

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

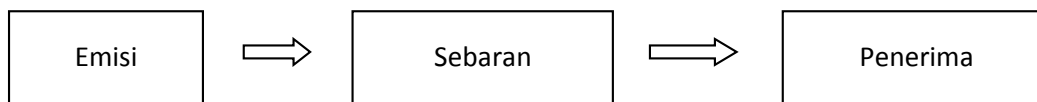
A. Pencemaran Udara

1. Pengertian pencemaran udara

Lapisan atmosfer di atas permukaan bumi terdiri dari campuran berbagai macam gas. Komposisi utama atmosfer adalah nitrogen (N_2) 78,1%; Oksigen (O_2) 21,0%; Argon (Ar) 0,9%; Karbon dioksida (CO_2) 0,03% dan komponen *trace* terdiri dari Neon (Ne), Helium (He), Metana (CH_4), Krypton (Kr), Nitrous oksida (N_2O_5), Hydrogen (H_2), Xenon (Xe), Sulfur dioksida (SO_2), Amonia (NH_3) dan Karbon monoksida (CO) sebesar 0,002%. Udara dalam keadaan normal mengandung uap air sebesar 1 – 3% (Manahan, 2000). Lapisan atmosfer berfungsi sebagai pendukung kehidupan di bumi. Karbon dioksida (CO_2) dan Oksigen (O_2) yang terdapat di atmosfer berguna untuk fotosintesis dan respirasi pada tanaman. Nitrogen di udara dengan bantuan bakteri nitrogen dan amonia yang digunakan tanaman membentuk senyawa nitrogen yang sangat diperlukan bagi kehidupan molekuler. Namun di atmosfer juga terdapat komponen yang dapat merusak (polutan) seperti sulfur dioksida (SO_2), dapat menyebabkan kerusakan pada tanaman (Manahan, 2000).

Pencemaran lingkungan hidup adalah masuknya atau dimasukkannya makhluk hidup, zat, energi, dan/atau komponen lain ke dalam lingkungan hidup oleh kegiatan manusia sehingga melampaui baku mutu lingkungan hidup yang telah ditetapkan (UU Nomor 32 tahun 2009). Pencemaran udara adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga mutu udara ambien turun sampai ke tingkat tertentu yang menyebabkan udara ambien tidak dapat memenuhi fungsinya (PP Nomor

41 tahun 1999). Pengertian pencemaran udara bila merujuk pada UU nomor 32 tahun 2009 adalah masuknya atau dimasukkannya zat, energi dan/atau komponen lain ke dalam udara ambien oleh kegiatan manusia, sehingga melampaui baku mutu yang telah ditetapkan. Fenomena pencemaran udara terjadi melalui beberapa tahapan, mulai dari emisi polutan, penyebaran di udara dan keterpaan pada penerima /reseptor (Atkinson, 1988). Skema sebaran polutan dari sumber emisi hingga penerima disajikan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema Sebaran Polutan.

Di dalam lingkungan, terdapat mekanisme daur (daur biogeokimia) yang berfungsi untuk menjaga keseimbangan materi sehingga bila terjadi penambahan konsentrasi suatu zat (materi) yang dapat mengakibatkan keseimbangan terganggu (Miller, 2007). Daur materi melibatkan komponen biotik yaitu manusia, hewan, tumbuhan dan pengurai. Bagi manusia, hewan dan tumbuhan materi bermanfaat sebagai nutrisi (Manahan, 2000). Masuknya pencemar ke atmosfer dapat mengganggu mekanisme daur biogeokimia, berupa kelebihan materi yang diemisikan ke lingkungan dan/atau berkurangnya komponen lingkungan yang berperan untuk menyerap atau mendegradasi dalam mekanisme tersebut, misalnya berkurangnya jumlah mikroorganisme yang menyebabkan proses dekomposisi menjadi semakin lama mengakibatkan materi semakin menumpuk yang sering dinamakan sebagai pencemaran. Kemampuan alam untuk membersihkan diri (*self purification*) dari masuknya materi (bahan pencemar) disebut daya tampung lingkungan. Terjadinya pencemaran lingkungan disebabkan oleh karena daya tampung lingkungan terlampaui. Daur materi yang terjadi di alam:

a. Daur Hidrologi

Cadangan air di bumi berada dalam 5 (lima) bagian yang membentuk mekanisme siklus/daur. Air di bumi terdapat pada (1) air laut (97%), (2) berupa uap air dan awan di atmosfer, (3) berwujud padat (es) di pegunungan dan daerah kutub, (4) air permukaan berupa sungai, danau serta (5) air bawah tanah (Manahan, 2000).

Siklus hidrologi (Gambar 2.2) dapat dijelaskan sebagai berikut. Terjadi penguapan air (1) pada permukaan laut, danau, sungai, tanaman. Uap air hasil penguapan bergerak dibawa angin, terakumulasi di atmosfer (2) mengalami kondensasi membentuk awan dan akhirnya terjadi hujan baik di darat maupun di laut. Hujan yang terjadi di darat sebagian mengalir di permukaan (3) membentuk sungai dan danau, sebagian terserap dalam bumi membentuk air bawah tanah (4).

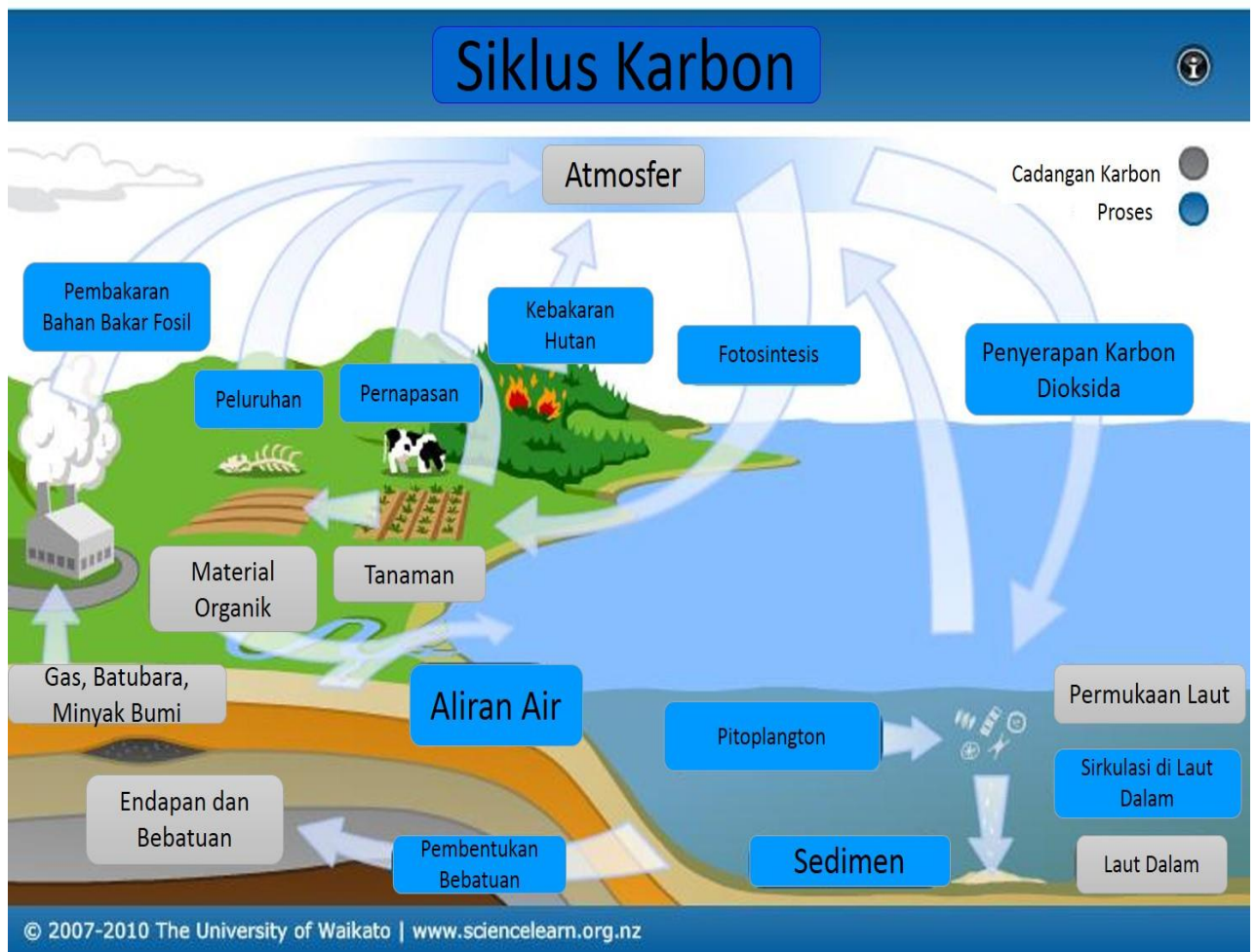


Gambar 2.2 Daur Hidrologi. Sumber: www.usgs.com

b. Daur Karbon

Daur karbon di bumi melibatkan senyawa karbon di atmosfer sebagai CO_2 , karbon terlarut di perairan sebagai HCO_3^- , terikat dalam mineral sebagai CaCO_3 , fotosintesis tumbuhan dengan energi dari sinar matahari merubah CO_2 menjadi sebagai CH_2O , komponen utama dalam senyawa bahan bakar fosil termasuk batu bara, minyak bumi, *lignite* dan gas alam. Batubara, minyak bumi dan gas alam merupakan senyawa karbon yang mengandung energi tinggi. Proses produksi dalam industri mengubah hidrokarbon menjadi senyawa xenobiotic dengan gugus fungsional yang mengandung halogen, oksigen, sulfur, fosfor atau nitrogen (Manahan, 2000).

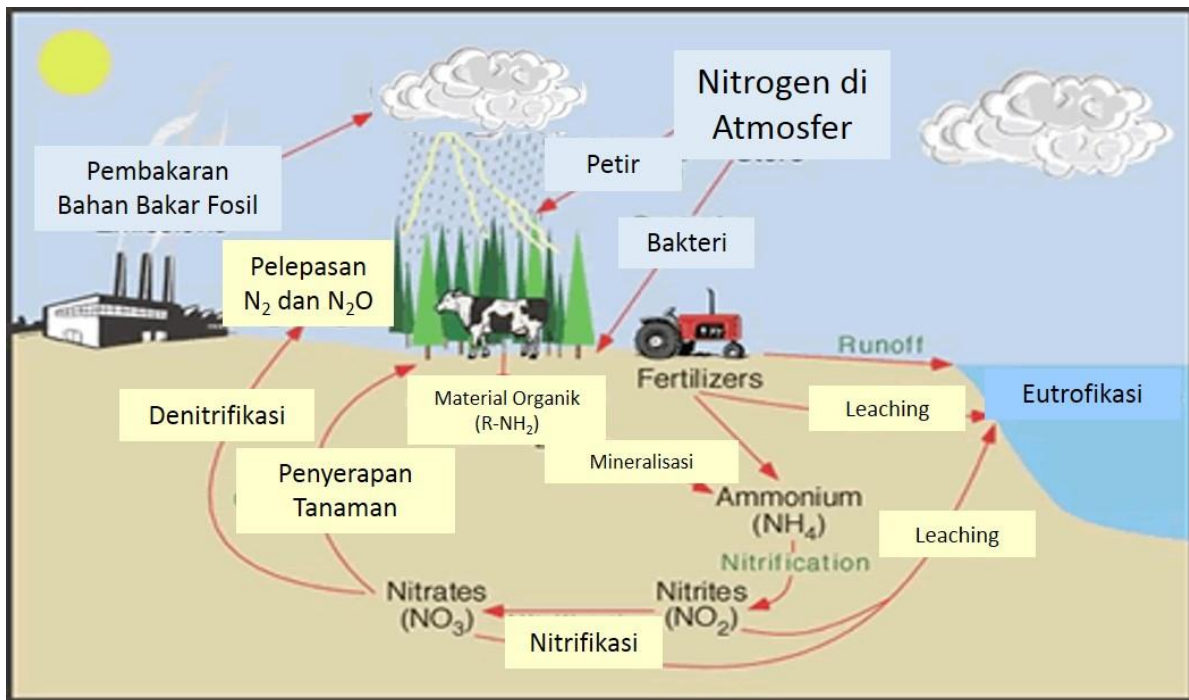
Daur karbon (Gambar 2.3) menjelaskan bahwa respirasi makhluk hidup menghasilkan CO_2 . Sinar matahari sebagai sumber energi dalam proses fotosintesis tumbuhan mengubah karbon anorganik di atmosfer CO_2 menjadi senyawa organik yang dibutuhkan makhluk hidup. Hasil fotosintesis disimpan sebagai cadangan karbon di tumbuhan. Pembakaran bahan bakar fosil sebagai sumber energi menghasilkan CO_2 . Jumlah CO_2 di atmosfer mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan penggunaan bahan bakar fosil. Daur karbon untuk menghasilkan bahan bakar fosil melalui mekanisme yang membutuhkan waktu jutaan tahun. Di atmosfer, CO_2 bereaksi dengan uap air membentuk HCO_3^- menyebabkan pH air hujan turun hingga 5,6 walaupun tidak ada bahan pencemar lainnya (Manahan, 2000).



Gambar 2.3. Daur Karbon. Sumber: www.sciencelearn.org.nz

c. Daur Nitrogen

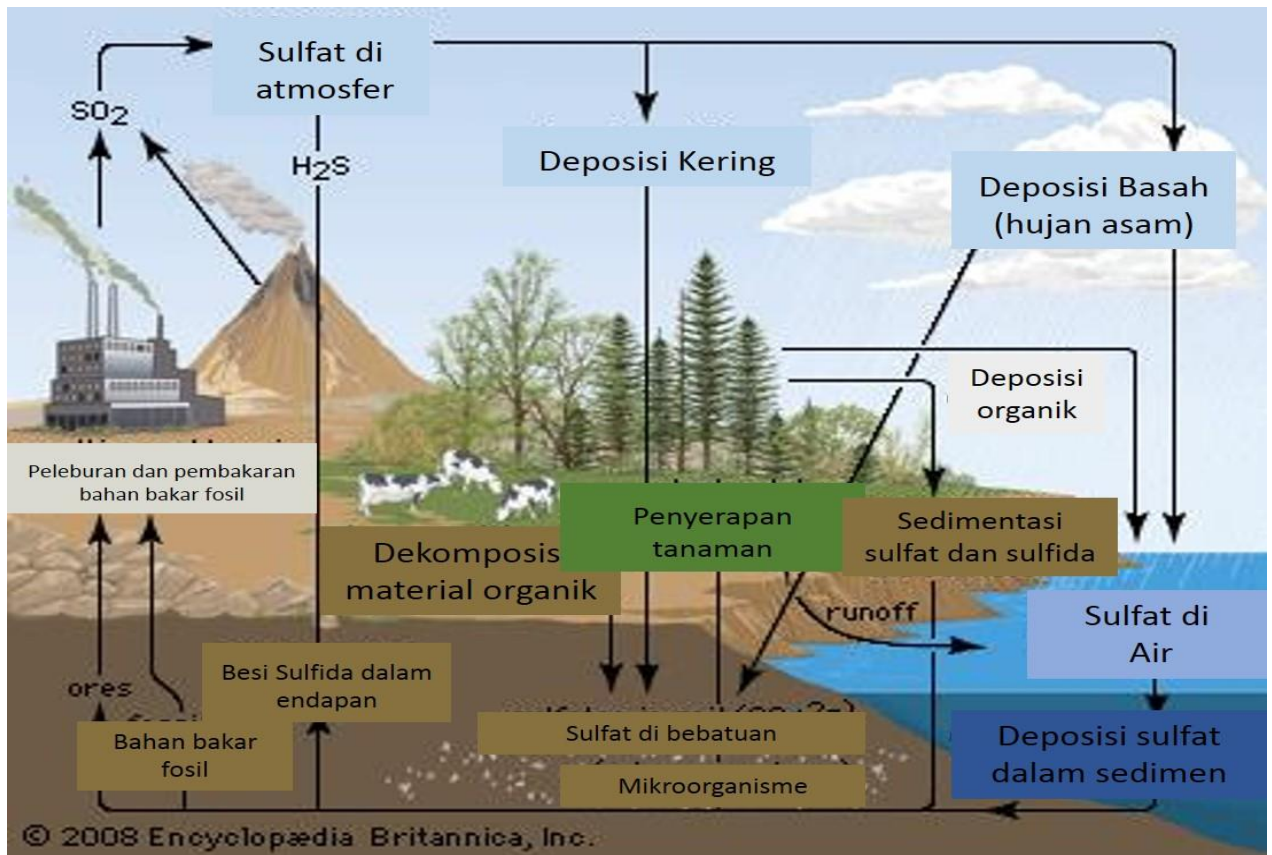
Atmosfer bumi mengandung Nitrogen sebesar 78%. Siklus nitrogen melibatkan proses emisi polutan dari reaksi oksidasi membentuk senyawa N_2 , NO_x , NO_3^- , NH_4NO_3 di atmosfer. nitrogen atmosfer, perairan, tanah dan biosfer. Dengan adanya air di atmosfer menyebabkan terjadi pelarutan senyawa nitrogen dan menyebabkan terjadinya hujan asam (Manahan, 2000).



Gambar 2.4. Daur Nitrogen. Sumber: www.sbi.oregonstate.edu

d. Daur Sulfur

Daur sulfur melibatkan (1) sulfur di atmosfer dalam bentuk SO_2 , H_2S , CS_2 , H_2SO_4 , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$; (2) sulfur anorganik baik yang terlarut maupun tidak SO_4^{2-} , PbS ; (3) sulfur dalam jaringan makhluk hidup $-\text{SH}$; (4) sulfur hasil dekomposisi dan biodegradasi H_2S , FeS . Senyawa sulfur di atmosfer mengalami transformasi kimia dan terlarut dalam air hujan menyebabkan terjadinya hujan asam. Organisme melakukan proses asimilasi membentuk senyawa sulfur dalam jaringan makhluk hidup. Proses dekomposisi dan biodegradasi menghasilkan senyawa sulfur yang terlepas ke atmosfer. Dalam daur sulfur ini, terjadinya hujan asam merupakan faktor penting dalam pencemaran udara (Manahan, 2000).



Gambar 2.5 Daur Sulfur. Sumber: www.britanica.com

2. Sumber pencemaran udara

Polutan penyebab pencemaran udara berasal dari sumber alami maupun dari hasil aktifitas manusia (Manahan, 2000; Huang, 2008; Feichter *et. al.*, 1995). Sumber alami sulit diketahui jumlahnya. Sumber alami adalah aktifitas alam yang mengeluarkan polutan ke udara. Aktifitas alam berupa letusan gunung berapi baik pada saat terjadi letusan maupun tidak, aroma / bau yang dikeluarkan oleh tumbuhan maupun binatang, kebakaran hutan, pembusukan hewan dan tumbuh-tumbuhan serta radioaktifitas alam. Dalam beberapa kejadian pencemaran udara dari aktifitas alamiah ini berskala sangat besar seperti letusan gunung berapi yang mengeluarkan jutaan ton gas dan debu ke udara, ataupun kebakaran hutan yang hebat yang

asapnya bisa menyebar dan menutupi suatu kawasan yang luas (Manahan, 2000). Sumber emisi sulfur alami lainnya berupa $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ (DMS) dan $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SCH}_3$ (EMS) hasil dari aktivitas biologi fitoplankton yang menguap ke atmosfer (Oksdath-Mansilla, 2012).

Sumber antropogenik adalah sumber polutan berasal dari kegiatan manusia. Dewasa ini emisi dari kegiatan manusia berkembang seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dan meningkatnya ragam kebutuhan (Miller, 2007), menyebabkan bertambahnya mobilitas penduduk dan industrialisasi. Pembangunan di bidang transportasi, pembangkit listrik (Huang, 2008), pertambangan dan industri membutuhkan energi penggerak berupa bahan bakar fosil (Lotfalipour *et. al.*, 2010). Penggunaan bahan bakar fosil menghasilkan beberapa polutan utama seperti debu, karbon monoksida, hidrokarbon, nitrogen oksida, sulfur oksida dan debu (Manahan, 2000; Miller, 2007; Xue *et.al.*, 2015). Pencemaran udara akibat aktivitas manusia yang terjadi dewasa ini harus dikembangkan upaya penanggulangannya agar tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan hidup. Beberapa polutan tersebut sudah terbukti bisa menimbulkan akibat negatif terhadap kesehatan manusia yaitu penyakit saluran pernapasan dan paru-paru, iritasi mata-kulit, alergi dan keracunan karena gas-gas. Disamping berdampak negatif terhadap manusia, pencemaran udara juga berdampak negatif terhadap alam, makhluk hidup lain dan tumbuh-tumbuhan. Perkembangan ekonomi suatu negara dapat menjadi pemacu bertambahnya emisi SO_2 , NO_2 dan polutan lainnya dan dapat menyebabkan terjadinya masalah pencemaran lingkungan lainnya seperti terjadinya hujan asam (Huang, 2008).

Polutan utama pembentuk asam di atmosfer adalah NO_2 dan SO_2 . Nitrogen dioksida (NO_2) merupakan hasil oksidasi Nitrogen pada pembakaran suhu tinggi, sedangkan SO_2 merupakan hasil oksidasi dari sulfur yang terkandung di dalam bahan bakar. Sumber utama

sulfur adalah : (1) asap gunung berapi mengandung sulfur dioksida (SO_2) dan asam sulfida (H_2S); (2) dekomposisi biologis (biogenik) dari material organik dan reduksi sulfat menghasilkan $(\text{CH}_3)_2\text{S}$ dan H_2S , sumber utama dimetil sulfida ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$) adalah emisi hasil biodegradasi dari laut; (3) Aktifitas manusia (antropogenik) adalah pembakaran biomasa dan bahan bakar fosil (Manahan, 2000; Feichter *et. al.*, 1995), transportasi (Butler *et.al.*, 2003; Suhodo, 2010; Chantara *et. al.*, 2012), industri pengolahan logam, (Lefohn *et. al.*, 1999), pertanian (Chantara *et.al.*, 2012; Xue *et.al.*, 2015) serta dari dampak transpor global polutan (Chantara *et. al.*, 2012; Gimeno *et. al.*, 2001)

Perkembangan ekonomi suatu negara dapat menjadi pemacu bertambahnya emisi SO_2 , NO_2 dan polutan lainnya dan dapat menyebabkan terjadinya masalah lingkungan lainnya seperti terjadinya hujan asam (Dulal, 2012; Huang, 2008; Huber, 2008,). Setiap kegiatan ekonomi membutuhkan penggerak berupa energi. Saat ini hampir semua energi sebagai motor penggerak ekonomi adalah bahan bakar fosil (batubara dan minyak bumi) untuk pemenuhan energi (pembangkit listrik), industri dan transportasi (Chantara *et. al.*, 2012; Huang *et al.*, 2008).

Pertumbuhan industri sebesar 1% mengakibatkan peningkatan emisi polutan total sebesar 11,8% (Cherniwchan, 2012). Semakin banyaknya jumlah penduduk bumi serta semakin berkembangnya ragam kebutuhan yang harus di penuhi menyebabkan konsumsi energi dari bahan bakar fosil semakin bertambah (Lotfalipour *et. al.*, 2010). Emisi polutan di Asia bertambah dengan cepat seiring dengan pertumbuhan ekonomi di kawasan Asia. (Chantara, 2012).

Batubara mengandung sulfur dan kualitas batubara ditentukan oleh kandungan sulfur, low-sulfur coal ($<1\%S$), medium sulfur ($1-< 3\%S$) dan high sulfur ($\geq 3\% S$) dalam bentuk pyrit (FeS_2) dan sulfur organik (Chou, 2012). Pembakaran pyrite membentuk SO_2 dan hanya

sebagian kecil (1 – 2%) membentuk SO₃ (Manahan, 2000). Selain menggunakan batubara, sebagian industri menggunakan minyak fraksi berat sebagai bahan bakar. *Fly ash* yang diemisikan selain mengandung sulfur juga mengandung ion logam yang dapat terhidrolisa yang bersifat sebagai agen asam yang kuat (Primerano *et. al.*, 1997). Pencemar dari industri adalah CO, CO₂, SO_x, NO_x, partikulat serat pencemar lain sesuai dengan proses produksi.

Emisi sulfur global pada tahun 1980 73,2 juta ton dan tahun 1989 74,1 juta ton (Stern, 2005). Jumlah emisi SO₂ di China pada tahun 1999 mencapai 20 – 22 juta ton sebagian besar berasal dari power plant (Larssen *et. al.*, 1999). Emisi global sulfur dari tahun 1990 hingga 2000 mengalami penurunan. Puncak emisi sulfur terjadi pada tahun 1996 (Stern, 2005). Penurunan emisi sulfur disebabkan oleh banyak faktor. Di China, kebijakan pengurangan emisi dari transportasi, power plant, industri dan rumah tangga serta krisis ekonomi di Asia tahun 1997 berpengaruh terhadap pertumbuhan ekonomi dan konsumsi bahan bakar. Emisi sulfur dari kegiatan antropogenik di tahun 1990 kurang lebih 71000 Gg S menjadi 59000 Gg S pada tahun 2000 (Stern, 2005). Di Eropa dalam beberapa dekade terakhir terjadi penurunan emisi dari 3185 Gg S di tahun 1970 menjadi 344 Gg S tahun 2005. Penurunan emisi di Eropa disebabkan adanya pengalihan bahan bakar dari batubara ke bahan bakar gas (Matejko *et. al.*, 2009). Emisi global Nitrogen dari kegiatan antropogenik pada tahun 1970 sebesar 951 Gg N, 315 Gg N di tahun 1990, 259 Gg N di tahun 2005 dan diperkirakan pada tahun 2020 emisi global N sebesar 222 Gg N (Matejko *et. al.*, 2009). Sumber emisi global sulfur disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Sumber Emisi Sulfur Global.

<i>Spesies</i>		<i>Source</i>	<i>Reference</i>	Tg S yr ⁻¹
Natural	DMS	<i>Marine biosphere</i>	Bates et al. 1987	16,2
	DMS	<i>Terrestrial biosphere</i>	Spiro et al. 1992	0,9
	SO ₂	<i>Non-eruption volcanoes</i>	Spiro et al. 1992	3,5
Antropogenik	SO ₂	<i>Biomass burning</i>	Hao et al. 1990	2,5
	SO ₂	<i>Fossil fuel use and industri</i>	Spiro et al. 1992	77,6
Total				100,7

Sumber: Feichter *et.al*, 1995

Pemakaian bahan bakar fosil pada alat transportasi merupakan penyumbang pencemar terbesar pada kota-kota besar. Menurut Suhodo (2006), transportasi menyumbang 70% dari total pencemar yang masuk ke atmosfer Jakarta. Sifat emisi dari transportasi adalah tidak stabil dipengaruhi oleh mobilitas penduduknya. Sebaran emisi tidak merata, jumlah emisi dari transportasi dipengaruhi oleh kepadatan lalu lintas. Semakin padat lalu lintas, kecepatan rerata kendaraan semakin kecil emisi pencemar semakin besar. Pencemar dari transportasi adalah CO, CO₂, SO_x, NO_x, HC dan partikulat. Transportasi sebagai penyumbang utama emisi NO₂ (Butler *et. al.*, 2003; Kuebler *et. al.*, 2001).

Sumber emisi dari aktifitas transportasi tidak hanya dari transportasi darat. Transportasi laut menyumbang emisi sulfur (Miola *et al.*, 2011, Stern, 2005). Emisi transportasi laut semakin meningkat seiring dengan peningkatan perdagangan antar benua. Kontribusi emisi sulfur ke atmosfer dari transportasi laut mencapai 5 % dari emisi sulfur global, (Lefohn *et. al.*, 1999). Di Asia emisi dari pelayaran 236.000 ton SO₂ per tahun pada tahun 1988 memberikan kontribusi emisi SO₂ sebesar 11,7% di Asia Tenggara dan 0,7 % di Asia (Streets *et. al.*, 1996).

Sumber NO₂ adalah pembakaran dalam suhu tinggi pada kendaraan bermotor baik menggunakan bahan bakar bensin maupun solar. Emisi oksida nitrogen dari pembakaran sebagian besar (85 - 97 %) dalam bentuk NO. di atmosfer NO dengan cepat teroksidasi oleh ozon membentuk NO₂ (Chaney A.M. *et. al.*, 2011; Palmgren *et. al.*, 1996). Emisi NO₂ dari

kendaraan bermotor diestimasi menggunakan perbandingan (rasio) antara campuran oksida nitrogen ($\text{NO} + \text{NO}_2$) dengan total oksidan ($\text{O}_3 + \text{NO}_2$). Emisi NO_2 dari kendaraan bermotor kurang dari 10% di tahun 1990-an dan meningkat menjadi 20% di tahun 2009. Peningkatan emisi primer NO_2 disebabkan karena pemakaian katalis pada kendaraan bermotor. Pada kurun waktu 1994 – 2004 Konversi NO menjadi NO_2 melalui reaksi fotokimia memberi kontribusi sebesar 51%, sedangkan emisi primer sebesar 31%. Pada periode 2005 – 2009, kontribusi konversi kimia turun dari 54 % di tahun 2005 menjadi 43% tahun 2009. Emisi primer NO_2 meningkat dari 32% menjadi 44% (Anttila P. *et. al.*, 2011).

Peningkatan fraksi primer NO_2 disebabkan oleh pemakaian katalis pada mesin disel modern. NO_x di atmosfer terjadi kesetimbangan kimia yang dipengaruhi oleh keadaan meteorology. Fraksi NO emisi dengan cepat dalam hitungan detik hingga menit dioksidasi oleh O_3 menjadi NO_2 . Pada siang hari dengan bantuan sinar matahari, NO_2 diubah menjadi NO dan O_3 (Anttila P. *et. al.*, 2011).

3. Transport polutan

Karakteristik kimia dan fisika atmosfer ditentukan oleh proses transfer masa dan transfer energi yang terjadi di atmosfer. Proses ini memegang peranan penting dalam fenomena pencemaran udara, penyebaran polutan dan reaksi kimia pembentukan polutan sekunder. Sumber energi di atmosfer berasal dari sinar matahari. Energi matahari yang sampai dan diserap permukaan bumi diemisikan kembali ke luar angkasa untuk menjaga kesetimbangan panas (Manahan, 2000). Kurang dari 1% dari energi matahari yang diserap dan berperan dalam sistem di bumi. Energi yang diserap bumi digunakan untuk proses fotosintesis tumbuhan, penguapan air, sebagai sumber energi dalam reaksi fotokimia dan memanaskan suhu permukaan bumi.

Perbedaan sifat muka bumi menyebabkan perbedaan daya serap terhadap energi matahari sehingga terjadi perbedaan temperatur muka bumi dan tekanan udara. Fenomena ini menyebabkan terjadinya angin yaitu pergerakan masa udara dari tekanan tinggi ke tekanan rendah. Pergerakan masa udara sebagai dasar dalam persebaran polutan (Manahan, 2000).

Polutan di atmosfer mengalami perpindahan dari sumber menyebar di lingkungan (Kim *et al.*, 2012). Perpindahan yang disebabkan oleh angin disebut adveksi (*advection*). Dalam kenyataan, perpindahan polutan tidak murni karena adveksi. Dalam perpindahannya, polutan mengalami penyebaran (*dispersion*), terjadi sebaran polutan ke arah vertikal maupun horisontal serta terjadi pencampuran dengan udara menyebabkan terjadi pengenceran maupun bereaksi dengan senyawa lain (Bishop, 2000). Transport polutan dipengaruhi oleh keadaan meteorology (Kim *et al.*, 2012) serta lifetime polutan (Moussiopolos *et al.*, 1996). Semakin singkat lifetime senyawa kimia, maka jarak penyebaran / transportasi semakin pendek, sedangkan semakin panjang lifetime polutan jarak sebarannya semakin jauh dan terlibat dalam transport global polutan (Moussiopolos *et al.*, 1996). Sulfur dioksida (SO₂) merupakan gas yang mempunyai *lifetime* panjang dan kecepatan reaksi dengan senyawa lain berjalan lambat sehingga SO₂ dan polutan sekunder bentukan dari polutan tersebut SO₄²⁻ menyebar jauh dari sumber emisi (Cantara S. *et al.*, 2012; Kuribayashi M., *et al.*, 2012; Gimeno L., *et al.*, 2001).

4. Transformasi polutan

Senyawa kimia di atmosfer dapat mengalami perubahan membentuk senyawa lain. Reaksi kimia di atmosfer terjadi karena adanya beragam senyawa dan sumber energi utama berasal dari radiasi sinar matahari. Senyawa- senyawa di atmosfer berasal dari emisi (polutan primer) maupun terbentuk di atmosfer (polutan sekunder). Reaksi kimia dapat terjadi pada

udara bersih maupun tercemar. Di atmosfer terdapat senyawa kimia, uap air dan partikel yang dapat menyerap energi berupa radiasi elektromagnetik dari sinar matahari. Sinar ultraviolet (UV) dengan panjang gelombang di bawah 300 nm yang bersifat merusak kehidupan organisme diserap atmosfer, sedangkan sinar UV dengan panjang gelombang 300 – 2500 nm (*near-ultraviolet, visible, near-infrared radiation*) dan 0,01 – 40 nm (gelombang radio) diteruskan ke bumi (Manahan, 2000).

Kemampuannya menyerap radiasi infra merah yang diemisikan kembali ke luar angkasa menyebabkan suhu atmosfer menjadi stabil (Manahan, 2000). Senyawa kimia yang menyerap energi dari sinar matahari dapat menjadi senyawa reaktif seperti senyawa radikal. Terbentuknya senyawa radikal menyebabkan terjadinya reaksi kimia di atmosfer. Reaksi kimia di atmosfer pada siang hari dengan OH radikal, pada malam hari dengan NO₃ radikal dan di permukaan laut senyawa kimia di atmosfer cenderung bereaksi dengan Cl dan BrO radikal (Oksdath-Mansilla, 2012). Di atas permukaan laut, di mana konsentrasi NO₂ rendah, reaksi DMS dengan OH radikal menghasilkan SO₂ dan CH₃CO, sedangkan reaksi DES menghasilkan SO₂, CH₃CO dan HCHO (Oksdath-Mansilla, 2012). Jenis senyawa kimia di atmosfer disajikan dalam Tabel 2.2.

Reaksi kimia yang terjadi di atmosfer diantaranya reaksi fotokimia, oksidasi, netralisasi (pembentukan garam). Reaksi fotokimia terjadi karena bahan kimia menyerap radiasi sinar matahari sebagai sumber energi terjadinya reaksi. Reaksi fotokimia tidak terjadi bila tidak ada sinar matahari. Reaksi fotokimia terjadi pada NO₂ dengan membentuk smog yang kemudian dikenal sebagai *fotochemical smog* (Manahan, 2000). Terjadinya perubahan senyawa kimia dipengaruhi oleh kecepatan reaksinya dengan senyawa kimia lainnya. Kecepatan reaksi, life

time dan transformasi senyawa kimia di atmosfer, disajikan dalam Tabel 2.3, Tabel 2.4 dan Tabel 2.5.

Tabel. 2.2. Senyawa Kimia di Atmosfer.

Klasifikasi	Senyawa kimia
Oksida anorganik	CO, CO ₂ , NO ₂ , SO ₂
Oksidan	O ₃ , H ₂ O ₂ , HO [*] , HO ₂ [*] , NO ₃
Reduktan	CO, SO ₂ , H ₂ S
Organik	CH ₄ , alkana, alkena, senyawa aryl
Organik teroksidasi	Carbonil, nitrat organik
Agen fotokimia	NO ₂ , formaldehid
Asam	H ₂ SO ₄
Basa	NH ₃
Garam	NH ₄ HSO ₄
Senyawa reaktif	NO ₂ (dng electron berlebih), HO [*]

Sumber: Manahan, 2000.

Tabel. 2.3. Konstanta Kecepatan Reaksi di Atmosfer.

Emisi	Konstanta kecepatan reaksi (cm ³ /molekul-detik)				
	OH	O ₃	NO ₃	HO ₂	N ₂ O ₅
NO ₂	1,1x10 ⁻¹¹	3,2x10 ⁻¹⁷	1,2x10 ⁻¹²	1,4x10 ⁻¹²	
NO	6,6x10 ⁻¹²	1,8x10 ⁻¹⁴	3,0x10 ⁻¹¹	8,3x10 ⁻¹²	
HNO ₂	6,6x10 ⁻¹²	<5x10 ⁻¹⁹			
HNO ₃	1,3x10 ⁻¹³				
SO ₂	9x10 ⁻¹³	<2x10 ⁻²²	<7x10 ²¹	<1x10 ⁻¹⁸	<4x10 ⁻²³
CH ₃ SH	4,7x10 ⁻¹²	<2x10 ⁻²⁰	<3x10 ⁻¹⁴		
H ₂ S	3x10 ⁻¹⁴				

Sumber: Atkinson R, 1988

Tabel 2.4. *Lifetime* Senyawa Kimia di Atmosfer.

Emisi	<i>lifetime</i> senyawa kimia berdasarkan reaksi dengan				
	OH	O ₃	NO ₃	HO ₂	N ₂ O ₅
NO ₂	2 hari	12 jam	1 jam	2 hari	2 min
NO	4 hari	1 min	3 min	20 min	
HNO ₂	4 hari	>33 min			
HNO ₃	180 hari				
SO ₂	26 hari	>200 tahun	>4,5x10 ⁴ tahun	600 tahun	
CH ₃ SH	140 hari				
H ₂ S	5 hari	>2 tahun	>4 hari		

Sumber: Atkinson R, 1988

Tabel 2.5. Transformasi Senyawa Sulfur di Atmosfer.

	NH	SH	Global
DMS			
Emisi (Tg S yr ⁻¹)	6,8	10,3	17,1
Sinks %	Oksidasi dengan OH	75,5	84,0
	Oksidasi dengan NO ₂	24,5	16,0
Burden (Tg S yr ⁻¹)	0,025	0,078	0,102
Turn-over time (d)	1,3	2,7	2,1
SO₂			
Emisi (Tg S yr ⁻¹)	79,8	20,9	100,7
Sinks %	Dry deposition	41,9	39,7
	Wet deposition	7,9	9,4
	Oksidasi dengan OH	16,7	19,1
	Oksidasi dengan H ₂ O ₂	30,0	26,8
	Oksidasi dengan O ₃	3,5	7,2
Burden (Tg S yr ⁻¹)	0,326	0,103	0,435
Turn-over time (d)	1,5	1,9	1,6
SO₄²⁻			
Sumber: Oksidasi dari SO ₂ (Tg S yr ⁻¹)	40,1	11,2	51,3
Sinks %	Dry deposition	13,6	13,1
	Wet deposition	86,4	86,9
Burden (Tg S yr ⁻¹)	0,433	0,200	0,633
Turn-over time (d)	3,9	6,4	4,4

Sumber: Feichter et al., 1995

5. Deposisi polutan

Selain mengalami perpindahan, polutan juga mengalami pengambilan /*removal* baik melalui mekanisme fisika maupun kimia (Atkinson, 1998). Secara fisika polutan mengalami deposisi kering /*dry deposition* dan deposisi basah/ *wet deposition* (Irwin et.al., 2002; Bishop, 2000). Deposisi kering gas dan partikel dari atmosfer karena adanya gerakan ke bawah dari lapisan atmosfer ke permukaan bumi. Deposisi kering sangat dipengaruhi oleh keadaan atmosferik, ukuran partikulat, dan sifat absorpsi. Dalam fase gas, polutan dapat mengalami deposisi kering karena terserap/terikat dalam partikel atau diserap oleh tanaman, (Jitto *et. al*, 2007; Utiyama *et. al*, 2005; Atkinson, 1988; Feicher *et. al*, 1995). Tiap-tiap senyawa kimia mempunyai laju deposisi kering berbeda (de Vos, 2012; Atkinson, 1988). Laju deposisi kering disajikan dalam Tabel 2.6.

Tabel 2.6. Laju Deposisi Kering Beberapa Senyawa Kimia di Atmosfer.

Senyawa kimia di Atmosfer	Laju Deposisi Kering (cm/dt)
O ₃	0,3 - 0,5
<i>Particulate Sulfur</i>	0,17
SO ₂	2,1
HNO ₃	2,5

Sumber: Atkinson 1988.

Deposisi basah polutan dalam bentuk gas dan partikel terjadi karena terlarut dalam air hujan sering disebut pencucian atmosfer karena hujan melalui mekanisme *rainout* dan *washout*. *Rainout* terjadi bila partikulat menjadi inti awan dalam proses terjadinya hujan, sedangkan *washout* adalah pencucian polutan oleh air hujan, terjadi di bawah awan (Aikawa, 2009; Atkinson, 1988). Dalam air hujan sering terkandung NO₃⁻, SO₄²⁻ dan logam-logam (Reisinger, 2000; Sanusi *et.al.*, 1995; Tuti Budiawati, 2010; Huang X-F. *et.al.*, 2010; Huang K. *et.al.*, 2008; Bai *et.al.*, 2006; Hu *et.al.*, 2003). Dengan adanya proses pencucian polutan oleh air hujan menyebabkan atmosfer menjadi lebih bersih setelah hujan (Huang *et. al.*, 2011). Deposisi basah dapat terjadi pada NO₃⁻ dan SO₄²⁻, namun SO₂ lebih dominan mengalami adveksi (Park dan Cho, 1998). Deposisi basah polutan juga melibatkan transpor global polutan terutama pada SO₂ dan SO₄²⁻ (Park dan Cho, 1998; Aikawa dan Hiraki, 2009; Kuribayashi *et.al.*, 2012; de Vos dan Zhang, 2012; Matejko *et.al.*, 2012; Sanusi *et.al.*, 1995).

Deposisi basah menyebabkan adanya senyawa kimia dalam air hujan. Keberadaan senyawa kimia mengakibatkan kemampuan air hujan untuk menghantarkan arus listrik (Tuti Budiawati dkk, 2010). Senyawa kimia yang sering terkandung dalam air hujan adalah SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺ (Tuti Budiawati dkk, 2010; Feng-Huang X *et.al.*, 2010; Huang K., 2008; Hu G.P., *et.al.*, 2003).

B. Hujan Asam

Hujan asam adalah air hujan yang mengandung asam. Asam yang terkandung dalam hujan berupa gas yang bersifat asam (HCl), garam asam (NH_4HSO_4) dan asam yang terlarut terutama asam-asam kuat seperti H_2SO_4 dan HNO_3 (Primerano, et.al., 1998; Bruce, 1997; Huang K. et.al., 2008; Huang X-F. et.al., 2010; Tuti Budiwati et al., 2010; Aikawa dan Hiraki, 2009; Manahan, 2000; Hu *et. al.*, 2003; Xue et.al., 2015). Sumber asam di atmosfer berasal dari sumber emisi (seperti HCl dan H_2SO_4) dan asam hasil reaksi senyawa-senyawa kimia di atmosfer. Kebanyakan merupakan polutan sekunder HNO_3 dan H_2SO_4 hasil oksidasi NO_2 dan SO_2 . Sumber utama gas NO_2 dan SO_2 pembentuk hujan asam adalah pembakaran bahan bakar fosil (Manahan, 2000; Hu *et. al.*, 2003). Oksidasi gas SO_2 menjadi SO_4^{2-} sebagai salah satu unsur utama pembentuk hujan asam dapat terjadi beberapa hari setelah diemisikan. Dalam rentang waktu tersebut, masa polutan (gas pembentuk hujan asam) mengalami perpindahan hingga mencapai ratusan kilometer tergantung dari kondisi atmosferik (Park dan Cho, 1998; Aikawa dan Hiraki, 2009; Kuribayashi et.al., 2012). Sehingga hujan asam dapat menjadi masalah polusi udara regional seperti halnya asap pembakaran biomasa dari kebakaran hutan. Asam-asam yang terkandung dalam air hujan dalam keadaan udara bersih dan dalam keadaan udara mengandung polutan disajikan dalam Tabel 2. 7.

Pada keadaan tidak ada pencemaran di atmosfer, pH air hujan dapat mencapai 5,6 karena pengaruh H_2CO_3 dari CO_2 . Meskipun jumlah CO_2 di atmosfer melimpah namun H_2CO_3 jauh lebih lemah daripada H_2SO_4 dan HNO_3 , (Cuninngam, 2004; Manahan, 2000; Walcek dan Pruppache, 1984). Di daerah industri, pH air hujan dapat mencapai 4,3 disebabkan oleh emisi NO_2 dan SO_2 , (Sowiński, 1995; Streets *et. al.*, 1996, Cuninngam, 2004; Ma, 2010; González, 2012). pH air hujan juga dipengaruhi oleh partikel di atmosfer dan intensitas hujan (Huo *et. al.*,

2012). Kejadian petir juga mempengaruhi tingkat keasaman air hujan. Kejadian petir dengan interval kurang dari 90 detik menjadikan pH air hujan terendah 3,63 dibandingkan tanpa kejadian petir 4,06 (Bruce, 1997).

Tabel 2. 7 Sumber asam dalam air hujan pada udara bersih dan udara mengandung polutan.

Asam	Sumber Alami	Sumber Antropogenik
Asam Karbonat (H_2CO_3)	Sumber CO_2 : Respirasi tumbuhan dan hewan. Dekomposisi bahan organik	Sumber CO_2 : Pembakaran bahan bakar fosil - Pembakaran batubara $C_{(s)} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)}$ - Pembakaran baban bakar minyak $C_8H_{18} + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_2O_{(g)}$ - Pembakaran baban bakar alkohol $C_2H_5OH + O_{2(g)} \rightarrow CO_{2(g)} + H_2O_{(g)}$
Asam Sulfat (H_2SO_4)	Sumber sulfur pembentuk sulfat: - SO_2 dari gunung berapi - H_2S dari dekomposisi bahan organik - Dimetil sulfida (DMS) dari dekomposisi bahan organik oleh alga di laut.	Sumber sulfur pembentuk sulfat: - pembakaran bahan bakar fosil: batubara dan minyak bumi untuk pembangkit listrik, industri, transportasi. - pembuatan asam sulfat - proses pengolahan minyak bumi. - peleburan bijih logam.
Asam Nitrat (HNO_3)	- pembentukan nitrat dari NO_x pada saat terjadi petir.	- pembakaran bahan bakar fosil pada suhu tinggi menghasilkan NO_x .
Asam Format ($HCOOH$) dari oksidasi CH_4	- CH_4 berasal dari dekomposisi anaerobic bahan organik.	-
Asam methanesulfonik	- oksidasi dimetil sulfida hasil dari dekomposisi bahan organik oleh alga di laut.	-

Sumber: Manahan, 2000.

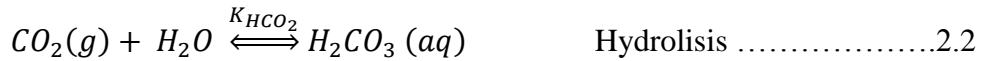
1. Pembentukan Karbonat, Sulfat dan Nitrat

a. Karbonat

Komponen utama asam dalam air hujan adalah karbonat, sulfat dan nitrat. Dalam keadaan udara tidak tercemar, atmosfer terdapat 1-3 % uap air dan 360 ppm (0.03%) CO_2 meningkat sebesar 1 ppm setiap tahunnya (Manahan, 2000). Karbon dioksida membentuk karbonat dengan mekanisme hidrolisis dan ionisasi.



$$K_{eqw} = 1,82 \times 10^{-16} \text{ M atm}^{-1}$$



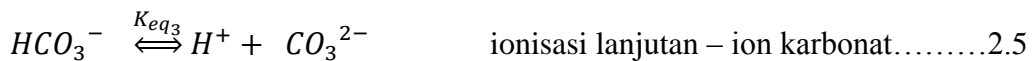
$$[H_2CO_3] = K_{HCO_2} \cdot p_{CO_2} \dots\dots\dots 2.3$$

$$K_{HCO_2} = 0,03 \text{ M atm}^{-1} \quad (\text{Sander, 1999})$$

$$p_{CO_2} = 350 \text{ ppm} \quad (\text{Skoog, 2000})$$



$$K_{eq2} = 4,7 \times 10^{-7} \text{ M} \quad (\text{Skoog, 1990})$$



$$K_{eq3} = 4.7 \times 10^{-11} \text{ M} \quad (\text{Skoog, 1990})$$

$$[H^+] = [OH^-] + [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}]$$

$$[H^+] = [OH^-] + [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}]$$

$$[H^+] = \frac{K_{eqw}}{[H^+]} + \frac{K_{eq2}K_{HCO_2}P_{CO_2}}{[H^+]} + \frac{2K_{eq3}K_{eq2}H_{HCO_2}P_{CO_2}}{[H^+]^2} \dots\dots\dots 2.6$$

$$pH = -\log [H^+] = 5,6.$$

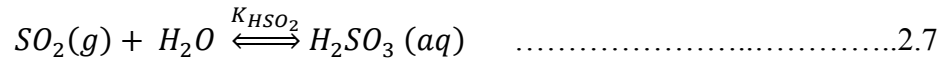
Dalam keadaan udara tidak tercemar, pH air hujan dapat turun sampai 5,6 karena pengaruh asam karbonat hasil pembentukan dari karbon dioksida.

b. Sulfat

Sulfat dalam air hujan terbentuk dari SO₂ melalui tahap pembentukan S(IV) dengan mekanisme hidrolisis dan ionisasi serta pembentukan S(VI) melalui reaksi oksidasi (Walcek dan Pruppacher, 1984; Skoog, 2000; Sander, 1999).

Pembentukan S(IV): H₂SO₃, HSO₃⁻ dan SO₃²⁻

i. Kelarutan SO₂ (g)



$$[H_2SO_3] = K_{HSO_2} \cdot p_{SO_2}$$

$$K_{HSO_2} = 1,23 \text{ M atm}^{-1} \quad (\text{Sander, 1999})$$

$$p_{SO_2} = 0,2 - 200 \text{ ppb} \quad (\text{Skoog, 2000})$$

ii. Disosiasi sulfit menghasilkan ion bisulfit dan ion sulfit



$$[HSO_3^-] = \frac{K_{eq2} \cdot [H_2SO_3(aq)]}{[H^+]} = \frac{K_{eq2} \cdot K_{HSO_2} \cdot p_{SO_2}}{[H^+]} \dots\dots\dots 2.16$$

$$K_{eq2} = 1,3 \times 10^{-2} \text{ M} \quad (\text{Skoog, 1990})$$



$$[SO_3^{2-}] = \frac{K_{eq3} \cdot [HSO_3^-]}{[H^+]} = \frac{K_{eq3} \cdot K_{eq2} \cdot K_{HSO_2} \cdot p_{SO_2}}{[H^+]^2} \dots\dots\dots 2.10$$

$$K_{eq3} = 6.6 \times 10^{-8} \text{ M} \quad (\text{Skoog, 1990})$$

Total S terlarut = [S(IV)_{total}]

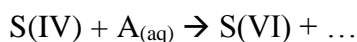
$$[S(IV)_{total}] = [H_2SO_3(aq)] + [HSO_3^-] + [SO_3^{2-}] \dots\dots\dots 2.11$$

$$[S(IV)_{total}] = K_{HSO_2} \cdot p_{SO_2} \left(1 + \frac{K_{eq2}}{[H^+]} + \frac{K_{eq2} K_{eq3}}{[H^+]^2} \right) \dots\dots\dots 2.12$$

Konstanta Kelarutan Henry: K_{HSO₂}^{*}

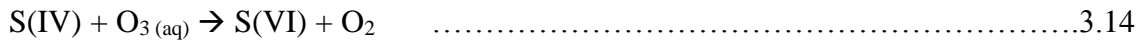
$$K_{HSO_2}^* = K_{HSO_2} \left(1 + \frac{K_{eq2}}{[H^+]} + \frac{K_{eq2} K_{eq3}}{[H^+]^2} \right) \dots\dots\dots 2.13$$

iii. Pembentukan S(VI): H₂SO₄, HSO₄⁻ dan SO₄²⁻



Dimana A adalah Oksidator di atmosfer: O₃, H₂O₂, CH₃COOH, O₂, OH, NO₂, HCHO, Mn, Fe dan logam-logam. Diantara oksidator tersebut yang paling berpengaruh terhadap pembentukan S(VI) adalah O₃ dan H₂O₂.

Oksidasi oleh O₃



Dimana S(IV): H₂SO₃, HSO₃⁻ dan SO₃²⁻

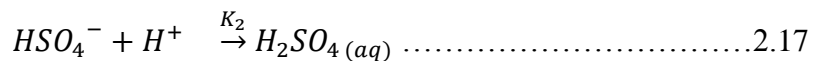
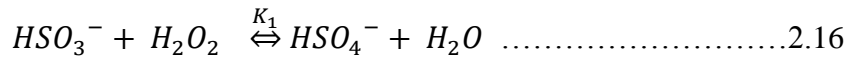
$$-\frac{d[S(IV)]}{dt} = (K_0[H_2SO_3(aq)] + K_1[HSO_3^-] + K_2[SO_3^{2-}]) \cdot [O_3(aq)] = k[S(IV)][O_3(aq)] \dots 2.15$$

$$K_0 = (2.4 \pm 1.1) \times 10^4 \text{ M}^{-1} \text{ dt}^{-1}$$

$$K_1 = (3.7 \pm 0.7) \times 10^5 \text{ M}^{-1} \text{ dt}^{-1}$$

$$K_2 = (1.5 \pm 0.6) \times 10^9 \text{ M}^{-1} \text{ dt}^{-1} \text{ (Skoog, 1990)}$$

Oksidasi oleh H₂O₂

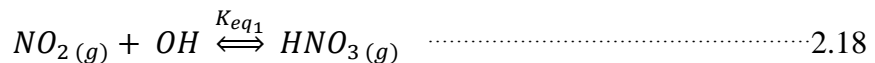


$$K_1 = 5.6 \times 10^6 \text{ M}^{-1} \text{ dt}^{-1}$$

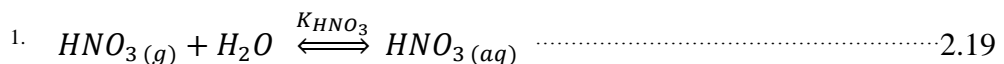
$$\frac{K_{-1}}{K_2} = 0.1 \quad \text{(Skoog, 2000)}$$

c. Nitrat

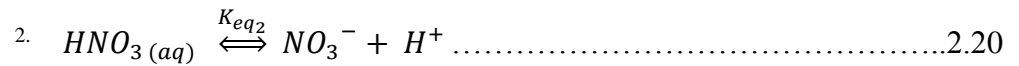
Pembentukan nitrat dari NO₂ terjadi melalui mekanisme oksidasi oleh OH.



$$K_{eq1} = 1,1 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ Molekul}^{-1} \text{ dt}^{-1}$$

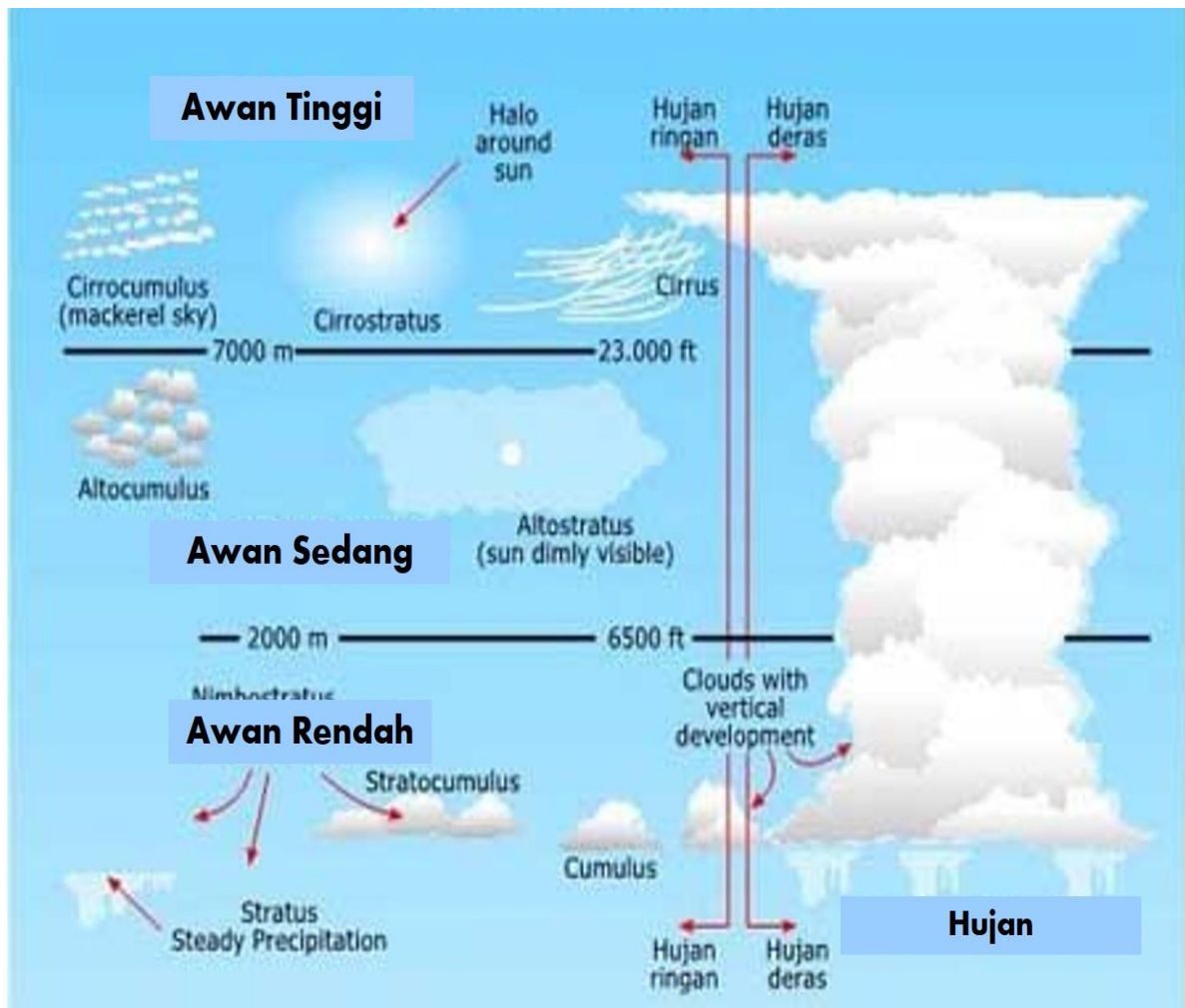


$$K_{HNO_3} = 2.1 \times 10^5 \text{ M} \text{ dt}^{-1} \quad \text{(sangat mudah larut)}$$



$K_{eq2} = 15.4 \text{ M}$ terdisosiasi sangat cepat (Skoog, 2000)

2. Pembentukan awan hujan



Gambar 2. 6 Ketinggian Awan. Sumber: <http://bmkgo.id>

Awan adalah kumpulan titik-titik air hasil dari pengembunan uap air di udara. Adanya partikel yang disebut sebagai aerosol di udara dapat mengikat uap air. Radiasi sinar matahari menyebabkan suhu udara di permukaan bumi meningkat. Udara mengalami pengembangan

secara adiabatik karena tekanan di atas lebih rendah daripada di lapisan bawah menyebabkan udara bergerak naik. Gerakan naik ke atas menyebabkan udara mengalami proses pendinginan dan selanjutnya terjadi pengembunan. Kumpulan titik-titik air hasil dari pengembunan uap air di udara membentuk awan. Semakin banyak udara yang mengembun makin besar awan yang terbentuk. Peristiwa pembentukan awan dan kejadian hujan terjadi pada lapisan troposfer dengan ketinggian kurang lebih 15 km di atas permukaan tanah (Gambar 2.6). Semua kejadian cuaca termasuk angin, perubahan suhu, kelembaban, tekanan udara terjadi pada lapisan troposfer.

C. Model Pencemaran Udara

1. Pengertian model

Pengertian model adalah sesuatu yang mewakili atau menggambarkan sesuatu yang diwakili. Model adalah contoh sederhana dari sistem dan meyerupai sifat-sifat dari sistem tetapi tidak sama dengan sistem. Model lingkungan merupakan penyederhanaan fenomena kejadian di lingkungan. Penyederhanaan dari fenomena lingkungan bermanfaat untuk mempelajari fenomena lingkungan dengan seksama dan dapat berfungsi sebagai konsep dalam mengembangkan teori dan rekomendasi bagi kebijakan (Moussiopoulos et al, 1996). Menurut Purwanto (2005), model merupakan representasi dari suatu sistem alam dalam bentuk yang dapat diterima untuk menggambarkan bagaimana karakteristik dari suatu sistem.

Model lingkungan dikembangkan melalui pendekatan sistem dengan tujuan untuk menentukan model atau sistem yang memberikan hasil paling optimal. Pendekatan sistem dalam model lingkungan merupakan metoda pemecahan masalah lingkungan dengan

menggunakan sisten dengan maksud agar sistem tersebut bekerja secara efisien dengan memasukkan semua faktor-faktor penting sehingga diperoleh penyelesaian yang baik melalui model dan dapat dilakukan pengambilan keputusan secara rasional (Muhammadi, 1993). Sistem merupakan kumpulan unsur-unsur yang saling berinteraksi, berhubungan (interrelasi) dan saling tergantung (interdependensi). Analisis sistem diperlukan untuk mengurai sistem menjadi bagian-bagiannya, memahami sifat, fungsi dan hubungannya dengan bagian yang lain. Analisis sistem merupakan metoda ilmiah yang mempunyai ciri logis, obyektif, sistematis berdasarkan fakta atau data. Data tersebut dianalisis dengan metoda yang sistematis dan sesuai kaidah keilmuan untuk memahami dan mencari solusi masalah yang dihadapi. (Muhammadi, 1993).

Dalam mengembangkan model, dilakukan dari pendekatan yang paling sederhana dengan cara mengidentifikasi masalah dengan seksama kemudian dirinci untuk menentukan unsur-unsur yang berperan. Selanjutnya dilakukan analisis hubungan antar variable yang digambarkan sebagai model yaitu gambaran yang menyatakan keterkaitan dan dinamika antar unsur-unsur tersebut. Untuk mengetahui perilaku model dilakukan simulasi dan validasi untuk mengetahui kesesuaian model dengan masalah yang ingin dicari solusinya.

Menurut Muhammadi (1993), ada tiga jenis model yaitu: model kuantitatif, model kualitatif dan model ikonik. Model kuantitatif adalah model yang menggunakan rumusan matematika, statistik atau komputer. Model kualitatif adalah model yang menggunakan penggambaran hubungan sebab akibat antar unsur sebagai diagram atau matrik tanpa merumuskannya sebagai rumusan matematika, statistik atau komputer. Model ikonik adalah model yang memiliki bentuk fisik untuk menggambarkan dinamika permasalahan yang dihadapi, dapat diperbesar atau diperkecil menurut skala yang dikehendaki.

2. Model sebaran polutan

Monitoring kualitas udara dengan cara melakukan pengukuran konsentrasi polutan di udara memberi informasi kuantitatif, namun hanya memberi informasi pada lokasi dan waktu tertentu dan tidak dapat menjelaskan sumber masalah pencemaran udara (Daly dan Zannetti 2007). Model pencemaran udara dapat menjelaskan masalah pencemaran udara lebih rinci termasuk analisis faktor dan penyebab, hubungan sebab akibat antara emisi polutan, meteorology, konsentrasi polutan di atmosfer, deposisi, sebaran maupun fenomena lain yang terjadi dan dapat digunakan sebagai petunjuk bagi upaya mitigasi. Konsentrasi polutan di udara dipengaruhi oleh transport, difusi, transformasi kimia dan deposisi (Daly dan Zannetti 2007).

Model sebaran Gaussian (*Gaussian Plume Model*) dikembangkan oleh Sutton 1932 dan Bosanquet 1936 untuk menghitung konsentrasi maximum polutan di tingkat reseptor dari emisi sumber tidak bergerak. Model Gaussian diformulasikan dengan eksperimen sebaran horisontal dan vertikal dari kepulan asap, diukur dengan standar deviasi dari distribusi spasial konsentrasi kepulan. Distribusi polutan dari sumber emisi merupakan fungsi dari stabilitas atmosfer, arah angin dan jarak. Pada awalnya Model Gaussian digunakan untuk sumber titik, dalam perkembangannya, model Gaussian digunakan sebagai dasar dalam memformulasikan sebaran sumber area dan sumber garis / transportasi (Daly dan Zannetti 2007).

Setelah tahun 1970, polusi udara disadari tidak hanya menjadi masalah lokal (dekat dengan sumber emisi). Emisi SO_x dan NO_x menyebabkan hujan asam pada jarak yang jauh dari sumber emisi. Lagrangian model dikembangkan oleh Rodhe (1972, 1974), Eliassen (1975) dan Fisher (1975) untuk menjelaskan *long-range transport sulfur* (Daly dan Zannetti, 2007). Model Lagrangian digunakan untuk menghitung transport polutan jarak jauh, lintas batas Negara untuk spesies polutan dengan waktu tinggal lama. Model Eulerian dikembangkan oleh

Reynolds (1973) untuk mempelajari sebaran ozone di perkotaan. Model Eulerian hanya digunakan untuk spesies polutan untuk periode pendek (Daly dan Zannetti, 2007).

Kuribayashi et al. (2012), menggunakan chemical transport model investigasi long-trem trend deposisi sulfur di Asia Timur dengan variable SO_4^{2-} , wet deposisi dan dry deposisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kurang lebih 2,1% pertahun pada tahun 2001 – 2005 sulfur dalam air hujan (wet deposition) di Jepang berasal dari sulfur yang diemisikan di China. Park J., dan Cho S.Y. (1998), menggunakan *Sulfur Transport Eulerian Model II* (STEM-II) untuk membuat simulasi transport rekasi kimia/deposisi polusi udara di Korea dan Cina. Matejko et al. (2009), menggunakan model *Fine Resolution Atmospheric Multipollutant Exchange (FRAME)* untuk membuat model distribusi spasial dari deposisi sulfur dan nitrogen periode 1990-2005.

a. Sebaran polutan dari emisi sumber tidak bergerak

Sebaran polutan gas dari emisi mengikuti hukum difusi yaitu gerakan udara dari konsentrasi atau tekanan tinggi ke rendah (Manohar, 1995). Model sebaran Gaussian dapat digunakan untuk menggambarkan secara matematik. Polutan dari sumber kepulan bergerak mengikuti angin dan menyebar ke arah horisontal dan vertikal dalam 3 dimensi. Konsentrasi polutan terdistribusi normal atau mengikuti kurva Gauss yaitu konsentrasi tertinggi ada pusat dan semakin kecil pada daerah pinggiran kepulan (Manohar, 1985; Zannetti, 1989).

Sumber tidak bergerak adalah sumber emisi yang menetap pada suatu lokasi tertentu berupa cerobong pembuangan asap pada industri baik *manufacturing* maupun pembangkit listrik. Mekanisme penyebaran polutan dari emisi sumber tidak bergerak (cerobong) dimulai dari keluarnya polutan dari cerobong, mula-mula membumbung ke atas kemudian menyebar di udara mengikuti angin. Tinggi kepulan asap cerobong (*plume rise*) dipengaruhi oleh kecepatan

lepasan emisi, angin dan adanya perbedaan suhu dengan sekitarnya. Sebaran polutan dari emisi sumber tidak bergerak dipengaruhi oleh karakteristik kepulan asap dan kondisi meteorologi di sekitar cerobong (Manohar, 1985; Zannetti, 1989).

Emisi polutan dari cerobong bersifat terus kontinyu. Asap keluar secara terus menerus. Kontinuitas emisi mempengaruhi potensi dampak yang dapat ditimbulkan. Kecepatan lepasan emisi /laju alir (*stack exit velocity*), menunjukkan cepat atau lambatnya asap keluar dari cerobong. Kecepatan keluarnya asap berpengaruh terhadap tinggi kepulan asap (*plume rise*). Debit emisi (*volumetric emission flowrate*) adalah banyaknya atau volume polutan yang dikeluarkan tiap satuan waktu. Debit emisi dapat diketahui dari perkalian kecepatan lepasan emisi dengan luas penampang cerobong. Suhu lepasan emisi (*exit temperature*) merupakan suhu asap saat keluar dari cerobong. Perbedaan suhu lepasan asap dengan suhu ambien berpengaruh terhadap tinggi kepulan (*plume rise*). *Plume rise* adalah jarak vertikal kepulan asap dari puncak cerobong hingga titik tertinggi di mana asap hampir horisontal. Tinggi kepulan asap dapat ditentukan dengan mengetahui perbedaan temperatur asap dengan sekelilingnya, diameter cerobong dan laju alir asap (Manohar, 1985; Zannetti, 1989).

Keadaan meteorologi sangat berpengaruh terhadap arah dan jangkauan sebaran polutan. Data meteorologi meliputi arah dan kecepatan angin, suhu dan tekanan udara serta stabilitas atmosfer. Angin merupakan penentu arah dan jangkauan sebaran polutan. Angin timur membawa polutan ke arah barat dan semakin kencang membuat jangkauan sebaran polutan semakin jauh dan konsentrasi polutan di suatu titik semakin rendah. Kecepatan angin biasanya diukur pada ketinggian 10 meter. Pada keperluan perhitungan sebaran, dibutuhkan kecepatan angin pada ketinggian lepasan emisi. Kecepatan angin pada ketinggian lepasan emisi dapat dihitung dengan persamaan:

$$\mu_e = \mu_{10} \left(\frac{Z_e}{10} \right)^p \dots\dots\dots 2.21$$

Dimana, μ_e : Kecepatan angin pada ketinggian lepasan emisi,
 μ_{10} : Kecepatan angin pada ketinggian 10 m,
 Z : Ketinggian lepasan emisi (m)
 p : stabilitas Pasquill-Turner

Tabel 2.8. Nilai P untuk penyesuaian kecepatan angin

Kelas Stabilitas Pasquill-Turner	Pedesaan	Perkotaan
A (sangat tidak stabil)	0,07	0,15
B (sedang)	0,07	0,15
C (sedikit tidak stabil)	0,10	0,20
D (netral)	0,15	0,25
E (agak sedikit stabil)	0,35	0,30
F (Stabil)	0,55	0,30

Sumber: Manohar, 1985

Arah dan kecepatan angin sering digambarkan dengan diagram mawar angin (*Windrose*). Masing-masing cabang dalam mawar angin melambangkan arah datangnya angin. Angin dari arah utara (angin utara) digambarkan sebagai cabang bagian atas (0°), arah timur di kanan (90°), arah selatan di bawah (180°) dan arah barat di kiri (270°). Suatu mawar angin dapat memiliki 8, 16 atau 32 cabang arah angin. Kebanyakan mawar angin di Indonesia mempunyai 16 cabang arah angin dan tiap cabang arah angin memiliki perbedaan sudut 22,5°. Panjang tiap cabang menunjukkan presentasi dari frekuensi angin yang bertiup ke suatu arah. Cabang terpanjang dianggap sebagai arah angin dominan. Diagram windrose mempunyai lingkaran tengah yang menggambarkan pemunculan angin tenang (*calm*) dengan kecepatan kurang dari 1 knot (0,5 m/detik). Semakin besar ukuran lingkaran tengahnya, semakin sering angin bertiup perlahan di wilayah tersebut (KNLH, 2007).

Stabilitas atmosfer merupakan adanya turbulensi udara ke arah vertikal. Atmosfer yang stabil mempunyai tingkat turbulensi yang rendah, tidak ada dispersi polutan ke arah vertikal. Atmosfer yang tidak stabil, tingkat dispersi ke arah vertikal tinggi sehingga polutan banyak

terdispersi ke arah vertikal. Stabilitas atmosfer sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin dan tingkat radiasi sinar matahari. Kedua faktor tersebut menimbulkan variasi tekanan udara di lapisan udara di permukaan bumi dengan lapisan udara yang lebih tinggi. Bila perbedaan tekanan kedua lapisan besar yang sering terjadi pada siang hari, maka atmosfer menjadi tidak stabil. Atmosfer pada malam hari cenderung lebih stabil karena tidak ada radiasi dan variasi tekanan udara tidak terlalu besar (Manohar, 1985).

Dispersi polutan di udara mengikuti hukum difusi, yaitu gerakan udara dari konsentrasi / tekanan tinggi ke rendah. Gerakan udara dapat terjadi *turbulens* menyebabkan adanya pusaran arus (*eddy*) yang merupakan fluktuasi acak dari rerata aliran. Turbulensi dalam atmosfer berasal dari pengaruh termal dan mekanik. Energi matahari diserap oleh permukaan bumi dan menyebabkannya menjadi panas. Panas pada permukaan bumi dipindahkan ke dalam lapisan udara terdekat melalui proses konduksi dan konveksi yang dapat mengakibatkan pusaran termal. Pusaran mekanik terjadi pada permukaan bumi yang kasar karena adanya pepohonan atau gedung-gedung. Pusaran mekanik dapat menyebabkan adanya guntingan aliran udara (Manohar, 1985; Zannetti, 1989).

Stabilitas atmosfer menggambarkan keadaan turbulensi vertikal yang terjadi di atmosfer. Adanya turbulensi vertikal menyebabkan terjadinya perpindahan masa atmosfer secara vertikal dari satu lapisan ke lapisan lain baik di bawah maupun di atasnya. Stabilitas atmosfer dipengaruhi oleh kecepatan angin dan intensitas sinar matahari serta tutupan awan. Stabilitas atmosfer diklasifikasikan menjadi 6 kategori, sebagaimana disajikan dalam Tabel 2.9.

Model Gaussian dikembangkan oleh Sir Graham Sutton dan Bosanquet 1936 dapat digunakan untuk melukiskan secara matematik sebaran polutan dalam 3 dimensi (Gambar 2.7). Dari sumber polutan bergerak sebagai plume / kepulan mengikuti hembusan angin dan

menyebar ke arah samping/horisontal dan vertikal. Konsentrasi polutan akan lebih tinggi pada pusat kepulan (*centre line*) dari pada di wilayah-wilayah tepi kepulan. Semakin ke tepi, konsentrasi semakin rendah (Manohar, 1985; Zannetti, 1989).

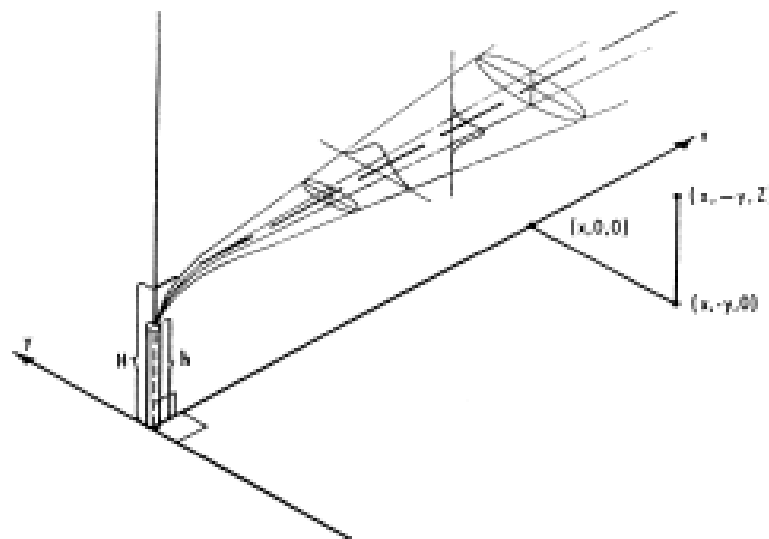
Tabel 2.9. Stabilitas Atmosfer berdasarkan klasifikasi Turner.

Kecepatan Angin (m/detik)	Klasifikasi Stabilitas Atmosfer			Tutupan Awan	
	Intensitas Sinar Matahari			>4/8 (berawan)	<3/8 (Cerah)
	Kuat	Sedang	Lemah		
< 2	A	A – B	B	F	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
5 – 6	C	C – D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D
Keterangan	A : Sangat tidak stabil B : Tidak Stabil C : Sedikit tidak stabil			D : Netral E : Agak Sedikit Stabil F : Stabil	

Sumber: Manohar, 1985.

Keterangan:

- Intensitas matahari kuat : sudut elevasi matahari $> 60^\circ$
- Intensitas matahari sedang : sudut elevasi matahari lebih besar dari 15° dan kurang dari 35°
- Intensitas matahari lemah : sudut elevasi matahari $< 15^\circ$



Gambar 2.7. Koordinat distribusi Gaussian dalam arah horisontal dan vertikal.

Sumber: KNLH, 2007.

Menurut Manohar (1985) dan Zannetti (1989), sebaran gas dari kepulan asap untuk emisi cerobong dengan tinggi efektif H di ambien pada jarak x meter adalah:

$$Y(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \mu \sigma_y \sigma_z} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H^2}{\sigma_y^2} \right) \right] \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H}{\sigma_z} \right)^2 \right] + \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \right\} \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan :

- Y : Konsentrasi polutan di udara ambien (mg/m³),
- μ : kecepatan angin (m/dt)
- σ_y : konstanta deviasi standar dispersi vertikal (m)
- σ_z : konstanta deviasi standar dispersi horizontal (m)
- H : tinggi cerobong efektif = tinggi cerobong + tinggi kepulan asap (m)
- Z : tinggi reseptor di atas permukaan tanah (m)
- Q : *volum rate* (debit) pada saat keluar dari cerobong (mg/dt)
- V_p : laju alir

Perhitungan σ_y dan σ_z berdasarkan persamaan Pasquill-Gifford

$$\sigma_y(x) = \frac{k_1 x}{[1 + (x/k_2)]^{k_3}} \quad (\text{Manohar, 1985; Zannetti, 1989}) \dots\dots (2.23)$$

$$\sigma_z(x) = \frac{k_4 x}{[1 + (x/k_2)]^{k_5}} \quad (\text{Manohar, 1985; Zannetti, 1989}) \dots\dots (2.24)$$

Tabel 2.10. Standar deviasi horizontal δ_y dan standar deviasi vertical δ_z berdasarkan klasifikasi stabilitas atmosfer.

Klas Stabilitas Pasquill	Standar deviasi horizontal δ _y (°)	Standar deviasi vertical δ _z (°)
A	> 22,5 ⁰	> 11,5 ⁰
B	17,5 ⁰ - 22,5 ⁰	10,5 ⁰ - 11,5 ⁰
C	12,5 ⁰ - 17,5 ⁰	7,8 ⁰ - 10,5 ⁰
D	7,5 ⁰ - 12,5 ⁰	5,0 ⁰ - 7,8 ⁰
E	3,8 ⁰ - 7,5 ⁰	2,4 ⁰ - 5,0 ⁰
F	< 3,8 ⁰	< 2,4 ⁰

Sumber: Zannetti, 1989.

Tabel 2.11. Konstanta K Pada Persamaan 2.23. dan 2.24.

Stabilitas Atmosfer	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	K ₅
A	0.250	927	0,189	0.1020	- 1.918
B	0.202	370	0,162	0.0962	- 0.101
C	0.134	283	0,134	0.0722	0.102
D	0.0787	707	0,135	0.0475	0.465
E	0.0566	1,070	0.137	0.0335	0.624
F	0.0370	1,170	0.134	0.0220	0.700

Sumber: Manohar, 1985; Zannetti, 1989.

b. Sebaran polutan dari emisi sumber bergerak

Prinsip dasar sebaran polutan dari emisi sumber bergerak sama seperti sebaran polutan dari emisi sumber tidak bergerak. Konsentrasi polutan pada jarak x menurut Manohar (1985) dan Zannetti (1989) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Y(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \mu \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{H^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \dots\dots\dots (2.25)$$

Dimana Y : Konsentrasi polutan di udara ambien (mg/m^3), μ : kecepatan angin (m/dt), σ_y : konstanta deviasi standar dispersi vertikal (m), σ_z : konstanta deviasi standar dispersi horizontal (m), H : tinggi cerobong efektif = tinggi cerobong + tinggi keputan asap (m), Z : tinggi reseptor di atas permukaan tanah (m), Q : *volum rate* (debit) pada saat keluar dari cerobong (mg/dt), V_p : laju alir.

3. Model spasial sebaran polutan SO_2 dan NO_2

Model merupakan representasi dari suatu sistem yang disajikan dalam bentuk yang dapat diterima untuk menggambarkan karakteristik dari suatu sistem. Permodelan rekayasa merupakan representasi dunia nyata dalam bentuk persamaan matematik yang mudah dipahami. Model diperlukan untuk menjelaskan dan menggambarkan permasalahan yang dihadapi yang memerlukan penanganan dengan pendekatan rekayasa (Purwanto, 2005). Model lingkungan menggambarkan fenomena lingkungan dalam bentuk yang lebih sederhana. Penjelasan fenomena pencemaran udara menggunakan pendekatan model dapat menjelaskan permasalahan dan penanganannya.

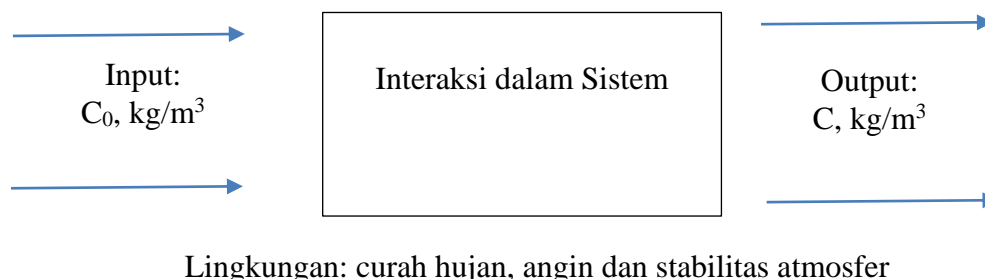
Model spasial berupa peta sebaran polutan merupakan salah satu model ikonik yang dapat digunakan untuk menggambarkan konsentrasi polutan di atmosfer, sebaran kejadian hujan asam, sebaran sumber emisi dan dapat digunakan untuk asesmen dampak lingkungan

(Muhammadi, 1993. Peta sebaran diperoleh dengan menggunakan perangkat untuk pemetaan misalnya GIS. Perangkat GIS dapat digunakan untuk pembuatan model spasial karena berkembang dengan cepat, semakin mudah digunakan dan dapat digabungkan dengan peta digital maupun basis data hasil survey. GIS dapat digunakan untuk memprediksi konsentrasi polutan sebaran polutan sehingga memudahkan untuk memperkirakan daerah terdampak. , menggunakan metoda geostatistik (*spatio-temporalkriging*) dapat digunakan untuk melakukan estimasi parameter polutan yang dapat dipengaruhi oleh spasial dan temporal seperti NO_x di udara (Montero-Lorenzo *et al.* 2013), logam berat (As, Hg, Co, dan Cr) dalam tanah (Hani, 2010)

4. Model hujan asam

a. Struktur model

Model hujan asam dikembangkan untuk memperoleh gambaran dari sistem udara terhadap konsentrasi SO_2 dan NO_2 dengan adanya pembentukan SO_4^{2-} dan NO_3^- karena pengaruh kejadian hujan. Sistem dalam model hujan asam disajikan dalam Gambar 2.8



Gambar 2.8. Sistem Input – Output Model.

Model dikembangkan berdasarkan kesetimbangan masa, konsentrasi polutan merupakan kesetimbangan antara input dan output. Input polutan berasal dari sumber-sumber emisi:

Laju akumulasi = laju input - laju output - laju transformasi.

$$\frac{dC}{dt} = Q - D - W - R \quad (\text{Purwanto, 2005}) \dots\dots\dots 2.26$$

Dimana dC/dt : laju perubahan konsentrasi SO_2 dan NO_2 (kg/dt), Q : laju emisi atau timbulan masa SO_2 dan NO_2 (kg/dt), D : laju deposisi kering atau laju eliminasi masa karena pengaruh gravitasi (m/dt), W : laju deposisi basah atau laju eliminasi masa karena pengaruh hujan (kg/dt) dan R : laju transformasi ($m^3/\text{molekul} \cdot dt$).

$$Q = f(m, X, \alpha, u, \tau) \dots\dots\dots 2.27$$

Dimana Q : laju emisi gas (kg/dt); m : masa polutan (g), X : jarak dari sumber emisi (m), α : sudut yang terbentuk dari sumber emisi dengan lokasi sampling dan arah angin ($^\circ$), u : kecepatan angin (m/dt), τ : tetapan stabilitas atmosfer. Emisi (Q) SO_2 dan NO_2 terdiri dari multi sumber, sehingga

$$Q = \sum Q_i.$$

Emisi gas dari sumber emisi bergerak atau kendaraan bermotor dan sumber tidak bergerak dari cerobong industri bersifat kontinyu. Gas terlepas dari sumber mengalami pengenceran, pencampuran dan perpindahan. Model lepasan gas menggunakan model dispersi untuk laju alir konstan adalah sebagai berikut:

$$\frac{dC}{dt} = D \frac{d^2C}{dx^2} dx - u \frac{dC}{dx} - r + w \quad (\text{Purwanto, 2005}) \dots\dots\dots 2.28$$

dimana r : laju transformasi dan W : laju transfer massa. Tinjauan tiga dimensi:

$$\frac{dC}{dt} = D_x \frac{d^2C}{dx^2} dx + D_y \frac{d^2C}{dy^2} dy + D_z \frac{d^2C}{dz^2} dz - u_x \frac{dC}{dx} - u_y \frac{dC}{dy} - u_z \frac{dC}{dz} + \sum R + \sum W$$

(Purwanto, 2005)..... 2.29

Dimana $\Sigma R = r_p - r_e$. r_p : laju timbunan massa dan r_e : laju eliminasi massa. Penyelesaian laju timbunan masa menggunakan pendekatan Gaussian untuk emisi sumber tidak bergerak pada pelepasan kontinu dengan ketinggian H, kecepatan angin rerata u, ke arah x, y, dan z adalah:

$$Y(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_e}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_e}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\}$$

(Manohar, 1985; Zannetti, 1989; Purwanto, 2005).....2.30

Dimana Y: Konsentrasi polutan di udara ambien dari sumber emisi (kg/m³), μ : kecepatan angin (m/dt), σ_y : konstanta deviasi standar dispersi vertikal (m), σ_z : konstanta deviasi standar dispersi horizontal (m), H_e : tinggi efektif sumber emisi = tinggi sumber emisi (H) + tinggi kepulan asap (m), Z: tinggi reseptor di atas permukaan tanah (m), Q: *volum rate* (debit) pada saat keluar dari cerobong (kg/dt). Sebaran maksimum di atas permukaan tanah $y = z = 0$, maka diperoleh:

$$Y_{y=z=0} = \frac{Q_p}{\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \cdot \exp\left[-\frac{H_e^2}{2\sigma_z^2}\right] \dots(\text{Manohar, 1985})\dots\dots\dots 2.31$$

Jika σ_y dan σ_z merupakan fungsi dari jarak

$$\sigma_y = A \cdot x^p \dots\dots(\text{Zannetti, 1989})\dots\dots\dots 2.32$$

$$\sigma_z = E \cdot x^p \dots\dots\dots(\text{Zannetti, 1989})\dots\dots\dots 2.33$$

Dimana A, B dan p adalah Konstanta

$$Y_{y=z=0} = \frac{q_p}{\pi\bar{u}AE} \cdot x^{-2p} \cdot \exp\left[-\frac{H_e^2}{2E^2 \cdot x^{2p}}\right] \quad (\text{Manohar, 1985})\dots\dots\dots 2.34$$

Tabel 2.12 Konstanta A, E dan p

Stabilitas atmosfer	σ_y		σ_z	
	A	p	E	p
Sangat Tidak Stabil	0,40	0,91	0,40	0,91
Tidak Stabil	0,36	0,86	0,33	0,86
Netral	0,32	0,78	0,22	0,78
Stabil	0,31	0,71	0,06	0,71

Sumber: Zannetti, 1989

Maka pada daerah pusat sebaran diperoleh:

$$Y_{y=z=0} = \frac{q_p}{\pi \cdot \bar{U} \cdot A \cdot E} \cdot x^{-2p} \cdot \exp \left[-\frac{H_e^2}{2E^2 \cdot x^{2p}} \right] \dots\dots (\text{Manohar, 1985}) \dots\dots 2.35$$

Untuk menentukan konsentrasi maksimum (Y_{max}) pada pusat sebaran dimana $dy/dx = 0$ dan $\sigma_z = H_e/\sqrt{2}$. Sehingga diperoleh

$$Y_{max} = \frac{0,117Q_p}{U \cdot \sigma_y \sigma_z} \quad (\text{Manohar, 1985}) \dots\dots 2.36$$

Dimana σ_y, σ_z tergantung pada X (jarak). Pada lokasi dengan sudut α dari pusat sebaran (daerah segaris dengan arah angin) konsentrasi polutan adalah

$$Y = \frac{0,117Q_p}{U \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \cos \alpha \quad \dots\dots 2.37$$

Pada saat peristiwa hujan terjadi pencucian polutan SO_2, NO_2 oleh air hujan atau deposisi basah sehingga konsentrasi SO_2, NO_2 mengalami penurunan. Konsentrasi SO_2, NO_2 adalah:

$$C = Y - W \dots\dots 2.38$$

Deposisi basah polutan SO₂ dan NO₂ melalui mekanisme pelarutan gas. Deposisi basah menggunakan koefisien *washout* K_w. Masa polutan M (per unit volume per unit waktu) dalam hujan adalah:

$$W = C \cdot K_w \quad (\text{Hall, 2008}) \dots\dots\dots 2.39$$

$$K_w = \alpha P^m \quad (\text{Hall, 2008}) \dots\dots\dots 2.40$$

dimana P: curah hujan (m/jam), α dan m adalah konstanta gas dengan $\alpha_{(SO_2)} = 0,0001$, $\alpha_{(NO_2)} = 0,0000008$ dan $m = 0,65$ (Hall, 2008).

Pada saat tidak terjadi hujan, konsentrasi polutan sama dengan konsentrasi polutan dari sumber-sumber emisi (γ) sehingga $C = \gamma$.

maka persamaan 2,39 menjadi:

$$W = \gamma \cdot K_w \quad \dots\dots\dots 2.41$$

dan persamaan 2.38 menjadi:

$$C = \gamma - \gamma \cdot K_w \quad \dots\dots\dots 2.42$$

$$-\frac{dC}{dt} = \gamma - \gamma K_w \quad \dots\dots\dots 2.43$$

dengan harga batas pada $t=0$, $C=\gamma$ dan $t=t$, $C=C_1$, maka penyelesaiannya adalah:

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{dC}{\gamma} = \int_{t_0}^{t_1} dt - K_w \int_{t_0}^{t_1} dt \quad \dots\dots\dots 2.44$$

Diperoleh: $C = \gamma - \gamma e^{-K_w \cdot t} \quad \dots\dots\dots 2.45$

$$C = \gamma(1 - e^{-K_w \cdot t}) \quad \dots\dots\dots 2.46$$

Maka
$$C = \frac{0,117Q_p}{U \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \cos \alpha \cdot (1 - e^{-K_w \cdot t}) \dots\dots\dots 2.47$$

Dimana $\frac{0,117Q_p}{U \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \cos \alpha$ adalah fraksi timbunan massa sebaran kering dari sumber emisi

dan $\frac{0,117Q_p}{U \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \cos \alpha \cdot (e^{-K_w \cdot t})$ adalah fraksi deposisi basah.

b. Validasi Model

Model merupakan gambaran dari keadaan sebenarnya. Pembuktian keobyektifan model dapat dilakukan dengan uji validasi (Muhammmadi, 2001). Model merupakan penyederhanaan fakta sehingga dapat dipahami dengan mudah dan cepat. Dalam keadaan nyata, perilaku variable dapat diukur dan disusun menjadi data statistik. Dalam model, hasil simulasi model dapat menampilkan perilaku variable serupa dengan perilaku variabel dalam fakta.

Validasi terhadap model dilakukan melalui validasi struktur dan validasi kinerja. Validasi struktur dilakukan terhadap validitas konstruksi dan stabilitas struktur. Validasi struktur model untuk mengetahui keserupaan struktur model dengan struktur fakta. Sebagai model berorientasi proses, keserupaan struktur model dengan struktur fakta ditunjukkan oleh sejauh mana interaksi variabel model dapat menirukan interaksi kejadian nyata (Muhammadi 2001). Kestabilan struktur terkait dengan keberlakuan atau kekuatan struktur model dalam dimensi waktu. Pengujian terhadap konstruksi dan kestabilan struktur bertujuan untuk memperoleh keyakinan sejauh mana keserupaan struktur model dengan struktur fakta.

Validasi kinerja bertujuan untuk memperoleh keyakinan sejauh mana hasil kinerja model sesuai dengan fakta. Validasi kinerja dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi model dengan data empiris. Penyimpangan (*error*) diketahui dengan melihat penyimpangan antara nilai rerata output model dengan nilai rerata data fakta dan melihat penyimpangan nilai

variasi simulasi terhadap aktual (Purwanto, 1995, Muhammadiyah, 2001). Validasi model untuk mengetahui unjuk kinerja model dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan korelasi Pearson, koefisien determinan (R^2), *index of agreement* (d), *root mean square error* (RMSE) dan *mean absolute error* (MAE). Korelasi Pearson menunjukkan kekuatan hubungan perubahan antara variabel bebas dengan variabel tergantung. Nilai korelasi Pearson adalah $0 \leq r \leq 1,0$. Kekuatan hubungan dinyatakan kuat apabila nilai korelasi lebih besar dari 0,8. Semakin besar nilai korelasi (mendekati 1,0) menunjukkan hubungan antara keduanya semakin kuat. Koefisien determinan (R^2) dalam korelasi Pearson merupakan gambaran dari porsi data observasi yang dapat dijelaskan oleh data model. Nilai R^2 adalah $0 \leq R^2 \leq 1,0$, semakin besar nilai R^2 maka model semakin mendekati fakta (Legates and McCabe, 1999). Koefisien determinan mengikuti persamaan:

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}) - (P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0,5} \left[\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0,5}} \right\}^2 \quad (\text{Legates and McCabe, 1999}) \dots\dots\dots 2.48$$

dimana O: data observasi dan P: data prediksi model.

Sensitifitas dari korelasi berdasarkan perbedaan data observasi dan data prediksi model menggunakan indeks keberterimaan (*index of agreement: d*). Indeks keberterimaan merupakan pengembangan dari koefisien determinan yang merepresentasikan rasio antara kuadrat error (selisih dari observasi dan prediksi) dengan potensi error (Willmott et.al., 2012). Nilai indeks keberterimaan adalah $0 \leq d \leq 1,0$. Semakin tinggi nilai d (mendekati 1,0) maka model semakin dapat diterima. Persamaan indeks keberterimaan adalah:

$$d = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (\text{Legates and McCabe, 1999; Willmott et.al., 2012}) \dots\dots\dots 2.49$$

Uji kesalahan (error) model menggunakan RMSE (*Root Mean Square Error*) dan MAE (*mean absolute error*). RMSE adalah salah satu statistik indeks kesalahan berdasarkan selisih dari observasi dan prediksi sedangkan MAE adalah aktual dari selisih observasi dan prediksi. Secara umum bahwa semakin rendah RMSE dan MEA maka kinerja model semakin baik (Legates and McCabe, 1999; Willmott, 1982; Willmott et.al., 2012). Persamaan RMSE dan MAE adalah:

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \quad (\text{Legates and McCabe, 1999; Willmott et.al., 2012}) \quad 2.50$$

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (\text{Legates and McCabe, 1999; Willmott et.al., 2012}) \quad \dots 2.51$$

c. Simulasi model

Simulasi adalah meniru perilaku gejala atau proses dengan tujuan untuk memahami gejala atau proses tersebut, membuat analisi dan membuat prediksi gejala atau proses tersebut di masa depan (Muhammadi, 2001). Simulasi pada model dilakukan dengan memasukkan data pada model. Hasil simulasi digunakan untuk memahami gejala atau proses yang terjadi dan kecenderungannya di masa datang. Pemahaman ini sangat berguna untuk memperoleh solusi terbaik dengan memperkirakan kecenderungannya di masa depan.

