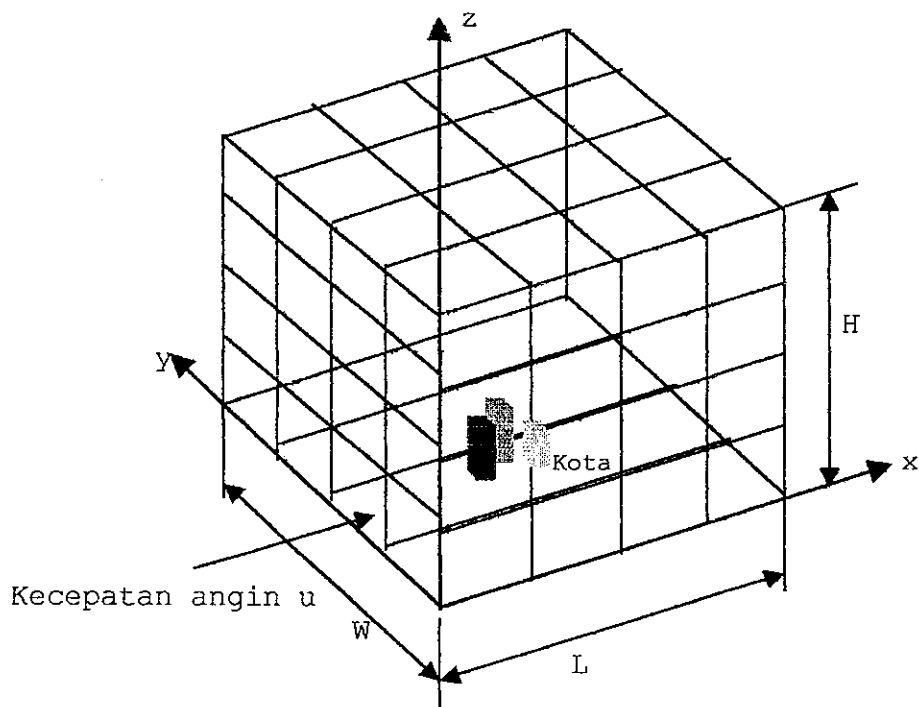
2.1.4.4. Model Numerik

Model lainnya yang lebih maju dikembangkan adalah model numerik. Ketika diinginkan estimasi kualitas udara *ambient* suatu area yang berasal dari emisi sumber area (*area source*) dan adanya reaksi fotokimia, maka model *Gaussian Dispersion* atau persamaan 2.14 menjadi tidak valid, dengan kata lain penyelesaian analitis dari persamaan 2.12 menjadi sulit. Model Gaussian hanya merepresentasikan proses kimia (transformasi) yang sederhana. Sehingga penyelesaian persamaan kesetimbangan massa (persamaan 2.6) dilakukan melalui cara numerik.

Metode ini menggunakan cara sebagai berikut, udara di atas suatu wilayah dibagi-bagi menjadi sel-sel jamak seperti ditunjukkan pada gambar 2.5. Masing-masing sel dilakukan perhitungan secara terpisah dengan menggunakan metode numerik yang menggunakan jasa pemrograman komputer. Persamaan 2.6 diterapkan untuk untuk masing-masing sel. Model simulasi pencemaran udara di sebuah kota pada suatu periode waktu awal tertentu dimulai dengan penggunaan data

yang ada atau data yang diasumsikan dari distribusi polutan dan prekursornya. Kemudian pada langkah berikutnya program akan menghitung perubahan konsentrasi polutan dan prekursornya pada tiap-tiap sel dengan cara integrasi numerik pada persamaan 2.6 (diasumsikan setelah 3 s/d 6 menit telah terjadi penyebaran dan perubahan konsentrasi).

Komputasi ini memerlukan data atau nilai estimasi/asumsi dari kecepatan dan arah angin pada titik tengah dari setiap sel, ditambah dengan data atau estimasi emisi pada tiap sel, ditambah dengan subprogram yang menghitung transformasi kimia (seperti fotokimia), ditambah dengan subprogram yang menghitung deposisi (pengurangan) polutan pada tiap sel.



Gambar 2.5. Pembagian ruang di atas kota ke dalam sel-sel

Model dispersi yang menggunakan penyelesaian numerik akan memberikan hasil yang lebih detil dan akurat, tetapi di sisi lain memerlukan data-data meteorologi, emisi dan kimia atmosfer yang lengkap. Jika ini dilakukan maka model ini dapat diterapkan untuk berbagai situasi atmosfer di atas daerah perkotaan dengan memberikan hasil yang layak.

Dalam penerapan model baik model dispersi Gaussian atau model numerik maka perlu dilakukan validasi dari model. Validasi dari model dilakukan dengan menggunakan data-data hasil pengukuran atau data-data historis dari pencatatan masa lalu, lalu model dilakukan modifikasi dan penyesuaian, sehingga model akan memberikan hasil komputasi yang cocok jika dibandingkan dengan konsentrasi polutan yang nyata. Selanjutnya model dapat dijalankan kembali dengan memakai input data emisi dan meteorologi yang berbeda untuk memprediksi situasi di masa mendatang.

2.1.5. Laju Emisi (Q)

Konsentrasi polusi udara pada suatu titik yang ditinjau ditentukan oleh laju emisi (Q) yang didispersikan oleh angin dari sumber emisi menuju titik observasi. Sumber emisi adalah lalu lintas kendaraan dalam satuan jumlah kendaraan per detik. Sedangkan laju emisi diekspresikan sebagai satuan massa polutan yang dilepaskan per satuan waktu. Rumusnya adalah sebagai berikut,

$$Q = n \cdot q \cdot L \quad (2.18)$$

dimana

Q = laju emisi, g/s

n = volume lalu lintas, jumlah kendaraan perdetik

q = emisi, g/km

L = panjang ruas jalan, km

Volume lalu lintas dihitung berdasarkan jumlah kendaraan rata-rata yang lewat pada suatu titik di ruas jalan untuk kategori sepeda motor, kendaraan penumpang dan kendaraan berat.

2.1.6. Stabilitas Atmosfir

2.1.6.1. Dry Adiabatic Lapse Rate

Tekanan angin berkurang secara eksponensial dengan bertambahnya ketinggian. Jadi udara yang bergerak ke atas akan mengalami pengembangan (*expand*) dan mendingin, demikian juga sebaliknya. Untuk atmosfer yang kering (hanya berisi uap air, tapi tidak mengandung butir-butir air) laju perubahan temperatur terhadap ketinggian yang disebabkan oleh tipe perpindahan udara seperti ini disebut dengan *dry adiabatic lapse rate* (Γ , disingkat DALR). Adiabatic artinya adalah energi yang dikandung oleh sekumpulan udara atau parcel udara akan konservatif selama proses perpindahan parcel udara, tidak terjadi pertukaran energi dengan udara sekelilingnya. Γ merupakan konstanta fisik dan dapat dihitung melalui persamaan berikut,

$$\Gamma = g / C_p \quad (2.19)$$

dimana,

$$g = \text{percepatan gravitasi} = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$C_p = \text{panas spesifik udara pada tekanan tetap} = 1010 \text{ J/(kg } ^\circ\text{K)}$$

Jadi $\Gamma = 9,8 \text{ } ^\circ\text{C/km}$. Nilai ini cukup akurat pada ketinggian di bawah 20 km di atmosfer. Di atas ketinggian tersebut karena pengaruh perubahan komposisi molekul (yang mempengaruhi massa) dan gravitasi g , maka nilai Γ terpengaruh.

2.1.6.2. Saturated Adiabatic lapse rate

Jika temperatur udara turun sehingga berada di bawah titik embun uap dimana parcel udara terus bergerak ke atas maka kelebihan uap air akan mengembun. Pengembunan akan melepaskan panas laten pengembunan dimana akan menurunkan laju pendinginan. Sebaliknya, jika parcel udara yang mengandung butiran air bergerak turun, maka proses mengalami hal yang sebaliknya, yaitu butiran air menguap sejalan dengan menghangatnya parcel, dimana akan menyerap panas sensibel atau laten dari udara sekelilingnya dan menyebabkan penurunan laju pemanasan.

Variasi temperatur untuk udara yang mengandung butiran air disebut dengan *saturated adiabatic lapse rate* (SALR), Γ_{sat} , yang persamaannya adalah sebagai berikut,

$$\Gamma_{sat} = \frac{dT}{dz} = \frac{-g}{C_p} \left\{ \frac{1}{1 + (L/C_p)(dq_s/dT)} \right\} \quad (2.20)$$

dimana

L = panas laten penguapan dari air

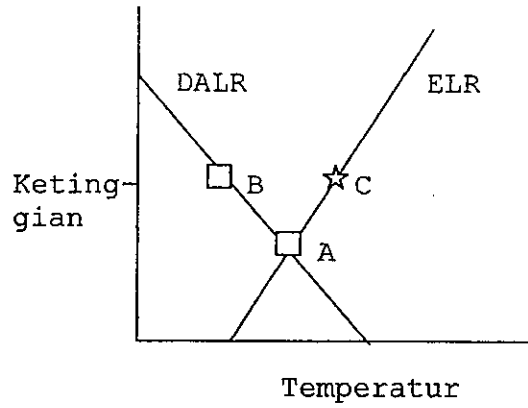
q_s = ratio percampuran pada kondisi saturasi
(kg air/kg udara)

Karena tekanan uap air saturasi dipengaruhi temperatur dan tekanan, maka nilai SALR juga bervariasi. Kondisi udara yang mengandung uap air jenuh lebih sering terjadi di daerah tropis dibandingkan dengan daerah gurun.

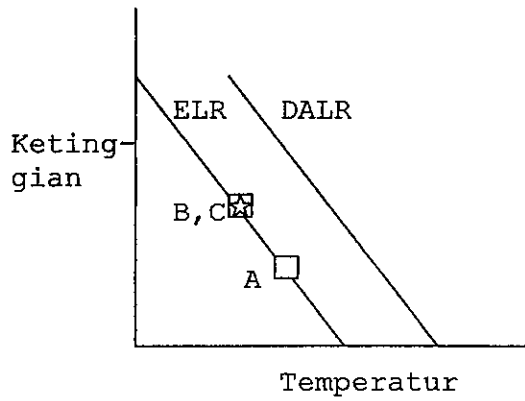
2.1.6.3 Profil Temperatur

Adiabatic lapse rate menjelaskan perubahan temperatur pada parcel udara yang bergerak vertikal. Keadaan ini tidak selalu sama dengan keadaan profil temperatur udara di sekeliling parcel, sebagaimana dicatat melalui pengukuran temperatur atmosfer. Keadaan lingkungan ini disebut dengan *environmental lapse rate* (ELR), yaitu variasi temperatur vertikal terhadap ketinggian udara lingkungan pada suatu waktu dan tempat tertentu. ELR mungkin akan sama dengan *adiabatic lapse rate* (ALR), misalnya pada daerah ketinggian tertentu (umpamanya pada sepanjang 1 km dari dispersi polutan), tetapi ELR dan ALR juga dapat berbeda jauh. Keseimbangan antara kedua *lapse rate* ini yang memberikan konsep stabilitas atmosfer.

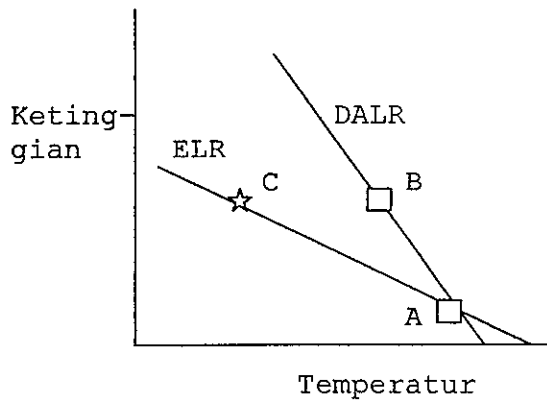
Konsep stabilitas pada penerapan parcel udara dapat dijelaskan sebagai berikut. Sebagai contoh perhatikan gambar 2.6.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.6. (a) Stabil; (b) netral; (c) tidak stabil pada *Environmental Lapse Rate*

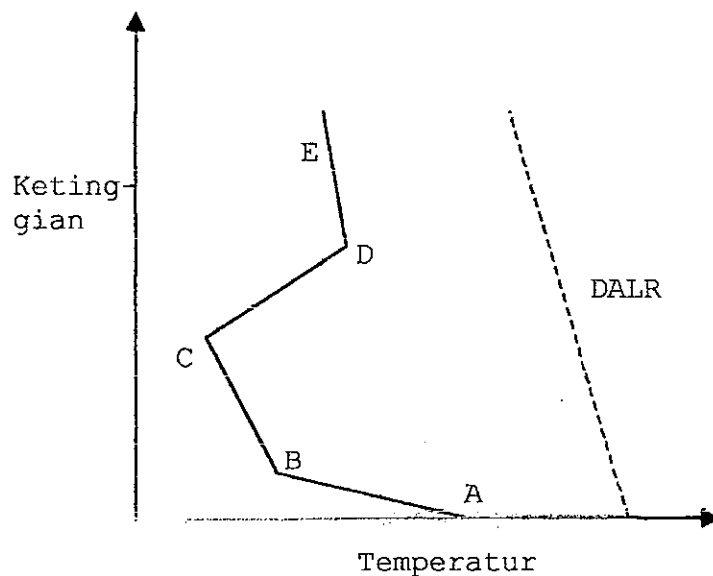
Pada masing-masing gambar ditunjukkan ELR dan DALR sebagai perbandingannya. Dalam gambar 2.6.a parcel udara bergerak dari A ke atas mengalami pendinginan pada garis DALR dan mencapai temperatur yang lebih rendah pada titik B.

Tetapi udara di sekitar parcel pada ketinggian yang sama akan berada pada titik C pada garis ELR. Parcel udara berada pada kondisi lebih dingin dan masa jenisnya lebih besar dibandingkan dengan udara sekeliling, sehingga cenderung untuk kembali ke ketinggian semula. Jika pada awalnya parcel bergerak ke arah bawah, maka ia akan lebih hangat, dan masa jenisnya lebih rendah dibandingkan dengan sekelilingnya dan cenderung akan kembali bergerak ke atas ke titik semula. Jadi ELR bersifat stabil karena setiap perpindahan atau perubahan akan diredam. Dalam gambar 2.6.b, parcel udara yang bergerak ke atas kembali mengalami pendinginan pada garis DALR. Karena hal ini sama dengan kondisi ELR, parcel akan berada pada udara yang temperatur dan massanya sama setelah perpindahan. Jadi ELR bersifat netral, sebab pergerakan vertical tidak mengalami percepatan atau peredaman. Sedangkan pada gambar 2.6.c memperlihatkan bahwa parcel mengalami percepatan, sehingga ELR bersifat tidak stabil.

Pada kondisi udara stabil jika ditinjau pada gaya yang dikenakan pada parcel untuk bergerak, maka gerakan parcel akan mengalami osilasi bergerak ke atas dan ke bawah di sekitar titik awalnya. Frekwensi osilasi ini disebut dengan *buoyancy frequency*, dimana mempunyai periode alami (*natural period*) sebesar beberapa menit pada atmosfer lapisan bagian bawah.

Pada kenyataannya profil temperatur di atmosfer terdiri dari campuran beberapa ELR, yang membuat dispersi vertikal akan berbeda pada ketinggian yang berbeda. Perhatikan *Environmental Lapse Rate* yang ditunjukkan gambar 2.7.

Antara titik A dan B, pemanasan yang kuat dari radiasi matahari pada permukaan bumi akan memanaskan lapisan udara di atasnya. Pada lapisan BC, ELR mendekati DLR, dan pada lapisan CD menunjukkan bahwa semakin tinggi, temperatur semakin meningkat. Keadaan pada lapisan CD ini disebut dengan inversi profil temperatur. Profil keseluruhan menunjukkan pada AB adalah sangat tidak stabil (dispersi kuat), BC mendekati netral, dan CD adalah sangat stabil (dispersi lemah).



Gambar 2.7. Profil temperatur atmosfer dan range stabilitas

2.1.6.4. Kelas Stabilitas Pasquill

Pengaruh umum dari variable lingkungan terhadap stabilitas dapat diringkas sebagai berikut :

- Pada hari tak berawan, radiasi matahari akan memanaskan permukaan tanah pada siang hari, membuat lapisan udara terbawah menjadi tidak stabil.
- Pada malam hari tak berawan, radiasi panas gelombang panjang dari permukaan bumi akan mendinginkan permukaan, membuat lapisan udara menjadi stabil, dan menciptakan *ground level inversion*.
- Dengan meningkatnya kecepatan angin, perubahan vertikal yang kuat cenderung menghasilkan kondisi netral ELR yang sama dengan DLR.
- Daerah yang ada tekanan tingginya secara terus menerus akan memiliki pergerakan udara ke bawah pada pusatnya, dimana seringkali menciptakan kondisi inversi dan munculnya polutan terperangkap yang berada dekat dengan tanah. Keadaan ini disebut dengan *anticyclonic gloom*.

Pengaruh dari radiasi matahari dan kecepatan angin pada stabilitas atmosfer telah membawa Pasquill untuk mengklasifikasikan stabilitas ke dalam skala dari A (sangat tidak stabil) sampai skala G (sangat stabil), dan hubungannya dengan meteorologi, yang ditunjukkan sebagai hubungan yang sederhana seperti dalam tabel 2.3.

Pada tabel tersebut pertama-tama lihat kelas stabilitas selama waktu siang hari. Ketika sinar matahari kuat dan kecepatan rendah maka diprediksikan terjadi pemanasan

permukaan tanah maksimum, meningkatkan temperatur pada lapisan udara terbawah dan menciptakan kondisi tidak stabil.

Tabel 2.3. Pengaruh meteorologi terhadap stabilitas
 Sumber : Jeremy Colls, 2002

Kecepatan Angin (m/s)	Siang hari Radiasi sinar matahari (W/m ²)			Malam hari (banyaknya awan)		
	Kuat (>590)	Sedang (300-590)	Lemah (<290)	8	4 - 7	0 - 3
< 2	A	A-B	B	D	G	G
2-3	A-B	B	C	D	E	F
3-5	B	B-C	C	D	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D	D

Ketika sinar matahari berkurang, efek ini menjadi berkurang dan kesetabilan menjadi menurun. Ketika kecepatan angin meningkat, pencampuran mekanis pada arah vertikal akan mengatasi efek *buoyancy*, dan karena terjadinya pertukaran yang kuat pada parcel udara di DLR menciptakan ELR netral (Klas D). Pada malam hari, pelepasan panas radiasi dari tanah dan proses pendinginan tanah seringkali terjadi pada angkasa yang cerah (tidak berawan). Sejalan dengan mendinginnya tanah, maka lapisan udara terbawah menjadi stabil (kelas G). Semakin udara berawan dan kecepatan angin meningkat, maka kondisi dengan kelas D kemungkinan akan terjadi kembali.

2.1.7. Angin

2.1.7.1 Arah angin

Arah angin dispesifikasikan sebagai arah dari mana angin berhembus. Arah angin diidentifikasi ke dalam 16 titik seperti yang terdapat pada kompas, atau ke dalam derajat sudut sesuai dengan arah jarum jam yang dimulai dari arah utara. Keenam belas titik pada kompas tersebut adalah :

North (N)	Nort North West (NNW)
North West (NW)	West North West (WNW)
West (W)	West South West (WSW)
South West (SW)	South South West (SSE)
South (S)	South South East (SSE)
South East (SE)	East South East (ESE)
East (E)	East North East (ENE)
North East (NE)	North North East (NNE)

Angin SW artinya angin berhembus dari arah South West dengan sudut antara $213,75^{\circ}$ sampai dengan $236,25^{\circ}$.

Arah angin jarang yang bersifat tetap baik untuk jangka lama atau pendek. Nilai rata-rata arah angin dalam periode satu atau beberapa jam dapat ditentukan dari data meteorologi. Nilai rata-rata arah angin untuk jangka waktu medium ini adalah penting untuk diketahui untuk menentukan area mana di permukaan yang terekspose oleh emisi dari suatu sumber. Variasi arah angin untuk jangka waktu pendek (dalam periode detik atau menit) dapat disebabkan oleh adanya turbulensi, dan nilainya dapat disuperimposkan ke nilai arah angin jangka waktu medium. Variasi jangka pendek tidak hanya secara horizontal tapi juga memiliki komponen vertikal yang

mempengaruhi dispersi turbulensi. Besarnya variasi horizontal dan vertikal dipengaruhi oleh stabilitas atmosfer, yang artinya bergantung pada keseimbangan antara *adiabatic lapse rate* (ALR) dan *environmental lapse rate* (ELR).

2.1.7.2. Kecepatan Angin

Kecepatan angin diukur dalam satuan m/s. Kecepatan angin penting pada proses dispersi di atmosfer dalam 3 hal, yaitu

- Emisi disebarkan dan didilusikan oleh faktor yang proporsional terhadap kecepatan angin yang berhembus melewati sumber emisi.
- Turbulensi mekanis, yang menambah pencampuran dan dilusi, disebabkan oleh adanya angin.
- Penyebab buoyancy akan diperkecil efeknya dengan semakin besarnya kecepatan angin, sehingga menjaga ketinggian penyebaran zat polutan pada ketinggian disekitar ketinggian zat saat dilepaskan.

Pengaruh friksi pada permukaan tanah adalah akan menurunkan kecepatan angin, sehingga kecepatan di bagian atas lebih tinggi dari pada di bagian bawah. Perubahan kecepatan angin terhadap ketinggian dapat diaproksimasikan dengan persamaan pangkat, sebagai berikut,

$$U(z) = U_0 (z/z_0)^P \quad (2.21)$$

dimana,

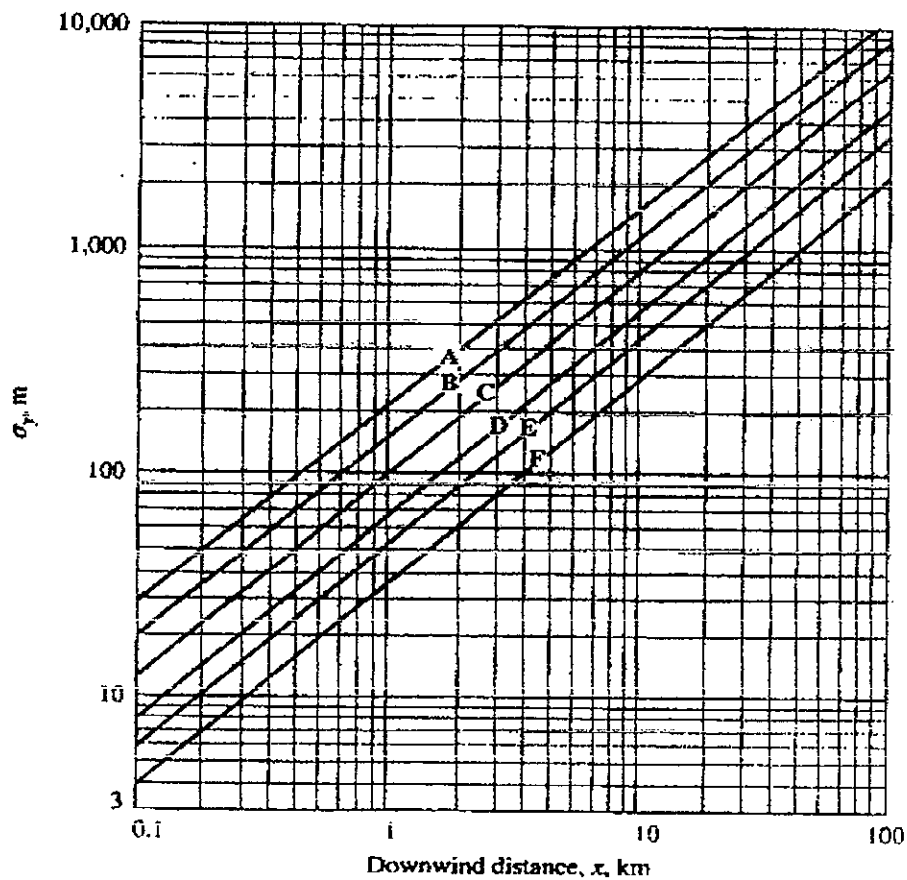
$$U(z) = \text{kecepatan angin pada ketinggian } z$$

U_0 = kecepatan angin yang diukur dengan anemometer pada ketinggian z_0 .

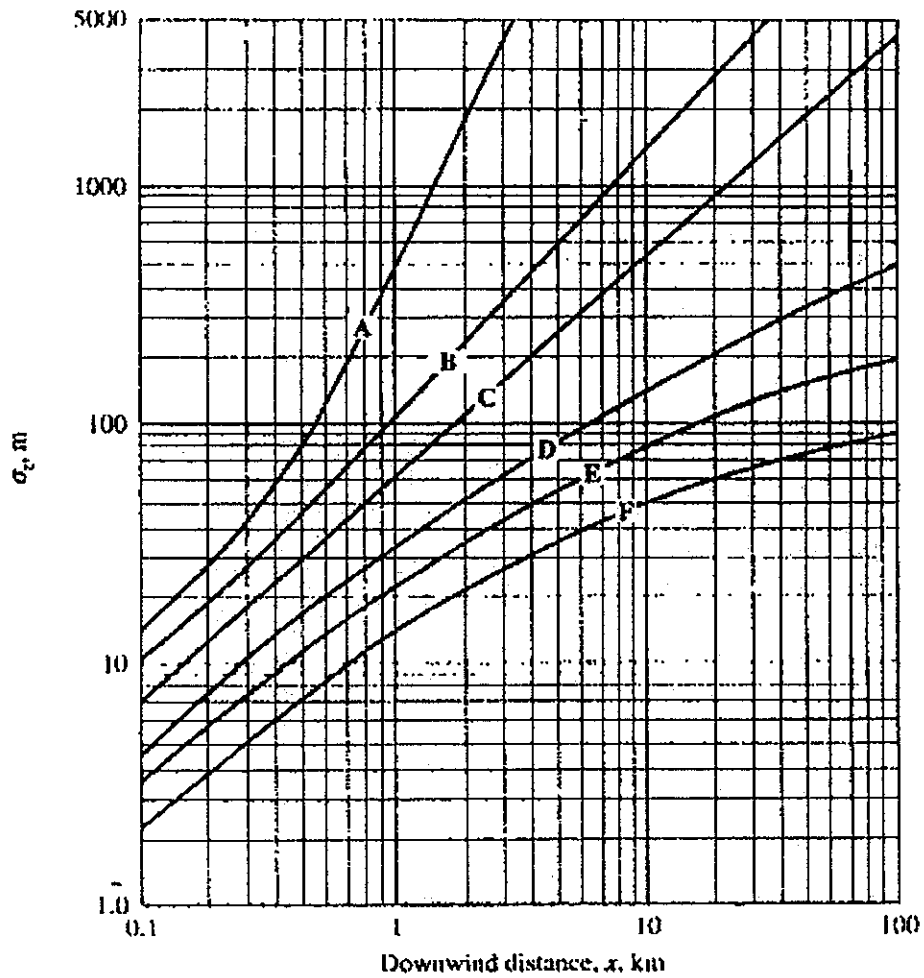
p = eksponen yang nilainya bervariasi tergantung pada stabilitas atmosfer

2.1.8. Parameter-parameter Dispersi Sumber Garis

Pada model dispersi Gaussian terdapat parameter koefisien dispersi atau standar deviasi sebaran pada arah y dan z atau sering juga disebut dengan koefisien dispersi σ_y dan σ_z .



Gambar 2.8. Koefisien dispersi horizontal σ_y sebagai fungsi dari jarak titik di bagian hilir arah angin ke sumber untuk berbagai kelas stabilitas

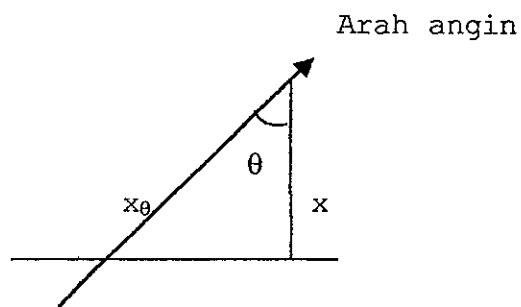


Gambar 2.9. Koefisien dispersi vertical σ_z sebagai fungsi dari jarak titik di bagian hilir arah angin ke sumber untuk berbagai kelas stabilitas

Parameter σ_y dan σ_z diekspresikan sebagai fungsi dari jarak yang ditempuh oleh polutan yang berjalan dari sumbernya searah dengan arah angin untuk kelas stabilitas yang berbeda-beda. Pada gambar 2.8 dan 2.9 ditunjukkan nilai σ_y

dan σ_z yang valid untuk range $100 \text{ m} < x < 10 \text{ km}$ [Noel de Nevers, 2000].

Sejauh ini untuk dispersi dua dimensi seperti dispersi di jalan raya pada model Gaussian, arah angin adalah tegak lurus jalan raya. Sehingga jika arah angin tidak tegak lurus maka jarak dirubah menjadi jarak efektif seperti terlihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10. Jarak efektif

Jarak efektifnya menjadi,

$$x_0 = x / \cos \theta \quad (2.22)$$

dimana,

x_0 = jarak efektif, m

x = jarak tegak lurus jalan, m

θ = sudut antara arah angin dan garis tegak lurus jalan

Begitu juga untuk laju emisi Q , dirubah menjadi laju emisi efektif dengan persamaan sebagai berikut,

$$Q_0 = Q / \cos \theta \quad (2.23)$$

Dengan mengganti x dan Q pada persamaan 2.15 (*dispersi line source*) dengan nilai efektifnya, maka diperoleh konsentrasi pada jarak x .

Tapi jika dilihat pada persamaan dispersi sumber garis dan persamaan-persamaan di atas maka secara virtual arah angin tidak berpengaruh pada konsentrasi *ground level*, karena faktor $(\cos\theta)^{-1}$ muncul pada penyebut dan pembilang. Hanya saja perlu diperhatikan jika angin yang menghembuskan emisi pada arah menuju reseptor (titik yang diukur) maka konsentrasi memiliki nilai, sebaliknya jika arah angin menghembuskan emisi pada arah menjauh dari reseptor maka konsentrasinya menjadi nol.

2.1.9. Kriteria Polutan

2.1.9.1. Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa dan merupakan polutan dengan jumlah terbesar dengan jumlah emisi perkapita pertahun mencapai lebih dari 100 kg. Zat tersebut adalah sebagai produk dari pembakaran bahan bakar yang tidak sempurna. Pembakaran yang seharusnya menghasilkan CO_2 tetapi yang terjadi adalah terbentuknya CO.

Sebanyak 70% CO berasal dari sumber bergerak atau kendaraan bermotor. Gas CO memberikan efek yang negatif terhadap kesehatan, menggantikan kandungan oksigen di dalam aliran darah dan membentuk karboxyhemoglobin (COHb). Jika persentase COHb melebihi 2% maka secara temporer kesehatan

akan terganggu. Keadaan seperti ini dapat terjadi pada manusia yang melakukan aktivitasnya pada kondisi lingkungan yang memiliki level CO ambien di atas 30 ppm.

Produksi CO secara alamiah adalah sebesar 25 kali lebih banyak dibandingkan oleh sumber antropogenik. Sumber utama CO secara alamiah adalah proses oksidasi metana di troposfir. Jadi siklus CO dan CH₄ adalah saling bergantung.

2.1.9.2. Nitrogen Oksida

Yang termasuk oksida-oksida nitrogen adalah mencakup :

- NO - Nitrit Oksida
- NO₂ - Nitrogen Oksida
- NO₃ - Nitrogen Trioksida
- N₂O - Nitrat Oksida
- N₂O₅ - Nitrogen Pentoksida

Sedangkan yang termasuk dalam asam nitrogen mencakup :

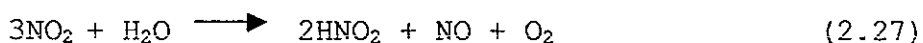
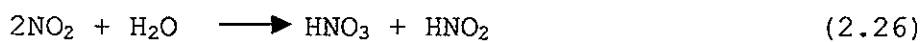
- HNO₂ - Asam Nitrat
- HNO₃ - Asam Nitrat

NO_x diproduksi melalui pembakaran bahan bakar fosil seperti bahan bakar minyak, batu bara, kayu dan gas. Termal NO_x diproduksi dari oksidasi molekul N₂ yang berasal dari udara atmosfer pada temperatur pembakaran yang tinggi dan dengan keberadaan oksigen. Kebanyakan emisi NO_x adalah dalam bentuk

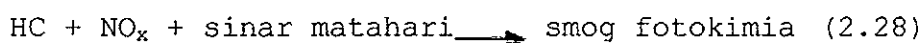
NO yang kemudian dengan cepat beroksidasi menjadi NO₂ dengan adanya oksigen O₂ atau O₃, dengan reaksi sebagai berikut,



NO₂ lebih berat dari udara dan dapat terlarut dalam air. NO₂ selanjutnya dapat kembali berdisosiasi menjadi NO, atau mengalami oksidasi membentuk HNO₃ dan HNO₂ berdasarkan reaksi sebagai berikut,



Lebih jauh lagi, NO₂ dapat bereaksi dengan campuran organik membentuk *peroxycatecyl nitrates* (PAN), atau bereaksi dengan hidrokarbon, dan dengan adanya sinar matahari membentuk *smog*, dengan reaksi sebagai berikut,



Efek yang berarti terhadap kesehatan dan lingkungan dapat terjadi akibat adanya NO_x. NO₂ menyebabkan masalah pernapasan. NO dan NO₂ dapat menyebabkan smog, dimana dapat menyebabkan penyakit paru-paru dan saluran pernapasan. PAN selama terjadinya smog dapat menyebabkan efek pada pernapasan. Ozon (terbentuk dari proses fotokimia) dapat merusak tanaman benih-benihan yang dapat menggagalkan panen.

2.1.9.3. Hidrokarbon (HC)

Hidrokarbon adalah salah satu spesies dari emisi *volatile organic compound* (VOC), yaitu senyawa yang terdiri dari karbon dan hidrogen. Senyawa hidrokarbon merupakan produk dari pengolahan minyak bumi.

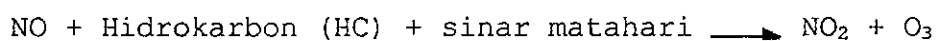
Hidrokarbon yang umum adalah metana. Gas ini berpengaruh secara signifikan terhadap efek gas rumah kaca. Dia juga berpengaruh terhadap kerusakan lapisan ozon. Hidrokarbon lainnya adalah alkana (atau olefin), yaitu zat yang reaktif tinggi ; ketika berkombinasi dengan NO_x ethylene akan menghasilkan *peroxyacetyl nitrate* (PAN) dan ozon.

Hidrokarbon lainnya yang mengancam adalah grup benzena. Walaupun tidak terlalu reaktif, tetapi beberapa jenis benzena bersifat racun (karsinogenik). Sumber utama hidrokarbon adalah berasal dari diantaranya lalu lintas, proses produksi kimia organik, transport dan pemrosesan minyak bumi, dan distribusi gas alam.

2.1.10. Fotokimia

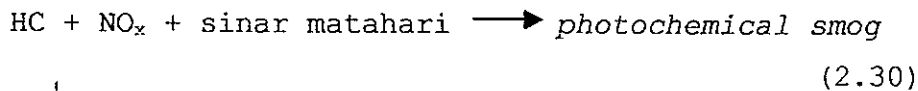
Reaksi fotokimia adalah serangkaian reaksi yang kompleks yang terjadi di atmosfer dengan bantuan radiasi sinar matahari. Salah satu reaksi utama fotokimia adalah reaksi pembentukan ozon yang merupakan oksidan fotokimia utama.

Ringkasan (*summary*) reaksi simultan fotokimia yang kompleks yang terjadi di atmosfer adalah sebagai berikut,



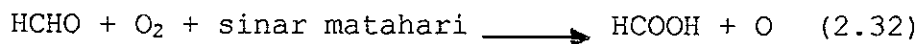
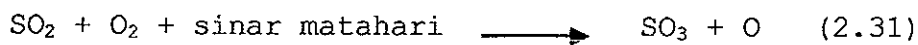
(2.29)

Lebih jauh lagi, NO_2 dapat bereaksi dengan senyawa organik untuk menghasilkan peroxyacetyl nitrat (PAN), atau dengan hidrokarbon dengan bantuan sinar matahari akan menghasilkan *smog (smoke and fog)*,



Baik NO_x maupun ozon (O_3) adalah zat yang berbahaya bagi kesehatan.

Beberapa reaksi fotokimia lainnya adalah sebagai berikut,



Dalam persamaan 2.12, Rj menyatakan laju reaksi fotokimia yang juga menyatakan laju degradasi kontaminan. Pada banyak peristiwa laju degradasi kontaminan (transformasi) dianggap memiliki kinetika reaksi tingkat satu. Sehingga laju degradasi tingkat satu dinyatakan sebagai berikut,

$$\frac{-d[C]}{dt} = k[C] \quad (2.33)$$

dimana,

k = konstanta laju reaksi/transformasi tingkat satu
(hari⁻¹)

[C] = konsentrasi kontaminan

Jika persamaan di atas diintegrasikan maka didapat,

$$C_t = C_o e^{-kt} \quad (2.34)$$

dimana,

C_t = konsentrasi pada waktu t

C_o = konsentrasi pada saat awal

2.1.11. Volume Lalu Lintas (n)

Volume lalu lintas menunjukkan tingkat kepadatan lalu lintas kendaraan bermotor pada suatu ruas jalan. Volume pada suatu jalan dapat bervariasi dari waktu ke waktu (bervariasi dari tahun ke tahun, minggu ke minggu, atau jam ke jam). Untuk mengetahui volume lalu lintas dilakukan penghitungan (*counting*) jumlah kendaraan yang melewati suatu titik pos pengamatan pada interval periode waktu tertentu. Periode waktu yang diterapkan bervariasi, dapat dari 15 menit sampai dengan satu tahun, tergantung dari tujuan penggunaan data volume tersebut. Pada proses penghitungan ini juga diidentifikasi mengenai kecepatan kendaraan, jenis kendaraan yang melintas dan arah pergerakan.

Satuan volume lalu lintas adalah satuan mobil penumpang (smp)/jam atau *passenger car unit (pcu)/hour*. Dalam penghitungan (*counting*), karena kendaraan yang lewat terdiri dari bermacam-macam tipe/kategori, sepeda motor (*motor cycle*), kendaraan penumpang (*light vehicle*), kendaraan berat

(heavy vehicle), maka untuk memperoleh volume lalu lintas dalam satuan mobil penumpang per satuan waktu dilakukan normalisasi menggunakan persamaan sebagai berikut [Directorate General of Highways, *Indonesian Highway Capacity Manual*, 1993],

$$n = n_{LV} \times f_{LV} + n_{HV} \times f_{HV} + n_{MC} \times f_{MC} \quad (2.35)$$

dimana,

n = volume lalu lintas, smp/jam

n_{LV} = jumlah kendaraan yang lewat per jam untuk jenis kendaraan *light vehicle*, yaitu kendaraan bermotor beroda empat (termasuk *car passanger*, oplet, mikro bus, *pick-up* dan mikro truk sesuai dengan sistem klasifikasi Bina Marga)

n_{HV} = jumlah kendaraan yang lewat per jam untuk jenis kendaraan *Heavy vehicle*, yaitu kendaraan bermotor beroda lebih dari empat (termasuk bus, truk bergardan dua, truk bergardan tiga dan truk gandeng sesuai dengan sistem klasifikasi Bina Marga)

n_{MC} = jumlah kendaraan yang lewat per jam untuk jenis kendaraan *Motor Cycle*, yaitu sepeda motor beroda dua atau tiga sesuai dengan sistem klasifikasi Bina Marga)

f adalah nilai faktor konversi dari berbagai tipe kendaraan berkaitan dengan pengaruhnya terhadap pencemaran udara, yang dibandingkan dengan kendaraan penumpang, dimana memiliki nilai sebagai berikut,

Tabel 2.4. Faktor konversi untuk volume kendaraan
 Sumber : I.G.W. Samsi Gunarta, et. al, 1999

No	Jenis kendaraan	F	Kapasitas ruang bakar (cc)
1	Kendaraan berat (HV)	1,54	>2800
2	Kendaraan penumpang (LV)	1	750 - 4300
3	Sepeda motor	0,6	<200

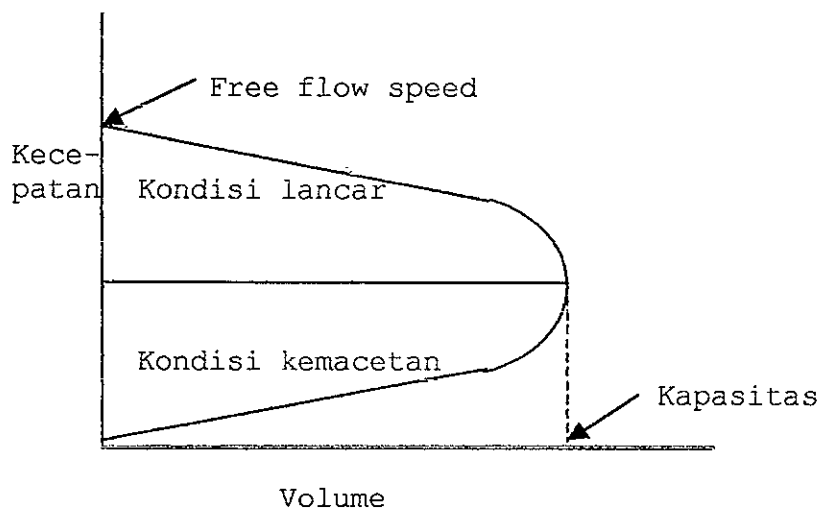
Dalam kaitannya dengan tingkat pencemaran udara variasi volume selama satu hari dalam basis jam-jaman adalah penting untuk diukur, hal ini untuk mengetahui kaitannya dengan variasi kualitas udara dalam satu hari.

2.1.12. Karakteristik Hubungan Kecepatan-Volume

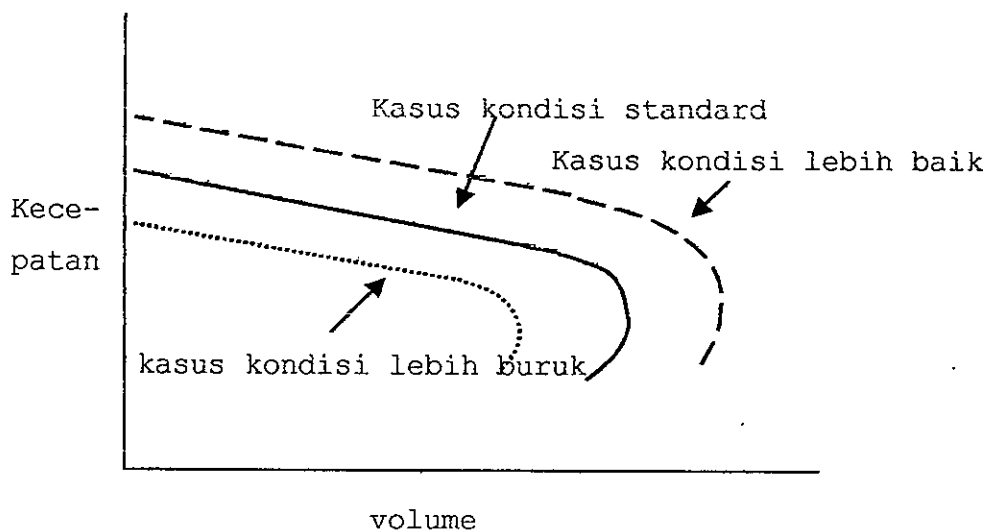
Salah satu bentuk karakteristik lalu lintas adalah hubungan antara volume lalu lintas dengan kecepatan rata-rata semua kendaraan yang lewat. Pada kondisi lalu lintas dengan volume yang sangat rendah, interaksi antar kendaraan adalah kecil, sehingga pengemudi cenderung membawa kendaraannya dengan kecepatan setinggi yang memungkinkan. Kecepatan maksimum diperoleh pada kondisi volume mendekati nol, dan ini disebut dengan *free flow speed*.

Karakteristik hubungan kecepatan-volume menunjukkan bahwa kecepatan akan berkurang sejalan dengan meningkatnya volume. Meningkatnya volume ini berlanjut hingga mencapai titik volume maksimum atau mencapai kapasitas jalan. Pada kondisi dimana volume mendekati kapasitas jalan maka penambahan volume yang sedikit akan memberikan laju penurunan kecepatan

yang besar. Daerah dengan variasi kecepatan/volume ini merupakan daerah dengan kondisi lalu lintas normal atau lancar (*uncongested flow*). Ketika titik volume maksimum dilewati seiring dengan terus bertambahnya kepadatan kendaraan (*density*) maka baik volume lalu lintas dan kecepatan rata-rata semakin menurun, bahkan dapat tercapai dimana kecepatan dan volume menjadi nol. Daerah dengan variasi kecepatan/volume ini disebut dengan kondisi kemacetan (*congested flow*). Hubungan kecepatan-volume ini dapat dilihat pada ilustrasi gambar 2.11.



Gambar 2.11. Karakteristik volume-kecepatan.



Gambar 2.12. Karakteristik volume-kecepatan untuk kasus kondisi standard dan tidak standard

Karakteristik hubungan volume dengan kecepatan ini didefinisikan pada kondisi kasus standard untuk suatu tipe ruas jalan tertentu. Yang dimaksud standard disini adalah kondisi geometrik standard dan kondisi karakteristik lingkungan tertentu. Jika karakteristik jalan menjadi lebih baik dari kondisi standard (misalnya lebar jalurnya menjadi lebih besar dari pada lebar jalan normal) maka kapasitas jalan semakin besar, pada gambar kurva garisnya berpindah ke sebelah kanan, atau kecepatan menjadi semakin tinggi untuk volume yang sama. Jika karakteristik jalan menjadi bertambah buruk dibandingkan kondisi standard (misalnya terjadi peningkatan aktivitas komersial di pinggir jalan) maka kurva akan berpindah ke sebelah kiri, kapasitas menjadi menurun dan kecepatan pada volume yang sama menjadi menurun. Hal ini diilustrasikan pada gambar 2.12.

Variabel-variabel perjalanan yang mempengaruhi karakteristik kecepatan-volume dapat diklasifikasikan berdasarkan faktor-faktor berikut ini :

- Faktor klasifikasi jalan : sebagai contoh, jalan arteri yang banyak digunakan untuk pengemudian perjalanan jarak jauh akan memiliki kecepatan rata-rata lebih tinggi dibandingkan dengan jalan untuk perjalanan lokal.
- Faktor fisik jalan : geometrik jalan (lebar, panjang, alinyemen), penerapan alat pengatur lalu lintas dan kekasaran permukaan jalan.
- Faktor hambatan samping : aktivitas komersial (pasar, perkantoran, pertokoan) dan area parkir di pinggir jalan.
- Faktor cuaca : siang, malam, hujan dan cerah.

Kondisi variabel-variabel yang mempengaruhi pergerakan kendaraan tersebut berbeda-beda untuk tiap-tiap ruas jalan, oleh karena itu untuk jalan yang berbeda akan memiliki kurva kecepatan-volume yang berbeda pula.

2.1.13. Karakteristik Kendaraan Operasional

Karakteristik kendaraan yang beroperasi di kota-kota besar di Indonesia sangat beragam. Keragaman ini muncul pada jenis atau tipe sedan, jeep, minibus, van (kendaraan penumpang), truk, bus dan sepeda motor. Demikian pula dengan variasi cc (kapasitas ruang bakar) dan usia kendaraan dari setiap jenis.

Rentang kapasitas ruang bakar kendaraan operasional di Indonesia sangat lebar pada kategori kendaraan penumpang. Tercatat untuk tipe ini, kapasitas pembakaran kendaraan yang umum dipergunakan di Indonesia dimulai dari 500 cc hingga 4350 cc [I.G.W. Samsi Gunarta, et. al, 1999]. Sepeda motor, bervariasi dari 80 hingga 200cc, dengan modus 100 cc. Truk untuk antar kota lebih bervariasi 2800 sampai dengan 8000 cc. Sedangkan pada daerah urban umumnya berkisar pada 2800 sampai dengan 6000 cc. Demikian pula dengan bus, rentang kapasitas ruang bakar (cc) bus dalam kota relatif lebih rendah dari pada bus antar kota.

2.1.14. Metode Simulasi

Metoda simulasi adalah mengupayakan untuk simulasi kerja atau proses yang ada di dalam sistem menggunakan unsur-unsur terstruktur dan hubungan matematik yang menggambarkan secara rinci proses dan interkoneksi antar sub-sistem.

Untuk simulasi ada 4 komponen yang diperlukan :

1. Data lapangan;
2. Perumusan model matematika;
3. Konstanta laju dan koefisien kesetimbangan untuk model;
4. Kriteria statistik kinerja model.

Pada model simulasi validasi dan verifikasi model membutuhkan data lapangan. Pada umumnya membutuhkan 2 set data lapangan, 1 set untuk validasi model dan 1 set untuk verifikasi model. Validasi model merupakan perbandingan antara hasil simulasi dengan pengukuran lapangan. Koefisien

dan konstanta laju ditentukan berdasarkan teori dan kajian laboratorium.

Pembandingan secara statistik variabel tergantung (*state variable*) antara hasil model dengan pengukuran lapangan diterima bila simpangan masih dalam level toleransi yang dapat diterima, maka model dinyatakan telah divalidasi. Bila simpangan tidak diterima maka dilakukan perubahan pada koefisien model dan konstanta laju untuk mendapatkan model simulasi yang dapat diterima. Verifikasi model merupakan pembandingan secara statistik hasil simulasi dengan himpunan ke-2 data lapangan. Kriteria kinerja model adalah rata-rata kuadrat simpangan dari residu (beda antara pengukuran lapangan dengan hasil model).

Metode simulasi memiliki kelebihan dibandingkan dengan metode eksperimental dalam hal sebagai berikut :

1. Metode eksperimental memerlukan lebih banyak data lapangan dibandingkan dengan metode simulasi.
2. Metode simulasi dapat diterapkan di lokasi lain, sedangkan metode eksperimental jika untuk lokasi lain maka perlu eksperimen untuk lokasi tersebut.

2.2. Originalitas Penelitian

Sepanjang survey yang telah penulis lakukan, belum ditemukan studi tentang hubungan volume lalu lintas terhadap pencemaran udara, khususnya untuk ruas jalan di kota Bandung, dimana dalam metode penelitiannya memberikan

penekanan pada validasi atau kalibrasi model dispersi kualitas udara.

Penelitian sebelumnya pernah dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah pada tahun 1995 yang berjudul *Kebisingan dan Pencemaran Udara oleh Lalu Lintas* [G. Gunawan et.al, 1995]. Seperti tercantum dalam laporan penelitiannya, fokus dari penelitian ini adalah membandingkan intensitas atau konsentrasi polutan yang diperoleh melalui hasil pengukuran dengan hasil perhitungan menggunakan model-model prediksi kualitas udara (model Gauss dan model Walter). Pada penelitian ini model prediksi yang diterapkan tidak dilakukan validasi. Sehingga hal ini yang membedakan dengan penelitian yang penulis lakukan.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian mencakup hal-hal sebagai berikut:

- Yang menjadi penekanan pada studi ini terutama adalah bagaimana pengaruh volume lalu lintas dan emisi terhadap kondisi pencemaran udara yang terjadi pada suatu ruas jalan. Pemilihan penekanan ini didasarkan pada bahwa penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan besarnya pengaruh volume dan emisi lalu lintas pada konsentrasi polutan udara ambien. Oleh karena itu validasi pada model dispersi diutamakan pada modifikasi variabel emisi kendaraan.
- Variasi volume lalu lintas dilihat untuk jangka waktu satu hari.
- Sebagai sampel parameter polutan yang akan ditelaah adalah gas karbonmonoksida (CO) dan Nitrogen Oksida, yaitu parameter yang berbahaya bagi kesehatan manusia. Karbonmonoksida dan Nitrogen Oksida adalah gas yang bersifat mudah menyebar dan stabil atau dengan kata lain laju oksidasi CO dan NO_x terutama di lapisan atmosfer bagian bawah adalah sangat lambat [L. H. Watkins, 1981]. Sehingga sifat penyebaran gas CO ini sesuai dengan asumsi yang terdapat pada model dispersi Gauss.

3.2. Prosedur Pengerjaan

Prosedur pengerjaan yang akan dilaksanakan adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan data lalu lintas
2. Pengumpulan data kualitas udara
3. Pengumpulan data emisi kendaraan
4. Penetapan model yang akan divalidasi, dalam hal ini model dispersi Gaussian
5. Penetapan hubungan model emisi kendaraan dan volume lalu lintas
6. Membandingkan konsentrasi antara hasil pengukuran dengan perhitungan
7. Validasi model dispersi dengan cara penghitungan

Pada gambar 3.1 ditunjukkan alur pemikiran yang menjadi arah menggunakan metode regresi

3.3. Instrumen Penelitian

Pengambilan data atau sampel dilakukan dengan Mobil Unit Laboratorium Polusi Udara (MULPU) dan alat pendukung lainnya. Peralatan MULPU menggunakan standar Japan International Standar (JIS), PP Nomor 41 tahun 1999 tentang pengendalian Pencemaran Udara dan KEP 03/MENKLH/1/1991 tentang Baku Mutu Pencemaran Udara.

Untuk pengujian kadar Nox di udara, peralatan yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Tabung penyerap yang seluruhnya terbuat dari bahan gelas ukuran normal
- Pompa udara dengan kecepatan alir sampai 50 liter/menit, ketelitian 0,01 liter/menit
- Pengukur kecepatan aliran udara (0-1) liter/menit
- Anemometer yang mempunyai ketentuan sebagai berikut
 - Batas ukuran (0-1)m, (0-30) m
 - Suhu (0-80)°C, ketelitian 2 %, tenaga AC 100 volt atau DC 12 volt, ukuran 86 mm x 123 mm x 180 mm
- Buret dengan berbagai ukuran 25 ml, 50 ml dan 100 ml.
- Labu dengan berbagai ukuran 25 ml, 50 ml dan 100 ml
- Gelas ukuran 2 liter atau lebih
- Spectrophotometer :
 - Batas pengukuran : (380 - 700) nm
 - Tenaga : baterai kering 6 volt
- Flow meter
 - Batas pengukuran : (0,05 - 2) liter/menit
- Tiang setinggi 7,5 m untuk kedudukan sampel pada berbagai penelitian

Pengukuran karbon monoksida (CO) dilakukan dengan alat analyzer CO dengan model alat GIA-72M menggunakan metode NDIR (Non-Dispersive Infra Red). Secara umum prinsip kerjanya adalah penyerapan spectrum infra merah oleh molekul CO pada panjang gelombang tertentu (sekitar 4,5 - 5 μm) dimana besarnya penyerapan sebanding dengan konsentrasi karbon monoksida. Energi yang datang dari sebuah sumber pencemar di dalam daerah infra merah dipilah menjadi dua berkas sinar parallel dan diarahkan menuju sel-sel referensi dan sel sampel. Kedua berkas sinar tersebut lewat melalui sel-sel yang setara masing-masing berisi detektor selektif

dan CO. CO di dalam sel akan mengabsorbsi radiasi yang akan menurunkan temperatu dan tekanan di dalam sel detector sehingga akan menggerakkan diafragma. Pergerakan ini akan dideteksi secara elektronik dan diampifikasi untuk mendapat sinyal keluarnya. Adapun spesifikasi alat CO analyzer adalah sebagai berikut :

Nama : Atmospheric CO analyzer
Model : GIA - 72
Fungsi : CO
Metod : Non-Dispersive Infra Red; 0 ppm - 50 ppm
Jarak ukur/satuan : 0 ppm-10 ppm;0 ppm-20 ppm;0 ppm-50 ppm
Luaran : Konsentrasi saat itu
Konsentrasi rata-rata perdetik, menit,
jam

3.4. Metode Analisis

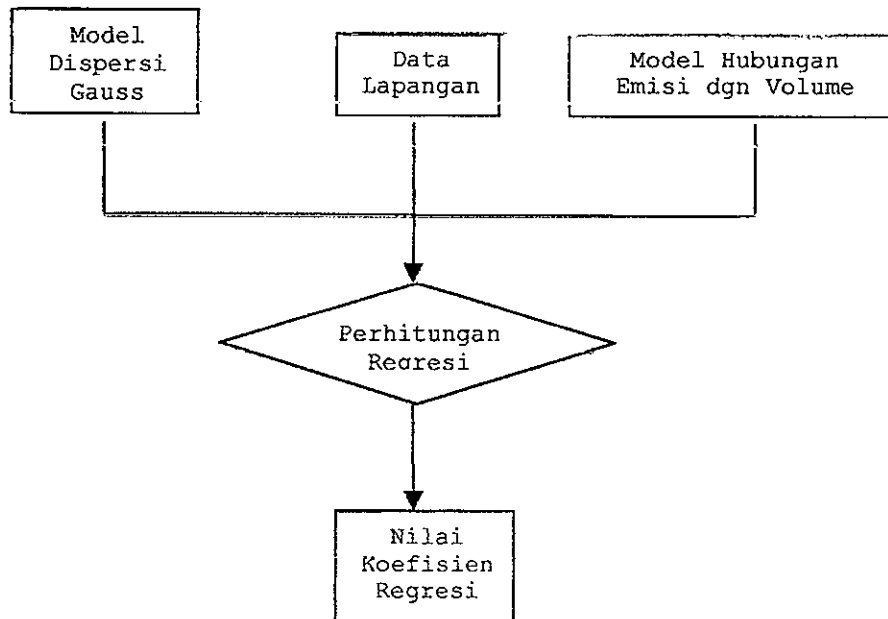
Teknik analisis yang dilakukan pada dasarnya terdiri dari dua bagian, yaitu yang pertama adalah melakukan analisis terhadap data hasil pengukuran, dan yang kedua adalah melakukan validasi terhadap model dispersi Gaussian untuk sumber garis.

Analisa data pengukuran dilakukan melalui langkah sebagai berikut :

- Menentukan variasi volume lalu lintas dan hubungan volume-kecepatan
- Menentukan besarnya emisi lalu lintas yang dihasilkan untuk volume tertentu
- Menentukan variasi konsentrasi polutan

- Menentukan korelasi antara volume lalu lintas terhadap tingkat konsentrasi polutan yang terjadi

Validasi model dispersi Gaussian dilakukan dengan alur pemikiran seperti ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir alur pemikiran proses validasi model

3.5. Metode Validasi

Dalam melakukan validasi model pertama-tama ditetapkan model dispersi yang akan divalidasi, dalam hal ini adalah model dispersi Gauss, yang persamaannya adalah sebagai berikut (lihat persamaan 2.15),

$$C_j(x,z) = \frac{2Q_j/L}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_z} \exp(-z^2/2\sigma_z^2) \quad (3.1)$$

Sedangkan faktor volume lalu lintas (n) disubstitusikan ke dalam persamaan dispersi dengan mengeliminasi laju emisi Q (g/s) menggunakan persamaan sebagai berikut (lihat persamaan 2.18),

$$Q = n \cdot q \cdot L \quad (3.2)$$

Lalu model dispersi didekati sebagai persamaan linier sebagai berikut,

$$y = a \cdot x \quad (3.3)$$

Dan selanjutnya dengan menggunakan data pengukuran dilakukan penghitungan dengan metode regresi untuk mendapatkan koefisien regresi "a" pada persamaan dispersi Gaussian.

3.6. Lokasi Penelitian

Sebelum dilakukan penetapan lokasi penelitian, maka dilakukan survey lapangan untuk mengetahui data apa yang terdapat di lapangan dan untuk lokasi dimana. Dalam survey ini juga dilihat peta lokasi dari ruas jalan yang akan dijadikan sampel lokasi studi. Berdasarkan survey yang telah dilakukan maka lokasi studi ditetapkan, yaitu pada salah satu ruas jalan di kota Bandung. Pertimbangannya adalah sebagai berikut,

- Hasil penelitian BAPEDAL di 5 kota besar, Bandung merupakan kota nomor dua tercemar setelah Jakarta [Moestikahadi Soedomo].
- Jalan Soekarno-Hatta merupakan jalan utama dengan klasifikasi arteri primer, panjang jalan 6 km
- Jalan Soekarno-Hatta mengalami pembebanan arus lalu lintas dan pencemaran yang cukup tinggi

Tabel 3.1. Pencemaran udara dan volume lalu lintas di beberapa ruas jalan di kota Bandung
 Sumber: Puslitbang Prasarana Teknologi Jalan dan BPLHD Kotamadia Bandung, 2002.

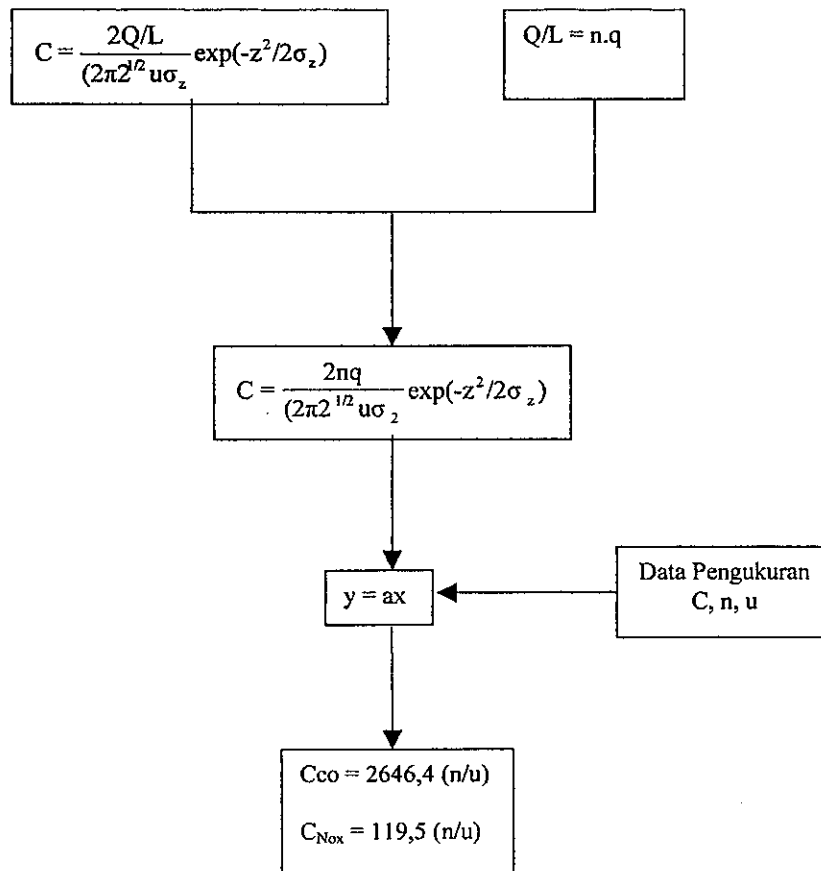
Ruas jalan	Nox (ppm)	CO (ppm)	SO ₂ (ppm)	Volume (kend./jam)
Soekarno-Hatta	0,0556	1,827	0,0420	4549
Margahayu raya	0,0521	1,400	0,0282	1011
Elang raya	0,0485	1,885	0,0625	1938
Setiabudhi	0,0420	1,365	0,0290	4390

Pada tabel 3.1 ditunjukkan kondisi pencemaran udara dan volume lalu lintas di beberapa ruas jalan di kota Bandung, dimana jalan Soekarno-Hatta memiliki tingkat pencemaran dan beban lalu lintas yang cukup tinggi.

Pada gambar 3.2 ditunjukkan lokasi jalan Soekarno-Hatta di kota Bandung. Jalan terletak di bagian selatan kota Bandung sebagai jalan by pass yang menghubungkan antara wilayah bagian barat dengan bagian timur kota.

3.7. Diagram Alir dalam Metode Regresi

Dalam validasi model diagram alir untuk melakukan regresi adalah ditunjukkan dalam gambar 3.3



Gambar 3.3 Diagram alir regresi dalam validasi model

3.8. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan untuk prediksi kualitas udara terdiri atas :

1. Kualitas udara ambient atau konsentrasi polutan
2. Emisi kendaraan
3. Volume lalu lintas
4. Kecepatan dan arah angin dan
5. Kondisi cuaca
6. Komposisi tipe kendaraan

Sedangkan sumber untuk memperoleh data ini adalah dari pengamatan lapangan dan instansi-instansi seperti BPLHD di propinsi, Dinas Perhubungan, Dinas Lalu lintas dan Angkutan Jalan Raya, Puslitbang Prasarana Transportasi Dep. Kimpraswil dan instansi lainnya.

Data mengenai volume lalu lintas, konsentrasi polutan dan meteorologi yang digunakan sebagai studi kasus dalam studi ini merupakan data hasil pengukuran (tahun 2003) yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Prasarana Transportasi, Departemen Permukiman dan Prasarana Wilayah (Dep. Kimpraswil). Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan Mobil Unit Laboratorium Polusi Udara (MULPU) dan alat pendukung lainnya.

BAB IV

HASIL PENELITIAN

4.1. Rona Lingkungan

4.1.1. Kondisi Jalan Soekarno-Hatta

Dalam studi ini sebagai sampel, data pengukuran yang digunakan adalah pada ruas jalan Soekarno-Hatta, Bandung. Jalan Soekarno-Hatta adalah jalan utama di kota Bandung yang berdasarkan fungsinya merupakan jalan arteri primer. Jalan terletak di bagian selatan kota Bandung yang menghubungkan bagian barat dengan bagian timur Bandung.

Titik reseptor dimana pengukuran dilakukan terletak di segmen jalan yang menjadi bagian ruas jalan Soekarno-Hatta, yaitu di pinggir jalan Soekarno-Hatta pada sisi yang berhadapan dengan terminal bus Leuwipanjang.

Secara administratif segmen jalan terletak di kelurahan Situ Sauer dan dibatasi sebelah barat oleh jalan Kopo dan disebelah timur oleh jalan Cibaduyut, sedangkan terminal bus Leuwipanjang terletak di sisi utara jalan. Data geografi lainnya dari segmen jalan ini adalah sebagai berikut :

- Topografi : datar dengan ketinggian \pm 600 m di atas permukaan laut

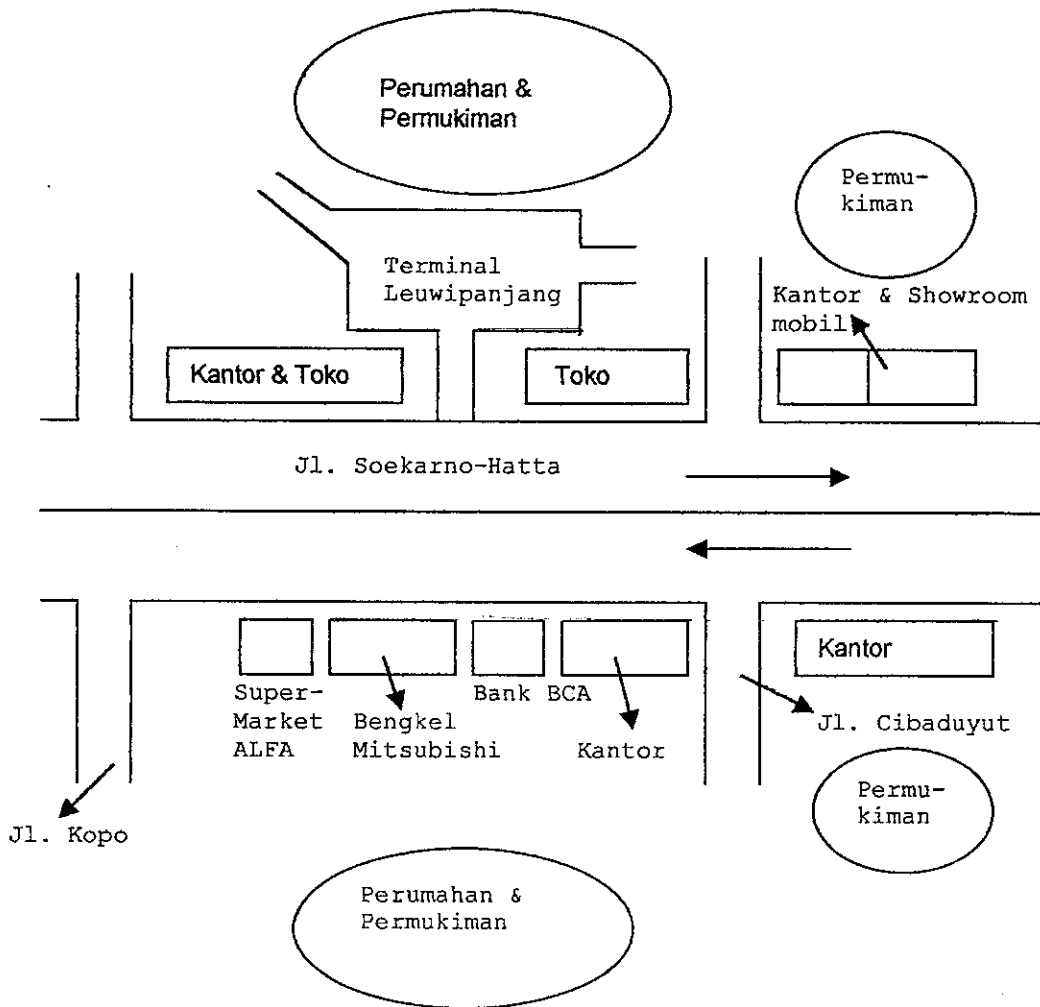
- Kemiringan : 0 - 5 %
- Aliran lalu lintas : 2 arah
- Lebar jalan : rata-rata 25 m
- Kecepatan kendaraan : rata-rata 40 m/s

Ditinjau dari tata guna lahan, tepat di pinggir jalan didominasi oleh bangunan perkantoran, jasa dan perdagangan, dimana hal ini sesuai dengan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Perda No. 2, tahun 2004 untuk kotamadya Bandung. Sehingga pada area ini tidak terdapat kawasan industri berat. Untuk lebih jelasnya lihat gambar 4.1 dan 4.2.

Di sisi utara segmen jalan terdapat terminal bus Leuwipanjang, bangunan-bangunan toko, kantor dan *showroom* mobil. Sedangkan di sisi selatan terdapat bangunan-bangunan bank BCA, kantor, bengkel mobil Mitsubishi dan supermarket ALFA.

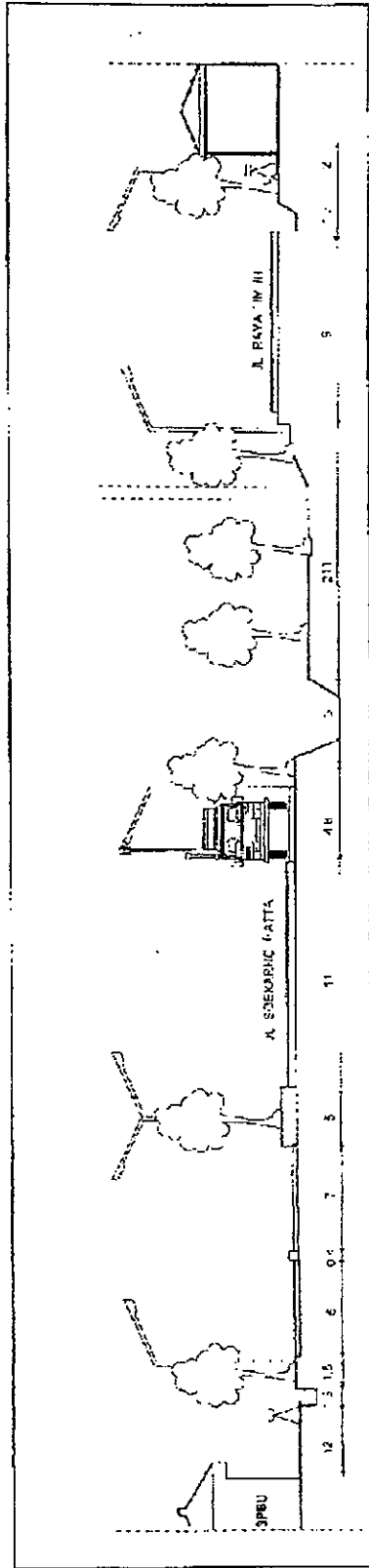
Di bagian belakang deretan bangunan yang berada di pinggir jalan terdapat area perumahan dan permukiman penduduk. Lansekap jalan tidak memiliki deretan pepohonan sebagai *barrier* untuk pencemaran udara.

Kategori kendaraan yang beroperasi disegmen jalan terdiri dari beberapa jenis. Karena disana terdapat terminal bus maka banyak melintas kendaraan umum, mulai dari bus besar, bus mikro sampai dengan angkutan kota yang menggunakan jenis kendaraan kecil minivan. Kendaraan pribadi dan sepeda motor merupakan persentase terbesar dari jenis yang lewat pada segmen jalan.



Gambar 4.1. Tata guna lahan di segmen jalan Soekarno-Hatta (terminal Leuwipanjang)

POTONGAN A-A



POTONGAN A-A

Gambar 4.3. Penampang melintang jalan dan posisi reseptor

Dengan adanya area perumahan dan permukiman maka menambah jumlah kendaraan pribadi dan sepeda motor yang beroperasi. Jenis lainnya kendaraan yang terdapat pada segmen jalan Soekarno-Hatta adalah kendaraan truk, baik dalam bentuk truk besar maupun kecil seperti kendaraan pick-up.

Pada kawasan tersebut juga terdapat kawasan industri kecil, yaitu industri pembuatan sepatu Cibaduyut. Kawasan ini cukup terkenal sehingga menjadi tempat tujuan wisata. Pada hari-hari tertentu, terutama hari libur dengan banyaknya wisatawan yang berkunjung ke daerah ini maka membuat kepadatan lalu lintas meningkat.

Pengukuran kualitas udara dan meteorologi menggunakan peralatan *mobile laboratory* untuk polusi udara. Sedangkan titik pengukuran terletak di bagian pinggir jalan seperti terlihat pada gambar 4.3 dan 4.4.

4.1.2. Kondisi Transportasi Kota Bandung

Tinjauan kondisi transportasi kota Bandung diuraikan mengingat bahwa ruas jalan Soekarno-Hatta merupakan bagian dari sistem jaringan jalan kota Bandung.

Kondisi prasarana jalan di kota Bandung dengan pertumbuhan 0,6 % per tahun sangat tertinggal dari pertumbuhan jumlah kendaraan yang melampaui 12 % per tahun. Struktur jalan di kota Bandung dari arah utara adalah jalan raya Lembang berkelas kolektor primer, dari arah barat jalan Padalarang berkelas arteri primer dan dari arah timur ada dua jalan

utama, yaitu jalan raya Ujung Berung dan jalan Soekarno-Hatta yang keduanya berkelas arteri primer.

Tabel 4.1. Kondisi dan panjang Jalan di kota Bandung

No.	Keadaan	Panjang Jalan (km)
		Tahun 2000
1	Jenis Permukaan	
	a. Hotmix	
	Jl. Nasional	40,560
	Jl. Propinsi	19,210
	Jl. Kota	358,885
	b. Penetrasi	508,925
	c. Beton	5,121
	Jumlah	932,701
2	Kondisi Jalan	
	a. Kondisi Baik	
	Jl. Nasional	38,530
	Jl. Propinsi	18,250
	Jl. Kota	591,128
	b. Kondisi Sedang	242,570
	c. Kondisi Rusak	39,823
d. Kondisi Rusak Berat	2,400	
	Jumlah	932,701
3	Wewenang Jalan	
	a. Jl. Nasional	40,560
	b. Jl. Propinsi	19,210
	c. Jl. Kota	358,885
	Jumlah	932,701

Permasalahan transportasi di kota Bandung yang paling menyolok adalah kemacetan lalu lintas. Permasalahan kemacetan di kota Bandung disebabkan oleh kenyataan bahwa Kota Bandung awalnya kota wisata sehingga karakteristik jalan di kota Bandung sempit dan pendek. Di Bandung terjadi percampuran antara jalan dalam dan luar kota. Angkot berkompetisi memperebutkan penumpang sehingga sering melanggar peraturan lalu lintas. Kendaraan sebagai lambang status, dan pelayanan transportasi publik yang buruk menyebabkan pemakaian kendaraan pribadi meningkat. Pertumbuhan perekonomian kota Bandung menyebabkan lahan semakin sempit, akibatnya badan jalan menjadi tempat aktivitas ekonomi. Lahan parkir menjadi sulit sehingga banyak terjadi parkir di tepi jalan yang mengurangi lebar badan jalan. Terminal tidak memadai sehingga badan jalan terpakai sebagai terminal liar.

4.2. Analisa Data

4.2.1. Karakteristik Lalu Lintas

Kendaraan yang beroperasi di ruas jalan Soekarno-Hatta, Bandung terdiri dari beragam jenis yang dapat dikelompokkan ke dalam beberapa kategori kendaraan, yaitu kendaraan penumpang (gabungan dari kendaraan pribadi dan kendaraan umum), bus (besar dan kecil), truk (besar dan kecil) dan sepeda motor. Di lihat dalam jumlah persentasenya maka jumlah kendaraan penumpang dan sepeda motor adalah dominan, seperti ditunjukkan pada tabel L.1 (di halaman lampiran). Persentase jumlah kendaraan berdasarkan kategorinya adalah: kendaraan penumpang = 44,2 %, bus = 1,3 %, truk = 4,6 % dan sepeda motor = 49,8 %.

Jumlah kendaraan yang beroperasi rata-rata per jam untuk semua kategori adalah 4549 kendaraan/jam.

Jumlah kendaraan yang beroperasi per satuan waktu dinyatakan dalam volume lalu lintas dengan satuan yaitu satuan mobil penumpang per jam (smp/jam). Dalam kaitannya dengan pencemaran udara dan banyaknya emisi yang dikeluarkan oleh tiap kategori kendaraan maka untuk menetapkan volume lalu lintas, yang diperhitungkan adalah hanya untuk kendaraan yang bermesin bensin, yaitu kategori kendaraan penumpang (kendaraan pribadi dan kendaraan umum) dan sepeda motor. Dengan demikian laju emisi yang diperhitungkan hanya yang berasal dari kendaraan berbahan bakar bensin. Pengandaian ini dapat diterima karena volume kendaraan bermesin diesel adalah relatif sedikit dan konsentrasi gas buangnya adalah jauh lebih kecil dibandingkan dengan kendaraan bermesin bensin. Perbandingan tingkat emisi antara mesin bensin dan mesin diesel ini dapat dilihat pada tabel 2.1. Sebagai contoh, pada mode pengoperasian jelajah (*cruising*) emisi gas buang untuk kendaraan bermesin bensin adalah 27000 ppm untuk CO dan 650 untuk NO_x, sedangkan mesin diesel mengemisikan hanya sedikit sekali (*trace*) CO dan 240 ppm NO_x.

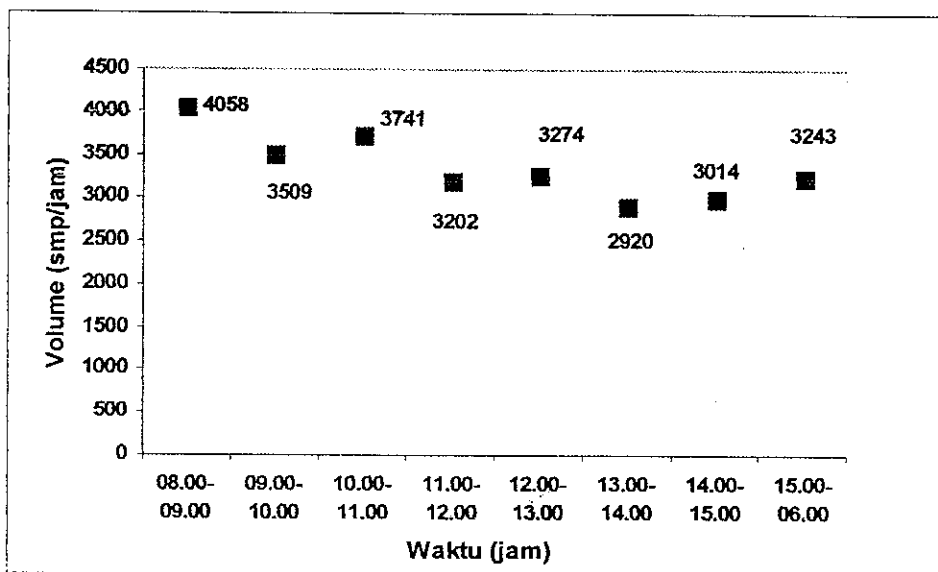
Volume dihitung menggunakan persamaan 2.35 sebagai berikut,

$$n = n_{LV} \times f_{LV} + n_{HV} \times f_{HV} + n_{MC} \times f_{MC} \quad (4.1)$$

sedangkan faktor normalisasi f_{LV} dan f_{MC} menggunakan tabel 2.4 untuk kendaraan penumpang dan sepeda motor.

Variasi volume lalu lintas untuk periode 8 jam dari jam 08.00 sampai dengan jam 16.00 dapat dilihat pada gambar 4.4.

Pada gambar 4.4 ditunjukkan volume tertinggi terjadi pada pagi hari pada jam 08.00 - 09.00 sebesar 4058 pcu/jam. Selanjutnya volume menurun hingga mencapai volume terendah pada jam 13.00 - 14.00 sebesar 2920 pcu/jam. Kemudian pada jam selanjutnya volume meningkat hingga mencapai 3243 pcu/jam pada jam 15.00 - 16.00.



Gambar 4.4. Variasi Volume Lalu lintas

Variasi volume dipengaruhi oleh tingkat aktivitas sosial masyarakat pengguna jalan. Pagi hari merupakan waktu dimulainya aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat yang diwarnai dengan kegiatan perjalanan berangkat ke tempat tujuan. Pada siang hari sekitar jam 13.00 - 14.00 mencapai

volume terendah yang menunjukkan aktivitas perjalanan masyarakat adalah terendah. Pada sore hari sekitar jam 16.00 merupakan waktu untuk perjalanan pulang setelah anggota masyarakat melakukan aktivitas kesehariannya, sehingga volume lalu lintas mengalami peningkatan kembali.

4.2.2 Emisi Lalu Lintas

Untuk menghitung emisi rata-rata per kendaraan q digunakan persamaan 2.4 dan 2.5 sebagai berikut,

$$q_{CO} = 867,92 v^{-0,8648} \quad (4.2)$$

dan

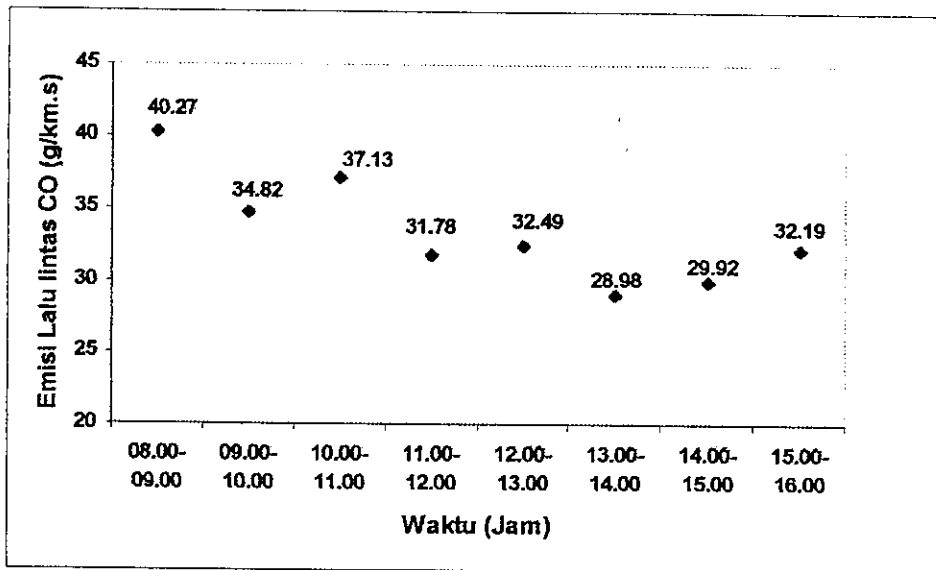
$$q_{NOx} = 0,0005 v^2 - 0,0656 v + 3,0586 \quad (4.3)$$

Dimana v adalah kecepatan kendaraan (km/jam). Sedangkan kecepatan kendaraan rata-rata yang digunakan adalah diasumsikan $v = 40$ km/jam. Jadi emisi lalu lintas pada ruas jalan untuk seluruh kendaraan dengan volume n adalah,

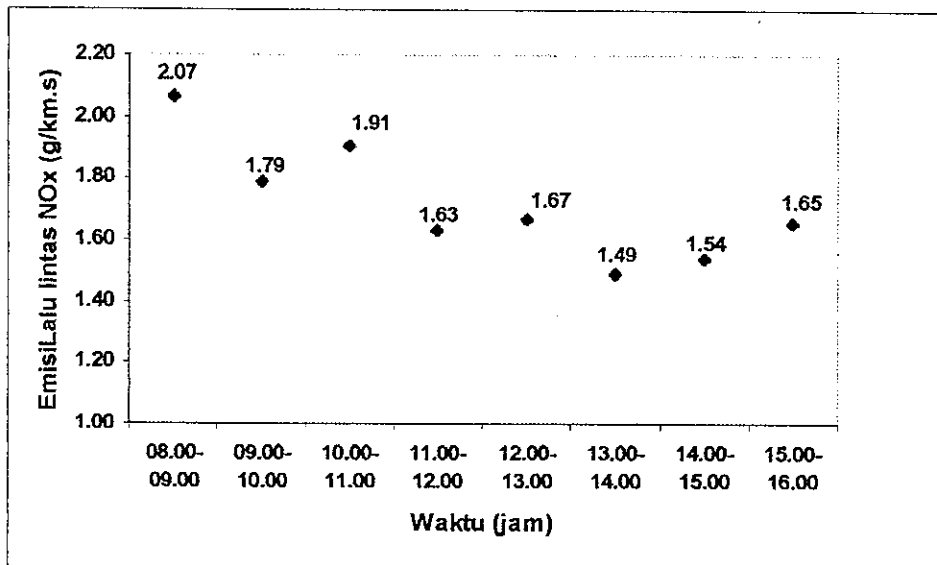
$$Q_{total} = q \cdot n \quad (4.4)$$

baik untuk CO dan NOx dengan satuan g/km.s. Hasil perhitungan emisi per kendaraan dan emisi lalu lintas tercantum dalam tabel L.3 di lampiran.

Hasil perhitungan emisi lalu lintas tercantum pada tabel L.3 di lampiran. Variasi emisi lalu lintas untuk CO dan NOx terhadap waktu, masing-masing ditunjukkan pada gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.5. Variasi Emisi CO Akibat Lalu lintas



Gambar 4.6. Variasi Emisi Nox Akibat Lalu lintas

Karena besarnya emisi lalu lintas berbanding lurus dengan volume lalu lintas, maka kurva emisi menyerupai atau identik dengan kurva volume. Emisi tertinggi adalah 40,27 g/km.s (CO) dan 2,07 g/km.s (NOx) yang terjadi pada jam 08.00 - 09.00, terendah adalah 28,98 g/km.s (CO) dan 1,49 g/km.s (NOx) yang terjadi pada jam 13.00 - 14.00, selanjutnya mendekati sore hari emisi meningkat kembali mencapai 32,19 g/km.s (CO) dan 1,65 g/km.s (NOx) pada jam 15.00 - 16.00. Peningkatan ini sejalan dengan meningkatnya volume.

Emisi dari sumber mengalami penyebaran. Semakin besar emisi maka menghasilkan konsentrasi yang semakin tinggi. Emisi lalu lintas ditimbulkan oleh kendaraan bermotor. Besarnya laju emisi pada tiap-tiap kendaraan adalah sangat beragam, yang besarnya dipengaruhi oleh bermacam-macam kondisi sebagai berikut,

- Moda pengoperasian kendaraan : moda pengoperasian dapat berupa percepatan, perlambatan atau jelajah (*cruising*) dengan kecepatan konstan. Masing-masing moda pengoperasian menghasilkan emisi yang berbeda-beda. Kendaraan yang melakukan percepatan akan membutuhkan power mesin yang lebih besar, akibatnya konsumsi bahan bakar meningkat, dan berdampak pada emisi yang dikeluarkan semakin besar.
- Kecepatan kendaraan : studi-studi empiris terdahulu menunjukkan laju emisi (g/s) per satuan panjang jalan akan meningkat pada kecepatan lebih rendah, dan laju emisi menurun dengan bertambahnya kecepatan.

- Tahun pembuatan kendaraan : hal ini berkaitan dengan cara perawatan kendaraan dan tingkat keausan dari komponen-komponen di dalam kendaraan. Secara umum dapat dikatakan bahwa semakin tua umur kendaraan, maka semakin besar emisi yang dihasilkan.
- Kondisi geometric jalan : sebagai contoh, jalan yang menanjak membutuhkan tenaga mesin yang lebih besar, sehingga menghabiskan konsumsi bahan bakar yang lebih banyak, dan hal ini menyebabkan emisi semakin bertambah.
- Alat pengendali emisi : penambahan alat pengendali emisi pada kendaraan seperti *catalytic converter* dapat menurunkan emisi polutan.

Banyaknya emisi polutan yang dihasilkan oleh kendaraan bermotor tidak terlepas dari teknologi yang diterapkan pada desain mesin kendaraan. Proses pembakaran yang tidak sempurna dapat menghasilkan polutan. Perkembangan teknologi desain ruang bakar kini banyak mengacu pada metode yang dapat menghasilkan proses pembakaran yang sempurna. Pembakaran yang tidak sempurna selain menambah emisi polutan, juga menyebabkan pembakaran sendiri (*auto ignition*) yang menimbulkan detonasi atau *knocking*, dan menurunkan efisiensi mesin. Pembakaran yang kurang sempurna dapat dikurangi dengan memperbaiki desain ruang bakar yang memungkinkan terjadinya pusaran gas campuran udara dan bahan bakar di dalam ruang bakar. Dengan berpusarnya gas maka proses pembakaran dipercepat, maka kemungkinan besar akan terjadi pembakaran yang normal dan sempurna. Hal ini akan menghindari terjadinya *knocking*. Pusaran di dalam ruang bakar menghasilkan pencampuran yang sempurna dari bahan bakar dan udara, sehingga pembakarannya terjadi sangat teratur, dengan akibat

berkurangnya kemungkinan pembakaran sendiri. Pusaran dari gas (turbulensi) dapat dicapai dengan jalan memberi bentuk saluran khusus sedemikian rupa sehingga campuran baru masuk ke dalam silinder dengan melalui katup secara berpusar. Di samping itu bila bentuk ruang bakarnya mencekung pada pistonnya, maka selama langkah kompresi pusaran tersebut dapat meningkat.

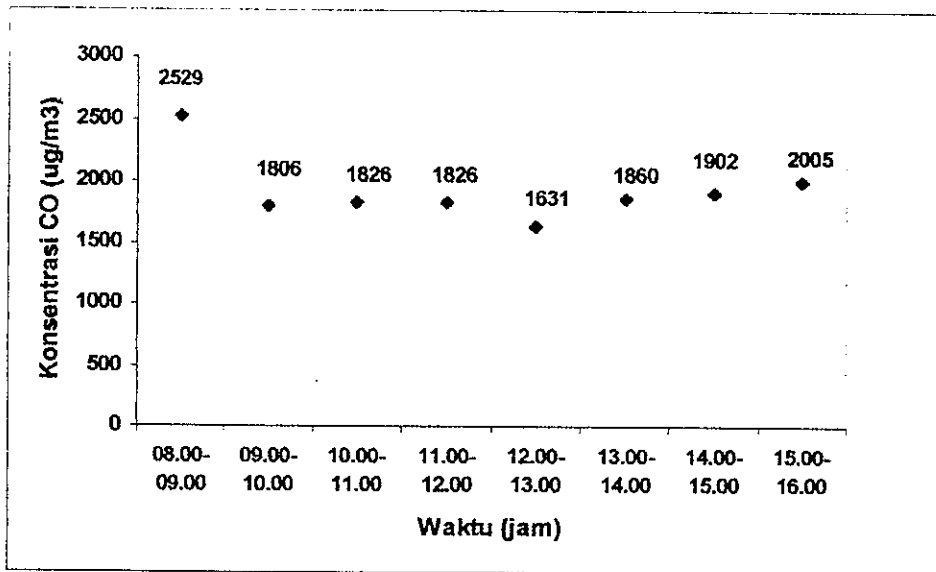
Perkembangan teknologi otomotif lainnya adalah penggunaan sistem injeksi bahan bakar motor bensin yang dikontrol secara elektronik (*Electronic Fuel Injection* atau EFI). Sistem ini menggantikan penggunaan sistem karburator. Dengan sistem ini diharapkan dapat dihasilkan rasio dan komposisi campuran bahan bakar dan udara yang sesuai dengan kondisi kerja mesin. Hasil akhir yang diharapkan adalah proses pembakaran yang sempurna dengan kadar emisi gas buang yang rendah. Pada sistem injeksi bahan bakar yang masuk ke ruang bakar tidak mengandalkan sedotan piston pada langkah isap, tetapi disemprot melalui alat injeksi atau nosel. Penyemprotan atau injeksi bahan bakar dilengkapi dengan sistem kontrol elektronik yang lebih populer disebut dengan EFI. Dalam bentuknya yang paling mutakhir EFI dilengkapi dengan sensor untuk memantau sistem kerja mesin. Dengan EFI penyemprotan bahan bakar dapat bekerja lebih akurat. Beberapa sub kerja yang semula mengandalkan prinsip kerja mekanik diganti dengan sistem elektronik (sensor-sensor elektronik). Sensor-sensor itu ada yang dipasang pada saluran gas buang untuk memantau kadar hidrokarbon (HC), dan ada juga sensor yang ditempatkan pada saluran masuk (*intake manifold*) untuk memantau langkah isap ruang bakar.

Pengurangan emisi juga dapat dilakukan dengan meningkatkan efisiensi kerja mesin. Efisiensi dapat ditingkatkan dengan meninggikan perbandingan kompresi (*compression ratio*). Tekanan akhir langkah kompresi yang berarti tekanan pembakaran menjadi lebih tinggi sehingga tekanan rata-ratanya meningkat. Dengan mempertinggi perbandingan kompresi maka efisiensi ikut meningkat sehingga menghasilkan keuntungan daya. Dengan meningkatnya efisiensi maka konsumsi bahan bakar dapat dikurangi ketika kendaraan beroperasi, dengan demikian emisi polutan dapat berkurang.

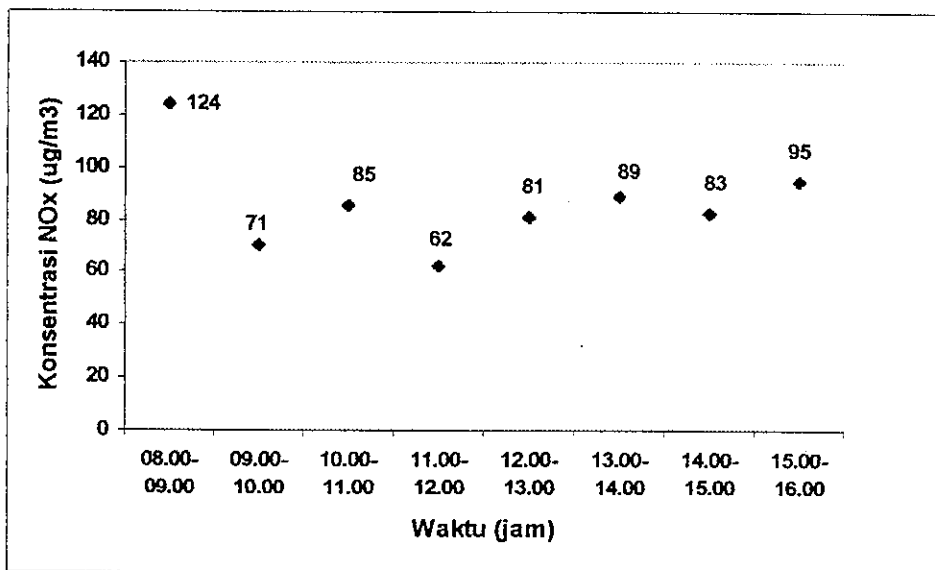
4.2.3. Konsentrasi Polutan

Pada gambar 4.7 dan 4.8 masing-masing menunjukkan variasi konsentrasi CO dan NO_x terhadap basis waktu. Nilai rata-rata konsentrasi adalah 1923 µg/m³ (CO) dan 86 µg/m³ (NO_x). Nilai konsentrasi tertinggi adalah 2529 µg/m³ (CO) dan 124 µg/m³ (NO_x), sedangkan nilai terendah adalah 1630 µg/m³ (CO) dan 62 µg/m³ (NO_x).

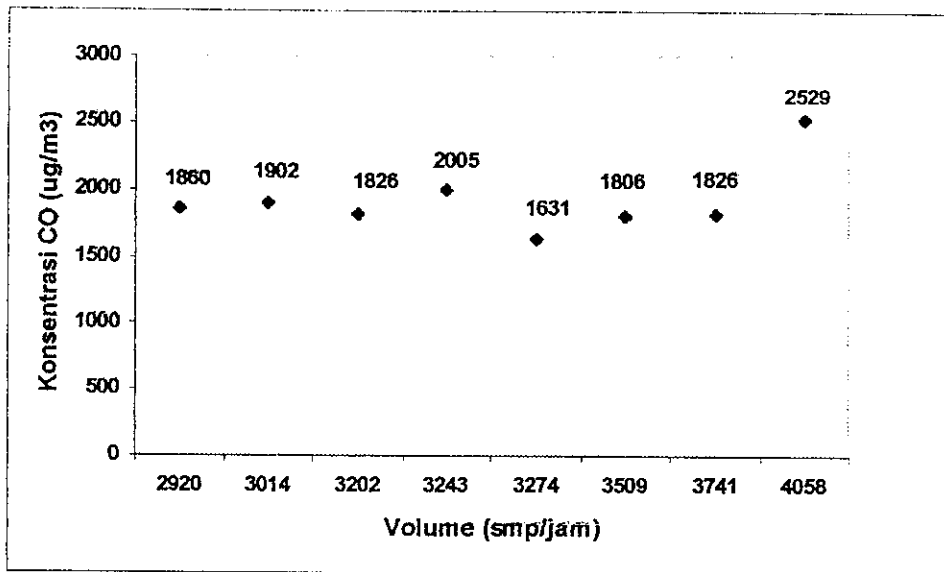
Menurut PP no. 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara, baku mutu CO untuk waktu pengukuran selama 1 jam adalah 30.000 µg/m³ dan NO_x adalah 400 µg/m³. Jadi konsentrasi CO dan NO_x dibandingkan dengan baku mutu masih di bawah nilai ambang batas baku mutu. Tapi walaupun demikian pengendalian pencemaran udara melalui pengaturan volume lalu lintas tetap perlu dilakukan agar kualitas udara tidak bertambah buruk.



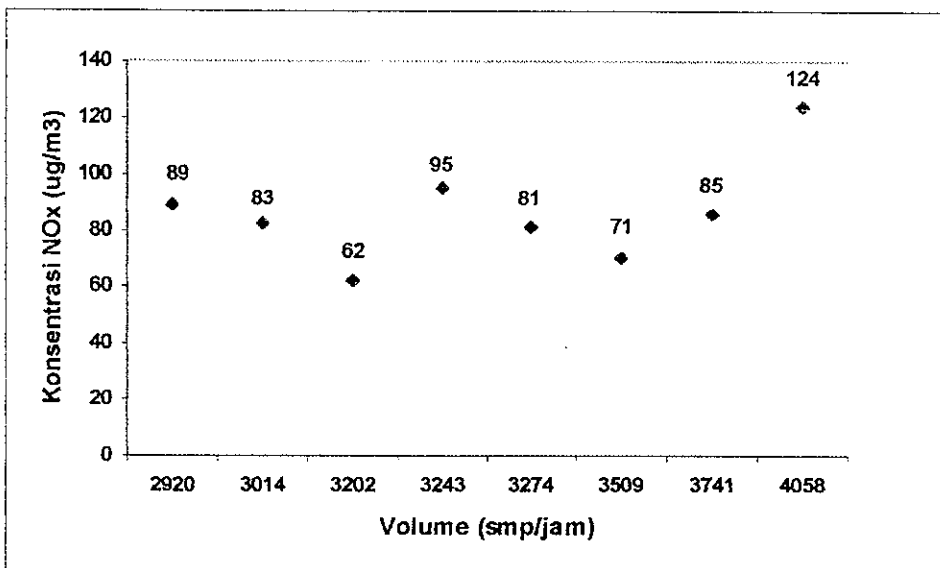
Gambar 4.7. Variasi Konsentrasi CO



Gambar 4.8. Variasi Konsentrasi NOx



Gambar 4.9. Variasi Konsentrasi CO Terhadap Volume



Gambar 4.10. Variasi Konsentrasi NOx Terhadap Volume

Gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan variasi konsentrasi terhadap volume lalu lintas. Tampak semakin tinggi volumenya, semakin tinggi konsentrasinya.

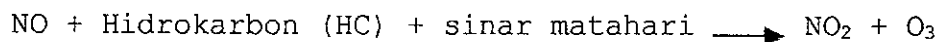
Konsentrasi polutan yang ditimbulkan oleh adanya emisi sumber kendaraan akan mengalami penyebaran (dispersi). Jadi besarnya konsentrasi di pengaruhi oleh besarnya emisi. Emisi polutan pada jalan raya ditimbulkan oleh banyaknya kendaraan yang beroperasi pada jalan tersebut. Jadi besarnya konsentrasi polutan dipengaruhi oleh banyaknya kendaraan yang melakukan perjalanan pada suatu ruas jalan.

Rona lingkungan jalan Soekarno-Hatta, Bandung ditandai dengan adanya deretan bangunan di pinggir sepanjang jalan. Kondisi jalan seperti ini membentuk ruas jalan yang menyerupai *street canyon*. *Street canyon* adalah suatu kondisi di jalan dimana pada kanan kiri jalan terdapat penghalang udara yang cukup rapat, sehingga berpengaruh terhadap gerakan udara di atas permukaan jalan. Aliran angin yang datang dari arah tegak lurus jalan akan melewati deretan bangunan. Pada bagian hilir aliran setelah melewati gedung terjadi daerah bertekanan rendah, sehingga aliran udara membentuk pusaran (*vortex*) dan terjadi turbulensi aliran. Daerah turbulensi ini terjadi tepat di atas permukaan jalan. Begitu juga lalu lintas kendaraan juga menimbulkan ulakan (*wake*) pada udara di atas permukaan jalan. Adanya turbulensi ini menyebabkan konsentrasi polutan akan tercampur secara merata dan terjadi akumulasi polutan di atas permukaan jalan. Akumulasi polutan yang terjadi menyebabkan konsentrasi bertambah tinggi, hal ini disebabkan karena adveksi aliran udara menjadi berkurang.

Proses penyebaran polutan di lingkungan jalan Soekarno-Hatta tidak terlepas dari kondisi topografi dan meteorologi kota Bandung secara keseluruhan. Dilihat keadaan topografinya kota Bandung merupakan cekungan yang dikelilingi pegunungan, merupakan sebuah wilayah yang tidak berventilasi baik. Deretan bukit dan pegunungan mengurangi proses transport polutan. Begitu juga adanya lapisan inversi di atmosfer menurunkan tingkat penyebaran. Inversi adalah lapisan udara di atmosfer yang memiliki stabilitas udara yang stabil. Keadaan seperti ini merupakan suatu potensi untuk terjadinya akumulasi polutan.

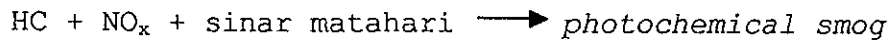
Pada siang hari dengan adanya emisi NO_x terjadi proses transformasi fotokimia. Transformasi fotokimia adalah proses reaksi kimia yang mengubah gas-gas yang diemisikan sumber menjadi zat polutan yang membahayakan. Reaksi fotokimia adalah serangkaian reaksi yang kompleks yang terjadi di atmosfer dengan bantuan sinar matahari. Transformasi mengubah pencemar primer menjadi unsur gas atau partikulat bentuk lain yang dikenal sebagai pencemar sekunder. Salah satu reaksi utama fotokimia adalah reaksi pembentukan ozon yang merupakan oksidan fotokimia utama.

Ringkasan (*summary*) reaksi simultan fotokimia yang kompleks yang terjadi di atmosfer adalah sebagai berikut,



Lebih jauh lagi, NO₂ dapat bereaksi dengan senyawa organik untuk menghasilkan peroxyacetyl nitrat (PAN), atau dengan

hidrokarbon dengan bantuan sinar matahari akan menghasilkan *smog (smoke and fog)*,



Baik NO_x maupun ozon (O_3) adalah zat yang berbahaya bagi kesehatan.

4.2.4. Stabilitas Atmosfir

Stabilitas atmosfir menurut klasifikasi Pasquill ditentukan berdasarkan banyaknya radiasi matahari yang memancar ke permukaan bumi dan kecepatan angin. Jam-jam pengamatan seperti yang terlihat pada table L.4 (di lampiran) besarnya radiasi matahari dan kecepatan angin menghasilkan kelas stabilitas A sepanjang periode jam 08.00 sampai dengan 16.00. Kelas A menyatakan bahwa stabilitas atmosfir adalah sangat tidak stabil, yang berarti polutan lebih mudah terdispersi. Adanya gaya pendorong (*driving force*) adveksi pada emisi polutan akan semakin mempermudah polutan untuk menyebar.

Dengan kelas stabilitas A dan menggunakan gambar 2.8 diperoleh koefisien dispersi pada arah z sebesar $\sigma_z = 15 \text{ m}$. Karena letak reseptor pengukuran ada di pinggir jalan maka pembacaan gambar 2.8 σ_z diambil pada jarak yang minimum. Nilai σ_z tercantum pada tabel L.4 pada lampiran.

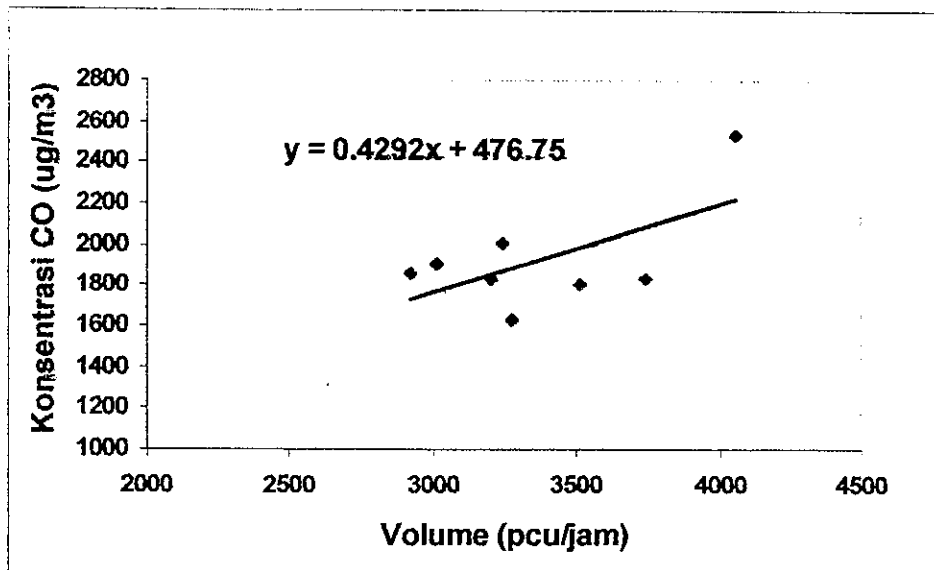
Tingkat penyebaran polutan yang berasal dari emisi sumber juga dipengaruhi kondisi stabilitas atmosfir. Pada siang hari radiasi matahari yang tinggi pada permukaan bumi akan

memanaskan lapisan udara di atasnya. Lapisan udara yang lebih hangat ini massa jenisnya lebih kecil dibandingkan dengan lapisan udara di atasnya yang temperaturnya lebih rendah. Sehingga hal ini menimbulkan pergerakan udara ke atas secara vertikal. Pada kondisi siang hari ini udara bersifat tidak stabil, pergerakan udara cukup tinggi. Ketidak stabilan atmosfer ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan pada pagi hari, karena pada pagi hari radiasi matahari tidak setinggi siang hari. Oleh karena itu pada siang hari tingkat penyebaran polutan lebih tinggi dibandingkan dengan pada pagi hari. Hal ini menyebabkan konsentrasi polutan pada pagi hari lebih tinggi dibandingkan dengan siang hari.

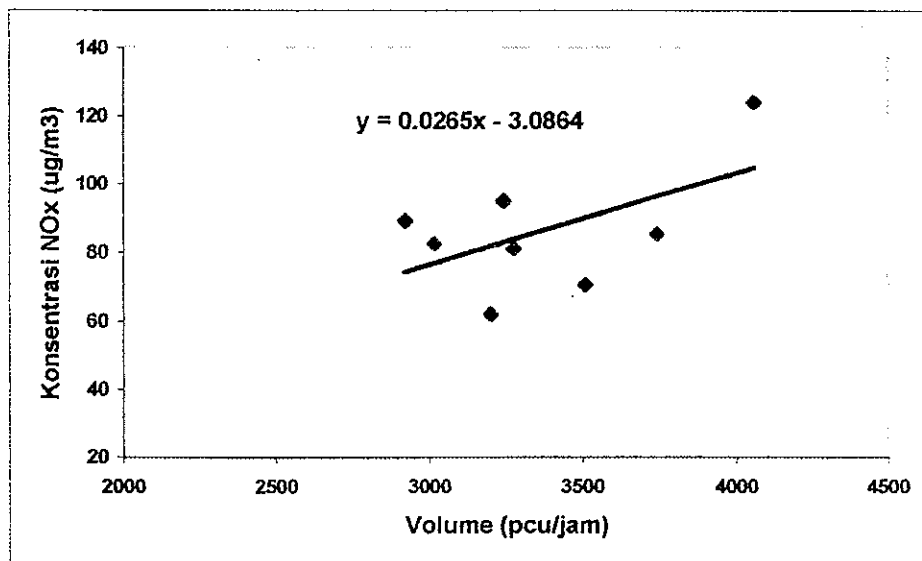
4.2.5. Korelasi Konsentrasi Terhadap Volume Lalu lintas

Gambar 4.11 dan 4.12 menyatakan hasil regresi antara konsentrasi terhadap volume lalu lintas masing-masing untuk polutan CO dan NOx. Regresi menyatakan korelasi antara konsentrasi dengan volume. Regresi yang digunakan adalah linier.

Dari hasil regresi linier baik untuk polutan CO dan NOx, menghasilkan koefisien atau gradien kurva linier yang positif. Korelasi ini menyatakan bahwa semakin tinggi volume menghasilkan konsentrasi yang semakin tinggi pula, begitu juga sebaliknya. Korelasi ini menunjukkan bahwa hubungan konsentrasi dengan volume dapat didekati dengan garis linier dengan gradien positif.



Gambar 4.11. Korelasi Konsentrasi CO Terhadap Volume Lalu lintas



Gambar 4.12. Korelasi Konsentrasi NOx Terhadap Volume Lalu lintas

4.2.6. Perbandingan Konsentrasi Perhitungan dan Pengukuran

Untuk menghitung konsentrasi polutan digunakan persamaan sebagai berikut,

$$C = \frac{2nq}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_z} \exp(-z^2 / 2\sigma_z^2) \quad (4.5)$$

dimana,

C = konsentrasi polutan (g/m³)

n = volume lalu lintas (pcu/s)

q = emisi kendaraan (g/m)

u = kecepatan angin (m/s)

σ_z = koefisien dispersi (m)

z = ketinggian titik reseptor = 1,5 m

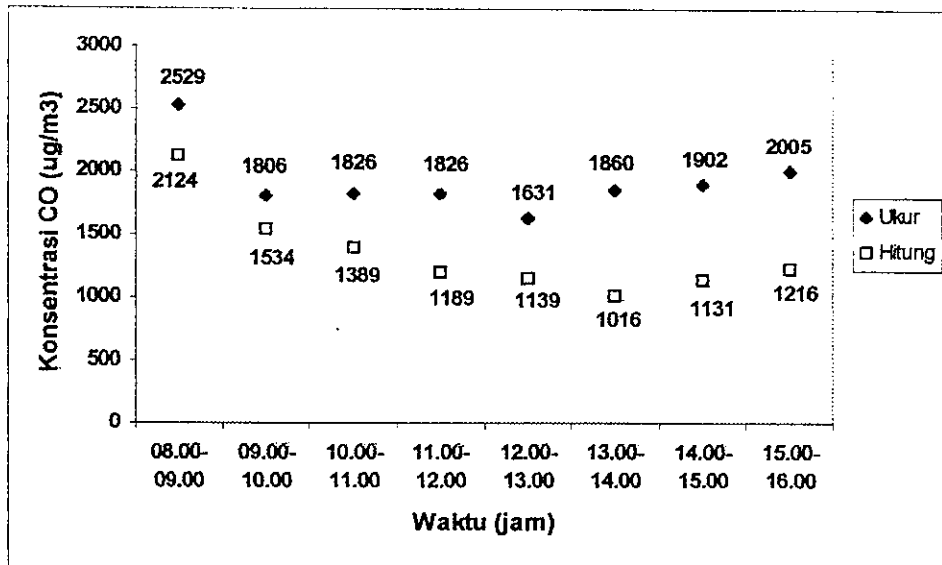
Emisi kendaraan dihitung dengan persamaan 2.4 dan 2.5, yaitu

$$Q_{CO} = 867,92 v^{-0,8648} \quad (4.6)$$

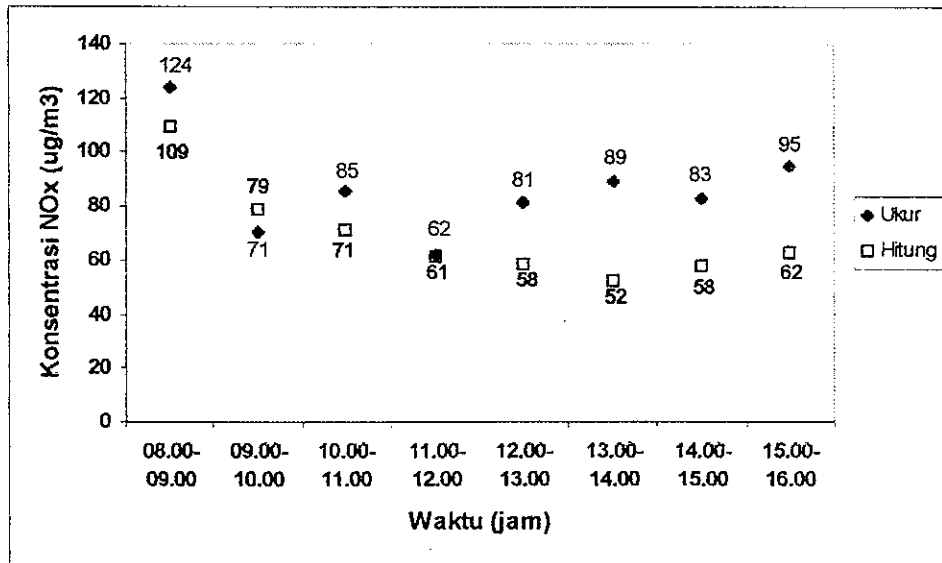
dan

$$Q_{NOx} = 0,0005 v^2 - 0,0656 v + 3,0856 \quad (4.7)$$

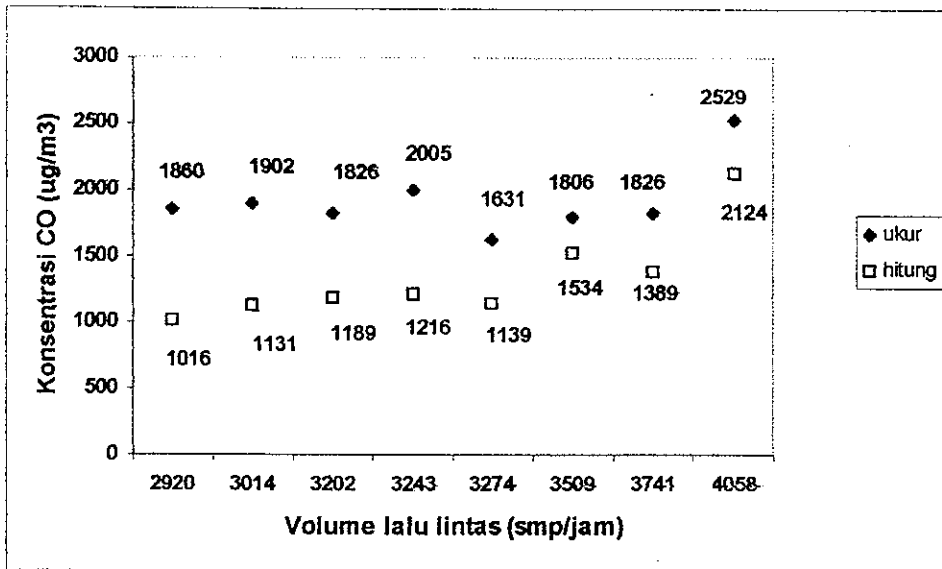
Nilai parameter-parameter tercantum pada tabel L.2, L.3, L.4. Konsentrasi perhitungan untuk masing-masing polutan CO dan NOx dan konsentrasi hasil pengukuran, perbandingannya dapat dilihat pada gambar 4.13 dan 4.14 untuk basis waktu (jam) dan 4.15 dan 4.16 untuk basis volume.



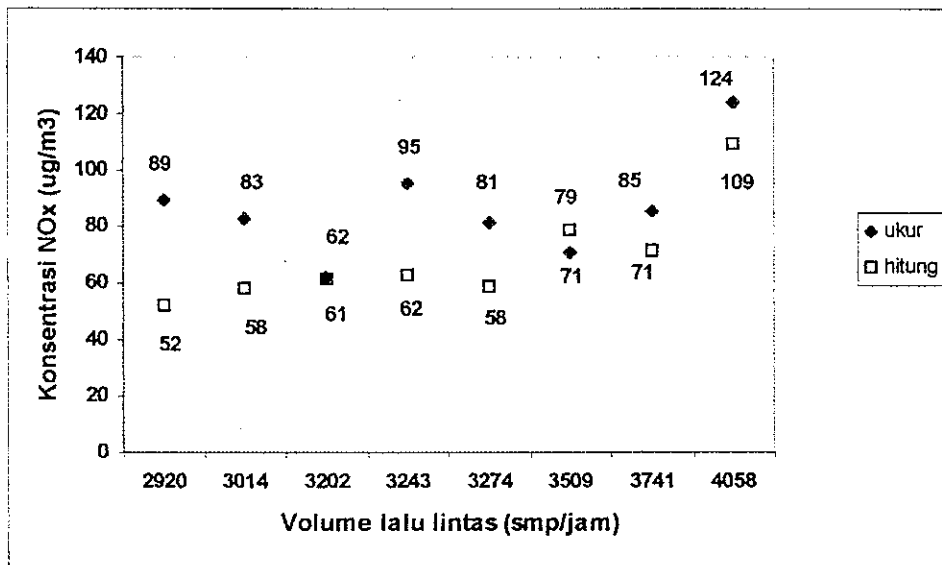
Gambar 4.13. Konsentrasi CO hasil perhitungan dan pengukuran terhadap waktu



Gambar 4.14. Konsentrasi NOx hasil perhitungan dan pengukuran terhadap waktu



Gambar 4.15. Konsentrasi CO hasil pengukuran dan perhitungan terhadap Volume lalu lintas



Gambar 4.16. Konsentrasi NO_x hasil pengukuran dan perhitungan terhadap volume lalu lintas

Dari gambar 4.13, 4.14, 4.15 dan 4.16 terlihat konsentrasi antara hasil perhitungan dengan pengukuran baik CO maupun NOx mempunyai kecenderungan yang sama namun terdapat perbedaan yang cukup besar. Untuk CO perbedaan yang terbesar adalah 45 % dan terkecil adalah 15 %, dengan rata-rata perbedaan adalah 31 %. Sedangkan untuk NOx perbedaan terbesar adalah 42 % dan terkecil adalah 2 %, dengan rata-rata perbedaan adalah 22 %.

Karena hasil perhitungan berbeda dengan hasil pengukuran maka pada model dispersi Gaussian perlu dilakukan validasi. Perbedaan ini menunjukkan ketidakakuratan dalam menentukan parameter koefisien dispersi σ_z dan nilai emisi q . Nilai koefisien dispersi σ_z untuk perhitungan konsentrasi ditentukan dengan menggunakan grafik koefisien dispersi pada gambar 2.9 yang pemilihannya kurang tepat. Kekurangtepatan disebabkan karena dua hal. Yang pertama adalah jarak reseptor ditentukan ± 12 m (jarak dari garis tengah jalan ke reseptor) dimana di luar *range/daerah* jarak seperti yang berlaku pada gambar 2.9 (jadi σ_z pada pembacaan grafik diambil pada nilai minimum dengan jarak 100 m untuk kelas stabilitas atmosfer A, yaitu $\sigma_z = 15$ m). Yang kedua adalah kondisi meteorologi atau stabilitas atmosfernya pada titik pengukuran belum tentu sama dengan kondisi meteorologi yang berlaku pada grafik koefisien dispersi σ_z pada gambar 2.9.

4.3. Validasi Model Gaussian

Karena kompleksnya faktor-faktor yang mempengaruhi penyebaran polutan, maka penggunaan data ke dalam model

prediksi harus dilihat secara hati-hati. Hal ini agar model dapat cukup akurat untuk diterapkan pada suatu kondisi tertentu. Validasi perlu dilakukan pada model, yaitu dengan melakukan validasi pada parameter-parameter yang terdapat pada model. Melihat bahwa unsur emisi (yang berkaitan dengan volume lalu lintas) dan kondisi meteorology adalah parameter yang cukup berpengaruh pada proses penyebaran (dispersi), maka dengan melakukan validasi pada kedua parameter ini adalah langkah yang cukup baik.

Model dispersi Gaussian untuk sumber garis merupakan salah satu model kualitas udara yang dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi polutan pada suatu ruas jalan. Pada model Gaussian terdapat parameter-parameter emisi q dan koefisien dispersi σ_z . Penerapan model Gaussian pada jalan Soekarno-Hatta memerlukan data q dan σ_z yang belum diketahui nilainya. Penggunaan data q dan σ_z yang diperoleh dari studi-studi sebelumnya (baik dari dalam negeri maupun luar negeri) belum tentu dapat sesuai. Untuk itu perlu dilakukan validasi terhadap model terutama pada parameter emisi q dan koefisien dispersinya σ_z . Validasi dilakukan dengan langkah-langkah seperti diuraikan di bawah ini.

Model dispersi Gaussian yang akan dilakukan validasi adalah seperti ditunjukkan pada persamaan 2.15, yaitu

$$C = \frac{2Q/L}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_z} \exp(-z^2 / 2\sigma_z^2) \quad (4.8)$$

Persamaan emisinya adalah seperti ditunjukkan oleh persamaan 2.18, yaitu

$$\frac{Q}{L} = nq \quad (4.9)$$

z adalah ketinggian reseptor yang merupakan titik yang diukur konsentrasinya, dalam hal ini z = 1,5 m.

Persamaan 4.9 dan z disubstitusikan ke persamaan 4.8, didapatkan persamaan sebagai berikut,

$$C = \frac{2nq}{(2\pi)^{1/2} u \sigma_z} \exp(-2,25/2\sigma_z^2) \quad (4.10)$$

Validasi dilakukan dengan memodifikasi parameter koefisien dispersi σ_z . Dengan menggunakan data konsentrasi C hasil pengukuran dan data parameter lainnya yaitu emisi kendaraan q, kecepatan angin u dan volume lalu lintas n yang tercantum pada tabel L.2, L.3, dan L.4, maka diperoleh koefisien dispersi σ_z hasil validasi sebagaimana tercantum pada tabel 4.2.

Tabel 4.2. Koefisien dispersi σ_z hasil validasi

Jam	σ_z (m)	
	CO	NOx
08-09	12.6	13.2
09-10	12.8	16.8
10-11	11.5	12.6
11-12	9.8	14.7
12-13	10.5	10.8
13-14	8.3	8.8
14-15	9	10.6
15-16	9.2	9.9
Rata-rata	10.4625	12.175

Validasi juga dapat dilakukan dengan memodifikasi parameter emisi kendaraan q dan koefisien dispersi σ_z . Modifikasi dilakukan dengan asumsi pemilihan dalam penggunaan rumus emisi persamaan 2.4 dan 2.5 kurang tepat. Persamaan tersebut menyatakan emisi kendaraan merupakan fungsi dari kecepatan. Padahal emisi juga dipengaruhi oleh moda pengoperasian kendaraan, apakah melakukan percepatan, perlambatan atau jelajah (*cruising*). Juga emisi dipengaruhi komposisi kondisi kendaraan yang beroperasi pada suatu ruas jalan yang mungkin berbeda antara satu jalan dengan jalan lainnya. Jika modifikasi persamaan Gaussian dilakukan terhadap parameter emisi q yang belum diketahui, maka langkah validasinya adalah sebagai berikut.

Persamaan 4.10 didekati dengan persamaan linier sebagai berikut,

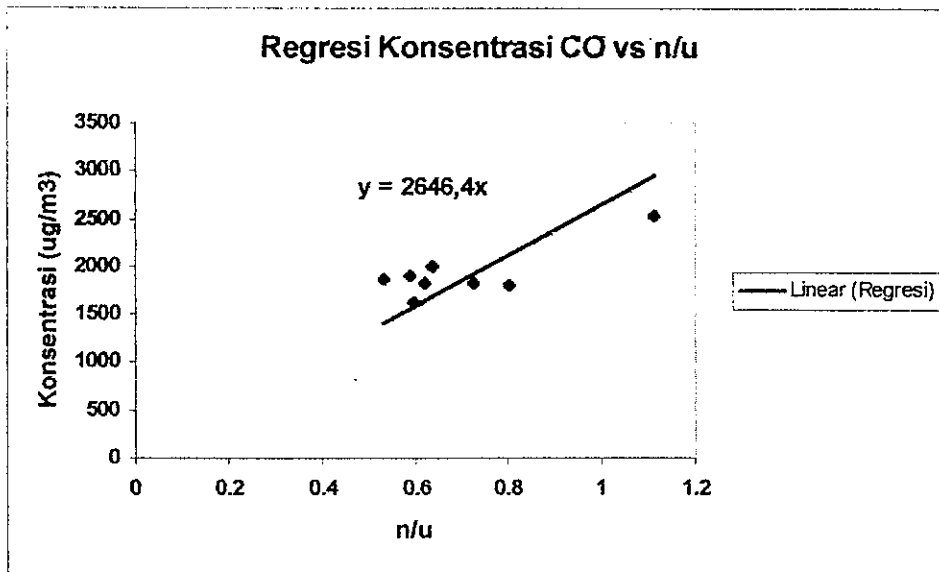
$$y = a \cdot x \quad (4.11)$$

dimana,

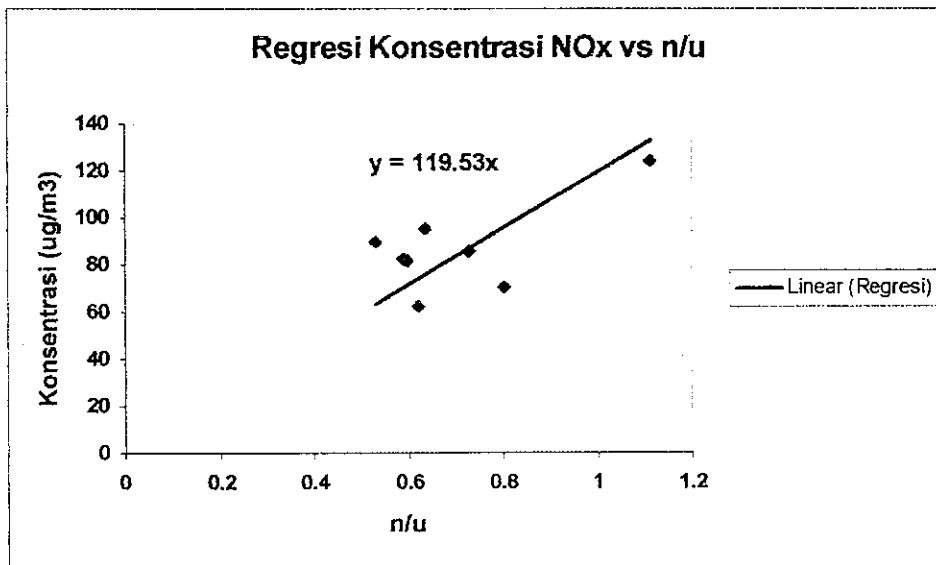
$$y = C$$

$$x = \frac{n}{u}$$

$$a = \frac{2q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_z} \exp(-2,25 / \sigma_z^2)$$



Gambar 4.17. Regresi Konsentrasi CO terhadap n/u



Gambar 4.18. Regresi Konsentrasi NOx terhadap n/u

Dengan menggunakan data konsentrasi C pengukuran (baik untuk polutan CO dan NOx), volume lalu lintas dan kecepatan angin u yang terdapat pada table L.2, L.3 dan L.4 (di lembar lampiran), selanjutnya dilakukan regresi linier, dan menghasilkan kurva regresi polutan CO dan NOx seperti ditunjukkan pada gambar 4.16 dan 4.17.

Dari hasil regresi diperoleh persamaan validasi sebagai berikut untuk masing-masing polutan,

$$C_{CO} = 2646,4 \frac{n}{u} \quad (4.12)$$

dan

$$C_{NOx} = 119,53 \frac{n}{u} \quad (4.13)$$

dimana,

C = konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

n = volume lalu lintas (pcu/s)

u = kecepatan angin (m/s)

Persamaan 4.12 dan 4.13 berlaku untuk konsentrasi di titik reseptor di *ground level* baik untuk prediksi polutan CO maupun NOx.

Model yang diperoleh dari hasil validasi dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi polutan di Jalan Soekarno-Hatta di kota Bandung. Penggunaan model ini akan mempermudah dalam menentukan kualitas udara di jalan

Sekarno-Hatta dibandingkan dengan cara pengukuran kualitas udara yang memerlukan biaya dan waktu.

BAB V

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

5.1. Kesimpulan

Dari hasil analisa dan pembahasan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Dalam periode satu hari selama 8 jam dari jam 08.00 sampai dengan jam 16.00 terjadi variasi volume lalu lintas. Pada pagi hari terjadi jumlah perjalanan yang tinggi, yang ditandai dengan terjadinya volume lalu lintas yang tinggi sebesar 4058 smp/jam, kemudian volume menurun pada siang hari yaitu terendah sebesar 2920 smp/jam, dan selanjutnya mengalami peningkatan kembali pada sore hari mencapai 3243 smp/jam. Variasi volume lalu lintas yang terjadi mempengaruhi banyaknya emisi oleh lalu lintas dan konsentrasi polutan. Besarnya emisi dan konsentrasi ini sebanding dengan banyaknya volume lalu lintas yang beroperasi di jalan raya.
2. Konsentrasi polutan yang dihasilkan sebanding (berbanding lurus) dengan besarnya variasi volume lalu lintas yang terjadi mengikuti persamaan sebagai berikut:
 $C = 0,4292 n + 476,75$ untuk polutan CO dan $C = 0,0265 n - 3,0864$ untuk polutan NOx, dengan C menyatakan konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), n adalah volume lalu lintas (smp/jam). Pada volume lalu lintas yang tinggi menimbulkan konsentrasi polutan yang tinggi pula, begitu juga sebaliknya.

3. Koefisien dispersi σ_z hasil validasi masing-masing untuk polutan CO dan NOx adalah $\sigma_z(C) = 10,45$ m dan $\sigma_z(NOx) = 12,18$ m.

Model konsentrasi hasil validasi yang didapat adalah sebagai berikut,

$$C_{CO} = 2646,4 \frac{n}{u}$$

$$C_{NOx} = 119,53 \frac{n}{u}$$

dimana,

C = konsentrasi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

n = volume lalu lintas (pcu/s)

u = kecepatan angin (m/s)

yang berlaku untuk konsentrasi pada ketinggian *ground level* untuk jalan Soekarno-Hatta di kota Bandung.

5.2. Rekomendasi

Dari hasil analisa walaupun pencemaran udara oleh polutan CO dan NOx belum melewati nilai ambang batas baku mutu yang ditetapkan, tetapi untuk pengendalian terhadap kualitas udara beberapa rekomendasi yang diusulkan dalam rangka mengurangi intensitas pencemaran udara di sekitar ruas jalan Soekarno-Hatta, kota Bandung adalah sebagai berikut :

1. Pengurangan emisi lalu lintas melalui upaya pengurangan volume lalu lintas di ruas jalan. Pengurangan volume lalu lintas dilakukan dengan memperkecil hambatan samping (*side friction*) dan hambatan terhadap aliran arus lalu lintas sehingga kelancaran arus lalu lintas dapat ditingkatkan. Dengan meningkatnya kelancaran lalu lintas maka kecepatan rata-rata kendaraan dapat meningkat, sehingga volume lalu lintasnya menurun, dengan demikian emisi yang dihasilkan dapat berkurang. Langkah yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kelancaran lalu lintas adalah dengan menerapkan larangan berhenti di pinggir jalan khususnya pada waktu pagi hari pada jam 8.00-9.00 dimana terjadi lalu lintas yang tinggi, dan membangun jembatan penyeberangan untuk menghindari agar masyarakat tidak menyeberang melintasi permukaan jalan.

2. Pengendalian emisi yang dilakukan pada sumbernya, yaitu mengurangi emisi yang dikeluarkan kendaraan bermotor. Bagi pemilik kendaraan langkah yang dapat diambil adalah dengan melakukan sistem pengelolaan perawatan kendaraan yang teratur. Sedangkan bagi pemerintah dapat diterapkan kebijakan mengenai pembatasan umur kendaraan. Walaupun kebijakan ini masih sulit diterapkan untuk kondisi saat ini tetapi penerapan kebijakan mengenai pembatasan umur kendaraan menjadi layak untuk dipertimbangkan mengingat bahwa pada desain mesin yang lebih mutakhir telah diterapkan pengembangan teknologi yang membuat pembakaran lebih sempurna yang menghasilkan emisi lebih rendah dan efisiensi lebih tinggi. Teknologi tersebut antara lain pada desain ruang bakar yang lebih kompak, dan sistem pemasokan campuran udara dan bahan bakar yang menghasilkan perbandingan campuran yang lebih tepat dan

merata. Efisiensi yang lebih tinggi membuat konsumsi bahan bakar lebih hemat, yang pada gilirannya dapat menurunkan emisi polutan.

3. Untuk pihak-pihak terkait dapat memanfaatkan model dispersi polutan hasil validasi untuk memprediksi konsentrasi polutan gas CO dan NOx khususnya untuk jalan arteri. Dengan penggunaan model tersebut maka dapat lebih menghemat biaya dan waktu serta lebih mudah penerapannya dibandingkan dengan melakukan pengukuran.

Daftar Pustaka

Arends, B.P.M., dan H. Berenschot, 1980. *Motor. Bensin.* Penerbit Erlangga, Jakarta.

Colls, J., 2002. *Air Pollution.* Spon Press, New York.

Davis, M.L., and David A.C., 1998. *Introduction to Environmental Engineering.* McGraw-Hill, New York.

Directorate General of Highways, 1993. *Indonesian Highway Capacity Manual.* Ministry of Public Works, Jakarta.

Direktorat Sistem Jaringan Prasarana, 2002. *Penyusunan Sistem Jaringan Jalan, Klasifikasi Jaringan Jalan Menurut Peranan dan Wewenang Pembinaan.* Dep. Kimpraswil, Jakarta.

Direktorat Jenderal Bina Marga, 1991. *Panduan Survei Perhitungan Lalu Lintas (Cara Manual).* Dep. Pekerjaan Umum, Jakarta.

Garber, N.J., and L.A. Hoel, 1997. *Traffic and Highway Engineering.* PWS Publishing Co., Boston.

Gunawan, G., I.G.W. Samsi Gunarta, dan Aji Tatang, 1995. *Kebisingan dan Pencemaran Udara oleh Lalu lintas,* Dep. Pekerjaan Umum, Bandung.

Hamilton, R.S., and R.M. Harrison, 1991. *Highway Pollution.* Elsevier, Amsterdam.

Kiely, G., 1997. *Environmental Engineering*. McGraw-Hill, New York.

Madcoms dan Penerbit Andi, 2000. *Microsoft Excel 2000*. Andi, Yogyakarta.

Nevers, N.D., 2000. *Air Pollution Control Engineering*. McGraw-Hill, New York.

Obert, E.F., 1973. *Internal Combustion Engines and Air Pollution*. Harper & Row, New York.

Pedoman Teknik, No. 017/T/BM/1999, 1999. *Tata Cara Prediksi Polusi Udara Skala Mikro Akibat Lalu Lintas*. Departemen Pekerjaan Umum, Jakarta.

Pline, J.L., 1992. *Traffic Engineering Handbook*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Puslitbang Prasarana Teknologi Jalan dan BPLHD Kotamadia Bandung, 2002. *Pemantauan Polusi Udara dan Kebisingan*. Departemen Kimpraswil, Bandung.

Rau, J.G., and D.C. Wooten, 1980. *Environmental Impact Analysis Handbook*. McGraw-Hill, New York.

Samsi Gunarta, I.G.W., David H. Siregar, dan Asep Sunandar, 1999. *Laporan Penelitian Studi Model Prediksi Polusi Udara Akibat Lalu Lintas*, Puslitbang Jalan, Bandung.

Soedomo, Moestikahadi, 2001. *Pencemaran Udara*. Penerbit ITB, Bandung.

Soenarta, Nakoela, dan Shoichi Furuhamu, 2002. *Motor Serba Guna*. Pradnya Paramita, Jakarta.

Tatang, A., G. Gunawan, Tauhid Ridwan, dan Andri Herdianti, 2000. *Laporan Akhir Monitoring dan Penyelesaian Pencemaran Lingkungan Akibat Lalu Lintas*, Puslitbang Teknologi Prasarana Jalan, Bandung.

Watkins, L.H., 1981. *Environmental Impact of Roads and Traffic*. Applied Science Publishers, London.

Watts, R.J., 1998. *Hazardous Wastes: Source, Pathways, Receptors*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Wardhana, W.A., 2001. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Andi, Yogyakarta.

Yu, J.C., 1982. *Transportation Engineering*. Elsevier, New York.