

2. TINJAUAN KEPUSTAKAAN

2.1. Kerangka Teoretik

Untuk mendukung analisis terhadap hasil penelitian pada setiap variabel maka disusun teori-teori dan juga hasil penelitian-penelitian yang berkaitan dengan permasalahan penelitian ini.

2.1.1. Pencemaran Udara

Udara adalah faktor yang sangat penting dalam kehidupan manusia dan makhluk hidup lain. Tetapi seiring dengan meningkatnya aktivitas pembangunan fisik kota dan pusat-pusat industri, kualitas udara telah mengalami perubahan. Udara pada awalnya segar, tetapi akibat pencemaran udara menjadi kering dan kotor. Di kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, Bandung, dan sebagainya, udara sering terlihat berwarna buram dan diselimuti asap dan debu.

Perubahan lingkungan udara pada umumnya disebabkan oleh pencemaran udara, yaitu masuknya zat pencemar (berbentuk gas-gas dan partikel kecil/aerosol) ke dalam udara. Berbagai pengertian pencemaran udara telah disampaikan oleh para ahli di bidang lingkungan. Parker (1976) dalam bukunya *Air Pollution* menyebutkan bahwa:

“Pencemaran udara adalah masuknya substansi atau kombinasi dari berbagai substansi ke dalam udara yang mengakibatkan gangguan pada kesehatan manusia atau bentuk kehidupan yang lebih rendah, bersifat menyerang dan atau merugikan bagian luar atau dalam tubuh manusia; atau karena keberadaannya baik secara langsung maupun tidak langsung menimbulkan pengaruh buruk pada kesejahteraan manusia”.

Berdasarkan definisi tersebut dapat dijelaskan bahwa batasan pencemaran udara adalah apabila perubahan kualitas udara dapat mengakibatkan gangguan pada tingkat kesehatan manusia atau makhluk hidup lain.

Sedangkan Kementerian Lingkungan Hidup (1987), *World Bank* (1978), dan Carter (1977) menyampaikan definisi pencemaran udara yang kurang lebih sama sebagai berikut:

“Pencemaran udara diartikan sebagai adanya atau masuknya satu atau lebih zat pencemar atau kombinasinya di atmosfer dalam jumlah dan waktu tertentu baik yang masuk ke udara secara alami maupun akibat aktivitas manusia yang dapat menimbulkan gangguan pada manusia, hewan, tumbuhan dan terhadap harta benda atau terganggunya kenyamanan dan kenikmatan hidup dan harta benda”.

Berdasarkan kedua definisi pencemaran udara di atas dapat dilihat adanya kesamaan prinsip bahwa pencemaran udara adalah peristiwa berubahnya kualitas maupun kuantitas udara akibat dari masuknya zat pencemar ke dalamnya sehingga dapat menimbulkan dampak yang merugikan bagi manusia dan makhluk hidup lainnya. Peristiwa masuknya zat pencemar udara dapat berlangsung secara alamiah maupun akibat aktivitas manusia. Kondisi kesehatan manusia adalah indikator yang paling mudah dilihat dan dijadikan acuan untuk menilai suatu kejadian pencemaran udara.

Lutgens & Tarbuck (1982) menyatakan bahwa udara tidak akan pernah bersih karena senantiasa ada sumber pencemaran alami (*natural sources of air pollution*) seperti asap dari letusan gunung berapi, spora tumbuhan, asap dari kebakaran hutan dan sampah, gas-gas yang dihasilkan dari pembusukkan sampah serta debu karena erosi tanah.

Ditinjau dari segi ilmu lingkungan, pencemaran udara adalah salah satu permasalahan lingkungan. Proses pencemaran udara terjadi dan melibatkan interaksi antara lingkungan alami, lingkungan buatan dan lingkungan sosial. Pencemaran udara dapat terjadi baik secara alami, akibat aktivitas lingkungan alam, maupun akibat aktivitas manusia untuk melaksanakan interaksi sosialnya. Proses terjadinya pencemaran udara juga dapat terjadi baik di lingkungan alami maupun di lingkungan buatan. Sedangkan dampak dari pencemaran udara dapat menimpa baik lingkungan alami (penurunan kualitas dan kuantitas), lingkungan buatan (rusaknya infrastruktur) maupun lingkungan sosial (gangguan kesehatan masyarakat).

Udara adalah suatu campuran gas yang terdapat pada lapisan yang mengelilingi bumi. Komposisi campuran gas tersebut tidak selalu konstan. Komponen yang

konsentrasinya paling bervariasi adalah air dalam bentuk uap H₂O dan karbondioksida (CO₂). Jumlah uap air yang terdapat di udara bervariasi bergantung pada cuaca dan suhu.

Konsentrasi CO₂ di udara selalu rendah, yaitu sekitar 0,03%. Konsentrasi CO₂ mungkin naik, tetapi masih dalam kisaran yang tidak terlalu tinggi, misalnya di sekitar proses-proses yang menghasilkan CO₂ seperti pembusukan sampah tanaman, pembakaran, atau di sekitar kumpulan massa manusia di dalam ruangan terbatas yaitu karena pernafasan. Konsentrasi CO₂ yang relatif rendah dijumpai di atas kebun atau ladang tanaman yang sedang tumbuh atau di area yang berada di sekitar lautan. Konsentrasi yang relatif rendah ini disebabkan oleh absorpsi CO₂ di dalam air. Pengaruh proses-proses tersebut terhadap konsentrasi total CO₂ di udara sangat kecil karena rendahnya konsentrasi CO₂.

Pencemaran udara secara luas terfokus pada lapisan troposfir dan sedikit sekali menembus stratosfer. Dalam keadaan yang tidak tercemar, komposisi gas yang ada dapat dilihat seperti pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Komposisi Gas-Gas di Atmosfer

Komposisi Gas	% volume	ppm
Nitrogen (N ₂)	78,08	780.000
Oksigen (O ₂)	20,95	209.500
Argon (Ar)	0,93	9.300
Karbondioksida (CO ₂)	0,0325	325
Neon (Ne)	0,0018	18
Helium (He)	5.10 ⁻⁴	5,24
Krypton (Kr)	1.10 ⁻⁴	1,14
Ozone (O ₃)	0 – 2.10 ⁻⁵	0-0,2

Sumber: Pedoman Bidang Studi Pengawasan Pencemaran Lingkungan Fisik Pada Institusi Pendidikan Tenaga Kesehatan Lingkungan, 2001

Udara di alam tidak pernah ditemukan dalam keadaan bersih tanpa polutan sama sekali. Beberapa gas seperti sulfur dioksida (SO₂), hidrogen sulfida (H₂S), dan karbon monoksida (CO) selalu dibebaskan ke udara sebagai produk sampingan dari proses-proses alami seperti aktivitas vulkanik, pembusukan sampah tanaman, kebakaran hutan, dan sebagainya. Selain itu partikel-partikel padatan atau cairan berukuran kecil dapat tersebar di udara oleh angin, letusan vulkanik atau gangguan alam lainnya. Selain disebabkan polutan alami tersebut, polusi udara juga dapat disebabkan oleh aktivitas manusia.

Udara adalah juga media esensial yang berguna untuk mendengar, melihat, dan membau, sehingga dengan adanya pencemaran udara dapat mengakibatkan gangguan terhadap penglihatan, penciuman, dan pendengaran. Penelitian tentang efek pencemaran udara pada kesehatan pada awalnya ditujukan pada terjadinya peristiwa kesakitan dan kematian, tetapi pada periode selanjutnya menjadi berkembang karena dampak yang ditimbulkannya juga semakin banyak.

Pencemaran udara terjadi karena proses *attrition* (gesekan), *vapourization* (penguapan) dan *combustion* (pembakaran). Dari ketiga proses tersebut yang paling banyak menghasilkan bahan polutan adalah proses pembakaran (Corman, 1971; Masters, 1991).

2.1.2. Sumber Pencemaran Udara

Sumber pencemaran udara dapat berupa kegiatan yang bersifat alamiah (natural) dan kegiatan antropogenik. Contoh sumber alami adalah akibat letusan gunung berapi, kebakaran hutan, dekomposisi biotik, debu, spora tumbuhan, dan lain sebagainya. Pencemaran udara akibat aktivitas manusia (kegiatan antropogenik), secara kualitatif sering lebih besar. Untuk kategori ini sumber-sumber pencemaran dibagi dalam pencemaran akibat aktivitas transportasi, industri, persampahan, baik akibat proses dekomposisi maupun pembakaran dan aktivitas rumah tangga.

Pencemaran udara akibat kegiatan transportasi yang sangat penting adalah akibat

kendaraan bermotor di darat. Kendaraan bermotor adalah sumber pencemaran udara dengan dihasilkannya gas CO, NO_x, hidrokarbon, SO₂, dan *tetraethyl lead*, yang menjadi bahan logam timah yang ditambahkan ke dalam bensin berkualitas rendah untuk meningkatkan nilai oktan guna mencegah terjadinya letupan pada mesin. Parameter-parameter penting akibat aktivitas ini adalah CO, partikulat (debu), NO_x, hidrokarbon, Pb dan SO_x.

Emisi pencemaran oleh industri sangat bergantung pada jenis industri dan prosesnya. Emisi pencemar dari industri selain akibat prosesnya juga diperhitungkan pencemaran udara dari peralatan yang digunakan (utilitas). Berbagai industri dan pusat pembangkit tenaga listrik menggunakan tenaga dan panas yang berasal dari pembakaran arang dan bensin, hasil sampingan dari pembakaran tersebut adalah SO_x, asap (partikulat), dan bahan pencemar lainnya.

Hasil penelitian di daerah pabrik semen Cibinong, konsentrasi debu rata-rata telah mencapai 380 µg/m³, pada jarak 1000-1500 meter dari lokasi pabrik, dan menurun pada tingkat konsentrasi 280 µg/m³ pada jarak 2000-3500 meter (Soedomo, 2001). Di daerah ini, terdapat dua industri semen terbesar di Indonesia. Daerah-daerah Cibinong-Citeureup yang semakin pesat berkembang menjadi perkotaan akan senantiasa menerima pengaruh langsung dari emisi debu partikulat dari kedua industri tersebut. Kualitas udaranya diperkirakan akan semakin menurun, dengan semakin tingginya pula intensitas kegiatan lain.

Hasil penelitian lain oleh Soenarsono (1993) di Surabaya. Aktivitas industri yang berkembang di sekitar Rungkut, Wonokromo dan Gresik telah pula ditandai dengan menurunnya kualitas udara, meskipun beberapa parameter masih berada di bawah ambang batas, kecuali untuk konsentrasi debu/partikulatnya yang mencapai 477 µg/m³ dan 581 µg/m³ (di atas baku mutu 150 µg/m³).

Sedangkan di daerah Palimanan Cirebon, Jawa Barat, pabrik semen yang ada hanya memberikan pengaruh penurunan kualitas udara yang tidak setinggi kedua daerah yang disebutkan sebelumnya. Konsentrasi debu partikulat yang teramati berkisar antara $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sampai dengan $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Soedomo, 2001). Hal tersebut dapat terjadi karena karakteristik geografis masing-masing daerah mempengaruhi konsentrasi pencemar di udara.

Data dan fakta tersebut adalah contoh kasus nyata mengenai perkembangan daerah yang tidak terencana dengan baik. Karena daya tarik industri, perkembangan daerah menjadi fungsi lain yang sifatnya lebih perkotaan tidak dapat terkendali.

Sumber pencemaran udara lainnya adalah aktivitas rumah tangga. Kegiatan rumah tangga mengemisikan pencemar udara yaitu dari proses pembakaran untuk keperluan pengolahan makanan. Parameter yang diemisikan ke atmosfer juga identik dengan parameter-parameter yang dilepaskan oleh kendaraan bermotor, kecuali senyawa tambahan di dalam bahan bakar seperti Pb. Kegiatan rumah tangga lain yang dapat menyebabkan pencemaran udara adalah aktivitas merokok. Parameter-parameter pencemaran udara yang dihasilkan dari rokok antara lain nikotin, NO_x , partikulat dan residu fenol, aldehid, sulfur dioksida, dan sulfat (Kusnopranto, 2001)

2.1.3. Aspek Spasial dan Temporal Pencemaran Udara

Hampir sebagian besar fenomena pencemaran udara yang kita ketahui, pada umumnya disebabkan oleh aktivitas antropogenik, khususnya di daerah-daerah perkotaan yang telah berkembang. Kronologis fenomena pencemaran udara yang ada menunjukkan adanya kaitan yang erat antara aktivitas manusia yang semakin berkembang dari waktu ke waktu (Soedomo, 2001). Bukti-bukti kronologis kasus-kasus pencemaran udara yang terjadi, secara langsung mengembangkan ilmu

pengetahuan. Fakta yang terjadi juga telah mendorong berkembangnya ilmu pengetahuan.

Dinamika atmosfer adalah faktor utama yang perlu dipertimbangkan dalam masalah pencemaran udara. Dalam hal ini, atmosfer selalu diamati secara parsial (lapisan demi lapisan) untuk menganalisis fenomena-fenomena yang khusus dan keterbatasan atmosfer biasanya dihilangkan. Dalam kaitannya dengan pencemaran udara, Pasquill (1983) membagi skala waktu dan ruang atmosferik sebagai berikut:

a. Skala Mikro

Skala ini sering disebut juga sebagai skala lokal. Skala mikro adalah skala dengan orde jangkauan sampai dengan satuan kilometer dan skala waktu dalam orde detik sampai beberapa menit.

Dalam skala mikro, beberapa faktor meteorologis lokal sangat besar pengaruhnya, seperti adanya angin darat dan angin laut di daerah pantai, sirkulasi udara perkotaan dan pedesaan, panas perkotaan, dan sebagainya.

Proses transport skala lokal, umumnya menyebabkan suatu akumulasi pencemaran relatif di daerah di atas sumber pencemarannya, akibat adanya lapisan *inversi* atmosfer yang membatasi ruang penyebaran pencemar.

b. Skala Meso

Skala meso adalah skala dengan jangkauan kilometer sampai dengan ratusan kilometer, dan dengan skala waktu menit sampai beberapa jam.

Skala ini juga dikenal sebagai Skala Regional. Angin yang mempengaruhi pergerakan atmosferik mulai dari tingkat ini adalah angin geotropik di atas lapisan bumi (*Planetary Boundary Layer*). Pelepasan pencemar tersebut sesuai dengan arah angin, dalam jangkauan horizontal dan vertikal yang jauh lebih besar.

c. Skala Makro

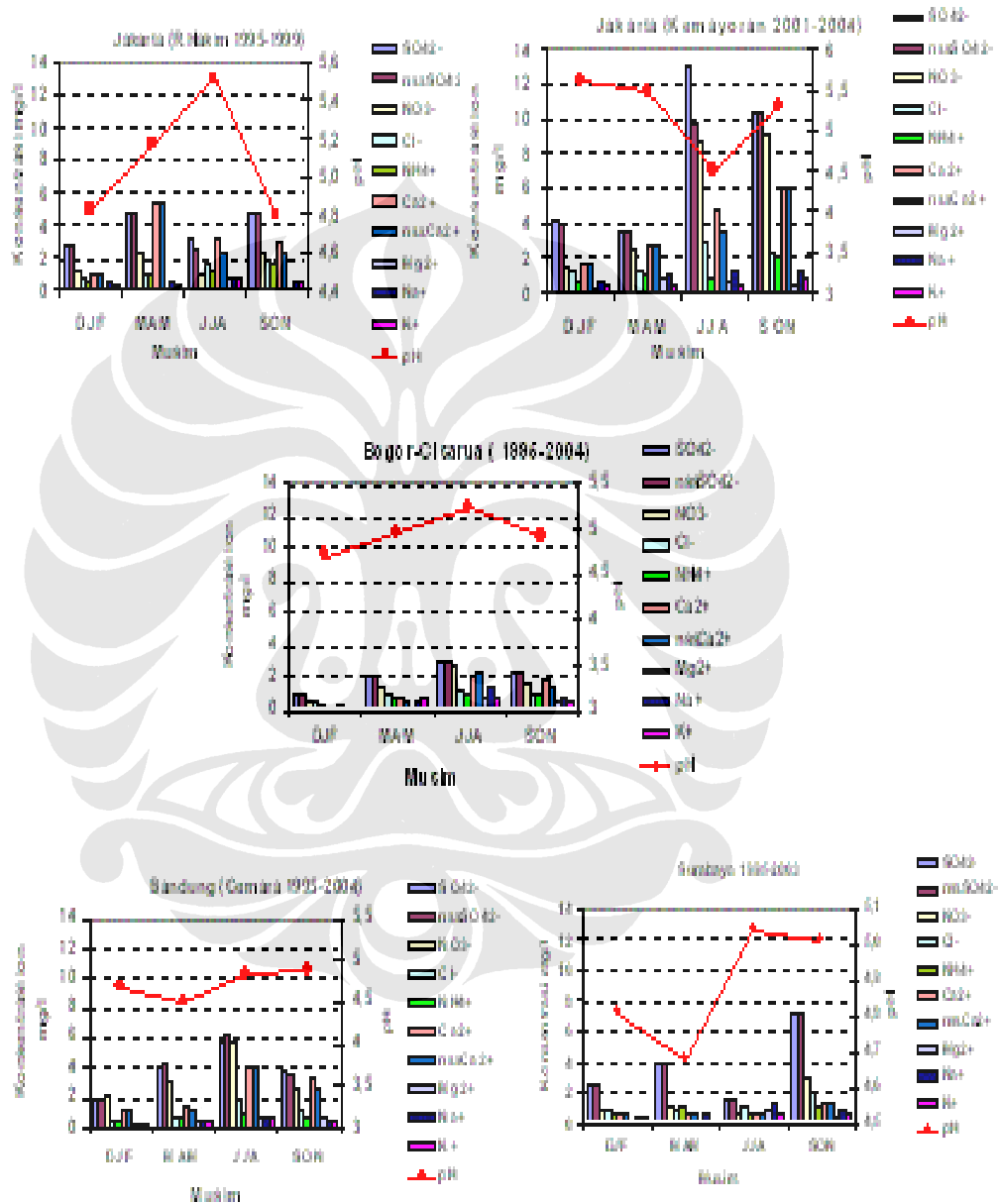
Skala makro sering disebut juga sebagai Skala Kontinental. Skala ini adalah skala dengan jangkauan di atas ribuan kilometer dan dengan skala waktu yang lebih besar dari pada satu hari. Unsur-unsur pencemar relatif stabil, akan dapat bertahan tetap dalam bentuknya, dan mencapai jarak jangkauan yang jauh.

Terjadinya hujan asam (SO_2) yang sangat tinggi intensitasnya di daerah Amerika Serikat Utara yaitu Illinois, Ohio, dan Wisconsin adalah suatu contoh fenomena pencemaran dengan skala makro. Fenomena ini dikenal sebagai suatu fenomena transport pencemar jarak jauh, hingga ribuan kilometer.

Hasil penelitian dari tim peneliti Pusat Pemanfaatan Sains Atmosfer dan Iklim, LAPAN dan Badan Meteorologi dan Geofisika menunjukkan bahwa hujan asam juga telah terjadi di Jakarta sejak tahun 1984 dengan frekuensi kejadian nilai $\text{pH} < 5,6$ adalah 1983-1999 sebanyak 60% dan 2001-2004 sebanyak 65%, Cisarua-Bogor 1989-2004 sebanyak 72% dan terjadi hujan asam sejak 1989. Bandung terlihat terkena hujan asam mulai tahun 1994 dengan kejadian hujan asam selama 1989-2004 sebanyak 74%. Surabaya sejak 1993 telah kena hujan asam dan terjadi hujan asam sebanyak 78% sampai 2003.

Kecenderungan $\text{pH} < 5,6$ menurun sampai 2004 di P. Jawa berarti masih terjadi hujan asam. Faktor netralisasi (NF) $\text{Ca}^{2+} > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+}$ sangat berperan untuk mengontrol keasaman air hujan. Profil konsentrasi anion maupun kation tinggi di musim kemarau di Jakarta, Cisarua, Bandung, kecuali Surabaya yang tinggi di musim hujan karena pengaruh debu-debu tanah. Komponen laut seperti Mg^{2+} , K^+ dan Na^+ adalah tinggi di musim hujan dibandingkan musim lainnya. Konsentrasi ion-ion tinggi di Jakarta dibandingkan tiga tempat lainnya, menandakan tingkat polusi tinggi di Jakarta. Terdapat pengaruh laut untuk Jakarta dan Surabaya dari

unsur Mg^{2+} dan Na^+ . Pengaruh transportasi, industri, dan laut dominan di Jakarta yang berakibat terhadap terjadinya hujan asam. Pengaruh partikel-partikel aerosol akan memperburuk keasaman air hujan atau berpotensi menurunkan pH.



Gambar 1. Variasi konsentrasi anion, kation dan pH dari 1995 sampai 2004 berdasarkan rata-rata musiman di Jakarta, Cisarua, Bandung dan Surabaya
 Sumber: Lapan 2006

Skala global dapat digolongkan dalam skala makro, tetapi dengan skala waktu yang dapat lebih lama, dan jangkauan vertikal yang lebih dari sepuluh kilometer. Pergerakan atmosferik global akan berlaku dalam suatu skala global. Batasan tegas antara skala tersebut pada dasarnya tidak ada, dan perbedaannya semata-mata dilakukan atas dasar relativitas (Soedomo, 2001).

Proses pergerakan dan dinamika serta kimia atmosferik, adalah faktor-faktor utama yang sangat menentukan nasib bahan pencemar udara setelah diemisikan dari sumbernya. Hal tersebut menunjukkan adanya suatu kaitan yang erat antara sumber pencemar dengan arah penerima, yang dalam hal-hal tertentu dapat berupa kaitan antara daerah perkotaan dengan pedesaan dan disekitarnya, atau suatu negara dengan negara lainya.

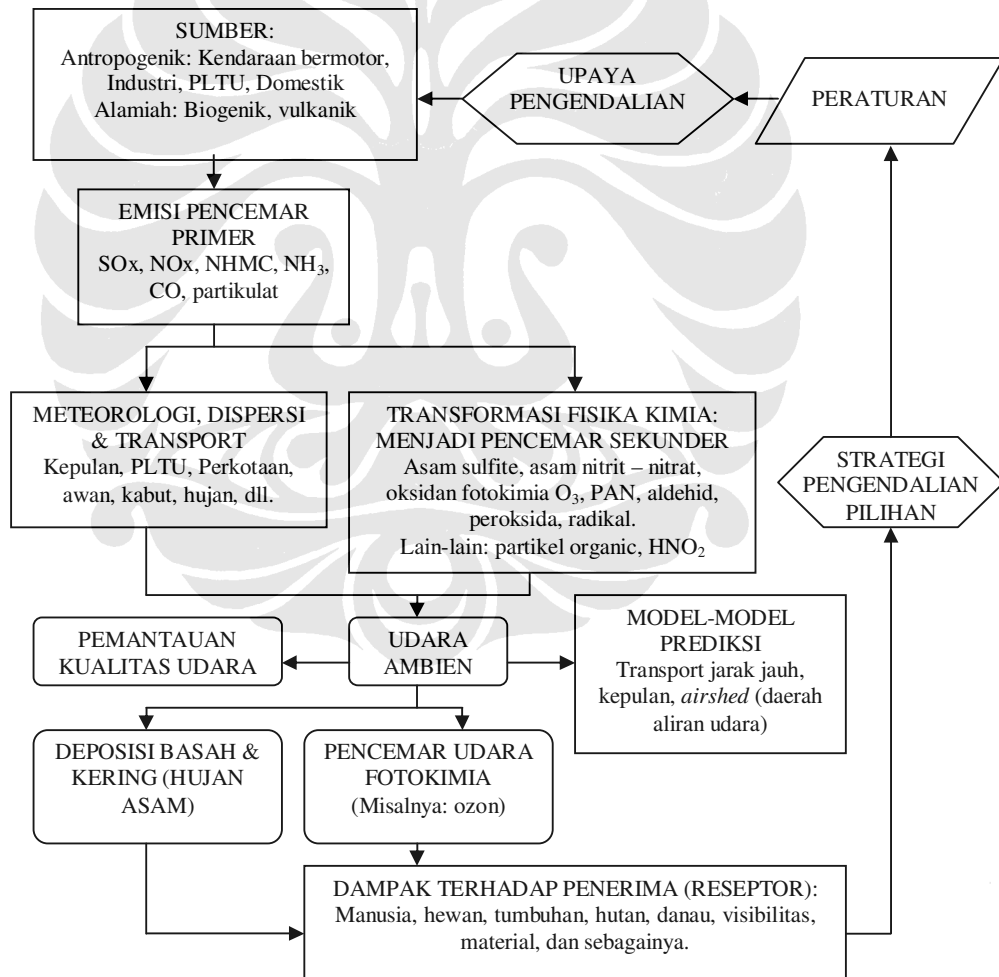
Transportasi dan industri adalah sumber-sumber utama pencemaran udara yang terdapat di perkotaan. Pola penyebaran bahan pencemar udara di perkotaan memiliki suatu karakteristik tersendiri yang timbul akibat sifat orografisnya. Perubahan-perubahan pada parameter-parameter meteorologis akan membawa pengaruh yang besar dalam penyebaran dan difusi pencemar udara yang diemisikan, baik terhadap kota itu sendiri dalam skala lokal, maupun terhadap daerah pedesaan disekitarnya dalam skala regional.

Kenyataan dalam pembuktian ilmiah telah menunjukkan, bahwa pengaruh pergerakan dan dinamika atmosfer adalah sangat besar, sehingga masalah pencemaran udara yang sebelumnya hanya menjadi masalah lokal, ternyata menyebar dan berkembang dalam suatu skala yang jauh lebih luas. Pengungkapan lainnya mencakup pula klimatologi pencemaran udara, yang kurang lebih dapat dianalogikan dengan parameter pencemar meteorologi umum.

Berdasarkan uraian di atas dapat disimpulkan bahwa pola penyebaran bahan pencemar di udara sangat dipengaruhi oleh karakteristik geografis maupun meteorologis. Faktor-faktor tersebut yang menyebabkan pola penyebaran pencemar udara membentuk suatu pola spasial dan temporal tertentu.

2.1.4. Sistem pencemaran udara

Emisi pencemaran udara dapat berupa emisi alami dan antropogenik. Emisi ini didefinisikan sebagai pencemar primer, karena pencemar-pencemar golongan ini diemisikan langsung ke udara dari sumbernya. Bersamaan dengan itu, terjadi pula proses-proses transformasi fisiko kimia yang mengubah pencemar primer menjadi unsur gas atau partikel bentuk lain yang dikenal dengan pencemar sekunder. Pencemar-pencemar ini dapat tersisihkan dari atmosfer kembali ke permukaan bumi melalui proses deposisi basah atau kering, yang dapat memberikan dampak pada penerima, seperti manusia, hewan, ekosistem akuatik, vegetasi dan material (Soedomo, 2001). Sistem pencemaran udara seperti, yang telah dijelaskan tersebut, dapat dilihat pada Gambar 7 berikut :

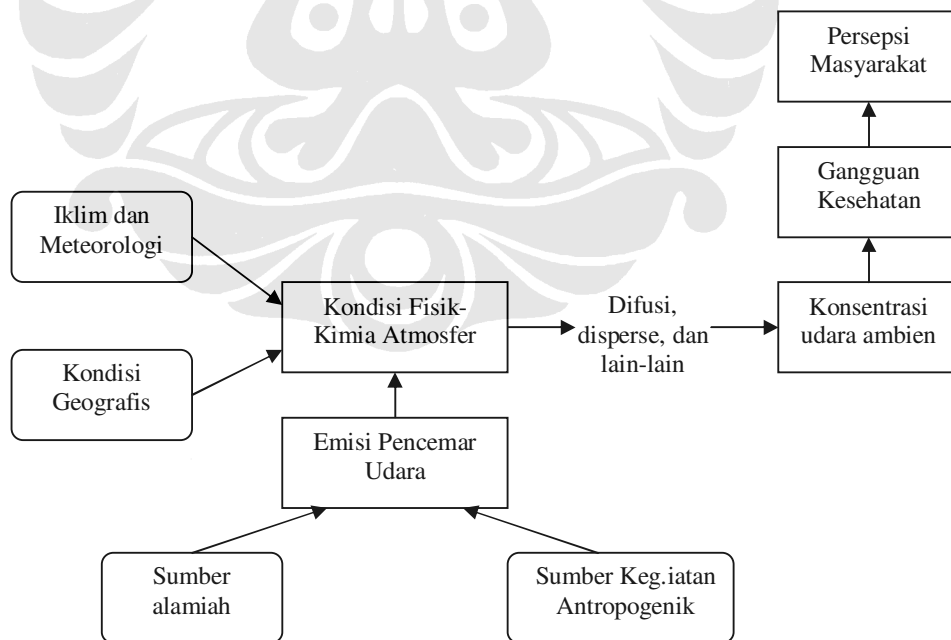


Gambar 2. Sistem Pencemaran Udara
Sumber: Soedomo, 2001

Dengan pengetahuan dasar yang mendalam mengenai emisi, topografi, meteorologi dan kimia suatu model matematik dapat dikembangkan untuk meramalkan konsentrasi-konsentrasi tersebut baik bagi pencemaran primer maupun yang sekunder, sebagai fungsi dari berbagai tempat dan lokasi yang berbeda dalam daerah aliran udaranya.

Model komputasi yang telah dikembangkan hingga saat ini meliputi model yang dapat meramalkan konsentrasi pencemar udara dari sebuah sumber tunggal (Model Kepulan/*Plume Model*), model dalam suatu daerah aliran udara (DAU), dan perpaduan berbagai sumber diam dan bergerak atau dalam suatu daerah geografis yang lebih luas di hilir sebuah keputulan sumber, misalnya perkotaan (model transport jarak jauh). Model-model yang telah divalidasikan dengan hasil pengamatan di lapangan, akan menjadi suatu instrumen yang sangat berguna untuk merumuskan strategi pengendalian yang tepat dan sesuai (Soedomo, 2001)

Perjalanan proses pencemaran udara dari mulai emisi sampai dengan timbulnya persepsi masyarakat juga dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 3. Proses pecemaran udara oleh suatu kejadian
(Sumber: Nugroho, 2007)

Gambaran sistem pencemaran udara tersebut, adalah suatu penjabaran langkah-langkah penting yang harus dilaksanakan, dalam usaha mengendalikan pencemaran udara, serta melindungi para penerima dari dampak negatif yang akan timbul. Tetapi, perlu diingat bahwa saat ini usaha pengendalian terutama akan diarahkan terhadap sumber pencemarnya yang menjadi unsur penyebab dalam sistem tersebut.

2.1.5. Aspek Meteorologis dalam Pencemaran Udara

Transportasi dan industri adalah sumber-sumber pencemaran udara yang terdapat di perkotaan. Pola penyebaran pencemar udara perkotaan memiliki suatu karakteristik tersendiri yang timbul akibat sifat orografisnya. Perubahan-perubahan dalam parameter-parameter penyebaran dan difusi pencemar udara yang diemisikan, baik terhadap kota itu sendiri dalam skala lokal, maupun terhadap daerah pedesaan sekitarnya dalam skala regional.

Kondisi tersebut menyebabkan hasil analisis udara sangat bervariasi serta banyak faktor yang menentukannya, antara lain:

- a. Suhu udara
- b. Kelembaban udara
- c. Kecepatan angin
- d. Arah angin
- e. Pola terdifusinya zat pencemar

Aktivitas perkotaan telah pula terbukti membawa perubahan-perubahan terhadap faktor-faktor meteorologi lokal. Dengan demikian dapat pula diperkirakan, bahwa pola penyebaran pencemar udara yang diemisikan di perkotaan juga akan mengalami perubahan evolusif yang berarti.

Beberapa faktor meteorologis juga terbukti mengalami perubahan akibat tumbuh dan berkembangnya aktivitas perkotaan. Fenomena meteorologis dalam skala lokal dan regional, yang dikenal sebagai sirkulasi udara perkotaan-pedesaan ini timbul akibat perubahan faktor meteorologi berikut ini:

a. Suhu Udara

Perubahan terhadap keseimbangan pemanasan adalah pengaruh meteorologi utama yang ditimbulkan oleh aktivitas perkotaan. Secara fisik suhu dapat diartikan sebagai tingkat gerakan molekul benda. Makin cepat gerakan molekul, akan makin tinggi suhunya. Suhu dapat juga didefinisikan sebagai tingkat panas suatu benda. Panas bergerak dari sebuah benda yang mempunyai suhu tinggi ke benda dengan suhu rendah (Tjasyono, 1999).

Suhu udara dapat mempengaruhi pencemaran udara, sesuai dengan keadaan tertentu. Suhu udara yang tinggi menyebabkan udara makin renggang sehingga konsentrasi pencemar menjadi semakin rendah. Sebaliknya pada suhu yang dingin keadaan udara makin padat sehingga konsentrasi pencemar di udara akan semakin tinggi (Ditjen P2MPLP, 1994).

Pada setiap kenaikan 1000 ft (\pm 300 meter) temperatur udara turun 5,4 °F. Tetapi tidak selalu terjadi penurunan temperatur pada setiap kenaikan 1000 ft lebih besar dari 5,4 °F. Keadaan seperti ini disebut *superradiabatic*, udara dikatakan menjadi tidak stabil. Apabila terjadi sebaliknya yaitu penurunan temperatur kurang dari 5,4 °F disebut *subadiabatic* udara dikatakan menjadi stabil. Keadaan udara yang tidak stabil sangat menguntungkan kita sebab keadaan tersebut membuat aliran udara cepat turun naik yang berarti pula mempercepat penurunan konsentrasi pencemaran udara (Soedjono, 1990).

Perubahan suhu udara dapat terjadi akibat:

a.1. Perubahan karakteristik pemanasan pada permukaan

Banyaknya dinding bangunan tegak lurus di daerah perkotaan akan mengubah keseimbangan pemanasan secara berarti: pada siang hari, gelombang sinar matahari yang ada akan mengalami pantulan berulang kali oleh permukaan tanah dan dinding-dinding tinggi, hingga gelombang sinar yang dapat terlepas langsung ke atmosfer sangat berkurang bila dibandingkan dengan daerah pedesaan yang relatif terbuka (Ardeniswan, 1997).

Panas yang datang dan menyentuh dinding juga akan tertahan dan tersimpan dalam waktu yang relatif lama. Pada malam hari, pelepasan panas yang tertahan siang hari akan meningkatkan temperatur minimum. Hal ini terutama berlangsung selama musim panas atau di perkotaan daerah tropis.

a.2. Perubahan penyinaran

Telah banyak diamati, bahwa unsur-unsur pencemar udara perkotaan (aerosol, debu, oksidan) dapat mengurangi intensitas sinar matahari yang datang antara 20% dan 30% (Soedomo, 2001). Hal tersebut mengakibatkan naiknya temperatur minimum, meskipun temperatur maksimum akan menurun dalam musim dingin.

a.3. *Urban heat island*

Akumulasi panas pada daerah perkotaan pada siang hari akan mengakibatkan keseimbangan radiatif pada malam hari yang berbeda dengan daerah pedesaan disekitarnya yang menyimpan panas lebih sedikit pada siang hari. Akan terjadi suatu gumpalan panas di daerah perkotaan yang isothermalnya biasanya terletak di daerah pusat kota. Intensitas gumpalan panas ini akan bergantung pada:

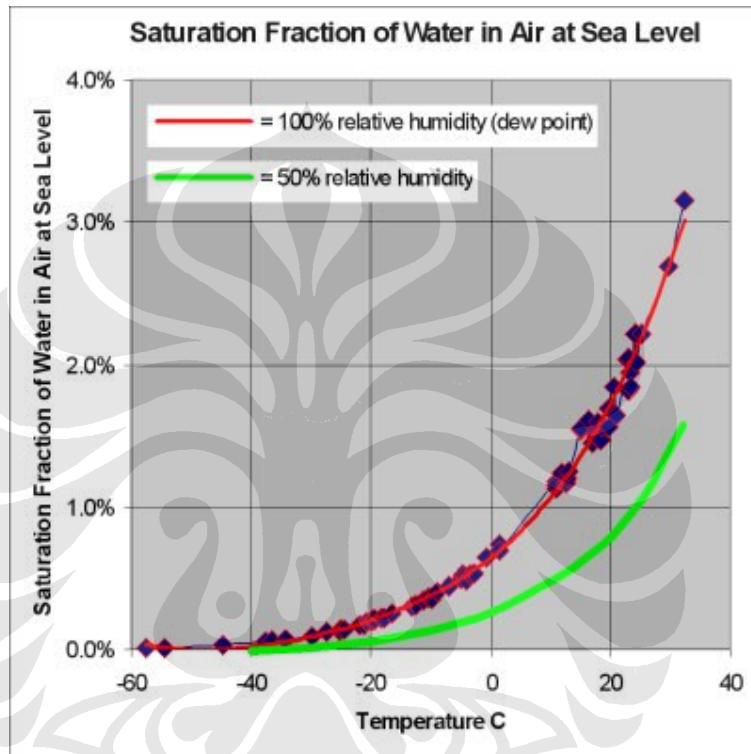
- a. Kecepatan angin kritis di atas gumpalan panas
- b. Awan dan presipitasi
- c. Lapisan pencampuran (*mixing layer*)

b. Kelembaban udara

Kelembaban adalah suatu kumpulan uap air yang terkandung di udara dalam waktu tertentu. Kelembaban juga adalah massa jenis uap (massa air yang terhadang dalam satu satuan volume udara) (Tjasyono, 1999). Sedangkan untuk mengetahui kadar kelembaban yang ada pada suatu ruangan dapat dihitung dengan beberapa satuan hitung. Satuan hitung tersebut diantaranya adalah kelembaban mutlak, kelembaban relatif, dan yang terakhir adalah spesifik kelembaban.

Alat untuk mengukur kelembaban disebut higrometer. Sebuah *humidistat* digunakan untuk mengatur tingkat kelembaban udara dalam sebuah bangunan

dengan sebuah pengawalembab (*dehumidifier*). Dapat dianalogikan dengan sebuah termometer dan termostat untuk suhu udara. Perubahan tekanan sebagian uap air di udara berhubungan dengan perubahan suhu. Konsentrasi air di udara pada tingkat permukaan laut dapat mencapai 3% pada 30 °C (86 °F), dan tidak melebihi 0,5% pada 0 °C (32 °F).



Gambar 4. Konsentrasi air di udara pada tingkat permukaan laut
(Sumber: Wikipedia, 02:06, 12 Februari 2008)

Sebagaimana suatu keadaan dari cuaca kelembaban menjadi informasi yang diperlukan. Hal ini dikarenakan kelembaban mempunyai peranan penting untuk mempengaruhi kegiatan aktivitas manusia. Kelembaban udara dapat mempengaruhi konsentrasi pencemar di udara. Pada kelembaban yang tinggi maka kadar uap air di udara dapat bereaksi dengan pencemar udara, menjadi zat lain yang tidak berbahaya atau menjadi pencemar sekunder (Ditjen P2M PLP, 1994).

Menurut Soekardi (1981) adanya variabiliti kandungan uap air berdasarkan tempat maupun waktu adalah penting, karena:

- 1) Besarnya uap air dalam udara adalah indikator kapasitas potensial atmosfer tentang terjadinya presipitasi.
- 2) Uap air mempunyai sifat menyerap radiasi bumi sehingga dapat menentukan cepat hilangnya panas bumi dan dengan demikian akan turut mengatur temperatur.
- 3) Makin besar jumlah uap air di dalam udara, maka makin besar jumlah energi potensial yang tersedia dalam atmosfer dan menjadi sumber terjadinya hujan angin (*storm*), sehingga dapat menentukan apakah udara itu kekal atau tidak.

Suatu keadaan udara dapat dikatakan mempunyai kadar kelembaban yang tinggi, apabila telah mencapai di atas angka 45%-50%. Angka ini bukanlah yang terendah, karena untuk sebagian keadaan bisa mencapai angka 85%. Kelembaban udara yang begitu tinggi ini menyebabkan sistem ekstrasi keringat kita menjadi terhalang, hal ini tentunya memberikan ketidaknyamanan. Bahkan berbagai risiko penyakit dapat disebabkan oleh keadaan kelembaban yang tinggi ini (Ditjen P2M PLP, 1994).

Penyakit asma adalah suatu infeksi yang sensitif terhadap kondisi kelembaban udara. Kelembaban udara yang tinggi sangat berbahaya bagi penderitanya. Selain itu bila dikombinasikan dengan hawa panas yang tinggi, dapat sangat membahayakan manusia. Kombinasi ini dapat dengan mudah menyebabkan kematian. Beberapa contoh kasus dapat kita lihat pada daratan Eropa yang terkena gelombang panas pada tahun 2007. Pada kasus tersebut gelombang panas menyebabkan beberapa lansia meninggal dunia.

Kabut atmosfer dari asam sulfat yang terbentuk karena reaksi antara kandungan pencemar sulfur dengan air di udara dapat merusak logam dan bahan-bahan lainnya, serta menyebabkan iritasi pada mata dan merusak paru-paru (Kusnoputranto, 2000). Batubara dan minyak bumi mengandung sejumlah kecil

(0,5%-5% massa) sulfur yang menjadi bahan pencemar. Bila bahan bakar tersebut dibakar, kotoran-kotoran sulfur bereaksi dengan oksigen dan menghasilkan sulfur dioksida. Gas tersebut keluar melalui cerobong asap dan masuk ke dalam atmosfer. Dalam beberapa hari sebagian besar sulfur dioksida di atmosfer tersebut dikonversi menjadi sulfur trioksida, yang kemudian bereaksi dengan air di udara untuk membentuk *droplet* dari asam sulfat (H_2SO_4).

c. Kecepatan angin

Kecepatan angin adalah waktu yang digunakan udara untuk menempuh jarak tertentu. Kecepatan angin dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain: (Soekardi, 1981)

1) Gradien tekanan horizontal

Gradien tekanan horizontal adalah perubahan tekanan per satuan jarak dengan arah horizontal dan tegak lurus isobar. Gradien tekanan dinyatakan dengan milibar per 100 kilometer. Dengan makin banyaknya gradien tekanan, kecepatan angin akan makin besar.

2) Letak geografis

Untuk gradien tekanan yang sama di dekat khatulistiwa kecepatan angin akan lebih besar daripada di lokasi yang jauh dari khatulistiwa. Dengan kata lain dapat dijelaskan bahwa semakin jauh suatu wilayah dari garis khatulistiwa maka kecepatan anginnnya akan semakin rendah.

3) Ketinggian tempat

Untuk gradien tekanan yang sama, makin tinggi tempatnya kecepatan angin akan semakin besar.

4) Waktu

Untuk gradien tekanan yang sama, kecepatan angin yang dekat dengan permukaan bumi waktu siang lebih cepat daripada waktu malam, dan sebaliknya untuk yang makin jauh dari permukaan bumi.

Kecepatan angin di daerah perkotaan akan cenderung menurun, akibat semakin besarnya gesekan yang timbul pada aliran udara, kecuali percepatan lokal yang dapat timbul akibat efek venturi, jet, dan sebagainya di sela-sela dinding yang

tinggi (Soedomo, 2001).

Angin permukaan pada umumnya menderita gaya gesek karena adanya kekasaran pada bumi. Gaya gesekan menyebabkan kecepatan angin melemah, hal ini bergantung pada permukaan alam. Jika permukaan datar dan halus maka efek gesekan akan kecil dan jika permukaannya kasar, misalnya tertutup tanaman, maka gaya gesekan besar (Tjasyono, 1999).

Konsentrasi zat pencemar dari sumbernya secara terus menerus berhubungan dengan kecepatan angin. Semakin tinggi kecepatan angin, penyebaran partikel atau molekul pencemar udara semakin besar sehingga konsentrasinya semakin kecil. Dengan kata lain angin kencang bergolaknya lemah sehingga konsentrasi pencemar menjadi pekat.

2.1.6. Karakteristik Dampak Pencemar Udara Ambien pada Kesehatan

Udara adalah media lingkungan yang menjadi kebutuhan dasar manusia. Oleh karena itu udara perlu mendapatkan perhatian yang serius. Hal ini menjadi kebijakan Pembangunan Kesehatan Indonesia 2010 dimana program pengendalian pencemaran udara adalah salah satu dari sepuluh program unggulan.

Pertumbuhan pembangunan seperti industri, transportasi, di samping memberikan dampak positif namun di sisi lain akan memberikan dampak negatif dimana salah satunya berupa pencemaran udara dan kebisingan baik yang terjadi di dalam ruangan (*indoor*) maupun di luar ruangan (*outdoor*) yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan terjadinya penularan penyakit.

Diperkirakan pencemaran udara dan kebisingan akibat kegiatan industri dan kendaraan bermotor akan meningkat 10 kali pada tahun 2020 dari kondisi tahun 1990 (Depkes, 1999). Hasil studi yang dilakukan oleh Ditjen PPM & PL, tahun 1999 pada pusat keramaian di 3 kota besar di Indonesia seperti Jakarta, Yogyakarta, dan Semarang menunjukkan gambaran sebagai berikut: kadar debu (SPM) 280 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, kadar SO_2 sebesar 0,76 ppm, dan kadar NO_x sebesar 0,50 ppm,

dimana angka tersebut telah melebihi nilai ambang batas/standar kualitas udara. Kondisi kualitas udara di Jakarta khususnya kualitas debu sudah cukup memprihatinkan, yaitu di Pulo Gadung rata-rata 155 ug/m^3 , dan Casablanca rata-rata 680 ug/m^3 , Tingkat kebisingan pada terminal Tanjung Priok adalah rata-rata 74 dBA dan di sekitar RSUD Koja 63 dBA.

Hasil Penelitian lain yang dilakukan oleh Pramono (2002), mendapatkan hasil di Kecamatan Kembangan Jakarta Pusat bahwa jumlah kasus ISPA tidak berhubungan dengan konsentrasi PM_{10} , CO, dan NO_2 tetapi berhubungan dengan konsentrasi SO_2 dan O_3 . Selain itu jumlah kasus penyakit ISPA juga tidak berhubungan dengan suhu udara dan kelembaban relatif. Hal tersebut menunjukkan bahwa kualitas udara ambien memberikan pengaruh yang berbeda pada tingkat kesehatan masyarakat.

Disamping kualitas udara ambien, kualitas udara dalam ruangan (*indoor air quality*) juga menjadi masalah yang perlu mendapat perhatian karena akan berpengaruh pada kesehatan manusia. Timbulnya kualitas udara dalam ruangan umumnya disebabkan oleh beberapa hal, yaitu kurangnya ventilasi udara (52%), adanya sumber kontaminasi di dalam ruangan (16%) kontaminasi dari luar ruangan (10%), mikroba (5%), bahan material bangunan (4%), dan lain-lain (13%).

Gambaran tentang karakteristik zat-zat pencemar udara serta dampaknya pada kesehatan manusia dapat dijabarkan sebagai berikut:

a. *Particulate Matter 10* (PM_{10})

PM_{10} adalah pencemar yang berbentuk debu/partikulat padat atau cair yang berukuran antara $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ sampai dengan $10 \text{ }\mu\text{m}$ (Frank, 1976). Secara umum partikulat adalah zat padat yang disebabkan oleh kekuatan alami atau mekanik seperti pengolahan, penghancuran, peledakan, pelembutan, pengepakan dan lain sebagainya dari bahan-bahan organik maupun anorganik.

Partikulat berada di udara dalam bentuk *suspended particulate matter (SPM)* atau disebut juga dengan *inhalable* yang dapat merusak paru-paru. Partikulat mempunyai sifat mengendap. Pada umumnya partikulat yang mempunyai ukuran diameter lebih besar akan lebih cepat mengendap.

Seperti sifat partikulat pada umumnya, PM_{10} juga cepat menggumpal dan cenderung menggumpal antara satu dengan lainnya. Partikulat yang berukuran kurang dari $0,3 \mu m$ apabila terjadi penggumpalan akan mencegah terjadinya gerak *Brown* disebabkan oleh ukurannya menjadi lebih besar dan lebih berat.

Ukuran partikulat di udara tidak selalu tetap seperti pada ukuran semula, tetapi dapat berubah, misalnya partikulat yang berukuran kurang dari $0,1 \mu m$ akan sulit mengendap karena masih dipengaruhi oleh gerak *Brown*, tetapi setelah beberapa lama, partikulat-partikulat ini akan saling bertumbukan di udara, selanjutnya melalui proses koagulasi antar sesama partikulat sehingga akan menghasilkan partikulat yang berukuran lebih besar.

Selain proses koagulasi, pada udara yang lembab ukuran volume partikulat dapat berubah menjadi lebih besar karena partikulat akan menyerap air (Shern, 1992), dan karena adanya proses penyerapan, maka partikulat dapat berubah menjadi partikulat asam yang bersifat iritatif.

Partikulat dapat terbentuk dari campuran heterogen zat cair dengan sulfur dioksida yang bersifat korosif terhadap barang-barang logam. Sumber utama partikulat adalah pembakaran batubara pada industri, kebakaran hutan, dan pembakaran sampah (Tjasyono, 1999).

Inhalasi adalah satu-satunya rute pajanan yang menjadi perhatian dalam hubungannya dengan dampak pada kesehatan. Walau demikian ada juga beberapa senyawa lain yang melekat bergabung pada partikulat, seperti timah hitam (Pb) dan senyawa beracun lainnya, yang dapat memajan tubuh melalui rute lain. Pengaruh partikulat debu bentuk padat maupun cair yang berada di udara sangat

bergantung pada ukurannya. Ukuran partikulat debu bentuk padat maupun cair yang berada di udara sangat bergantung pada ukurannya.

Partikel yang berukuran lebih besar dari 5 μm akan terhenti dan terkumpul terutama di dalam hidung dan tenggorokan. Meskipun partikel tersebut sebagian dapat masuk ke dalam paru-paru tetapi tidak pernah lebih jauh dari kantong-kantong udara atau *bronchi*, bahkan segera dapat dikeluarkan oleh gerakan silia. Partikel yang berukuran antara 0,5-5 μm dapat terkumpul di dalam paru-paru sampai pada *bronchioli* dan hanya sebagian kecil yang sampai pada *alveoli*. Sebagian besar partikel yang terkumpul dalam *bronchioli* akan dikeluarkan oleh silia dalam waktu 2 jam. Partikel yang berukuran diameter kurang dari 0,5 μm dapat mencapai dan tinggal di dalam *alveoli*. Pembersihan partikel-partikel yang sangat kecil tersebut dari *alveoli* sangat lambat dan tidak sempurna dibandingkan dengan di dalam saluran yang lebih besar. Beberapa partikel yang tetap tertinggal di dalam *alveoli* dapat terabsorpsi ke dalam darah.

Partikel-partikel yang masuk dan tertinggal di dalam paru-paru mungkin berbahaya bagi kesehatan. Partikel-partikel tersebut mungkin beracun karena sifat kimia dan fisiknya. Selain itu, partikel tersebut mungkin juga bersifat *inert* (tidak bereaksi) tetapi jika tertinggal di dalam saluran pernafasan dapat mengganggu pembersihan bahan-bahan lain yang berbahaya. Sifat lain dari partikel-partikel tersebut adalah dapat membawa molekul-molekul gas yang berbahaya. Cara membawanya adalah dengan mengabsorpsi atau mengadsorpsi sehingga molekul-molekul gas tidak dapat mencapai dan tertinggal di bagian paru-paru yang sensitif (Fardiaz, 1992).

Selain itu partikulat debu yang melayang dan berterbangan dibawa angin akan menyebabkan iritasi pada mata dan dapat menghalangi daya tembus pandang mata (*visibility*). Adanya ceceran logam beracun yang terdapat dalam partikulat debu di udara adalah bahaya yang terbesar bagi kesehatan. Pada umumnya udara yang tercemar hanya mengandung logam berbahaya sekitar 0,01% sampai 3% dari seluruh partikulat debu di udara, akan tetapi logam tersebut dapat bersifat

akumulatif dan kemungkinan dapat terjadi reaksi sinergistik pada jaringan tubuh. Selain itu diketahui pula bahwa logam yang terkandung di udara yang dihirup mempunyai pengaruh yang lebih besar dibandingkan dengan dosis sama yang berasal dari makanan atau air minum. Oleh karena itu kadar logam di udara yang terikat pada partikulat patut mendapat perhatian.

b. Sulfur dioksida (SO_2)

Pencemaran oleh sulfur oksida terutama disebabkan oleh dua komponen sulfur bentuk gas yang tidak berwarna, yaitu sulfur dioksida (SO_2) dan Sulfur trioksida (SO_3), dan keduanya disebut sulfur oksida (SO_x). Sulfur dioksida mempunyai karakteristik bau yang tajam dan tidak mudah terbakar di udara, sedangkan sulfur trioksida adalah komponen yang tidak reaktif.

Pembakaran bahan-bahan yang mengandung sulfur akan menghasilkan kedua bentuk sulfur oksida, tetapi jumlah relatif masing-masing tidak dipengaruhi oleh jumlah oksigen yang tersedia. Di udara SO_2 selalu terbentuk dalam jumlah besar. Jumlah SO_3 yang terbentuk bervariasi dari 1 sampai 10% dari total SO_x .

Sepertiga dari jumlah sulfur yang terdapat di atmosfer adalah hasil kegiatan manusia dan kebanyakan dalam bentuk SO_2 . Dua pertiga hasil kegiatan manusia dan kebanyakan dalam bentuk SO_2 . Dua pertiga bagian lagi berasal dari sumber-sumber alam seperti vulkano dan terdapat dalam bentuk H_2S dan oksida. Masalah yang ditimbulkan oleh bahan pencemar yang dibuat oleh manusia adalah ditimbulkan oleh bahan pencemar yang dibuat oleh manusia adalah dalam hal distribusinya yang tidak merata sehingga terkonsentrasi pada daerah tertentu. Sedangkan pencemaran yang berasal dari sumber alam biasanya lebih tersebar merata. Tetapi pembakaran bahan bakar pada sumbernya adalah sumber pencemaran SO_x , misalnya pembakaran arang, minyak bakar gas, kayu dan sebagainya. Sumber SO_x yang kedua adalah dari proses-proses industri seperti pemurnian petroleum, industri asam sulfat, industri peleburan baja dan sebagainya (Soedomo, 2001).

Pencemaran SO_x menimbulkan dampak pada manusia dan hewan, kerusakan pada tanaman terjadi pada kadar sebesar 0,5 ppm. Pengaruh utama polutan SO_x pada manusia adalah iritasi sistem pernafasan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa iritasi tenggorokan terjadi pada kadar SO_2 sebesar 5 ppm atau lebih bahkan pada beberapa individu yang sensitif iritasi terjadi pada kadar 1-2 ppm. SO_2 dianggap pencemar yang berbahaya bagi kesehatan terutama terhadap orang tua dan penderita yang mengalami penyakit khronis pada sistem pernafasan kardiovaskular (Ditjen P2M PLP, 2001).

Individu dengan gejala penyakit tersebut sangat sensitif terhadap kontak dengan SO_2 , meskipun dengan kadar yang relatif rendah. Kadar SO_2 (ppm) yang berpengaruh pada gangguan kesehatan adalah sebagai berikut:

- 3 – 5 ppm : Jumlah terkecil yang dapat dideteksi dari baunya
- 8 – 12 ppm : Jumlah terkecil yang segera mengakibatkan iritasi tenggorokan
- 20 ppm : Jumlah terkecil yang akan mengakibatkan iritasi mata
- 20 ppm : Jumlah terkecil yang akan mengakibatkan batuk
- 20 ppm : Maksimum yang diperbolehkan konsentrasi dalam waktu lama
- 50 – 100 ppm : Maksimum yang diperbolehkan untuk kontrak singkat (30 menit)
- 400 -500 ppm : Berbahaya meskipun kontak secara singkat

3. Nitrogen dioksida (NO_2)

Oksida nitrogen (NO_x) adalah kelompok gas nitrogen yang terdapat di atmosfer yang terdiri atas nitrogen monoksida (NO) dan nitrogen dioksida (NO_2). Walaupun ada bentuk oksida nitrogen lainnya, tetapi kedua gas tersebut yang paling banyak diketahui sebagai bahan pencemar udara. Nitrogen monoksida adalah gas yang tidak berwarna dan tidak berbau sebaliknya nitrogen dioksida berwarna coklat kemerahan dan berbau tajam.

Nitrogen monoksida terdapat di udara dalam jumlah lebih besar daripada NO_2 . Pembentukan NO dan NO_2 adalah reaksi antara nitrogen dan oksigen di udara sehingga membentuk NO , yang bereaksi lebih lanjut dengan lebih banyak oksigen membentuk NO_2 .

Udara terdiri atas 78% volume nitrogen dan 20% volume oksigen. Pada suhu kamar, hanya sedikit kecenderungan nitrogen dan oksigen untuk bereaksi satu sama lainnya. Pada suhu yang lebih tinggi (di atas 1.210 °C) keduanya dapat bereaksi membentuk NO dalam jumlah banyak sehingga mengakibatkan pencemaran udara. Dalam proses pembakaran, suhu yang digunakan biasanya mencapai 1.210-1.765 °C, oleh karena itu reaksi ini adalah sumber NO yang penting. Jadi reaksi pembentukan NO adalah hasil samping dari proses pembakaran.

Dari seluruh jumlah oksigen nitrogen (NO_x) yang dibebaskan ke udara, jumlah yang terbanyak adalah dalam bentuk NO yang diproduksi oleh aktivitas bakteri. Akan tetapi pencemaran NO dari sumber alami ini tidak menjadi masalah karena tersebar secara merata sehingga jumlahnya menjadi kecil. Yang menjadi masalah adalah pencemaran NO yang diproduksi oleh kegiatan manusia karena jumlahnya akan meningkat pada tempat-tempat tertentu.

Kadar NO_x di udara perkotaan biasanya 10–100 kali lebih tinggi dari pada di udara pedesaan. Kadar NO_x di udara daerah perkotaan dapat mencapai 0,5 ppm (500 ppb). Seperti halnya CO, emisi NO_x dipengaruhi oleh kepadatan penduduk. Hal tersebut dikarenakan sumber utama NO_x yang diproduksi manusia adalah dari pembakaran. Sebagian besar proses pembakaran terjadi pada kendaraan bermotor, produksi energi dan pembuangan sampah. Sebagian besar emisi NO_x buatan manusia berasal dari pembakaran arang, minyak, gas, dan bensin.

NO_2 adalah gas yang toksik bagi manusia. Efek yang terjadi bergantung pada dosis dan juga lamanya pemaparan yang diterima seseorang. Konsentrasi NO_2 yang berkisar antara 50–100 ppm dapat menyebabkan peradangan paru-paru untuk paparan selama beberapa menit saja. Dalam fase ini orang masih dapat sembuh kembali dalam waktu 6–8 minggu. Konsentrasi 150–200 ppm dapat menyebabkan pemaparan *bronchioli* yang disebut *bronchiolitis fibrosis*

obliterans, orang dapat meninggal dalam waktu 3–5 minggu setelah pemaparan. Konsentrasi lebih dari 500 ppm dapat mematikan dalam waktu 2–10 hari (Slamet, 2000).

Menurut Ditjen P2M PLP Depkes RI (1994), penelitian menunjukkan bahwa NO₂ empat kali lebih beracun daripada NO. Selama ini belum pernah dilaporkan terjadinya keracunan NO yang mengakibatkan kematian. Di udara ambien yang normal, NO dapat mengalami oksidasi menjadi NO₂ yang bersifat racun. Penelitian terhadap hewan percobaan yang dipajankan NO dengan dosis yang sangat tinggi, memperlihatkan gejala kelumpuhan sistem syaraf dan kekejangan.

Penelitian lain menunjukkan bahwa tikus yang dipajani NO sampai 2500 ppm akan hilang kesadarannya setelah 6-7 menit, tetapi jika kemudian diberi udara segar akan sembuh kembali setelah 4–6 menit. Tetapi jika pajanan NO pada kadar tersebut berlangsung selama 12 menit, pengaruhnya tidak dapat dihilangkan kembali, dan semua tikus yang diuji akan mati.

NO₂ bersifat racun terutama terhadap paru. Kadar NO₂ yang lebih tinggi dari 100 ppm dapat mematikan sebagian besar binatang percobaan dan 90% dari kematian tersebut disebabkan oleh gejala pembengkakan paru (*edema pulmonari*). Kadar NO₂ sebesar 800 ppm akan mengakibatkan 100% kematian pada binatang-binatang yang diuji dalam waktu 29 menit atau kurang. Pajanan NO₂ dengan kadar 5 ppm selama 10 menit terhadap manusia mengakibatkan kesulitan dalam bernafas.

d. Karbon Monoksida (CO)

Karbon Monoksida (CO) adalah zat pencemar udara yang paling besar dan umum dijumpai. CO berbentuk gas yang sangat stabil di udara, mempunyai waktu tinggal 2–4 bulan. Sebagian besar CO terbentuk akibat proses pembakaran bahan-bahan karbon yang digunakan sebagai bahan bakar secara tidak sempurna, misalnya dari pembakaran bahan bakar minyak, pemanas, proses-proses industri, dan pembakaran sampah.

Karbon monoksida di lingkungan dapat terbentuk secara alamiah, tetapi sumber utamanya adalah dari kegiatan manusia. Korban monoksida yang berasal dari alam termasuk dari lautan, oksidasi metal di atmosfer, pegunungan, kebakaran hutan dan badai listrik alam. Sumber utama CO berasal dari kendaraan bermotor dan proses industri menduduki tempat kedua, sedangkan pembakaran sampah dan kebakaran hutan menduduki tempat ketiga dan keempat (Tjasyono, 1999).

Kadar CO di perkotaan cukup bervariasi bergantung pada kepadatan kendaraan bermotor yang menggunakan bahan bakar bensin dan umumnya ditemukan kadar maksimum CO yang bersamaan dengan jam-jam sibuk pada pagi dan malam hari. Selain cuaca, variasi dari kadar CO juga dipengaruhi oleh topografi jalan dan bangunan di sekitarnya. Pemajanan CO dari udara ambien dapat direfleksikan dalam bentuk kadar karboksi-haemoglobin (HbCO) dalam darah. Zat terbentuk dengan sangat perlahan karena butuh waktu 4-12 jam untuk tercapainya keseimbangan antara kadar CO di udara dan HbCO dalam darah. Oleh karena itu kadar CO di dalam lingkungan, cenderung dinyatakan sebagai kadar rata-rata dalam 8 jam pemajanan. Data CO yang dinyatakan dalam rata-rata setiap 8 jam pengukuran sepanjang hari (*moving 8 hour average concentration*) adalah lebih baik dibandingkan dari data CO yang dinyatakan dalam rata-rata dari 3 kali pengukuran pada periode waktu 8 jam yang berbeda dalam sehari. Perhitungan tersebut akan lebih mendekati gambaran dari respons tubuh manusia terhadap keracunan CO dari udara.

Karbon monoksida yang bersumber dari dalam ruang (*indoor*) terutama berasal dari alat pemanas ruang yang menggunakan bahan bakar fosil dan tungku masak. Kadarnya akan lebih tinggi bila ruangan tempat alat tersebut bekerja, tidak memadai ventilasinya. Namun umumnya pemajanan yang berasal dari dalam ruangan kadarnya lebih kecil dibandingkan dari kadar CO hasil pemajanan asap rokok.

Menurut Fardiaz (1992), CO adalah suatu komponen yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak mempunyai rasa yang terdapat dalam bentuk gas pada suhu di

atas -192° C. Komponen ini mempunyai berat sebesar 46,5% dari berat air dan tidak larut dalam air.

Karakteristik biologik yang paling penting dari CO adalah kemampuannya untuk berikatan dengan haemoglobin, pigmen sel darah merah yang mengangkut oksigen ke seluruh tubuh. Sifat ini menghasilkan pembentukan karboksihaemoglobin (HbCO) yang 200 kali lebih stabil dibandingkan oksihemoglobin (HbO_2). Penguraian HbCO yang relatif lambat menyebabkan terhambatnya kerja molekul sel pigmen tersebut dalam fungsinya membawa oksigen ke seluruh tubuh. Kondisi seperti ini bisa berakibat serius, bahkan fatal, karena dapat menyebabkan keracunan. Selain itu, metabolisme otot dan fungsi enzim intra-seluler juga dapat terganggu dengan adanya ikatan CO yang stabil tersebut. Dampak keracunan CO sangat berbahaya bagi orang yang telah menderita gangguan pada otot jantung atau sirkulasi darah perifer yang parah.

Dampak dari CO bervariasi bergantung pada status kesehatan seseorang pada saat terpajan. Pada beberapa orang yang berbadan gemuk dapat mentoleransi pajanan CO sampai kadar HbCO dalam darahnya mencapai 40% dalam waktu singkat. Seseorang yang menderita sakit jantung atau paru-paru akan menjadi lebih parah apabila kadar HbCO dalam darahnya sebesar 5–10% (Ditjen P2M PLP, 2002).

Pengaruh CO kadar tinggi pada sistem syaraf pusat dan sistem kardiovaskular telah banyak diketahui. Namun respon dari masyarakat berbadan sehat terhadap pajanan CO kadar rendah dan dalam jangka waktu panjang masih sedikit diketahui. Misalnya kinerja para petugas jaga, yang harus mempunyai kemampuan untuk mendeteksi adanya perubahan kecil dalam lingkungannya yang terjadi pada saat yang tidak dapat diperkirakan sebelumnya dan membutuhkan kewaspadaan tinggi dan terus menerus, dapat terganggu/terhambat pada kadar HbCO yang berada di bawah 10% dan bahkan sampai 5% (hal ini secara kasar ekuivalen dengan kadar CO di udara masing-masing sebesar 80 dan 35 mg/m^3) Pengaruh ini sangat terlihat pada perokok, karena kemungkinan sudah terbiasa

terpapaj dengan kadar yang sama dari asap rokok.

Beberapa studi yang dilakukan terhadap sejumlah sukarelawan berbadan sehat yang melakukan latihan berat (studi untuk melihat penyerapan oksigen maksimal) menunjukkan bahwa kesadaran hilang pada kadar HbCO 50% dengan latihan yang lebih ringan, kesadaran hilang pada HbCO 70% selama 5-60 menit. Gangguan tidak dirasakan pada HbCO 33%, tetapi denyut jantung meningkat cepat dan tidak proporsional.

Studi dalam jangka waktu yang lebih panjang terhadap pekerja yang bekerja selama 4 jam dengan kadar HbCO 5-6% menunjukkan pengaruh yang serupa tpada denyut jantung, tetapi agak berbeda. Hasil studi di atas menunjukkan bahwa paling sedikit untuk para bukan perokok, ternyata ada hubungan yang linier antara HbCO dan menurunnya kapasitas maksimum oksigen.

Walaupun kadar CO yang tinggi dapat menyebabkan perubahan tekanan darah, meningkatkan denyut jantung, ritme jantung menjadi abnormal, gagal jantung, dan kerusakan pembuluh darah perifer, tidak banyak didapatkan data tentang pengaruh pemajanan CO kadar rendah pada sistem kardiovaskular.

Hubungan yang telah diketahui tentang merokok dan peningkatan risiko penyakit jantung koroner menunjukkan bahwa CO kemungkinan mempunyai peran dalam memicu timbulnya penyakit tersebut (perokok berat tidak jarang mengandung kadar HbCO sampai 15 %). Namun tidak cukup bukti yang menyatakan bahwa karbon monoksida menyebabkan penyakit jantung atau paru-paru, tetapi jelas bahwa CO mampu untuk mengganggu transpor oksigen ke seluruh tubuh yang dapat berakibat serius pada seseorang yang telah menderita sakit jantung atau paru-paru.

Studi epidemiologi tentang kesakitan dan kematian akibat penyakit jantung dan kadar CO di udara yang dibagi berdasarkan wilayah, sangat sulit untuk ditafsirkan. Namun dada terasa sakit pada saat melakukan gerakan fisik, terlihat

jelas akan timbul pada pasien yang terpajan CO dengan kadar 60 mg/m^3 , yang menghasilkan kadar HbCO mendekati 5%. Walaupun wanita hamil dan janin yang dikandungnya akan menghasilkan CO dari dalam tubuh (*endogenous*) dengan kadar yang lebih tinggi, pajanan tambahan dari luar dapat mengurangi fungsi oksigenasi jaringan dan plasental, yang menyebabkan bayi dengan berat badan rendah. Kondisi seperti ini menjelaskan mengapa wanita merokok melahirkan bayi dengan berat badan lebih rendah dari normal.

Masih ada dua aspek lain dari pengaruh CO pada kesehatan yang perlu dicatat. Pertama, tampaknya binatang percobaan dapat beradaptasi terhadap pemajanan CO karena mampu mentoleransi dengan mudah pemajanan akut pada kadar tinggi, walaupun masih memerlukan penjelasan lebih lanjut. Kedua, dalam kaitannya dengan CO di lingkungan kerja yang dapat mengganggu pertumbuhan janin pada pekerja wanita, adalah kenyataan bahwa paling sedikit satu jenis senyawa hidrokarbon-halogen yaitu metilen khlorida (diklorometan), dapat menyebabkan meningkatnya kadar HbCO karena ada metabolisme di dalam tubuh setelah absorpsi terjadi.

e. Ozon (O_3)

Ozon adalah salah satu zat pengoksidasi yang sangat kuat setelah fluor, oksigen dan oksigen fluorida. Meskipun di alam terdapat dalam jumlah kecil, tetapi ozon sangat berguna untuk melindungi bumi dari radiasi ultraviolet (UV-B). Ozon terbentuk di udara pada ketinggian 30 km dimana radiasi UV matahari dengan panjang gelombang 242 nm secara perlahan memecah molekul oksigen (O_2) menjadi atom oksigen tergantung dari jumlah molekul O_2 atom-atom oksigen secara cepat membentuk ozon. Ozon menyerap radiasi sinar matahari dengan kuat di daerah panjang gelombang 240-320 nm. Absorpsi radiasi elektromagnetik oleh ozon di daerah ultraviolet dan inframerah digunakan dalam metode-metode analitik.

Ozon juga adalah substansi yang lazim disebut oksida karena biasanya menjadi bagian terbanyak dari oksida yang terukur, dan menjadi hasil awal dan berkesinambungan dari reaksi *photochemical smog*, ozon tidak berwarna tetapi berbau tajam (Depkes RI, 1994). Sifat lain dari ozon antara lain adalah gas yang tidak stabil, berwarna biru, mudah mengoksidasi dan bersifat iritan yang kuat terhadap saluran pernafasan.

Ozon didapat secara alamiah di dalam stratosfir dan sebagian kecil di dalam toposfer, ozon juga menjadi konstituen dari *smog* (*smoke* dan *fog*). Secara artifisial ozon didapat dari berbagai sumber seperti peralatan listrik bervoltase tinggi, peralatan sinar Röntgen dan spektrograf.

Efek kesehatan yang dapat timbul karena ozon bereaksi dengan segala zat organik yang dilaluinya. Ozon dapat memasuki saluran pernafasan lebih dalam daripada SO₂. Ozon akan mematikan sel-sel makrofag, menstimulasi pembakaran dinding arteri paru-paru dan bila pemaparan terhadap ozon sudah terjadi cukup lama, dapat terjadi kerusakan paru-paru yang disebut *emphysema* dan sebagai akibatnya kerja jantung dapat melemah.

Emphysema disebabkan karena dinding *alveoli* tidak elastis lagi sehingga tidak dapat mengembang, tidak dapat berfungsi dalam pertukaran gas dan bila kelamaan akan terjadi robekan-robekan pada dinding *alveoli*. Selain itu ozon juga dianggap dapat menyebabkan depresi pusat pernafasan, sehingga pengaturan ventilasi paru-paru dapat terganggu (Slamet, 2000).

Beberapa gejala yang dapat diamati pada manusia yang diberi perlakuan kontak dengan ozon, sampai dengan kadar 0,2 ppm tidak ditemukan pengaruh apapun, pada kadar 0,3 ppm mulai terjadi iritasi pada hidung dan tenggorokan. Kontak dengan Ozon pada kadar 1,0–3,0 ppm selama 2 jam pada orang-orang yang

sensitif dapat mengakibatkan pusing berat dan kehilangan koordinasi. Pada kebanyakan orang, kontak dengan ozon dengan kadar 9,0 ppm selama beberapa waktu akan mengakibatkan *pulmonary oedema* (Depkes RI, 2002).

2.1.7. Infeksi Saluran Pernafasan Akut (ISPA)

Infeksi saluran pernafasan akut (ISPA) yang diadaptasi dari istilah dalam bahasa Inggris *Acute Respiratory Infections (ARI)* mempunyai pengertian sebagai berikut (Depkes RI, 1999):

- a. Infeksi adalah masuknya kuman atau mikroorganisma ke dalam tubuh manusia dan berkembang biak sehingga menimbulkan gejala penyakit.
- b. Saluran pernafasan adalah organ mulai dari hidung hingga *alveoli* beserta organ adneksanya seperti sinus-sinus, rongga telinga tengah dan *pleura*. ISPA secara anatomis mencakup saluran pernafasan bagian atas, saluran pernafasan bagian bawah (termasuk jaringan paru-paru) dan organ adneksa saluran pernafasan.

Dengan batasan ini, jaringan paru termasuk dalam saluran pernafasan (*respiratory tract*). Sedangkan infeksi akut adalah infeksi yang berlangsung sampai dengan 14 hari. Batas 14 hari diambil untuk menunjukkan proses akut meskipun untuk beberapa penyakit yang dapat digolongkan dalam ISPA proses ini dapat berlangsung lebih dari 14 hari.

ISPA mengandung tiga unsur, yaitu infeksi, saluran pernafasan dan akut (Ditjen P2M PLP, 2000). Infeksi adalah masuknya kuman atau mikroorganisme ke dalam tubuh manusia dan berkembangbiak sehingga menimbulkan gejala penyakit. Saluran pernafasan adalah organ yang mulai dari hidung hingga *alveoli* beserta dengan adneksanya seperti sinus-sinus rongga telinga tengah dan *pleura*. Dengan demikian ISPA secara anatomis mencakup saluran pernafasan bagian atas, saluran pernafasan bagian bawah (termasuk jaringan paru-paru) dan organ adneksa

saluran pernafasan. Sedangkan infeksi akut adalah infeksi yang berlangsung sampai dengan 14 hari.

Sebagian besar dari infeksi saluran pernapasan hanya bersifat ringan seperti batuk pilek dan tidak memerlukan pengobatan dengan antibiotik, namun demikian anak akan menderita *pneumoni* bila infeksi paru ini tidak diobati dengan antibiotik dapat mengakibatkan kematian. ISPA dapat ditularkan melalui air ludah, darah, bersin, udara pernapasan yang mengandung kuman yang terhirup oleh orang sehat kesaluran pernapasannya.

Kelainan pada sistem pernapasan terutama infeksi saluran pernapasan bagian atas maupun bawah dan asma banyak diderita oleh para pejalan kaki di kota-kota. Infeksi saluran pernapasan bagian atas terutama yang disebabkan oleh virus, sering terjadi pada semua golongan masyarakat pada bulan-bulan musim dingin. ISPA yang berlanjut menjadi *pneumonia* sering terjadi pada anak kecil terutama apabila terdapat gizi kurang dan dikombinasi dengan keadaan lingkungan yang tidak hygiene. Risiko terutama terjadi pada anak-anak karena meningkatnya kemungkinan infeksi silang, beban immunologisnya terlalu besar karena dipakai untuk penyakit parasit dan cacing, serta tidak tersedianya atau berlebihannya pemakaian antibiotik.

Etiologi ISPA terdiri lebih dari 300 jenis bakteri, virus, dan riketsia. Bakteri penyebabnya antara lain dari genus *Streptococcus*, *Stafilococcus*, *Pnemococcus*, *Hemofilus*, *Bordetella*, dan *Corinebakterium*. Virus penyebabnya antara lain golongan *Miksovirus*, *Adenovirus*, *Coronavirus*, *Picornavirus*, *Mikoplasma*, *Herpesvirus*.

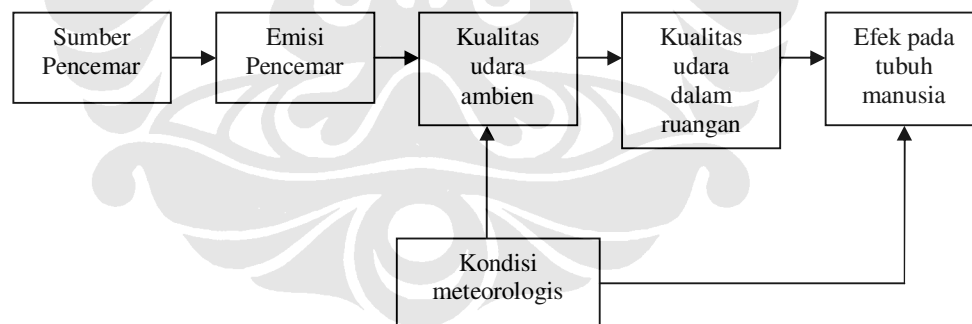
2.2. Kerangka Berpikir

Meningkatnya volume kendaraan di suatu kota dapat menjadi penyebab terjadinya

pencemaran udara. Emisi pencemar dari kendaraan bermotor dapat mempengaruhi kadar zat-zat pencemar pada udara ambien seperti PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , dan ozon (O_3). Selain dipengaruhi oleh sumber, pencemaran udara juga dipengaruhi oleh kondisi meteorologis seperti temperatur udara, kelembaban udara dan kecepatan angin.

Kondisi udara ambien akan berpengaruh juga pada kondisi udara dalam ruang permukiman. Hal tersebut akan dapat meningkatkan terjadinya pencemaran udara dalam ruang. Pencemaran udara yang terjadi dalam ruang dapat memapar para penghuni rumah tersebut dalam dosis tertentu. Manusia yang terpapar oleh tersebut akan mengalami efek yang tidak diinginkan yaitu gangguan kesehatan, terutama dalam bentuk infeksi saluran pernafasan akut (ISPA).

Hal tersebut dapat digambarkan dalam kerangka teori sebagai berikut:



Gambar 5. Kerangka berpikir

2.3. Kerangka Konsep

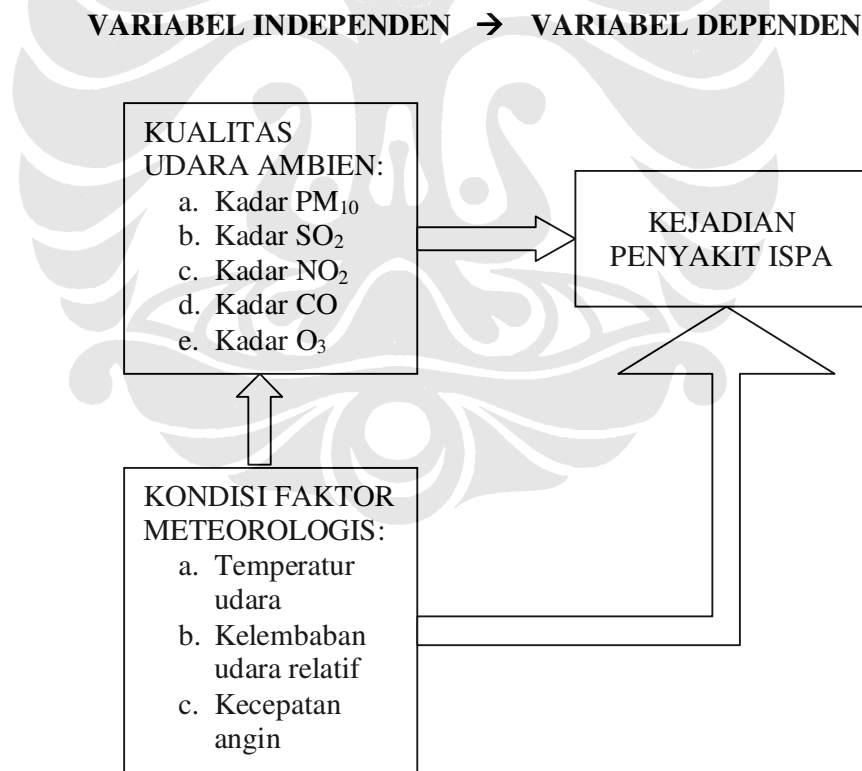
Berdasarkan kerangka teori tersebut, maka ditentukan pokok-pokok yang akan menjadi variabel penelitian. Karena penelitian ini adalah penelitian terhadap suatu kelompok (agregat), maka karakteristik individu dan tempat tinggalnya tidak menjadi fokus penelitian. Kondisi pencemaran di dalam ruangan rumah juga tidak

diteliti, karena penelitian hanya ditujukan pada kualitas udara ambien berdasarkan kondisi parameter pencemar PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, dan ozon (O₃) serta kondisi meteorologis (temperatur udara, kelembaban udara relative, dan kecepatan angin) sebagai kondisi yang dapat berhubungan dengan kejadian penyakit ISPA.

Variabel-variabel dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Variabel independen terdiri atas kualitas udara ambien meliputi kadar PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, dan ozon (O₃) serta kondisi meteorologis yang meliputi temperatur, kelembaban udara relatif, dan kecepatan angin.
- b. Variabel dependen adalah kejadian penyakit ISPA.

Pola hubungan antara variabel-variabel dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam bagan kerangka konsep berikut:



Gambar 6. Kerangka Konsep

2.4. Hipotesis penelitian

Berdasarkan uraian dalam kerangka teori, kerangka berpikir dan kerangka konsep penelitian, maka hipotesis-hipotesis penelitian (H_a) ini adalah:

- a. Terdapat hubungan yang signifikan antara kondisi faktor meteorologis dengan kualitas udara ambien. Hipotesis ini mempunyai sub hipotesis sebagai berikut:
 - 1) Terdapat hubungan yang signifikan antara temperatur udara dengan kadar PM_{10}
 - 2) Terdapat hubungan yang signifikan antara temperatur udara dengan kadar SO_2
 - 3) Terdapat hubungan yang signifikan antara temperatur udara dengan kadar NO_2
 - 4) Terdapat hubungan yang signifikan antara temperatur udara dengan kadar CO
 - 5) Terdapat hubungan yang signifikan antara temperatur udara dengan kadar O_3
 - 6) Terdapat hubungan yang signifikan antara kelembaban udara relatif dengan kadar PM_{10}
 - 7) Terdapat hubungan yang signifikan antara kelembaban udara relatif dengan kadar SO_2
 - 8) Terdapat hubungan yang signifikan antara kelembaban udara relatif dengan kadar NO_2
 - 9) Terdapat hubungan yang signifikan antara kelembaban udara relatif dengan kadar CO
 - 10) Terdapat hubungan yang signifikan antara kelembaban udara relatif dengan kadar O_3
 - 11) Terdapat hubungan yang signifikan antara kecepatan angin dengan kadar PM_{10}
 - 12) Terdapat hubungan yang signifikan antara kecepatan angin dengan kadar SO_2
 - 13) Terdapat hubungan yang signifikan antara kecepatan angin dengan kadar NO_2

- 14) Terdapat hubungan yang signifikan antara kecepatan angin dengan kadar CO
 - 15) Terdapat hubungan yang signifikan antara kecepatan angin dengan kadar O₃
- b. Terdapat hubungan yang signifikan antara kondisi faktor meteorologis dengan kejadian penyakit ISPA. Hipotesis ini mempunyai sub hipotesis sebagai berikut:
 - 1) Terdapat hubungan yang signifikan antara temperatur udara dengan kejadian penyakit ISPA
 - 2) Terdapat hubungan yang signifikan antara kelembaban udara relatif dengan kejadian penyakit ISPA
 - 3) Terdapat hubungan yang signifikan antara kecepatan angin dengan kejadian penyakit ISPA
 - c. Terdapat hubungan yang signifikan antara kualitas udara ambien dengan kejadian penyakit ISPA. Hipotesis ini mempunyai sub hipotesis sebagai berikut:
 - 1) Terdapat hubungan yang signifikan antara kadar PM₁₀ dengan kejadian penyakit ISPA
 - 2) Terdapat hubungan yang signifikan antara kadar SO₂ dengan kejadian penyakit ISPA
 - 3) Terdapat hubungan yang signifikan antara kadar NO₂ dengan kejadian penyakit ISPA
 - 4) Terdapat hubungan yang signifikan antara kadar CO dengan kejadian penyakit ISPA
 - 5) Terdapat hubungan yang signifikan antara kadar O₃ dengan kejadian penyakit ISPA
 - d. Terdapat hubungan yang signifikan antara kondisi faktor meteorologis secara bersama-sama dengan konsentrasi masing-masing parameter pencemar udara.
 - e. Terdapat hubungan yang signifikan antara konsentrasi semua parameter pencemar udara dengan kejadian penyakit ISPA.
 - f. Terdapat hubungan yang signifikan antara kondisi faktor meteorologis secara bersama-sama dengan kejadian penyakit ISPA.

Hipotesis-hipotesis tersebut di atas akan diuji dan dianalisis dengan uji statistik.