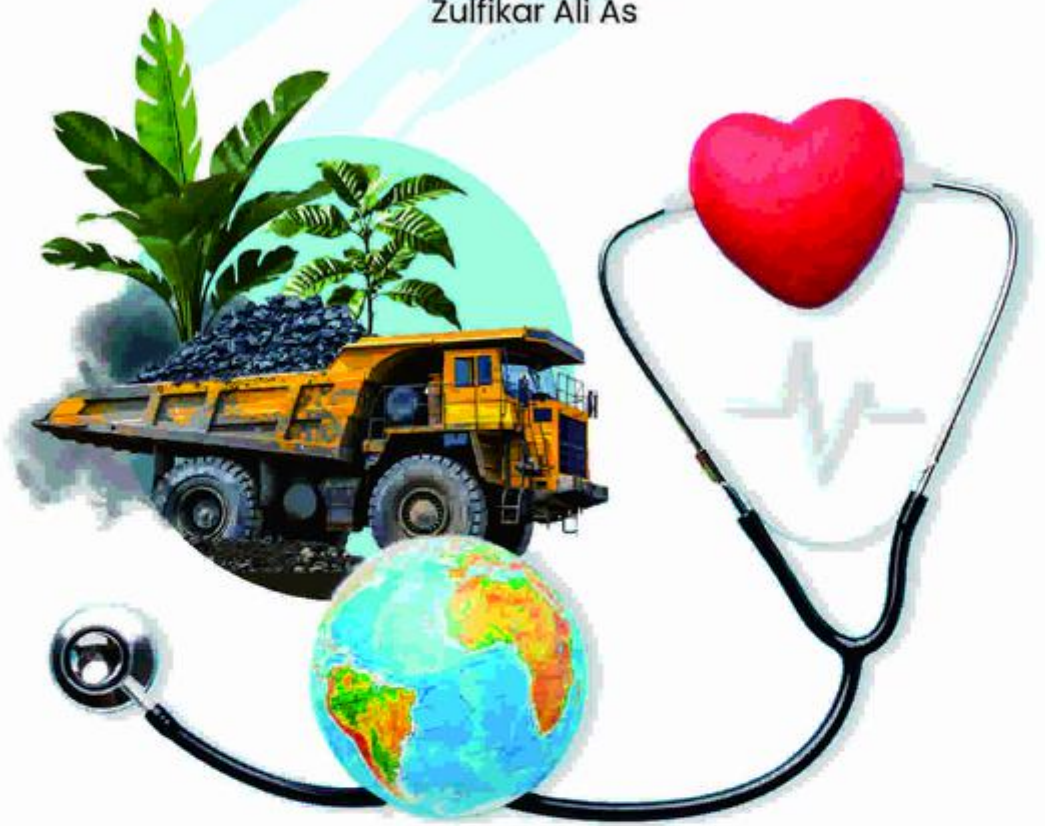


Junaidi
Muhammad Pahrudin
Zulfikar Ali As



DAMPAK DEBU JALAN ANGKUTAN BATUBARA

Terhadap Kesehatan Manusia
dan Tanaman Karet

DAMPAK DEBU JALAN ANGKUTAN BATUBARA

Terhadap Kesehatan Manusia
dan Tanaman Karet

Junaidi
Muhammad Pahrudin
Zulfikar Ali As



**DAMPAK DEBU JALAN ANGKUTAN BATUBARA
TERHADAP KESEHATAN MANUSIA
DAN TANAMAN KARET**

Ditulis oleh:

**Junaidi
Muhammad Pahrudin
Zulfikar Ali As**

Diterbitkan, dicetak, dan didistribusikan oleh

PT Literasi Nusantara Abadi Grup

Perumahan Puncak Joyo Agung Residence Blok B11 Merjosari

Kecamatan Lowokwaru Kota Malang 65144

Telp : +6285887254603, +6285841411519

Email: literasinusantaraofficial@gmail.com

Web: www.penerbitlitnus.co.id

Anggota IKAPI No. 340/JTI/2022



Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang. Dilarang mengutip
atau memperbanyak baik sebagian ataupun keseluruhan isi buku
dengan cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Cetakan I, Agustus 2025

Perancang sampul: Noufal Fahriza

Penata letak: Noufal Fahriza

ISBN : 978-634-234-475-0

vi + 144 hlm.; 15,5x23 cm.

©Agustus 2025



PRAKATA

Perkembangan industri pertambangan, khususnya batubara, telah memberikan kontribusi signifikan terhadap perekonomian. Namun, di sisi lain, aktivitas pengangkutan batubara juga menimbulkan dampak negatif, terutama terkait dengan penyebaran debu di sepanjang jalur transportasi. Buku “Dampak Debu Jalan Angkutan Batubara terhadap Kesehatan Manusia dan Tanaman Karet” ini hadir sebagai upaya untuk mengkaji secara mendalam permasalahan tersebut.

Buku ini membahas secara komprehensif tentang karakteristik debu batubara, mekanisme penyebarannya, serta dampak yang ditimbulkannya terhadap kesehatan manusia dan tanaman karet. Pembaca akan diajak untuk memahami potensi bahaya debu batubara terhadap sistem pernapasan manusia, serta pengaruhnya terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman karet. Kajian ini didasarkan pada data dan analisis ilmiah, sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran yang akurat dan objektif tentang permasalahan yang dibahas.

Harapan kami, buku ini dapat menjadi sumber informasi dan referensi yang berharga bagi berbagai pihak, termasuk akademisi, peneliti, pengambil kebijakan, pelaku industri pertambangan, petani karet, dan masyarakat umum.

Dengan pemahaman yang lebih baik tentang dampak debu batubara, diharapkan kita dapat bersama-sama mencari solusi yang berkelanjutan untuk meminimalkan dampak negatif dan menciptakan lingkungan yang lebih sehat dan lestari.

Penulis



DAFTAR ISI

Prakata.....	iii
Daftar Isi.....	v

BAB I

PENDAHULUAN	1
-------------------	---

BAB II

PARTIKEL DEBU	5
Pencemaran Udara	5
Dinamika Debu di Udara	6
Efek Kesehatan akibat Partikel Debu.....	8
Partikel Debu terhadap Tumbuhan	10
Efek Vegetasi terhadap Debu Udara	11

BAB III

PARTIKULAT	19
Sumber Partikulat	19
Karakteristik dan Transpor Partikulat.....	21
Pengaruh Meteorologi terhadap Transport Partikulat	22

BAB IV

PENGUKURAN PARTIKULAT	27
Pengumpulan Partikulat	27
Perjalanan Partikulat dan Efeknya pada Organ Pernafasan	30
Jenis Penyakit Pernafasan Terkait Inhalasi Partikulat.....	34

BAB V

DEPOSISI PERTIKEL PADA VEGETASI 41

Pembentukan Vegetasi.....	41
Efek Partikel Debu di Udara terhadap Tumbuhan.....	47
Efek Pencemaran Partikulat terhadap Riap Pohon	57

BAB VI

POLA SEBARAN DEBU 63

Pengukuran Konsentrasi Debu Terendap.....	63
Pola Sebaran Debu.....	74
Risiko Kesehatan.....	86

BAB VII

RIAP TANAMAN KARET 107

Kesesuaian Habitat Tanaman Karet.....	107
Riap Tanaman Karet.....	108

BAB VIII

KONKLUSI 127

Daftar Pustaka.....	129
---------------------	-----



BAB I

PENDAHULUAN

Batubara adalah salah satu sumber energi di alam yang dieksploitasi melalui penambangan terbuka (*open pit mining*) maupun tambang bawah tanah (*underground mining*). Realisasi produksi batubara Nasional di tahun 2015 oleh perusahaan PKP2B (Perjanjian Karya Pengusahaan Pertambangan Batubara) dan BUMN (Badan Usaha Milik Negara) adalah 257,3 juta ton, belum lagi oleh perusahaan swasta, sehingga total produksi Nasional sesuai target 425 juta ton (RPJMN Kementerian ESDM, 2014).

Propinsi Kalimantan Selatan merupakan produsen batubara terbesar kedua di Indonesia setelah Kalimantan Timur. Cadangan Batubara di Provinsi Kalimantan Selatan 10.659 Milyar ton (Bulkin, 2014). Tingginya produksi batubara di provinsi ini memiliki konsekuensi antara lain semakin bertambahnya lahan tambang, lapangan penumpukan batubara (*stockpile*), pelabuhan dan armada angkutan batubara.

Transportasi batubara diperlukan karena terdapat jarak antara lokasi tambang dengan pelabuhan sebagai tempat untuk pengapalan bahan galian ini. Transportasi batubara ini dilakukan menggunakan *dump truck* dengan berbagai kapasitas, yaitu 20 ton sampai dengan 100 ton.

Kapasitas truk dengan daya angkut yang besar (100 ton) biasanya digunakan oleh perusahaan-perusahaan besar yang berskala nasional, sedangkan *dump truck* dengan kapasitas 20 ton lebih banyak digunakan oleh perusahaan tambang batubara skala kecil.

Undang-undang Republik Indonesia Nomor 4 tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara, menetapkan bahwa bahan galian tambang harus diangkut melalui jalan khusus yang dibangun sendiri oleh perusahaan tambang. Di Provinsi Kalimantan Selatan pernah ada kebijakan pemerintah daerah yang memperbolehkan angkutan batubara untuk melintasi jalan umum (Jalan Negara), walaupun izinnya dibatasi pada jam 18.00 s.d 06.00 saja. Kebijakan ini tentu banyak membawa dampak terhadap pengguna jalan, mulai dari terjadinya kemacetan lalu lintas sampai dengan meningkatnya angka kecelakaan.

Namun sejak 1 Juni 2009 yaitu dikeluarkannya Peraturan Daerah (Perda) Kalimantan Selatan No. 3 tahun 2008 tentang Pengaturan Penggunaan Jalan Umum dan Jalan Khusus Untuk Angkutan Hasil Tambang dan Hasil Perusahaan Perkebunan, maka praktis pengangkutan batubara yang sebelumnya menggunakan jalan umum berpindah dan terkonsentrasi di jalan khusus angkutan batubara yang dimiliki oleh perusahaan tertentu, sehingga jalan angkut tersebut digunakan secara bersama-sama oleh beberapa usaha tambang.

Salah satu jalan khusus angkutan batubara yang mengalami peningkatan volume lalu lintas pasca pemberlakuan Perda Kalsel No. 3 tahun 2008 adalah jalan angkut batubara milik salah satu perusahaan yang terdapat di Kabupaten Tapin.

Jalan angkut ini menghubungkan antara lokasi tambang dengan lapangan penumpukan batubara (*stockpile*) dan pelabuhan khusus batubara sebagai pintu keluar bahan tambang ini, panjang jalan ini lebih dari 50 km.

Permasalahan pencemaran lingkungan mulai muncul saat jalan angkut yang awalnya hanya digunakan oleh dua perusahaan tambang, kini digunakan oleh kurang lebih 25 perusahaan. Volume lalu lintas



truk batubara yang melintas di ruas jalan tersebut berkisar antara 4.000 hingga 5.000 unit perhari (As, 2010).

Dampak yang paling dirasakan adalah terjadinya pencemaran lingkungan berupa peningkatan konsentrasi debu dari jalan angkut batubara tersebut. Permasalahan ini semakin kompleks karena ruas jalan khusus angkutan batubara ini memotong beberapa ruas jalan, baik jalan kabupaten maupun jalan negara dan juga melintasi spot-spot permukiman penduduk.

Pencemaran lingkungan akibat dispersi debu yang mencapai rumah penduduk sudah lama menjadi keluhan warga, bahkan gangguan pernafasan yang cenderung meningkat diyakini juga berhubungan dengan kontaminasi debu tersebut.

Efek pajanan partikel halus ($PM_{2.5}$) terhadap anak usia sekolah di jalan angkut Kecamatan Benuang Provinsi Kalimantan Selatan pernah diteliti pada tahun 2010. Hasilnya, sebanyak 68% anak usia sekolah berisiko mengalami gangguan pernafasan akibat inhalasi debu batubara berukuran kecil tersebut.

Meskipun kapasitas paru anak usia sekolah tidak mengalami kelainan yang diduga akibat efek paparan yang masih singkat namun terdapat kecenderungan semakin tinggi asupan $PM_{2.5}$ maka semakin terhambat pertumbuhan kapasitas paru anak usia sekolah tersebut (As, 2010).

Dampak akibat dari pencemaran debu di sepanjang jalan angkut batubara tidak terbatas hanya pada gangguan pernapasan manusia saja, tetapi juga pada pertumbuhan tanaman disekitar jalan angkut tersebut. Dampak terhadap pertumbuhan tanaman ini terutama terjadi pada tanaman tahunan karena tanaman tersebut menerima pengaruh secara terus menerus.

Tanaman tahunan yang diteliti pada penelitian ini adalah Tanaman Karet. Karet adalah tanaman perkebunan tahunan berupa pohon batang lurus dengan nama latin *Hevea brasiliensis*, pohon karet pertama kali hanya tumbuh di Brasil, Amerika Selatan, namun setelah percobaan berkali-kali oleh Henry Wickham, pohon ini berhasil



dikembangkan di Asia Tenggara, di mana sekarang ini tanaman ini banyak dikembangkan sehingga sampai sekarang Asia merupakan sumber karet *alami*.

Di Indonesia, Malaysia dan Singapura tanaman karet mulai dicoba dibudidayakan pada tahun 1876 dan Indonesia pernah menguasai produksi karet dunia, namun saat ini posisi Indonesia didesak oleh dua negara tetangga Malaysia dan Thailand (Tim Penulis PS, 2008).

Pemilihan jenis tanaman karet sebagai obyek yang diteliti juga didasari atas luasnya perkebunan karet di Kabupaten Tapin yang dijadikan sebagai lokasi penelitian ini, yaitu seluas 262.295 Ha. Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa jalan angkut batubara memotong perkebunan karet lebih dari 10 km pada ruas tertentu, sehingga sepanjang ruas jalan tersebut, kebun karet berbatasan langsung dengan badan jalan angkutan batubara yang mendispersikan debu ke sekitar jalan.

Pengelolaan lingkungan akibat aktifitas angkutan batubara mutlak dilakukan. Kebijakan yang akan diambil membutuhkan informasi yang akurat mengenai konsentrasi dan dispersi debu di sepanjang jalan angkut batubara.

Mengingat jalur angkutan batubara yang sangat panjang, pengukuran konsentrasi debu secara langsung diperkirakan menghabiskan sumber daya yang sangat besar karena membutuhkan jumlah sampel yang banyak dan waktu penelitian yang lama (karena metode pengukuran partikulat bersifat kontinyu).

Oleh sebab itu, di samping melakukan pengukuran langsung, konsentrasi dan dispersi debu juga diprediksi menggunakan model kualitas udara. Kontur konsentrasi dan dispersi partikulat ini selanjutnya menjadi input dalam menghitung risiko pajanan debu bagi masyarakat yang bermukim di sepanjang jalan khusus angkutan batubara di Kabupaten Tapin.





BAB II

PARTIKEL DEBU

Pencemaran Udara

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PPRI) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup; menjelaskan bahwa Pencemaran Udara adalah masuk atau dimasukkannya zat, energi, dan/atau komponen lainnya ke dalam Udara Ambien oleh kegiatan manusia sehingga melampaui Baku Mutu Udara Ambien yang telah ditetapkan.

Permukiman merupakan bagian dari lingkungan hidup di luar kawasan lindung, baik yang berupa kawasan perkotaan maupun perdesaan yang berfungsi sebagai lingkungan tempat tinggal atau lingkungan hunian dan tempat kegiatan yang mendukung perikehidupan dan penghidupan (UU No.4 Tahun 1992).

Particulate Matter (PM) adalah istilah umum untuk menggambarkan bagian-bagian kecil dari zat padat atau cair di udara, air, dan pada permukaan zat padat yang berukuran mulai dari Angstrom (1×10^{-10}) meter hingga sentimeter.

PM_{2.5} tergolong partikel halus (*fine particle*) yang memiliki diameter equivalen aerodinamis 0,1-2,5 μm (Phalen, 2009). Partikel kasar (*coarse particle*) merupakan partikel yang memiliki diameter

equivalen aerodinamis 2,5-10 μm . PM_{10} adalah semua partikel yang memiliki diameter equivalen aerodinamis kurang dari atau sama dengan 10 μm (sekitar satu pertujuh diameter rambut manusia) (McKenna, 2008).

Index bahaya (*Hazard Index*) adalah suatu penilaian risiko terhadap paparan suatu bahan nilai kimia pada paparan perorangan. Nilai *hazard index* adalah kurang dari 1,0 menunjukkan tidak ada efek kesehatan (*noncancer*) pada perkiraan tersebut (web.ead.anl.gov).

Dinamika Debu di Udara

Debu adalah partikel padat yang dapat dihasilkan oleh manusia (*antropogenik*) atau alam dan merupakan hasil dari proses pemecahan suatu bahan (Mukono, 1997). Sedangkan menurut Hidayat (2000), debu adalah partikel padat yang terbentuk dari proses penghancuran, penanginan, grinding, impaksi cepat, peledakan dan pemecahan dari material organik atau anorganik seperti batu, bijih metal, batubara dan kayu.

Tiga kontributor utama dalam partikel *antropogenik* adalah (1) pembakaran (bahan bakar fosil dan biomass), (2) material yang mengalami penghancuran (misalnya permukaan jalan yang tidak diaspal) dan (3) proses industri dengan temperatur tinggi (Eastwood, 2008).

Permukaan jalan menjadi hancur kalau mendapatkan tekanan yang konstan akibat kendaraan, menghasilkan debu aspal dan debu mineral. Debu tanah dan debu mineral dalam jumlah yang jauh lebih besar dapat terangkat dari permukaan jalan-tanah yang tidak diperkeras. Kondisi ini terjadi di semua lokasi konstruksi dan tambang terbuka serta pembangunan lansekap.

Particulate Matter (PM) adalah istilah umum untuk menggambarkan bagian-bagian kecil dari zat padat atau cair di udara, air, dan pada permukaan zat padat yang berukuran mulai dari Angstrom (1×10^{-10}) meter hingga sentimeter.



Partikulat dapat berasal dari sumber alamiah atau buatan manusia (*antropogenik*). Permukaan sebuah jalan akan hancur di bawah tekanan yang konstan akibat kendaraan yang melintas di atasnya dan menghasilkan debu, jumlah debu yang dihasilkan jauh lebih besar dari permukaan jalan tanah yang tidak diaspal, seperti halnya pada kondisi jalan angkut batubara.

Proses utama perpindahan partikulat dari atmosfer adalah melalui; 1) pengendapan secara gravitasi, 2) deposisi kering dan 3) deposisi basah. ***Pengendapan secara gravitasi*** terjadi ketika turbulensi dengan atmosfer tidak mampu mempertahankan partikel yang tersuspensi, partikel menjadi berat dan jatuh ke tanah. Pergerakan partikulat karena gaya gravitasi tergantung ukuran partikel, kepadatan dan kecepatan angin. ***Deposisi kering*** kadang disebut penyerapan permukaan, terjadi akibat polutan yang ditransfer ke permukaan dari atmosfer oleh gerak turbulensi dan menyebabkan polutan menumpuk di permukaan. ***Deposisi basah*** yang secara umum dikenal sebagai *scavenging precipitation* terbagi dua yaitu *washout* dan *rainout* atau *snowout* dimana partikulat diserap oleh butiran air kemudian jatuh ke bumi. Deposisi material berkaitan dengan laju deposisi, yang tergantung dari intensitas turbulensi atau kecepatan angin (Holgate, *et al.*, 1999).

Suatu model dapat digunakan untuk menghitung konsentrasi polutan yang didistribusikan sebagai hasil dari dispersi, salah satu model tersebut adalah Model ArchGIS. Zhong *et al* (2011), menggunakan ArcGis, untuk memetakan konsentrasi polutan dengan kontur visualisasi pada peta.

Data spasial merupakan dasar dalam pemetaan, yang menyimpan informasi ruang yang diperlukan dari sistem dan menyediakan dukungan data untuk analisis spasial dan operasi grafis. Data spasial kemudian dikelola menjadi database lapisan internal platform GIS.

Kondisi eksisting kemudian direpresentasikan sebagai lapisan yang berbeda di peta. Sebuah layer peta baru dibangun untuk memuat informasi konsentrasi polutan atau ke dalam peta yang sudah ada,



kemudian algoritma interpolasi yang ada dalam *software* ArcGIS digunakan untuk membangun lapisan raster dan hasil interpolasi akan digunakan untuk membuat garis kontur konsentrasi lapisan.

Nilai-nilai raster mewakili konsentrasi kawasan yang kemudian menggunakan warna yang berbeda untuk membedakan situasi polusi dengan menggunakan ArcGIS untuk membuat lapisan raster. Kemudian lapisan raster dan lapisan kontur yang terdapat dalam peta, mampu menampilkan efek visualisasi yang baik yang menggambarkan distribusi atau sebaran polutan

Partikulat atau debu adalah suatu benda padat yang tersuspensi di udara dengan ukuran dari 0,3 μm sampai 100 μm , berdasarkan besar ukurannya partikulat (debu) ada dua bagian besar yaitu debu dengan ukuran lebih dari 10 μm disebut dengan debu jatuh (*dust-fall*) sedang debu yang ukuran partikulatnya kurang dari 10 μm disebut dengan *Suspended Particulate Matter* (SPM).

Debu yang ukurannya kurang dari 10 μm ini bersifat melayang-layang di udara. Partikulat melayang umumnya diukur dengan metode atau peralatan yang aktif, yakni peralatan yang menggunakan pompa penghisap, agar udara yang mengandung partikulat terserap melalui kertas filter *fiberglass*. Metode pengukuran debu lainnya adalah secara pasif, pengukuran secara pasif ini digunakan untuk mengukur debu yang jatuh karena gaya beratnya secara gravitasi.

Efek Kesehatan akibat Partikel Debu

Partikulat dapat menyebabkan efek merugikan kepada manusia setelah masuk dan disimpan dalam sistem pernafasan manusia. Penetrasi dan deposisi partikulat tergantung pada ukuran aerodinamis partikel, mekanisme pertahanan pernafasan, dan pola pernafasan.

Kerusakan tubuh akibat inhalasi partikulat tergantung banyak faktor antara lain spesifikasi partikulat, status kesehatan saat ini (terutama pernafasan dan sistem peredaran darah), usia (anak-anak dan orang tua lebih rentan terhadap kerusakan), jenis kelamin



(perempuan memiliki permukaan paru-paru yang lebih kecil dari pada laki-laki dan memiliki tingkat deposisi alveolar yang lebih tinggi), lokasi (kedekatan dengan sumber emisi didukung temperatur yang tinggi atau kondisi klimatologi dan geografi yang mendukung respon negatif terhadap partikulat), ukuran partikel (golongan $PM_{2.5}$ merupakan yang paling banyak mengendap di alveolar), komposisi partikel (kerusakan dapat berasal dari efek fisiologis pada jaringan paru, dari kandungan kimia komponen yang larut dalam cairan alveolar dan ditransfer ke dalam darah atau bagian lain dari tubuh, komponen yang tidak larut dapat menyebabkan kerusakan dengan cara lain), dan jenis pernafasan seseorang (hidung, mulut, atau keduanya, masing-masing menyebabkan pola deposisi partikulat yang berbeda di saluran pernafasan).

Penyakit pernafasan akibat inhalasi partikulat yang diidentifikasi dari hasil studi epidemiologi antara lain asma/alergi, bronchitis, emphysema, COPD, *pulmonary infection*, *pulmonary fibrosis*, *respiratory infection*, *pulmonary vasculitis* dan lain-lain (Holgate, *et al.*, 1999).

Sebuah pendekatan yang dapat digunakan untuk menilai dampak dari pejanan debu selain berdasarkan hasil diagnosis medis adalah dengan menghitung besar risiko. Risiko didefinisikan sebagai kemungkinan terjadinya kerusakan, penyakit atau kematian yang dihasilkan dari pajanan yang berasal dari agen-agen lingkungan.

Penilaian risiko ini tidak berdasarkan pada perbandingan antara populasi yang terpajan dengan populasi yang tidak terpajan, melainkan berdasarkan sejumlah polutan yang dapat masuk ke tubuh manusia melalui jalur masuknya.

Dalam analisis risiko ini, efek yang merugikan kesehatan tersebut sebagai *endpoint* dibedakan atas efek karsinogenik dan nonkarsinogenik dan dinyatakan dalam Index bahaya (*Hazard Index*), yaitu suatu penilaian risiko terhadap paparan agen lingkungan pada paparan perorangan. Nilai *Hazard Index* adalah kurang dari



1,0 menunjukkan tidak ada efek kesehatan (*noncancer*) pada peperan tersebut (web.ead.anl.gov).

Partikel Debu terhadap Tumbuhan

Dampak lain dari dispersi partikulat juga bisa mengenai tumbuhan, sehingga dapat mempengaruhi pertumbuhannya. Mekanisme terpengaruhnya pertumbuhan tanaman ini adalah akibat dari tertutupnya stomata daun sehingga mengganggu proses respirasi oleh daun.

Dampak terhadap pertumbuhan tanaman ini terutama terjadi pada tanaman tahunan karena tanaman tersebut menerima pengaruh secara terus menerus sepanjang tahun. Tanaman yang di jadikan obyek dalam penelitian ini dipilih tanaman karet dengan nama latin *Hevea brasiliensis*.

Pertumbuhan tanaman disebabkan oleh fungsi dari dua variabel, pertama adalah faktor genetik yang bersifat tetap (jenis bibit) dan yang kedua adalah faktor lingkungan yang selalu berubah-ubah (termasuk oleh partikulat /debu).

Pertumbuhan atau riap (*increment*) merupakan pertumbuhan dari dimensi pohon atau tegakan untuk jangka waktu tertentu. Riap adalah pertumbuhan diameter, tinggi dan volume atau nilai suatu pohon atau tegakan selama jangka waktu tertentu (Jenus, *et al.*, 1984).

Pertumbuhan dalam penelitian ini dinyatakan dalam riap rata-rata tahunan (*Mean Annual Increment/MAI*) merupakan rata-rata pertambahan tumbuh dimensi pohon atau tegakan riap tahunannya. MAI diperoleh dari pembagian antara besarnya dimensi yang dicapai dengan waktu yang diperlukan.

Riap kumulatif suatu dimensi pengukuran

$$\text{MAI} = \frac{\text{Riap kumulatif suatu dimensi pengukuran}}{\text{Umur pada saat pengukuran}}$$

Pemilihan parameter riap dengan mengukur diameter pohon, didasarkan pada kemudahan dalam pelaksanaan pengukuran



diameter tersebut dengan akurasinya tepat (diukur pada ketinggian 1,3 meter dan dapat menggunakan meteran biasa), sedangkan parameter MAI dipilih karena penelitian ini hanya mengindikasikan suatu dampak terhadap pertumbuhan yang terakumulasi pada satu kurun waktu saat tanaman karet ini terdampak debu.

Efek Vegetasi terhadap Debu Udara

Kualitas udara di sekitar jalan raya telah menarik perhatian para peneliti di berbagai penjuru dunia. Pengurangan polusi udara di sekitar jalan raya oleh barrier pinggir jalan, seperti barrier kebisingan dan tegakan vegetasi pohon telah dipelajari.

Vegetasi tegakan pohon di sepanjang jalan (pohon jalur hijau jalan raya) telah diidentifikasi sebagai cara yang efektif untuk mengurangi polusi udara dan memberikan peningkatan estetika lanskap perkotaan (Buccolieri *et al.*, 2009; Sander, Polasky dan Haight, 2010).

Tajuk pohon pinggir jalan dapat memperbaiki kualitas udara melalui perubahan dispersi udara dan penangkapan polutan udara, termasuk partikel debu. Hasil-hasil penelitian terbaru mengungkapkan bahwa kanopi pohon pinggir jalan memiliki efek positif terhadap kualitas udara (Bealey *et al.*, 2007; Litschke dan Kuttler, 2008).

Efek positif adalah hambatan yang ditimbulkan oleh vegetasi terhadap aliran udara, mengurangi pertukaran udara terutama ke arah vertikal dan menangkap polutan udara. Efek negatif adalah bahwa jenis-jenis tumbuhan tertentu dapat memancarkan senyawa organik (biogenik) yang mudah menguap (BVOC) dan berkontribusi pada pembentukan aerosol organik sekunder (SOA), yang merupakan komponen kimia penting dari partikulat udara (Poschl, 2005; Liao *et al.*, 2009; Zhang dan Ying, 2011).

Barisan pohon sebagai penahan angin sering terlihat di sepanjang jalan raya dan memiliki efek melindungi yang mampu melawan arah angin permukaan yang membawa partikel udara. Barisan pohon ini



ternyata mampu menahan hembusan angin dan turbulensi udara (Wilson, 2005; Bouvet, *et al.*, 2007).

Hasil penelitian Raupach *et al.* (2001) mengungkapkan bawa barier vegetasi pohon mampu menyaring partikel debu dalam aliran udara yang melewatinya, atau nilai transmitansi dari vegetasi penahan angin terhadap partikel debu udara.

Total deposisi partikel oleh vegetasi ternyata ditentukan oleh pertukaran penyerapan dan transmisi partikel, dan jumlah deposisi maksimal ditentukan oleh nilai porositas vegetasi. Teori vegetasi penahan angin dan penyaring partikel debu udara ini dikaji lebih lanjut oleh Wilson (2005) dan Bouvet *et al.* (2007), terutama dalam hal penyaringan partikel debu udara oleh vegetasi.

Vegetasi pohon mempunyai daun-daun yang permukaannya sangat luas, dan struktur tajuknya sangat kompleks (cabang dan ranting), menyajikan kekasaran permukaan aerodinamis yang mampu mengumpulkan partikel debu udara secara efisien (Beckett, Freer dan Taylor, 1998).

Fitur penting dari vegetasi pohon perkotaan biasanya adalah (Chen *et al.*, 2015.): (1) dua jenis pohon atau lebih yang berbeda-beda ditanam sebagai jalur-hijau jalan-raya; dan (2) panjang dan lebar, serta kerapatan jalur hijau jalan raya ini sangat bervariasi. Efisiensi penghilangan partikel debu udara oleh jalur hijau ini di suatu lokasi dapat diestimasi dengan rumus:

$$E = (C_i - C_{CK}) / C_i \times 100\% \quad (1)$$

dimana C_i adalah konsnetrasi partikel debu di sisi jalan-raya ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), dan C_{CK} adalah konsentrasi partikel debu di dalam jalur hijau jalan-raya ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

Penyerapan partikel debu udara oleh vegetasi hutan kota di suatu lokasi dapat diestimasi dengan rumus:

$$Q = F \times S \times T \quad (2)$$



dimana Q jumlah partikel debu yang diserap oleh pohon-pohon selama periode waktu tertentu (kg), F adalah aliran partikel ($\mu\text{g} \cdot \text{det}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), S adalah total luasan tutupan tajuk (m^2), dan T adalah periode waktu (detik).

Aliran partikel debu F diestimasi dengan formula Nowak (1994a):

$$F = V_d \times C \quad (3)$$

dimana V_d adalah kecepatan deposisi kering partikel debu udara ($\text{m} \cdot \text{det}^{-1}$) dan C adalah konsentrasi partikel debu udara ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).

Proses deposisi kering partikel debu dapat diestimasi dengan formula Nowak (1994):

$$V_d = 1 / (R_a + R_b + R_c) \quad (4)$$

dimana V_d adalah kecepatan deposisi kering, R_a adalah resistensi aerodinamik, R_b adalah resistensi lapisan batas quasi-laminer, dan R_c adalah resistensi tajuk. R_a , R_b , dan R_c dihitung dengan rumus Killus *et al.* (1984) sebagai berikut:

$$R_a = u(z) / (u^*)^2 \quad (5)$$

dimana $u(z)$ adalah kecepatan angin pada ketinggian z ($\text{m} \cdot \text{det}^{-1}$) dan u^* , kecepatan friksi ($\text{m} \cdot \text{det}^{-1}$), dihitung dengan rumus Nieuwstadt (1984) sebagai berikut:

$$u^* = k u(z-d) / (\ln [(z-d)/z_0] - \psi [(z-d)/L] + \psi_m (z_0/L)) \quad (6)$$

dimana k adalah konstante von-Karman (0,4), d adalah tinggi perpindahan (8 m), z_0 adalah panjang kekasaran (0,5 m), dan L adalah panjang stabilitas Monin-Obukhov. L memiliki dua metode klasifikasi yang berbeda.

Satu metode adalah mengelompokkan data meteorologi lokal ke dalam kelas stabilitas menggunakan kelas Turner (Panofsky dan Dutton, 1984) dan kemudian memperkirakan $1/L$ sebagai fungsi dari kelas stabilitas dan z_0 (Zanetti, 1990). Metode lainnya adalah menggunakan Skema klasifikasi stabilitas Pasquill (1961) untuk



mengklasifikasikan data meteorologi lokal per jam ke dalam kelas-kelas stabilitas.

Kalau $L < 0$ (kondisi tidak stabil) (Van Ulden dan Holtslag, 1985) maka:

$$\Psi_m = 2 \ln [(1+X)/2] + \ln [(1+X^2)/2] - \tan^{-1}(X) + 0.5 \quad (7)$$

Konstante X dihitung dengan rumus Dyer and Bradley (1982) sebagai berikut:

$$X = (1 - 28 z/L)^{0.25} \quad (8)$$

Kalau $L > 0$ (kondisi stabil) (Van Ulden dan Holtslag, 1985) maka:

$$\Psi_m = -17 [1 - \exp \{-0.29 (z-d)/L\}] \quad (9)$$

Rb dapat dihitung dengan rumus Pederson *et al.* (1995) berikut:

$$R_b = B^{-1} \cdot u^{*-1} \quad (10)$$

dimana: $B^{-1} = 2(2 u^*)^{-1/3}$ (Killus, *et al.*, 1985).

Nilai-nilai resistensi tajuk jam-jaman (R_c) dapat diturunkan dari data tahunan:

$$R_c = 1 / V_{g(s)} - (R_a + R_b) \quad (11)$$

Konsistensi tajuk pohon konsisten (R_c) terhadap partikel debu udara dapat diperoleh dari literatur. Nowak mengklasifikasikan resistensi tajuk menjadi (1) siang-hari musim berdaun, (2) malam-hari musim berdaun, dan (3) musim tanpa daun, dengan distribusi luas daun 90% pohon daun-lebar dan 10% pohon daun jarum. Siang hari musim berdaun mempunyai $R_c = 0.78$, malam-hari musim berdaun $R_c = 0.78$, dan musim tanpa daun $R_c = 2.39$.

V_g ($m \cdot det^{-1}$) adalah spesies-spesifik dan dihitung dengan menggunakan hubungan antara kecepatan angin dan V_g (menggunakan data dari Freer-Smith, El-Khatib dan Taylor (2004):

$$V_g (\text{populus}) = 0,00125 (0.5^u) \\ (\text{banyaknya observasi} = 9; p < 0,05; R^2 = 0.87).$$



$$V_g (F.chinensis \text{ Roxb}) = 0,00178 (0.56^u)$$

(banyaknya observasi = 9; $p < 0,05$; $R^2 = 0.80$).

dimana $V_g(\text{populus})$ adalah kecepatan deposisi pada spesies *P. tomentosa*, $V_g(F.chinensis \text{ Roxb.})$ adalah kecepatan deposisi pada spesies *F. chinensis* Roxb., dan u adalah kecepatan angin.

Kecepatan pengendapan PM_{2.5}, PM₁, dan PM₁₀ pada vegetasi pohon dapat diperkirakan dari literatur dan bervariasi dengan kecepatan angin (Slinn, 1982; Freer-Smith, El-Khatib dan Taylor, 2004; Pullman, 2009; Kwecien, 2015). Freer-Smith, El-Khatib dan Taylor, 2004) menganalisis hubungan antara kecepatan deposisi relatif dan kecepatan angin dalam terowongan angin.

Partikel debu udara dapat ditangkap ketika mereka melewati dekat dengan suatu permukaan. Kebanyakan tumbuhan memiliki permukaan yang sangat luas per satuan volume, sehingga meningkatkan kemungkinan pengendapan partikel debu udara dibandingkan dengan permukaan halus tanpa vegetasi.

Misalnya, 10-30 kali lebih cepat deposisi partikel debu telah dilaporkan untuk partikel sub-mikrometer ($< \mu\text{m}$) pada permukaan berumput sintetis, dibandingkan dengan permukaan kaca dan permukaan semen (Roupsard *et al.*, 2013). Ukuran partikel, memiliki efek yang sangat besar terhadap deposisinya.

Partikel ultrafine, di bawah $\sim 0,1 \mu\text{m}$, berperilaku seperti molekul gas dan didepositkan melalui proses difusi; partikel $< 10 \mu\text{m}$ jatuh di permukaan yang memungkinkan aliran udara membelok; dan partikel $> 10 \mu\text{m}$ juga jatuh ke permukaan tanah dengan cara sedimentasi (Hinds, 1999).

Deposisi pada permukaan vegetasi biasanya digambarkan sebagai deposisi vertikal satu-dimensi, pada lapisan vegetasi homogen berupa hutan atau lapangan bervegetasi. Untuk aplikasi perkotaan, vegetasi seringkali berupa pohon tunggal atau semak-semak, atau barisan pohon yang membentuk barier atau jalur, sehingga proses pengendapan partikel perlu dimodelkan secara lebih rinci. Namun



demikian, sebagian besar mekanisme fisik dapat dijelaskan dengan menggunakan situasi dimana aliran udara melewati permukaan daun tunggal.

Deposisi satu dimensi yang disederhanakan dapat dibagi menjadi transportasi dari udara-bebas ke permukaan; melintasi lapisan laminar di dekat permukaan; dan proses-prosesnya berkaitan dengan karakteristik permukaan. Kecepatan pengendapan, v_d , sering digambarkan sebagai kebalikan dari resistensi deposisi, R_{tot} .

R_{tot} dapat dibagi menjadi beberapa resistensi yang berkaitan dengan masing-masing proses transportasi, yaitu R_a = resistensi aerodinamis, R_b = resistensi laisan batas dan R_c = resistensi permukaan (Davidson dan Wu, 1990).

$$v_d = 1/R_{tot} = 1/R_a + 1/R_b + 1/R_c \quad (1)$$

Resistensi aerodinamis biasanya dianggap kecil dibandingkan dengan jenis resistensi lainnya dan dianggap nilainya nol, kecuali untuk penelitian tentang partikel yang mempunyai kecepatan pengendapan sangat tinggi (Hinds, 1999), yaitu diameter partikel yang diameternya lebih dari 10 mm (Slinn, 1982; Davidson *et al.*, 1982).

Kecepatan deposisi selalu lebih besar dari kecepatan pengendapan (Petroff *et al.*, 2008a). Dalam konteks ini, resistensi aerodinamis juga terkait dengan dispersi. Untuk resistensi aerodinamis, R_a , faktor meteorologi sangat penting; sedangkan R_a dan R_b tergantung pada gesekan (friksi) dan kecepatan (Bruse, 2007).

Vong *et al.* (2010) menunjukkan bahwa kecepatan pengendapan partikel 0,2-0,5 mm tergantung pada stabilitas atmosfer lapisan batas, yang diukur dengan panjang Monin-Obukov (L), dan berhubungan linear dengan diameter partikel (D_p).

Faktor dependensi lainnya dikumpulkan dalam konstante empiris A , nilainya 0,63 pada hutan pinus (Vong *et al.*, 2010), sebesar 1,35 pada hutan daun-lebar (Gallagher *et al.*, 1997) dan sebesar 0,2 pada vegetasi rumput (Wesely *et al.*, 1985).



$$v_d = A \cdot u \cdot D_p \cdot (1 + (-300/L)^{2/3}) \quad (2)$$

Deposisi adalah transportasi dari suatu titik di udara ke permukaan vegetasi atau tumbuhan. Proses deposisi ini dapat disederhanakan dengan cara yang berbeda-beda. Dengan demikian, model deposisi harus diaplikasikan secara hati-hati. Biasanya kecepatan deposisi mencapai minimal untuk diameter partikel 0.1-0.3 mm.

Jumlah massa yang didepositkan secara langsung berkaitan dengan konsentrasi udara di dekat permukaan, Weber *et al.* (2014) menemukan bahwa daun-daun yang berbulu meningkatkan deposisi secara substansial untuk partikel yang diameternya 3-180 mm. Speak *et al.* (2012) menganalisis deposit pada berbagai spesies tumbuhan dan menemukan deposisi yang lebih besar pada vegetasi rumput dan daun-daun yang berbulu daripada tumbuhan herba lainnya.

Kecepatan deposisi pada tumbuhan konifer lebih besar daripada pohon berdaun lebar, telah ditemukan dalam beberapa penelitian (Beckett *et al.*, 2000; Freer-Smith *et al.*, 2004). Kecepatan deposisi meningkat dari 0,1-0,3 m.det⁻¹ menjadi 2,9 m.det⁻¹ ketika kecepatan angin meningkat dari 3 m.det⁻¹ menjadi 9 m.det⁻¹ (Freer-Smith *et al.*, 2004).

Kecepatan relatif deposisi pada batang meningkat dibandingkan dengan daun untuk batang yang lebih kecil dan daun yang lebih besar, sedangkan pohon di daerah semi-kering memiliki kecepatan deposisi rendah (berdaun tebal) (Freer-Smith *et al.*, 2004).

Dalam penelitian lain, Przybysz *et al.* (2014) menemukan deposisi yang lebih besar pada pinus, dan sedikit deposisi pada jenis ivy (*Hedera helix* L.); partikel halus memiliki kecepatan pengendapan yang lebih besar pada spesies daun-jarum daripada spesies daun-lebar (Hwang *et al.*, 2011).

Partikel, terutama fraksi kasar, dapat tercuci dari permukaan daun pada saat terjadi hujan (Przybysz *et al.*, 2014). Jika partikel ditahan dalam lapisan lilin permukaan daun, sangat sulit dilepaskan oleh gaya-gaya angin dan hujan (Dzierzanowski *et al.*, 2011).



Pengukuran pada 13 spesies tanaman menunjukkan bahwa sekitar 60% dari deposit partikel di permukaan daun dapat dicuci dengan air, sedangkan 40% ditahan dalam lapisan lilin, dengan variasi yang cukup besar di antara spesies tumbuhan (Popek, 2013).

Tumbuhan berdaun-jarum umur tiga tahun memiliki lebih banyak senyawa aromatik polisiklis (PAH) yang ditransfer ke dalam lapisan lilin daunnya, sehingga tidak mungkin untuk dicuci dengan air, hal ini menunjukkan efek umur tanaman terhadap lapisan lilin di permukaan daun-jarum (Terzaghi *et al.*, 2013). Hanya partikel yang diameternya $<10\text{ }\mu\text{m}$ ditahan ke dalam kutikula daun-jarum, sehingga tidak dapat hanyut oleh air hujan (Terzaghi *et al.*, 2013).

Dengan menggunakan sampel lebih dari 40 spesies tumbuhan, Saebo *et al.* (2012) menemukan korelasi positif antara deposisi partikel dengan daun berbulu dan kandungan lilin daun. Daun-daun yang tebal menunjukkan deposisi yang lebih rendah untuk semua ukuran partikel, selain partikel yang diameternya $0,2\text{--}2,5\text{ }\mu\text{m}$. Ada perbedaan 10-20 kali lipat di antara spesies dalam hal kemampuannya deposisi partikel (Saebo *et al.*, 2012).

Kerapatan vegetasi atau porositas-vegetasi umumnya diukur dengan menggunakan beberapa parameter yang berbeda. Vegetasi yang kerapatannya tinggi menunjukkan tingkat deposisi yang tinggi terhadap polutan yang berada di dekat permukaan tanah, tetapi menghambat transportasi polutan menuju ke permukaan tanah.

Spesies tumbuhan yang berbeda memiliki kecepatan deposisi yang berbeda bahkan untuk rentang ukuran partikel yang sama, namun informasi yang tersedia belum dapat memberikan penjelasan secara kuantitatif. Karakteristik daun-berbulu dan kandungan lilin daun telah terbukti meningkatkan deposisi partikel, sedangkan perbedaan antara daun tebal dan daun tipis mungkin juga mempengaruhi deposisi partikel.





BAB III

PARTIKULAT

Sumber Partikulat

Partikulat atmosferik, juga dikenal sebagai partikulat (PM), adalah bahan padatan atau cair mikroskopis yang tersuspensi di udara atmosfer. Istilah “Aerosol” umumnya mengacu pada partikulat yang tercampur dengan udara (Seinfeld dan Pandis, 1998). Partikulat ini dapat bersumber dari agen-agen alamiah dan sumber-sumber buatan manusia. Keberadaannya di udara berdampak pada kesehatan lingkungan dan kesehatan manusia, mulai dari kesehatan kulit hingga gangguan organ dalam (Kim, Cho dan Park, 2016).

Efek dari menghirup partikulat yang berlebihan telah dipelajari secara luas pada manusia dan hewan, termasuk gangguan asma, kanker paru-paru, penyakit jantung, penyakit pernapasan, kelahiran prematur, cacat lahir, dan kematian dini.

Peningkatan kadar partikulat di udara sebagai akibat dari polusi udara antropogenik secara konsisten berdampak serius, termasuk kanker paru-paru (Raaschou-Nielsen *et al.*, 2013) dan kematian *cardio-pulmonary* lainnya (Cohen *et al.*, 2005). Banyaknya kematian dan masalah kesehatan lain yang terkait dengan polusi partikulat

pertama kali ditunjukkan pada awal tahun 1970 dan telah dilaporkan berkali-kali sejak saat itu (Lave dan Seskin, 1973).

Partikulat dapat berasal dari sumber alamiah atau buatan manusia (*antropogenik*). Secara alamiah partikulat dibagi menjadi empat kelompok yaitu (1) materi biologis (mikroorganisme, dan struktur sel nekrotik dari organisme yang lebih besar); (2) biogenik (substansi kimia tak hidup atau struktur yang dikeluarkan oleh tanaman); (3) lautan (garam, dan sulfat yang berasal dari laut) dan (4) geogenik (material yang berasal dari kerak bumi) (WHO, 2003; Chin, Kahn dan Schwartz, 2009; Abril *et al.*, 2016).

Tiga kontributor utama dalam partikel antropogenik adalah (1) pembakaran (bahan bakar fosil dan biomass), (2) material yang mengalami penghancuran (misalnya permukaan jalan yang tidak diaspal) dan (3) proses industri dengan temperatur tinggi (Chow, Watson dan Lowenthal, 1996; Eastwood, 2008; Garbero, Salizzoni dan Soulhac, 2010).

Permukaan jalan dapat hancur di bawah tekanan yang konstan akibat kendaraan dan menghasilkan debu aspal dan mineral. Debu tanah dan mineral dalam jumlah yang jauh lebih besar dapat terangkat dari permukaan jalan yang tidak diaspal dan terdispersi ke udara ambiaen (Patra *et al.*, 2008; Garbero, Salizzoni dan Soulhac, 2010).

Kondisi ini terjadi di semua lokasi konstruksi dan tambang terbuka serta pembangunan lansekap. Di beberapa negara, kontribusi jalan terhadap konsentrasi partikulat (PM_{10}) sangat tinggi seperti ditunjukkan pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1. Estimasi kontribusi dari sumber emisi utama PM_{10}

Sumber	Kontribusi(%)					
	EU	USA	UK	Greater London	West Midlands	Greater Man- chester
Pembangkit Energi	29	1	15	4	0	45
Pembakaran Industri	14	2	18	2	27	45



Sumber						
Pembakaran Kecil	13	2	13	2	9	45
Proses Produksi	14	2	26	4	<1	23
Angkutan Jalan Raya	17	1	25	77	56	31
Sumber Mobil Lain	1	1	3	5	1	<1
Lainnya	11	95	1	6	7	<1

Sumber: Holgate (1999).

Karakteristik dan Transpor Partikulat

Partikulat memiliki karakteristik yang spesifik yaitu: (1) *Settling rate*, adalah sifat partikulat yang cenderung selalu mengendap karena gaya gravitasi bumi, namun untuk ukuran yang sangat kecil kadang-kadang partikulat tetap berada di udara dalam waktu yang lama; (2) *Wetting*, sifat partikulat yang mudah basah menyebabkan permukaannya dilapisi air yang sangat tipis; (3) *Floculation*, sifat menggumpal karena permukaan yang selalu basah. Jika kelembaban berada di atas titik jenuh penggumpalan akan lebih mudah terjadi; (4) *Electrical*, partikulat memiliki sifat listrik statis yang dapat menarik partikel lain yang berlawanan; (5) *Optical properties*, yaitu kemampuan memancarkan sinar yang dapat terlihat dalam kamar gelap (Muchtler, 1973; Chow, Watson dan Lowenthal, 1996; Gautam dan Patra, 2015).

Proses utama perpindahan partikulat dari atmosfer melalui pengendapan secara gravitasi, deposisi kering dan deposisi basah. Pengendapan secara gravitasi terjadi ketika turbulensi dengan atmosfer tidak mampu mempertahankan partikel yang teruspensi, partikel menjadi berat dan jatuh ke tanah.

Pergerakan partikulat karena gaya gravitasi tergantung ukuran partikel, kepadatan dan kecepatan angin (Caramagna *et al.*, 2015). Deposisi basah yang secara umum dikenal sebagai *scavenging*



precipitation terbagi dua, yaitu *washout* dan *rainout* atau *snowout*, dimana partikulat diserap oleh butiran air kemudian jatuh ke bumi.

Deposisi kering kadang disebut serapan-permukaan, terjadi akibat polutan yang ditransfer ke permukaan dari atmosfer oleh gerak turbulensi dan menyebabkan polutan menumpuk di permukaan (Kaur, Nieuwenhuijsen dan Colvile, 2007; Chen *et al.*, 2016).

Deposisi material berkaitan dengan laju deposisi, yang tergantung dari intensitas turbulensi, kecepatan angin dan ukuran partikel (Holgate *et al.*, 1999; Godoy, *et al.*, 2009; Nimmatoori dan Kumar, 2013; Pineda-Martínez *et al.*, 2014).

Pengaruh Meteorologi terhadap Transport Partikulat

Pergerakan massa udara sangat mempengaruhi nasib dan perilaku polutan udara (Taseiko *et al.*, 2009). Setiap studi tentang polusi udara harus mencakup studi tentang pola cuaca lokal (meteorologi). Jika udara tenang dan polutan tidak dapat terdispersikan, maka konsentrasi polutan ini akan mengakumulasi.

Di sisi lain, ketika ada angin yang kuat, dan angin bergolak berhembus, polutan akan terdispersi dengan cepat, sehingga konsentrasi polutan di udara ambien lebih rendah (Taseiko *et al.*, 2009). Data meteorologi dapat berguna untuk membantu: (1) mengidentifikasi sumber polutan, (2) memprediksi kejadian polusi udara, seperti inversi dan periode konsentrasi tinggi (polutan), (3) mensimulasikan dan memprediksi kualitas udara dengan menggunakan model computer (Cloquet, Carignan dan Libourel, 2006; Milliez dan Carissimo, 2007; Kakosimos *et al.*, 2011; Kumar *et al.*, 2011; Nikolova *et al.*, 2011; Maroko, 2012; Hagler dan Tang, 2016).

Hal yang sangat penting dalam mempelajari kualitas udara adalah mengukur faktor-faktor meteorologi, karena dapat membantu memahami reaksi kimia yang terjadi di atmosfer. Faktor-faktor meteorologi ini adalah: (1) kecepatan dan arah angin, (2) suhu



udara, (3) kelembaban udara, (4) curah hujan, (5) radiasi matahari, (6) stabilitas atmosfer (Sini, Anquetin dan Mestayer, 1996; Ghenu, Rosant dan Sini, 2008; Soulhac, Perkins dan Salizzoni, 2008; Chithra dan Nagendra, 2014; Squizzato dan Masiol, 2015).

Kecepatan angin, arah angin dan turbulensi sangat penting dalam kaitannya dengan polusi udara, termasuk polusi udara di sepanjang dan di sekitar lembah jalan raya yang biasanya bervegetasi pohon (Buccolieri *et al.*, 2009).

Ketika konsentrasi pencemar tinggi terjadi di suatu stasiun pemantauan, maka catatan data angin dapat menentukan arah secara umum dan luasnya sebaran polutan dari sumbernya (Arya, 1999; Berkowicz *et al.*, 2002; Kumar, Fennell dan Britter, 2008; Soulhac dan Salizzoni, 2010.; Kim dan Guldman, 2011).

Stabilitas atmosfer. Pada lapisan troposfer, temperatur udara akan berbanding terbalik dengan ketinggian. Temperatur mengalami penurunan 10°C setiap peningkatan ketinggian 1000 m. Kondisi ini sangat membantu dalam transport polutan karena udara akan naik mengikuti gradien temperatur dan terencerkan oleh angin yang bergerak di atasnya (Camuffo, 2014).

Namun kemungkinan lain bisa terjadi dimana temperatur di bagian atas lebih tinggi dibandingkan bagian bawah yang dikenal dengan istilah inversi. Banyak penyebab terjadinya inversi namun yang terpenting dalam dispersi polutan adalah udara yang stabil akibat inversi tidak menguntungkan dalam penyebaran polutan. Udara yang membawa polutan akan berbenturan dengan temperatur tinggi di atasnya sehingga tidak bisa naik dan terdispersi lebih jauh. Akibatnya polutan akan didispersikan dalam radius yang sempit di sekitar sumber emisi.

Pasquill (1961) mengklasifikasikan stabilitas udara berdasarkan kecepatan angin dan intensitas radiasi surya (siang) atau penutupan awan (malam). Stabilitas udara digolongkan menjadi enam kelompok yaitu A, sangat tidak stabil; B, stabil; C, sedikit tidak stabil; D, netral. E, sedikit stabil dan F, sangat stabil (Tabel 2.2).



Tabel 2.2. Golongan stabilitas udara menurut Pasquill.

Kecepatan angin di permukaan (m.det ⁻¹)	Insolasi siang hari			Kondisi awan malam hari	
	Kuat	Moderat	Ringan	Awan tipis	Berawan
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	E
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Sumber: Holgate (1999).

Kelas A berlaku untuk pemanasan permukaan yang kuat seperti yang dialami di musim panas. Kelas D merupakan kondisi mendung yang berat baik siang maupun malam hari. Sedangkan F hanya berlaku pada malam hari untuk kondisi langit yang sedikit berawan hingga cerah dan angin bertiup sepoi-sepoi.

Nilai A-B merupakan rata-rata untuk kondisi A dan B dan seterusnya. Angin adalah udara yang bergerak dari tekanan tinggi ke tekanan rendah, semakin tinggi gradien tekanan semakin tinggi kecepatan angin. Akibat gaya Coriolis kecepatan angin paling rendah terjadi di ekuator dan paling tinggi terjadi di daerah kutub.

Arah angin yang konstan akan mengangkut polutan ke arah yang jelas, sedangkan arah angin yang bervariasi akan menghasilkan sebaran polutan yang acak. Bagian terpenting dalam penentuan dispersi polutan adalah menemukannya di bagian hilir angin (*downwind*) dari sumber emisinya. Pertimbangan angin lokal dalam kajian transport polutan skala meso sangat penting terutama angin lokal (Berkowicz *et al.*, 1997; Holgate, *et al.*, 1999).

Kecepatan angin juga dipengaruhi oleh gesekan dengan permukaan, sebagai pembanding laut hanya memberi efek gesekan 5 – 10% sedangkan daratan 15-35%. Dengan demikian semakin kasar bentuk permukaan bumi yang direpresentasikan oleh bentuk topografi dan tutupan lahan maka semakin besar gesekan yang dihasilkan dan semakin rendah pula angin yang bergerak di sana.



Di samping menghambat kecepatan angin, faktor topografi dan *roughness* (kekasaran) permukaan tanah, serta bangunan di tepi jalan dapat menyebabkan polutan terperangkap dalam suatu area yang tidak jauh dari sumbernya (Vardoulakis *et al.*, 2003).

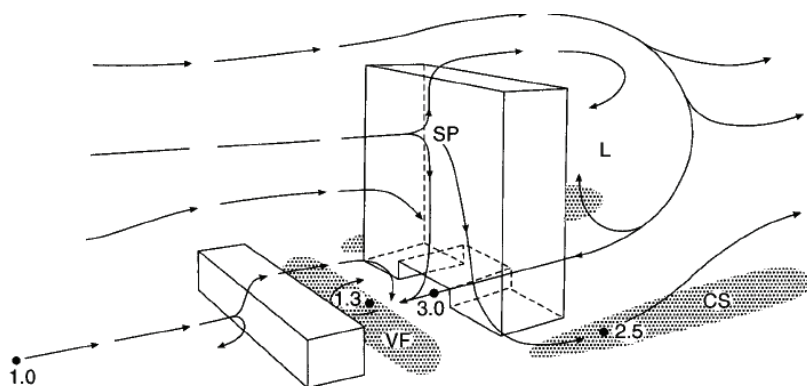
Topografi. Teori dispersi yang paling sederhana berlaku untuk suatu sumber pada kondisi di tengah daratan yang datar. Kenyataannya kebanyakan lahan memiliki berbagai bukit dan sangat berpengaruh terhadap dispersi polutan. Lembah cenderung menyimpangkan dan meng-konsentrasikan aliran angin, sehingga kecepatannya lebih tinggi.

Angin yang berhembus di sepanjang lembah lebih tinggi proporsi waktunya dibandingkan di tempat terbuka (Tomlin *et al.*, 2009). Juga akan ada efek termal akibat perbedaan panas di sisi lembah, contoh dari hal tersebut adalah sisi utara lembah yang berorientasi barat-timur akan menerima radiasi matahari lebih kuat di siang hari dari sisi selatan.

Pada malam hari udara dingin dapat terakumulasi di dasar lembah sehingga terbentuk inversi yang menyebabkan polutan terjebak di lembah tersebut. Di area yang lebih halus, garis aliran udara akan mengikuti kontur, namun di area yang kasar, mungkin aliran akan terpisah dan akibat turbulensi terjadi golakan angin yang menyebabkan arah dan kecepatan angin menjadi acak (Tiwary, *et al.*, 2010; Weber, Kordowski dan Kuttler, 2013; Tiwari *et al.*, 2014).

Efek bangunan. Sangat jarang ditemui sumber emisi berdiri sendiri di tengah dataran terbuka tanpa ada penghalang. Bangunan yang terdapat di sekitar sumber polutan dapat membelokkan arah angin dan mencampurkan konsentrasi polutan yang ada di dalamnya. Arah dan kecepatan angin yang semula konstan bisa berubah, berbalik, dipercepat atau diperlambat (Vesovic *et al.*, 2001). Ilustrasi ini dapat dilihat pada **Gambar 2.1**.





Gambar 2.1. Aliran udara idealis di sekitar bangunan. SP: titik stagnasi, CS: aliran pojok, VF: aliran berputar (pusaran) (Sumber: (Tiwary, *et al.*, 2010)).





BAB IV

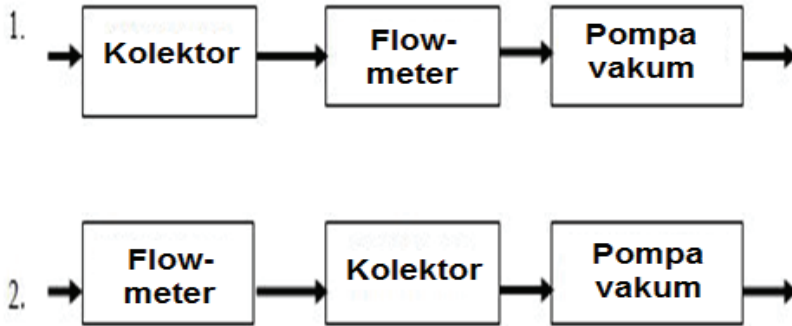
PENGUKURAN PARTIKULAT

Pengumpulan Partikulat

Pengumpulan partikulat memerlukan peralatan pengambilan contoh udara yang pada umumnya terdiri dari *collector*, *flowmeter* dan *vacuum pump*. *Collector* merupakan media yang digunakan untuk menangkap partikulat misalnya *plate* atau kertas filter. *Flowmeter* berfungsi untuk mengatur debit udara ambien yang dihisap, sehingga volume udara yang dikumpulkan dapat diketahui. Pompa *vacuum* berfungsi untuk menarik udara dari luar masuk ke dalam *collector* melewati *flowmeter* (Chirino *et al.*, 2015; Herrington, 2015).

Konfigurasi susunan peralatan sampling gas yang umum digunakan dapat dilihat pada Gambar 2.2.

INSTRUMEN PENGAMBILAN CONTOH UDARA



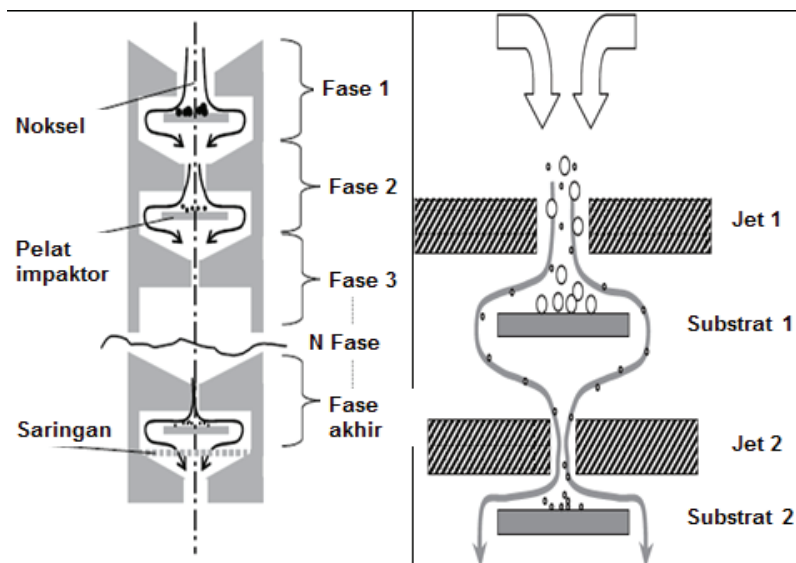
Gambar 2.2. Susunan instrumen pengambilan contoh kualitas udara (Sumber: Kadri, 2011)

Connector yang digunakan untuk menghubungkan *collector* dengan *flowmeter* dan pompa harus terbuat dari bahan yang *innert*, yang tidak akan bereaksi dengan gas pencemar atau akan mengotori contoh kualitas udara misalnya gelas, plastik atau tubing dari silikon atau jenis tubing lainnya. Selain itu, perlu diperhatikan bahwa tidak terjadi kebocoran dalam rangkaian peralatan sampling tersebut (Cheng dan He, 2015; Li *et al.*, 2016).

Metode dan teknik yang dikembangkan untuk pengumpulan partikulat bermacam-macam namun yang paling umum digunakan adalah metode filtrasi, impaksi dan *electrostatic precipitator* (Kocik, Dekowski dan Mizeraczyk, 2005; Sillanpää *et al.*, 2008). Pengumpulan partikulat dengan teknik filtrasi merupakan teknik yang paling populer. Jenis filter yang digunakan adalah filter *fiberglass*, *cellulose*, *polyurthen foam*. Setiap jenis filter mempunyai karakteristik tertentu yang cocok untuk penggunaan tertentu. Filter *fiberglass* merupakan filter yang paling banyak digunakan untuk pengukuran SPM atau TSP, terbuat dari *micro fibergelas* dengan porositas $< 0,3 \mu\text{m}$ yang mempunyai efisiensi pengumpulan partikulat berdiameter $0,3 \mu\text{m}$ sebesar 95% (Kubo *et al.*, 2000). Filter ini tahan korosif dan dapat

digunakan pada temperatur 540°C (Bein dan Wexler, 2015). Teknik filtrasi untuk pengukuran partikulat di udara ambien (*outdoor*) biasanya terintegrasi dengan instrumen pengumpul yang disebut *high volume sampler* (HVS) (Byeon *et al.*, 2006; Lancereau, Roux dan Achard, 2013).

Dalam metode impaksi, udara ditarik dan dipaksa mengalir melewati lubang-lubang kecil, menembusnya dengan kecepatan tinggi dan berbenturan dengan suatu *plate* penghalang atau *impaction plate*, di sekitar belokan aliran udara (**Gambar 2.3**). Kejadian selanjutnya tergantung dari gaya inersia terkait gaya hisapan aerodinamis. Partikel kecil yang tetap terikut dalam arus di bawa ke tahap selanjutnya, di mana proses ini kembali berulang. Partikel yang lebih besar tidak bisa mengikuti arus sehingga berbenturan dengan permukaan *plate* dan tertahan di sana. Proses pemisahan terjadi karena pada setiap tahap lubang diameter semakin kecil, akibatnya aliran udara dan gaya inersia semakin meningkat. Dengan sendirinya pada setiap *cascade* terjadi pemisahan debu berdasarkan ukuran partikel.



Gambar 2.3. Skema *Cascade Impactor* (Hinds, 1999)

Sumber: (Eastwood, 2008), (Tiwary dan Colls, 2010).



Pengambilan contoh partikulat dapat dilakukan dengan metode impaksi bertingkat (*cascade impaction*) yang memungkinkan debu terpisah berdasarkan diameternya. Diameter yang lebih besar akan tertahan pada *stage* paling atas, semakin ke bawah maka semakin kecil diameter yang dapat terkumpul di permukaan *stage*. *Cascade Impactor* terdiri dari beberapa *stage* (3, 5 hingga 9 fase) tergantung keperluannya. Prinsip pengukurannya adalah kertas saring yang telah ditimbang, dipasang di masing-masing *stage* (*plate*) yang terdapat pada alat *Cascade Impactor*. Selanjutnya udara dilewatkan ke dalam *Cascade Impactor* dengan *flowrate* tertentu dan dibiarkan selama 24 jam atau lebih tergantung konsentrasi debu di udara ambient dan tingkat akurasi yang dibutuhkan. Setelah sampling selesai, debu-debu yang terkumpul pada masing-masing *stage* ditimbang menggunakan neraca analitik (Misra *et al.*, 2002; Singh *et al.*, 2010; Giorio *et al.*, 2013).

Dalam teknik *elektrostatic precipitator*, udara yang mengandung partikulat dilewatkan ke dalam medan listrik, yaitu dua plat logam yang dialiri muatan positif dan negative (Turner *et al.*, 2000; Sudrajad dan Yusof, 2015). Partikulat yang bermuatan menempel pada plat yang bermuatan berlawanan dengan muatan partikel. Partikel $PM_{2.5}$ termasuk zat yang volumenya berubah seiring perubahan temperatur dan tekanan (Jaworek, Krupa dan Czech, 2007; Xu, *et al.*, 2015). Oleh sebab itu dalam menyatakan konsentrasi $PM_{2.5}$ di udara digunakan kondisi standar yaitu kondisi dimana volume udara ditetapkan pada temperatur 25°C dan tekanan 1 atm (760 mm Hg) (Wen *et al.*, 2015; Wen *et al.*, 2015a).

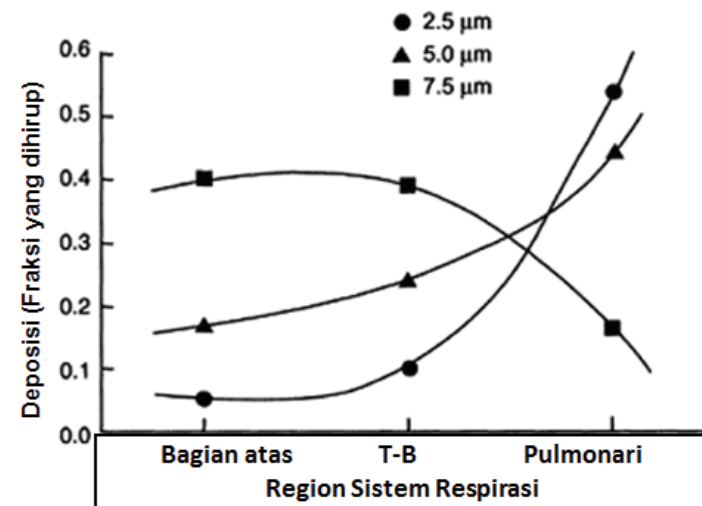
Perjalanan Partikulat dan Efeknya pada Organ Pernafasan

Partikel dapat menyebabkan efek kesehatan yang merugikan manusia setelah masuk dan disimpan dalam sistem pernafasan manusia (Löndahl *et al.*, 2008). Penetrasi dan deposisi partikulat tergantung



pada ukuran aerodinamis partikel, mekanisme pertahanan pernafasan, dan pola pernafasan (Lieutier-Colas, 2001).

Diameter aerodinamis partikel merupakan penentu utama terjadinya deposisi di saluran pernapasan (Löndahl *et al.*, 2009). Deposisi partikel paling tinggi di area paru adalah partikel berukuran paling kecil ($2.5\ \mu\text{m}$), dan deposisi paling tinggi di *nasopharyngeal* adalah partikel berukuran paling besar ($7.5\ \mu\text{m}$) (Ayres *et al.*, 2006) (Gambar 2.4).



Gambar 2.4. Deposisi partikel pada saluran nafas manusia berdasarkan ukuran partikel (Sumber: Ayres *et al.*, 2006)

Deposisi terjadi oleh gaya impaksi inersia (5-10 mikron), sedimentasi (3-5 mikron) dan difusi $< 0,1$ mikron. Impaksi inersia adalah proses dimana partikel yang lebih besar bergerak bersama aliran udara kemudian berbenturan dengan permukaan saat terjadi perubahan arah aliran udara. Sedimentasi terjadi ketika partikel jatuh ke permukaan karena gaya gravitasi. Dalam proses difusi, partikel yang sangat kecil masuk dan berkontak dengan permukaan sebagai hasil dari gerakan acak (Hofmann, 2009).

Mekanisme deposisi ini dipengaruhi oleh pola pernafasan. Bernafas secara dalam dapat meningkatkan jumlah partikel yang



masuk dan kontak dengan sel epitel pernafasan dan konsekuensinya meningkatkan deposisi karena impaksi, sedimentasi dan difusi (Kim, 2009).

Bernafas secara dalam dan cepat dapat mempengaruhi (1) ukuran partikel yang terdeposisi, (2) lokasi terjadinya deposisi dan (3) mekanisme deposisi partikel. Pola terjadinya deposisi sangat penting karena letak deposisi partikel ini menentukan mekanisme dan kecepatan pembersihan, potensi retensi dan disolusi partikel dan sifat luka jaringan yang mungkin terjadi (Taulbee dan Yu, 1975; Smith *et al.*, 2007; Sturm dan Hofmann, 2009; Varghese dan Gangamma, 2009).

Partikulat yang masuk ke dalam sistem pernafasan manusia menurut ukurannya dapat dikelompokkan menjadi empat kelompok (Phalen, 2003). Partikel berukuran 5 mikron atau lebih akan ikut jatuh sejalan dengan percepatan gravitasi (*gravity acceleration*) dan bila terhirup melalui pernapasan biasanya lebih banyak jatuh pada alat pernapasan bagian atas. Gangguan yang terjadi berupa iritasi yang menyebabkan *pharyngitis*.

Partikel berukuran 3-5 mikron dapat masuk ke saluran pernapasan dalam (*bronchus/ broncheolos*) yaitu menimbulkan penyakit-penyakit bronchitis, alergi atau asthma. Timbulnya penyakit alergi atau asthma lebih sering pada orang-orang yang memang semula sudah memiliki predisposisi untuk hal ini (Mentese *et al.*, 2015).

Partikel berukuran 1-3 mikron akan jatuh lebih dalam lagi pada alveoli yang gerakannya sejalan dengan suatu kecepatan yang konstant untuk jenis-jenis debu tertentu. Partikel hambatan fungsi alveoli sebagai media pertukaran gas zat asam/asam arang, maka dengan melekatnya debu-debu dengan ukuran ini pada alveoli akan memberikan gangguan terhadap kemampuan proses pertukaran gas. Lebih kecil ukurannya, lebih perlahan jatuhnya (Hickey, Martonen dan Yang, 1996)

Partikel berukuran 0,1–1,0 mikron karena demikian kecilnya dan tidak memiliki berat ternyata tidak dapat menempel pada permukaan alveoli, tetapi mengikuti gerakan *Brown* dan berada dalam bentuk



suspensi. Keadaan debu kecil ini juga dialami pula oleh *fumes* atau *smoke* (Phalen, 2003; Salvi, *et al.*, 2016).

Kerusakan tubuh akibat inhalasi partikulat tergantung banyak faktor antara lain spesifikasi komposisi dan ukuran partikulat, status kesehatan (terutama pernafasan dan sistem peredaran darah), usia (anak-anak dan orang tua lebih rentan terhadap kerusakan), jenis kelamin (perempuan memiliki permukaan paru-paru yang lebih kecil daripada laki-laki dan memiliki tingkat deposisi alveolar yang lebih tinggi) (Madaniyazi *et al.*, 2016).

Lokasi atau kedekatan dengan sumber emisi, temperatur udara, kondisi klimatologi dan geografi juga mendukung respon negatif terhadap partikulat. Ukuran partikel ($PM_{2.5}$) biasanya paling banyak mengendap di alveolar.

Komposisi dan kandungan bahan kimia dari partikulat juga sangat penting, komponen larut dalam cairan alveolar dapat ditransfer ke dalam darah atau bagian lain dari tubuh, komponen tidak larut dapat menyebabkan kerusakan dengan mekanisme lain. Jenis pernafasan seseorang, yaitu hidung, mulut, atau keduanya; masing-masing dapat menyebabkan pola deposisi partikulat yang berbeda dalam sistem saluran pernafasan (Kumar dan Attri, 2016).

Sistem paru-paru anak-anak berkembang sesuai umur dan lebih sensitif mengalami kerusakan dibandingkan orang dewasa. Dalam masa penuaan, volume dan permukaan paru-paru untuk transfer gas menurun perlahan-lahan. Kedua kelompok usia ini, dan orang-orang dengan penyakit paru dan jantung, lebih berisiko rusak akibat partikel dibandingkan orang dewasa yang sehat.

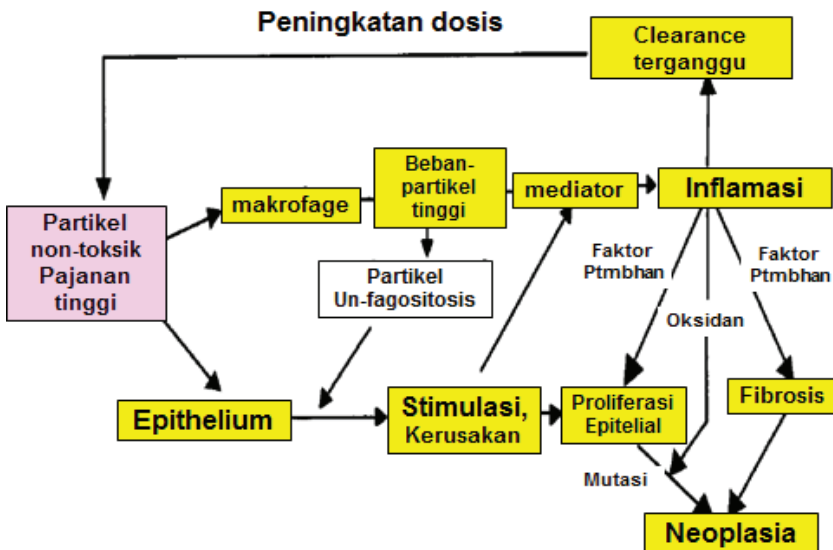
Risiko untuk orang-orang ini meningkat sesuai aktifitas fisik yang disebabkan oleh peningkatan kecepatan pernafasan dan pengambilan nafas lebih dalam (Sánchez-Soberón *et al.*, 2015). Banyak partikel masuk ke dalam paru-paru dan diangkut lebih dalam, memapar beberapa permukaan untuk menimbulkan efek kerusakan potensial (McKenna, 2008; Baldacci *et al.*, 2015; Kesavachandran *et al.*, 2015; Kesavachandran *et al.*, 2015a; César, *et al.*, 2016).



Lima komponen penting yang berperan menentukan kerentanan seseorang terhadap efek pencemaran udara, adalah: (1) usia (anak-anak dan orang tua lebih rentan) (Kim, *et al.*, 2016), (2) genetika (meliputi penyakit kerutunan, sensitifitas, ras dan jenis kelamin) (3) status gizi (antioksidan, protein dan diet rendah/tinggi lemak), (4) kondisi fisiologis (temperatur dan latihan), dan (5) penyakit (terutama *cardiopulmonary* dan infeksi paru) (Sun *et al.*, 2016).

Jenis Penyakit Pernafasan Terkait Inhalasi Partikulat

Studi paparan partikulat dosis tinggi pada hewan percobaan (tikus) menyebabkan penumpukan partikel di paru-paru pada satu titik dimana terjadi kegagalan dalam pembersihan, akumulasi dosis, inflamasi, proliferasi, fibrosis dan produksi tumor (Kampa dan Castanas, 2008; Shaughnessy, Venigalla dan Trump, 2015). Mekanisme paparan berlebih ini tidak begitu dipahami namun terdapat elemen penting yang ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5. Model hipotetik inhalasi partikulat dalam dosis tinggi
(Sumber: Ayres *et al.*, 2006)



Penyakit pernafasan akibat inhalasi partikulat yang diidentifikasi dari hasil studi epidemiologi antara lain asma/alergi, bronchitis, emphysema, COPD, *pulmonary infection*, *pulmonary fibrosis*, *respiratory infection*, *pulmonary vasculitis* dan lain-lain (Holgate *et al.*, 1999; Donaldson dan MacNee, 2001; Li *et al.*, 2003; Tao *et al.*, 2003; Peters, 2005; Mundandhara, Becker dan Madden, 2006; Kampa dan Castanas, 2008; Miyata dan van Eeden, 2011; Zeng *et al.*, 2016).

Penyakit Asma (Asthma) adalah suatu penyakit kronik (menahun) yang menyerang saluran pernafasan (*bronchiale*) pada paru dimana terdapat peradangan (inflamasi) dinding rongga bronchiale sehingga mengakibatkan penyempitan saluran nafas yang akhirnya seseorang mengalami sesak nafas.

Pada penderita asma, dinding lapisan dalam saluran pernafasan menjadi sensitif dan akan bereaksi dengan kuat terhadap alergen atau sesuatu yang dapat membuat iritasi. Pada waktu pipa udara bereaksi, pipa udara/saluran pernafasan menjadi lebih sempit sehingga paru-paru mendapatkan lebih sedikit udara. Hal ini dapat menyebabkan nafas bunyi (*wheezing*), batuk, dada sesak dan kesulitan bernafas, terutama pada pagi hari atau malam hari (Baldacci *et al.*, 2015).

Bronchitis adalah peradangan pada lapisan membran saluran udara bronchial pada paru, menyebabkan batuk, nafas pendek dan dada sesak. Batuk sering mengeluarkan dahak yang berwarna kuning atau kehijauan. Bronchitis ditandai dengan sekresi lendir berlebihan dan penyumbatan, radang saluran nafas, fibrosis pada saluran udara, kerusakan pada sel epitel, obstruksi saluran nafas dan hiperresponsif.

Bronchitis dapat disebabkan oleh infeksi pathogen atau iritasi pernapasan, misalnya karena asap rokok, paparan industri, dan pencemaran udara ambien dan indoor (Harrison dan Yin, 2000; Kearney *et al.*, 2011).

Emphysema adalah jenis penyakit COPD, penyakit ini merusak kantong udara (*alveoli*) pada paru-paru. Sebagai akibatnya tubuh tidak mendapatkan cukup oksigen yang dibutuhkannya. Gejala yang dominan adalah nafas pendek dan kesulitan bernafas pada



waktu berolah raga. Pada penderita emphysema, alveoli pada paru menyebabkan paru kehilangan elastisitasnya.

Sebagai akibatnya membuang nafas menjadi sulit sehingga udara yang kotor tinggal/terjebak di dalam paru-paru, menghalangi pertukaran oksigen dan karbon dioksida. Penderita yang parah, akan mengalami gejala seperti kekurangan nafas terus menerus, batuk kronis, dan sering mengeluarkan dahak.

Chronic obstructive pulmonary disease (COPD) mewakili kelompok penyakit pernafasan yaitu obstruksi saluran pernafasan kronis, sekresi lendir berlebihan, radang kronis dan kerusakan saluran udara paru-paru and parenkim. *Bronchitis* dan *emphysema* merupakan bagian dari COPD.

Pulmonary fibrosis Adalah pembentukan jaringan parut, penebalan dan peradangan pada jaringan paru yang penyebabnya tidak diketahui. Meskipun jarang terjadi pada manusia, namun penelitian terhadap pekerja yang terpapar debu metal, debu mineral dan debu organik berhubungan dengan penyakit ini (Kappos *et al.*, 2004; Kleinman *et al.*, 2013; Kim, Kabir dan Kabir, 2015).

Respiratory infection adalah penyakit infeksi akut yang melibatkan organ saluran pernapasan, hidung, sinus, farink dan larink. ISPA dapat ditularkan melalui air ludah, darah, bersin, udara pernapasan yang mengandung kuman yang terhirup oleh orang sehat kesaluran pernapasannya.

Infeksi saluran pernapasan bagian atas terutama yang disebabkan oleh virus, sering terjadi pada semua golongan masyarakat pada bulan-bulan musim dingin atau pada saat kualitas udara memburuk. ISPA dapat berlanjut menjadi pneumonia terutama pada anak-anak dengan status gizi kurang dan dikombinasi dengan keadaan lingkungan yang tidak hygiene (Green dan Armstrong, 2003; Englert, 2004; Dockery, 2009; Lee, *et al.*, 2011).

Pulmonary Vasculitis (Hypertension), penyakit ini menjelaskan sejumlah gangguan yang berbeda secara patologis dan ditandai dengan kerusakan pembuluh darah. Manifestasi klinis dari gangguan



masing-masing ditentukan oleh jenis, ukuran, dan lokasi yang terkena pembuluh darah (Brunekreef dan Holgate, 2002).

Lung Cancer, bentuk paling umum dari kanker paru-paru bronkogenik berasal dari lapisan bronkial dan menyerang percabangan bronkial. Serangan dapat menyebar ke paru-paru dan bagian-bagian lain di seluruh tubuh.

Bukti- bukti epidemiologis menunjukkan bahwa 90% kematian akibat kanker di AS setiap tahun (termasuk anak-anak) disebabkan oleh paparan kronis polusi udara, termasuk asap tembakau, perokok pasif, paparan lingkungan kerja yang terkontaminasi asbes, arsen, gas radioaktif dan debu (Donaldson, Li dan MacNee, 1998; Godish, 2005; Riedl dan Diaz-Sanchez, 2005; Billet *et al.*, 2007; Ashmore dan Dimitroulopoulou, 2009).

Pada jaman sekarang ini banyak orang yang menghabiskan sebagian besar waktunya di dalam ruangan, sehingga polusi udara dalam ruangan menjadi hal yang sangat penting bagi kesehatan masyarakat, termasuk kesehatan anak-anak (Seaton *et al.*, 1995; Salvi, 2007; Neeta dan Grigg, 2008; Tabaku *et al.*, 2011).

Polusi udara dapat menjadi agen penyebab penyakit pernapasan kronis dan akut, serta dapat mempengaruhi prognosis medis penyakit-penyakit lainnya (Chen, Hong dan Kan, 2004). Menurut hasil-hasil penelitian terbaru di berbagai penjuru dunia, penyakit pernapasan menjadi prioritas, bersama dengan penyakit kardiovaskular dan kanker (Peters, 2005; Yang dan Ballinger, 2005; Nelin *et al.*, 2012; Mohammed *et al.*, 2016).

Karena meningkatnya kekhawatiran mengenai penyakit pernapasan seluruh dunia, Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) mencanangkan tindakan darurat untuk mengurangi beban global penyakit pernapasan yang disebut GARD (*Global Alliance Against Chronic Respiratory Diseases*), bekerja sama dengan organisasi nasional dan internasional terkait (GARD, 2008).

Hasil-hasil penelitian menunjukkan hubungan antara kesehatan pernapasan dan *Indoor Air Quality* (IAQ) menunjukkan pentingnya



faktor lingkungan dan faktor pribadi seperti usia, jenis kelamin dan adanya penyakit-penyakit terkait (Dennis *et al.*, 1996; Dutt *et al.*, 1996; Paul *et al.*, 2002).

IAQ mempengaruhi tingkat kesehatan pernafasan, serta prevalensi dan prognosis asma, dan COPD (*chronic obstructive pulmonary disease*), penyakit pernapasan akut, kanker paru-paru, penyakit paru-paru interstitial, dan angka kematian (WHO, 2010; IARC, 2013; Yorifuji, Kashima dan Doi, 2016).

Selain berbagai gangguan kesehatan yang merugikan akibat polusi udara dalam ruangan, hal ini juga dapat menyebabkan melemahnya sistem kekebalan tubuh dan peningkatan infeksi saluran pernapasan (Wong *et al.*, 2011; Kurmi *et al.*, 2012).

Keterkaitan antara polusi udara dalam ruangan dan kanker paru-paru juga telah dilaporkan dalam kaitannya dengan merokok pasif dan asap dari berbagai bahan bakar (Salvi dan Barnes, 2010; Danielsen *et al.*, 2011). Hal itu menunjukkan bahwa kondisi ruangan ramah lingkungan sangat penting bagi penghuniruangan yang menderita asma dan bukan penderita (Tham dan Fadeyi, 2015; Nadeau *et al.*, 2010). Oleh karena itu, dari sudut pandang kesehatan, kesadaran masyarakat harus ditingkatkan untuk mencapai nilai IAQ yang bagus (Frontczak, Andersen dan Wargocki, 2012).

Nilai IAQ mencakup sekelompok besar parameter senyawa organik (organik volatil dan formaldehida) dan konstituen anorganik (gas dan partikulat), mikroba (bakteri dan jamur), parameter kenyamanan termal (suhu dan kelembaban) (Mentese *et al.*, 2012).

Di antara parameter ini, partikel halus dapat menembus jauh ke dalam paru-paru dan berfungsi sebagai media pembawa gas beracun dan virus, dapat mengakibatkan banyak efek signifikan dibandingkan dengan partikel kasar (Ormstad, 2000).

Tingkat konsentrasi PM dalam ruangan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti tingkat pertukaran udara, tingkat PM di luar ruangan, dan PM yang terkait dengan aktivitas manusia (Long, Sulh dan Koutrakis, 2000; Luoma dan Batterman, 2001; Fromme *et al.*,



2007; Martuzevicius *et al.*, 2008, Oh *et al.*, 2014; Serfozo *et al.*, 2014; Tran *et al.*, 2014).

Variasi konsentrasi PM harian dan variasi jangka panjang, ternyata bererkaitan dengan kematian, peningkatan penyakit jantung dan pernapasan (Polichetti *et al.*, 2009), infeksi saluran pernapasan akut, dan kelahiran prematur (Brunekreef dan Holgate, 2002; Pope *et al.*, 2002; Simoni *et al.*, 2002; Pope dan Dockery, 2006; Dominici *et al.*, 2007; Maier *et al.*, 2008).

Bakteri dan jamur di udara dapat ditemukan sebanyak 10-104 CFU.m⁻³ di lingkungan indoor yang khas, tergantung pada faktor-faktor yang memungkinkan penyebaran bioaerosols, seperti kehadiran manusia, hewan peliharaan, dan tanaman pot, suhu udara, dan kelembaban udara (Mentese, 2009).

Peningkatan konsentrasi bioaerosols terkait dengan asma, alergi rhinitis, radang paru-paru hipersensitif, gangguan sindrom gedung (SBS), infeksi, alergi dan efek toksik yang sangat penting bagi penyandang alergi dan gangguan pernapasan (Ross, 2000; Burge, 2002; Fabian, *et al.*, 2005; Portnoy *et al.*, 2005; Bush *et al.*, 2006).

Senyawa organik volatil (VOC) terdiri dari berbagai macam senyawa organik di udara. Penetrasi emisi kendaraan bermotor/ industri dari udara outdoor ke udara indoor, penggunaan bahan-kimia untuk interior ruangan, adalah kontributor utama VOC di lingkungan indoor (Baek *et al.*, 1997; Rehwagen, Schlink dan Herbarth, 2003; Lee *et al.*, 2002).

Beberapa jenis VOC mempunyai efek karsinogenik, dan beberapa jenis VOC lainnya terkait dengan asma dan gejala seperti asma (Liu, 2004). Kondisi ventilasi yang tidak memadai, bersama-sama dengan VOC yang berasal dari produk plastik, mengakibatkan gangguan sindrom gedung seperti sakit kepala, kelelahan, dan iritasi selaput lendir di kalangan para pekerja kantor (Olesen, 2005).

Konsentrasi CO₂ dapat menjadi indikator kecukupannya ventilasi (Heudorf, Neitzert dan Spark, 2009) dan parameter kenyamanan (Olesen, 2004). Meskipun diasumsikan bahwa konsentrasi CO₂ >



1000 ppm menunjukkan IAQ yang tidak layak dan ventilasi yang tidak memadai, namun konsentrasi CO_2 <1000 ppm tidak menjamin kondisi IAQ yang sehat (Seppanen, Fisk dan Mendell, 1999; Apte, Fisk dan Daisey, 2000)..

Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai IAQ ternyata bervariasi musiman. Konsentrasi TVOC (*Total Volatile Organic Compound*), CO_2 , dan PM ternyata lebih tinggi selama musim dingin daripada musim panas. Demikian pula, tingkat tertinggi VOC dan PM ditemukan selama musim dingin (Mentese *et al.*, 2012a).

Rehwagen, Schlink, dan Herbarth (2003) menemukan bahwa konsentrasi TVOC indoor tiga kali lebih tinggi pada musim dingin daripada musim. Nilai TVOC ini bervariasi dalam kisaran (0,13-10,32 mg.m^{-3}) di antara lokasi; variasi nilai TVOC 0.036 -3-2,59 mg.m^{-3} di lingkungan indoor gedung perkantoran (Shields, Fleischer dan Weschler, 1996).

Faktor-faktor utama yang mempengaruhi laju deposisi partikel dalam ruangan berhubungan dengan kurangnya ventilasi, maka biasanya tingkat PM yang tinggi terjadi pada musim dingin, hal ini berhubungan dengan kondisi ventilasi yang lebih selama musim panas (Jamriska, Morawaska, dan Clark, 2000).

Peningkatan ventilasi selama waktu musim panas berdampak pada masuknya bioaerosol outdoor ke lingkungan indoor, tanah dan vegetasi merupakan sumber bioaerosols outdoor (Andersen *et al.*, 2009). Parameter IAQ yang diukur biasanya juga berhubungan dengan suhu udara dan kelembaban udara.





BAB V

DEPOSISI PERTIKEL PADA VEGETASI

Pembentukan Vegetasi

Kerapatan vegetasi atau porositas vegetasi biasanya diukur dengan menggunakan beberapa parameter yang berbeda. Vegetasi yang rapat mampu meningkatkan deposisi polutan udara yang berada di dekat permukaan tajuknya, tetapi juga dapat menghambat transportasi polutan menuju ke permukaan.

Oleh karena itu sangat diperlukan pengukuran standar kerapatan vegetasi, sehingga dapat dilakukan analisis komparabilitas di antara hasil-hasil studi (Liu *et al.*, 2004; Litschke dan Kuttler, 2008; Lin, Katul dan Khlystov, 2012; Maher *et al.*, 2013).

Spesies tumbuhan yang berbeda memiliki kecepatan deposisi partikel udara yang berbeda bahkan untuk rentang ukuran partikel yang sama, namun data yang tersedia belum bisa memberikan penjelasan yang bagus. Pembentukan parameter tertentu untuk menggambarkan vegetasi penting untuk standardisasi vegetasi dalam penelitian eksperimen.

Karakteristik daun-berbulu dan kandungan lilin telah terbukti meningkatkan deposisi partikel debu, ketebalan daun mungkin juga menentukan ukuran partikel yang dapat dideposit-kan (Popek *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015).

Tumbuhan secara efektif dapat menghilangkan partikel debu dari udara ambien, meningkatkan kualitas udara dan kesehatan masyarakat. Akumulasi partikel debu pada permukaan daun ternyata juga dipengaruhi oleh ultra-struktur lilin epikutikularnya, seperti film-tipis, trombosit dan tubulus.

Akumulasi partikel pada permukaan daun setelah masa pecah-tunas ternyata berlangsung cepat dan mencapai jumlah yang tinggi dalam waktu 4-7 hari. Curah hujan sesekali menghasilkan peningkatan akumulasi partikel pada permukaan daun dengan konsentrasi PM yang tinggi.

Hal ini dihasilkan dari deposisi basah PM, dan kesetimbangan PM pada permukaan daun dalam periode yang lebih lama (Wang *et al.*, 2015b). Nilai kesetimbangan luas permukaan-bawah daun yang tertutup partikel adalah 10-50% dibandingkan dengan 3-35% pada permukaan-atas daun. Ultra-struktur lilin epikutikula berkontribusi signifikan pada adsorpsi PM pada daun.

Kemampuan ultra-struktur untuk menangkap PM ini menurun dalam urutan: film-tipis, trombosit dan tubulus. Pematang-pematang mikro (pada skala 1-2 μm) pada permukaan daun ternyata lebih efisien mengumpulkan PM, khususnya PM_{2.5}, dibandingkan dengan kekasaran (jarak P-V) pada skala 5-20 μm .

Ukuran PM ternyata bervariasi (Ninomiya *et al.*, 1971; Fennelly, 1975) dan pergerakan atau perjalanannya di udara juga berbeda-beda. Everett (1980) menemukan bahwa untuk jalan-jalan beraspal, ada penurunan cepat dalam ukuran partikel debu di udara pada jarak 8 m dari jalan.

Tamm dan Troedsson (1955) melaporkan hasil penelitiannya bahwa pada jarak lebih dari 20 m dari jalan beraspal ternyata hanya ditemukan partikel yang berukuran silt (debu). Debu jalan raya



tidak selalu berwarna hitam dan mungkin tidak mempengaruhi penyerapan cahaya dan suhu daun separah partikel debu lainnya.

Laju transfer debu dari udara ke permukaan vegetasi yang sangat bervariasi dengan sifat debu, dan sifat lingkungan ambien (Grantz *et al.*, 2003) sangat menentukan efek debu terhadap ekosistem. Deposisi partikel atmosfer ke permukaan vegetasi memiliki tiga rute utama: (1) deposisi basah, (2) deposisi kering dan (3) deposisi okultisme. Faktor-faktor yang mempengaruhi deposisi partikel dalam kondisi kering sama yang mempengaruhi proses deposisi okultisme yaitu embun, kabut dan awan.

Curah hujan secara langsung menentukan besarnya deposisi basah. Kejadian hujan mem-bersihkan udara, sehingga deposisi kering dihilangkan atau dikurangi selama periode kering berikutnya. Deposisi okultisme tergantung pada intersepsi lansekap (Cape, 1993). Deposisi basah terjadi akibat inklusi partikel dan gas ke dalam titik-titik awan oleh nukleasi, dan presipitasinya (Lovett, 1994).

Deposisi basah dipengaruhi oleh jumlah curah hujan dan konsentrasi partikulat ambien, dan tidak terpengaruh oleh sifat permukaan debu. Aliran deposisi basah selama curah hujan melebihi aliran deposisi kering sebesar satu hingga empat kali lebih besar (Lindberg dan Harriss, 1981).

Deposisi basah yang paling efisien untuk partikel halus atmosferik yang mengandung unsur-unsur Cd, Cr, Pb, Ni, dan Va (Smith, 1990a,b). Namun demikian, sifat permukaan daun seperti keterbasahan, exposure, dan kekasaran sangat mempengaruhi retensi cairan (Neinhuis dan Barthlott, 1998).

Lereng bukit yang berhutan lebat dan tegakannya tinggi menerima masukan 4-6 kali lebih banyak deposisi basah daripada daerah lembah yang vegetasinya pendek-pendek. Hal ini karena efek orografis (Unsworth dan Wilshaw, 1989) dan kopling aerodinamis lebih dekat dengan atmosfir kanopi hutan tinggi daripada tajuk yang pendek di lembah-lembah.



Hal ini menyebabkan daun-daun lebih cepat mengering setelah terjadi deposisi, mengurangi waktu tinggal partikel terlarut. Pada saat yang sama dengan cepat terjadi konsentrasi bahan terlarut yang dapat merusak kutikula atau serapan daun (Unsworth, 1984; Schonherr dan Huber, 1977).

Beban kimia dari bahan debu deposisi kering terperangkap di kanopi dikombinasikan dengan material baru untuk ditransfer ke tanah (Lovett dan Lindberg, 1984). Konsentrasi partikulat tersuspensi dan terlarut umumnya tertinggi pada saat awal kejadian hujan dan menurun dengan durasi hujan (Lindberg dan McLaughlin, 1986).

Laju deposisi kering partikel debu atmosfer ke permukaan tanaman dan tanah jauh lebih lambat dibandingkan dengan deposisi basah dan deposisi akuit, namun deposisi kering ini berlangsung terus-menerus dan mempengaruhi semua permukaan yang terkena (Hicks, 1986).

Sifat fisik debu yang menentukan bobot partikel dan potensi jarak transportasi dari sumbernya adalah berat jenis partikel dan ukuran partikel. Sedimentasi gravitasi merupakan proses pengendapan yang utama, untuk partikel yang diameternya $> 1 \mu\text{m}$, sedangkan untuk partikel $< 0,001 \mu\text{m}$ yaitu partikel-tersuspensi, ternyata sifat inersia lebih penting dalam menentukan dampaknya terhadap permukaan (Chamberlain, 1986; Wesely dan Hicks, 2000).

Deposisi kering bahan organik (misalnya dioxin, dibenzofurans, dan aromatik polisiklik) ke permukaan bervegetasi seringkali didominasi oleh PM kasar, meskipun muatan massal fraksi ukuran ini mungkin kecil (Lin *et al.*, 1993) relatif terhadap PM yang halus. Orientasi posisi daun, usia, kekasaran dan wettability permukaan daun mempengaruhi intersepsi debu dan dengan demikian juga menentukan retensi partikel debu (Neinhuis dan Barthlott, 1998; Beckett *et al.*, 2000).

Kekuatan dan stabilitas angin, porositas vegetasi sehubungan dengan gerakan udara juga mempengaruhi retensi debu (Raupach *et al.*, 2001). Sulit untuk memperkirakan laju hilangnya debu dari



permukaan vegetasi dalam kondisi kering. Krishnamurthy dan Rajachidambaram (1974) melaporkan beban debu semen yang sama dan tingkat deposisinya ($3,7 \text{ g.m}^{-2}.\text{hari}^{-1}$) pada daun kelapa dan daun asam.

Kecepatan deposisi untuk partikel halus ke permukaan hutan telah dilaporkan dalam kisaran $1\text{-}15 \text{ cm.det}^{-1}$ (Smith, 1990a). Tingkat penurunan beban debu permukaan dengan meningkatnya jarak dari Jalan-Raya mengikuti pola eksponensial (Walker dan Everett, 1987). Keller dan Lamprecht (1995) melaporkan bahwa konsentrasi debu di dekat Jalan Raya Dalton di Alaska relatif tidak beragam selama musim pertumbuhan musim panas dan lebih dari 85% debu yang jatuh pada permukaan vegetasi dapat diambil.

Deposisi PM pada permukaan daun terjadi melalui empat proses, yaitu (1) sedimentasi yang disebabkan oleh gravitasi; (2) difusi dengan gerak Brown; (3) impaksi akibat aliran turbulen udara, dan (4) intersepsi yang dihasilkan dari aliran udara turbulen (Sternberg *et al.*, 2010).

Sedimentasi terutama mempengaruhi pengendapan PM yang berukuran besar ($10\text{-}100 \mu\text{m}$), impaksi dan intersepsi mempengaruhi pengendapan partikel yang lebih besar dari $0,5 \mu\text{m}$ (Hinds, 1999), dan gerak Brown mengarah ke deposisi partikel ultrafine ($<0,1 \mu\text{m}$).

Banyak penelitian menyelidiki bagaimana pohon menangkap partikel pada permukaan daunnya (Yin, *et al.*, 2011; Terzaghi *et al.*, 2013; Terzaghi *et al.*, 2013a; Song *et al.*, 2015); anatomi daun menjadi factor signifikan yang mempengaruhi deposisi partikel (Rai, 2013).

Permukaan daun dapat menyerap ultrafine PM($0,1$) ke dalam jaringan daun melalui stomatanya ketika difusi Brown menjadi mekanisme deposisi yang utama (Hinds, 1999; Treshow dan Bell, 2002; Lin dan Khlystov, 2012). Rasanen *et al.* (2013) membandingkan pentingnya struktur permukaan daun, fisiologi daun, dan kekeringan tanah moderat, pada efisiensi penangkapan partikel oleh pohon di terowongan angin.



Studi ini menunjukkan bahwa konifer menangkap partikel lebih banyak, karena ukuran daunnya kecil-kecil. Daun lebar biasanya mempunyai tingkat keterbasahan yang rendah, kerapatan stomata rendah, dan daun-daun berbulu mampu menangkap lebih banyak partikel. Lugas tanah moderat cenderung meningkatkan efisiensi penangkapan partikel oleh tumbuhan cemara (Rasanen *et al.*, 2013) dan *P.sylvestris* (Rasanen *et al.* (2013).

Perilaku konifer dan daun-lebar mewakili perbedaan karakteristik struktural dan kimia kutikula lilin daripada kualitas lilin (Joueva *et al.*, 2002; Dzierzanowski *et al.*, 2011). Analisis menunjukkan bahwa pengaruh thermophoresis pada deposisi partikel halus ke permukaan daun tidak dapat diabaikan (Hinds, 1999).

Arsitektur tajuk tanaman didefinisikan sebagai organisasi tiga dimensi dari tubuh tanaman. Untuk bagian tanaman yang berada di atas tanah, termasuk pola percabangan, serta ukuran, bentuk dan posisi daun dan organ bunga (Reinhardt dan Kuhlmeier, 2002).

Arsitektur spesies tanaman tertentu dikendalikan oleh faktor genetik secara ketat. Meskipun juga dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti cahaya, suhu, kelembaban dan status gizi, namun tampaknya ada prinsip-prinsip endogen yang mengontrol arsitektur tanaman.

Hasil-hasil penelitian terbaru telah mengungkapkan pola dasar yang terlibat dalam regulasi susunan daun, regulasi genetik meristem determinasi, yaitu keputusan untuk menghentikan atau melanjutkan pertumbuhan, dan kontrol percabangan selama fase vegetatif dan generatif.

Hal penting lainnya adalah arsitektur daun dan peran pembelahan sel dan pertumbuhan sel dalam morfogenesis tanaman (Reinhardt dan Kuhlmeier, 2002). Arsitektur tanaman dapat menanggapi deposisi debu dengan menunjukkan stres-thymus atau manifestasi lainnya (Rai, 2014).

Beberapa spesies tanaman kurang rentan terhadap deposisi debu karena mempunyai posisi daun dan fitur penting lainnya. Bentuk



dan ukuran daun dan organ bunga merupakan penentu utama dari arsitektur tanaman.

Daun dapat berupa daun sederhana, seperti pada *Arabidopsis* dan tembakau, atau daun yang terdiri dari beberapa subunit helaian, seperti tanaman tomat dan kacang. Sebuah daun prototipikal memiliki tiga sumbu: sumbu proximodistal (tip-base), sumbu dorsiventral (permukaan atas dan permukaan bawah) dan sumbu lateral (kiri-kanan).

Efek Partikel Debu di Udara terhadap Tumbuhan

Penelitian tentang polutan non-gas di udara dan interaksinya dengan komunitas vegetasi telah banyak dilakukan. Penelitian-penelitian seperti ini telah dilakukan di hutan alam (Brandt dan Rhoades, 1972), hutan tanaman (Ricks dan Williams, 1974), dan lahan basah (Gilbert, 1973; Spatt dan Miller, 1981).

Bukti-bukti empirik menunjukkan bahwa deposisi partikel debu pada permukaan tanaman dan tanah dalam berbagai komunitas memiliki dampak yang kronis, dan perubahan kondisi lingkungan dapat menyebabkan pergeseran komposisi botani di suatu daerah.

Efek ini pada tanaman dan tanah dapat menyebabkan, perubahan komunitas invertebrata dan akhirnya perubahan fauna predator tertentu. Misalnya daun dimakan ulat atau kumbang, dan selanjutnya serangga ini adalah mangsa bagi burung tertentu. Akumulasi debu dapat mempengaruhi pH tanah (Bohn, 1972) dan / atau mempengaruhi permeabilitas permukaan tanah, baik secara langsung atau melalui interaksi dengan vegetasi yang ada (Eldridge, 1993).

Paparan terhadap konsentrasi tertentu PM dapat menyebabkan respon fito-toksik yang berbeda-beda, tergantung pada campuran partikel yang diendapkan. Deposisi partikel dan efeknya pada vegetasi meliputi (1) nitrat dan sulfat dan asosiasinya dalam bentuk



deposisi asam dan bahan-bahan yang dapat menyebabkan asam, dan (2) elemen kimia dan logam berat, termasuk Pb. Tingkat dampaknya tergantung pada mode dan besarnya deposisi, dan mungkin juga komposisi kimia partikel yang terlibat (Whitby, 1978).

Partikel debu mineral pada umumnya sukar larut dan kurang reaktif dibandingkan dengan partikel antropogenik seperti sulfat dan nitrat (Fowler *et al.*, 1989; Grantz *et al.*, 2003). Debu dengan nilai pH $\geq 9,0$, dapat menyebabkan kerusakan langsung pada jaringan daun atau secara tidak langsung melalui perubahan pH tanah (Harapan *et al.*, 1991; Vardak *et al.*, 1995; Auerbach *et al.*, 1997).

Partikel debu yang mengandung garam-garam toksik juga berdampak negative pada tumbuhan (Prajapati dan Tripathi, 2008a-d). Pertukaran energi antara vegetasi dan lingkungan tumbuhnya melibatkan proses-proses penyerapan dan konversi radiasi gelombang pendek dan emisi radiasi gelombang panjang (Monteith dan Unsworth, 1990).

Partikel debu yang diendapkan pada permukaan daun dapat mengubah sifat-sifatnya optiknya daun, terutama reflektansi permukaan terhadap radiasi infra merah, radianya visible dan gelombang pendek (Eller 1977; Keller dan Lamprecht, 1995), serta mempengaruhi jumlah radiasi yang tersedia untuk fotosintesis.

Partikel debu yang menutup permukaan daun dapat menyebabkan suhu permukaan daun $4.0-11.5^{\circ}\text{C}$ lebih tinggi daripada suhu lingkungan ambien (Spencer dan Tinnin, 1997), mengakibatkan perubahan struktur dan komposisi vegetasi (Auerbach *et al.*, 1997), dan mengubah pola penggembalaan hewan-ternak (Walker dan Everett 1987).

Dalam kondisi lingkungan kering, partikel debu jalan-ray a sebesar 40 g.m^{-2} dapat meningkatkan suhu daun $2-3^{\circ}\text{C}$ (Sharifi *et al.*, 1997). Debu yang terkumpul pada permukaan daun dapat mengganggu difusi gas antara daun dan udara-ambien.

Sedimentasi partikel kasar dapat mempengaruhi permukaan atas daun lebih serius (Thompson *et al.*, 1984; Kim *et al.*, 2000); sedangkan



partikel halus lebih mempengaruhi permukaan bawah daun (Ricks dan Williams, 1974; Beckett *et al.*, 2000).

Dalam lingkungan yang berdebu, spesies tumbuhan yang memiliki stomata tenggelam, dan berlilin mungkin kurang terpengaruh dibandingkan dengan spesies yang stomatanya menonjol di permukaan daun.

Peningkatan aktivitas penggalian, pertambangan terbuka dan lalu lintas jalan raya juga dapat berdampak pada deposisi partikel debu pada vegetasi. Farmer (1993) menggambarkan karakter fisik dan kimia dari berbagai jenis debu.

Efek partikel debu pada tumbuhan, padang rumput, pohon-pohon dan vegetasi hutan, ternyata beragam. Partikel debu dapat mempengaruhi proses fotosintesis, respirasi, transpirasi dan penetrasi polutan gas fitotoksik. Gejala kerusakan visual dapat terjadi dan umumnya terjadi penurunan produktivitas tumbuhan.

Sebagian besar komunitas tumbuhan dipengaruhi oleh deposisi debu sehingga struktur komunitas vegetasi dapat berubah. Komunitas tumbuhan epifit dan *Sphagnum* seringkali sangat sensitif terhadap dampak deposisi partikel debu (Farmer, 1993).

Dalam hal partikel debu mineral, efeknya pada vegetasi mungkin berhubungan dengan penurunan jumlah cahaya yang dapat mencapai aparat fotosintesis dalam daun, peningkatan suhu daun karena sifat optik permukaan daun berubah, dan gangguan difusi gas ke dalam dan ke luar dari daun (Farmer, 1993; Doley, 2006; Prajapati, 2012b). Tetapi secara keseluruhan, efeknya pada tumbuhan adalah berkurangnya kemampuan fotosintesis (Krishnamurthy dan Rajachidambaram, 1986; Hirano *et al.*, 1995).

Partikulat atmosfer mengandung berbagai macam unsur-unsur dan substansi kimia. Deposisi partikel pada permukaan tumbuhan tergantung pada distribusi ukuran partikel-partikel ini dan juga dipengaruhi oleh komposisi kimiawinya (Prajapati, 2012a).

Pengaruh partikel debu pada vegetasi mungkin berhubungan dengan penurunan cahaya yang diperlukan untuk fotosintesis dan



peningkatan suhu daun karena sifat optik permukaan daunnya berubah. Perubahan tingkat pertukaran energi dianggap lebih penting daripada difusi gas ke dalam dan ke luar jaringan daun; perubahan ini dipengaruhi oleh beban debu, warna debu dan ukuran partikel debu.

Partikel debu alkalis dapat menyebabkan kerusakan permukaan daun, sedangkan bahan-bahan lainnya dapat menembus lapisan kutikula. Sebuah rute lainnya lebih panjang terhadap proses metabolisme tumbuhan dan berdampak pada vegetasi adalah melalui rhizosfer. Intersepsi debu oleh vegetasi berkontribusi penting pada peningkatan kualitas udara di sekitar vegetasi (Prajapati, 2012a).

Proses pertukaran cahaya dan energi dapat diprediksi dengan lebih akurat daripada efek debu terhadap difusi gas. Beban kritis debu yang mengakibatkan perubahan fungsi tumbuhan secara signifikan ternyata bervariasi dengan distribusi ukuran partikel dan warna debu, mulai dari 1 g.m^{-2} untuk karbon hitam yang berdiameter $0,15 \mu\text{m}$ hingga sekitar 8 g.m^{-2} untuk partikel debu kasar jalan-raya atau partikel debu batukapur dengan diameter lebih dari $50 \mu\text{m}$.

Beban kritis ini ternyata berbeda-beda dengan fungsi tumbuhan dan belum dapat diprediksi secara tepat. Ukuran partikel debu memiliki efek penting pada sifat pertukaran energi dari vegetasi, dan warna debu menjadi faktor sekunder.

Dalam rangka untuk membuat prediksi yang berguna tentang efek debu pada fungsi tumbuhan, maka distribusi ukuran partikel debu harus dapat dijelaskan. Bukti-bukti langsung harus dikumpulkan tentang efek debu terhadap sifat fisik tumbuhan pada berbagai proses lingkungan.

Dengan menggabungkan beberapa karakteristik fisiologis tumbuhan, maka dimungkinkan untuk memperkirakan dampak deposisi debu terhadap vegetasi dan dengan demikian dapat diperkirakan risiko lingkungan yang terkait kegiatan yang menghasilkan debu (Doley dan Rossato, 2010). Pengaruh debu pada fotosintesis kanopi tanaman telah disimulasi dan dimodelkan (Lin *et al.*, 1995; Holmes dan Morawska, 2006).



Pemodelan menunjukkan bahwa dampak deposisi debu pada vegetasi di bagian bawah kanopi tanaman ternyata lebih besar daripada bagian vegetasi yang sepenuhnya terkena sinar matahari langsung. Fotosintesis berkurang dan ini tampaknya karena efek naungan (penutupan) ketika permukaan-atas daun tertutup debu, dan difusi gas terhambat ketika permukaan-bawah daun berdebu.

Efek ini dapat terjadi pada saat 5-10 g debu per m² diendapkan di permukaan daun (Doley dan Rossato, 2010). Beban debu yang dapat diterima ternyata bervariasi di antara spesies dan posisinya dalam komunitas tumbuhan.

Dengan menggabungkan beberapa karakteristik fisiologis tumbuhan, maka dimungkinkan untuk memperkirakan dampak yang mungkin dari deposisi debu pada vegetasi dan dengan demikian risiko lingkungan yang terkait dengan kegiatan yang menghasilkan debu (Doley dan Rossato, 2010).

Pemodelan juga menunjukkan bahwa dampak deposisi debu pada vegetasi di bagian bawah kanopi tanaman lebih besar daripada bagian vegetasi yang sepenuhnya terkena sinar matahari. Perbedaan ini berarti bahwa beban debu diterima dapat bervariasi antara spesies dan posisinya dalam komunitas tumbuhan.

Dengan menggabungkan beberapa karakteristik fisiologis tanaman maka dimungkinkan untuk memperkirakan dampak akibat deposisi debu pada vegetasi dan dengan demikian dapat diperkirakan risiko lingkungan yang terkait dengan kegiatan yang menghasilkan debu.

Debu mempengaruhi fisiologi tumbuhan pada tingkat kimiawi dan tingkat biokimiawi. Tingkat absolut deposisi debu mungkin penting dalam kaitannya dengan efek fisika. Partikel debu halus dapat menyumbat lubang stomata (Oblisami *et al.*, 1978; Hirano *et al.*, 1995), mengurangi laju fotosintesis (Borka 1980), meningkatkan suhu daun (Guggenheim *et al.*, 1980), dan meningkatkan transpirasi (Eveling, 1969).



Pengaruh deposisi PM pada permukaan daun mungkin terletak pada pengurangan produk fotosintesis (Auclair 1977; Naidoo dan Chirkoot, 2004). Krajickova dan Mejstrik (1984) mengkonfirmasi asumsi ini. Para peneliti lainnya menemukan bahwa PM dari pembangkit listrik berbahan bakar batu bara mempengaruhi laju fotosintesis *Calamagrostis epigeios* dan *Hypericum perforatum*, tetapi stomatanya hanya sedikit tersumbat.

Mereka menduga bahwa partikel debu mungkin berdampak langsung pada sel-penjaga, meskipun mekanismenya masih belum dapat dijelaskan. Setelah pengendapan PM pada permukaan daun, *Rhododendron catawbiense* menunjukkan peningkatan penyerapan meningkat spektrum inframerah dan penurunan refleksi dan transmisi radiasi (Eller dan Brunner, 1975).

Pengendapan partikel debu yang ukurannya lebih kecil menyebabkan lebih banyak pengurangan fotosintesis dibandingkan dengan efek partikel debu kasar (Hirano *et al.*, 1990). Efek ini mungkin karena penutupan partikel debu yang lebih rapat di permukaan daun menghasilkan efek naungan yang lebih besar terhadap radiasi fotosintetik (PAR).

Dalam skala percobaan, dimana debu dengan ukuran yang berbeda-beda yang diaplikasikan secara elektrostatis ke daun-daun tanaman Brassica, tidak ditemukan perbedaan efisiensi fotosintesis tanaman. Hal ini mungkin karena distribusi partikel yang seragam dan lapisan deposisi PM di permukaan daun sangat tipis, sehingga masih tembus cahaya.

Reaksi tanaman terhadap pengendapan debu tergantung spesiesnya. Sebagai contoh, fluoresensi klorofil tumbuhan *Ilex rotunda* dan *Ficus microcarpa* yang tumbuh berdekatan dengan pabrik keramik, ternyata kurang terpengaruh dibandingkan dengan tumbuhan *Machilus chinensis*. Sedikit perubahan pada fotosistem II telah diamati pada tumbuhan *Ilex rotunda* (Wen *et al.*, 2004).

Data fluoresensi klorofil tumbuhan mangrove, *Avicennia marina*, menunjukkan bahwa daun-daun yang dilapisi partikel debu



menunjukkan hasil kuantum fotosistem II (PS II) lebih rendah, tingkat transpor elektron (ETR) melalui PS-II lebih rendah, dan mengurangi efisiensi kuantum PS-II (Fv/Fm) (Naidoo dan Chirkoot, 2004).

Nano dan Ilias (2007) melaporkan hal yang serupa pada pohon-pohon zaitun yang terkena semen debu. Partikel debu semen menurunkan total kandungan klorofil dan rasio klorofil a / klorofil b. Akibatnya, laju fotosintesis dan hasil kuantum menurun.

Efek jangka panjangnya adalah perubahan biokimia daun dan kemungkinan peningkatan gangguan patogen tanaman dan hama arthropoda (Taylor *et al.*, 1986). Taylor *et al.* (1986) melaporkan gejala daun-menggulung dan nekrosis intervenial pada tanaman *Phaseolus vulgaris* terjadi setelah deposisi partikel debu semen.

Sperber (1975) sudah menduga bahwa tanaman yang mampu beradaptasi dengan kondisi sedikit cahaya ternyata kurang terpengaruhi oleh deposisi debu dibandingkan dengan jenis tanaman yang beradaptasi dengan kondisi sinar matahari langsung.

Interferensi fungsi stomata akibat deposisi PM dapat menyebabkan penyumbatan stomata pada permukaan-atas daun pada kondisi alamiah, dan juga pada permukaan-bawah daun. Menurut Krajickova dan Mejstrik (1984), diameter stomata pada kebanyakan tumbuhan biasanya berkisar 8-12 μm .

Oleh karena itu, ukuran partikel debu menjadi kriteria penting untuk kemungkinan penetrasi partikel debu ke dalam daun. Partikel debu PM₁₀ dan ukuran partikel yang lebih kecil secara teoritis dapat mengganggu fungsi stomata. Penyumbatan stomata daun menurunkan tingkat transpirasi dan asimilasi karbon, yang akhirnya menyebabkan penurunan secara signifikan tingkat fotosintesis daun.

Pengaruh deposisi debu tidak signifikan pada jenis-jenis tumbuhan yang mempunyai struktur perlindungan fisik, seperti trikoma (bulu daun) dibandingkan dengan jenis tumbuhan yang tidak mempunyai barier fisik seperti itu.

Debu batubara secara signifikan mengurangi pertukaran CO₂ dari permukaan-atas daun dan permukaan-bawah daun tumbuhan



Avicennia marina sebesar 17-39%, dimana penurunan ini biasanya lebih besar pada permukaan-bawah daun, yang memiliki rambu-daun dan kelenjar garam (Naidoo dan Chirkoot, 2004).

Nano dan Ilias (2007) menjelaskan penurunan konduktansi stomata untuk H_2O dan CO_2 pada tumbuhan *Olea europaea* yang terkena partikel debu semen, sehingga produktivitasnya berkurang. Hirano *et al.* (1995) melaporkan bahwa debu menurunkan konduktansi stomata tanaman mentimun dan kacang-buncis dalam kondisi terang, tetapi meningkatkannya pada kondisi gelap dengan menutup stomata, kalau stomata membuka selama periode berdebu. Kalau ukuran debu lebih kecil diaplikasikan pada tanaman, efeknya akan lebih besar. Namun, efeknya ini dapat diabaikan dengan cara menutup stomata selama periode berdebu.

Flückiger *et al.* (1979) menemukan, bahwa 1 mg.cm^{-2} debu silika mampu menurunkan resistensi difusi stomata tumbuhan *Populus tremula*, tetapi debu sebanyak $0,5 \text{ mg.cm}^{-2}$ sudah cukup untuk meningkatkan suhu daun. Fungsi metabolisme tanaman hanya dapat beroperasi dengan baik pada kisaran suhu optimal tertentu.

Jika daun memanaskan melebihi 34°C , enzim fotosintesis mulai mengalami denaturasi dan daun tidak dapat melakukan fungsi fotosintesis secara normal. Jiao dan Grodzinski (1996) melaporkan penghambatan ekspor hasil fotosintesis pada tumbuhan *Salvia splendens* dengan suhu di atas 35°C . Sukrosa dan rafinosa terakumulasi dalam daun pada suhu 40°C . Dalam kondisi seperti ini, tanaman bereaksi dengan cara meningkatkan transpirasinya hingga suhu daunnya menurun.

Data dari situs yang berbeda dianalisis dengan hubungan bivariat, dan variabilitas nilai rata-rata di antara situs ternyata lebih kecil daripada variasi di antara spesies dalam situs yang sama. Namun demikian, fotosintesis lebih dibatasi oleh $g(m)$ di lokasi-lokasi yang rendah hujan / kaya hara dan banyak hujan / miskin hara, yang mendukung vegetasi dengan dedaunan yang lebih bersifat sklerofilus (Niinemets, Wright dan Evans, 2009). Data ini secara kolektif



menunjukkan hubungan yang kuat antara struktur daun dengan $g(m)$, dan menunjukkan bahwa tingkat fotosintesis sangat dibatasi oleh $g(m)$ pada tumbuhan yang bersifat sklerofilus.

Pohon adalah pemulung PM yang sangat efisien dan kanopinya dapat berfungsi sebagai sink untuk menyerap partikulat, gas, dan aerosol (Decker *et al.*, 2000; McDonald, *et al.*, 2007; Urbat, Lehndorff dan Schwark, 2004; Tallis *et al.*, 2011).

Sebagai akibat dari luasnya permukaan daun dan gerakan udara turbulen yang diciptakan oleh struktur kanopinya, pohon-pohon secara efektif dapat menangkap lebih banyak partikel dibandingkan dengan vegetasi yang tajuknya lebih pendek (Fowler, Cape dan Unsworth, 1989). Fowler *et al.* (2004) menemukan bahwa hutan di West Midlands Inggris mampu mengumpulkan PM_{10} tiga kali lebih banyak dibandingkan dengan padang rumput.

Beberapa faktor ternyata terlibat dalam menentukan kemampuan pohon menangkap partikel debu. Faktor-faktor ini termasuk luas kanopi, struktur tajuk pohon, konsentrasi partikel debu di udara, distribusi ukuran partikel debu, dan kecepatan angin. Struktur tajuk pohon mengganggu aliran udara di dalam jalur hijau dan meningkatkan dampak dan intersepsi partikel debu (Beckett, Freer dan Taylor, 1998).

Pohon konifer mempunyai sifat aerodinamis yang spesifik, mereka telah terbukti mampu menangkap partikel debu lebih banyak daripada pohon berdaun lebar (Reinap *et al.*, 2009; Tallis *et al.*, 2011; Popek *et al.*, 2013.).

Penelitian dengan analisis statistik dan analisis multivariat menunjukkan bahwa faktor-faktor meteorologi yang mempengaruhi pertumbuhan dan perkembangan jenis pohon di hutan kota Shenyang adalah suhu akumulasi $\geq 5^{\circ}C$, akumulasi lamanya penyinaran, dan rata-rata suhu sepuluh harian pada setiap fase fenologi tumbuhan (Xu *et al.*, 2006).

Faktor-faktor meteorologi yang dibutuhkan oleh jenis-jenis pohon ternyata bervariasi dengan periode fenologinya. Suhu rendah



dan CI rendah diperlukan dalam periode perkecambahan, dan WI dan HI yang cocok sangat diperlukan selama masa pertumbuhan.

Karakter morfologi kuantitatif dari 10 jenis pohon di hutan kota Shenyang yang ditampilkan dalam morfologi daun dan ukuran daun, menurun dengan urutan *Lespedeza cyrtobotrya* > *Syringa oblata* > *Sophora japonica* > *Populus alba* > *Cornus alba* > *Lonicera maackii* > *Ligustrum obtusifolium* > *Fraxinus mandshurica* > *Prunus Padus* > *Phellodendron amurense*. Sedangkan karakter luas daun menurun dengan urutan *S.oblata* > *P.alba* > *P.amurense* > *P.Padus* > *F.mandshurica* > *C.alba* > *L.cyrtobotrya* > *L.maackii* > *S.japonica* > *L. obtusifolium*.

Hubungan panjang daun dengan lebar daun, perimeter dan luas, disajikan dengan model $y = ax (k)$, dan tren per-tumbuhannya tergolong pada Jenis Allometrik. Nilai k antara panjang daun dan lebar daun dari semua jenis pohon (kecuali *P.alba*) ternyata kurang dari 1.0; antara panjang daun dan perimeter lebih dari 1.0 untuk *P.amuresne*, sekitar 1.0 untuk *P.alba*, dan < 1 untuk pohon lain jenis.

Sedangkan nilai k antara panjang daun dan laus daun, > 1.0 untuk semua spesies pohon. Peningkatan luas daun sekitar 2 kali lebih tinggi daripada panjang daun. (Xu *et al.*, 2006). Polusi udara telah menjadi masalah kesehatan masyarakat yang serius di seluruh dunia, memperburuk berbagai penyakit pernapasan dan pembuluh darah di daerah perkotaan.

Pertanaman vegetasi sangat membantu menyerap debu dan mengurangi polusi udara untuk konservasi lingkungan perkotaan. Permukaan daun tanaman merupakan reseptor polutan atmosfer. Oleh karena itu, pemilihan jenis tanaman yang cocok untuk lingkungan perkotaan sangat penting. Kemampuan menangkap debu dari pohon perkotaan ditentukan oleh ciri-ciri morfologi daunnya, seperti lilin, kutikula, stomata, dan trikoma (bulu daun).

Kemampuan menangkap debu dari setiap jenis pohon secara signifikan berbeda di tempat yang sama. Hasil penelitian menunjukkan bahwa jumlah debu paling banyak ditangkap oleh



Mangifera indica Linn sebesar $12,723 \text{ g.m}^{-2}$ (di daerah industri) dan $1,482 \text{ g.m}^{-2}$ (di daerah komersial/ padat lalu lintas). Namun demikian nilai maksimum untuk tanaman *Bauhinia blakeana* hanya $2,682 \text{ g.m}^{-2}$ dan $0,720 \text{ g.m}^{-2}$ (Liu, Guan dan Peart, 2012).

Spesies tanaman yang berbeda memiliki morfologi daun yang berbeda pula. Daun-daun *M.indica* memiliki stomata tenggelam dan kerapatan stomata yang tinggi, karakter ini sangat mendukung penangkapan debu, sedangkan tanaman *B.blakeana* memiliki sel-sel epidermisnya berlilin (epikutikula) dengan stomata tersusun secara teratur, sehingga kemampuannya menangkap debu sangat terbatas.

Ukuran daun juga terbukti berhubungan dengan kemampuannya menangkap debu. Kapasitas penangkapan debu dari spesies pohon harus diperhitungkan dalam pengelolaan penghijauan kota. Hal ini juga menunjukkan bahwa variasi temporal dalam hal akumulasi debu terjadi selama periode pertumbuhan tanaman.

Selanjutnya, variasi spasial dalam hal akumulasi debu dibuktikan dengan data empirik. Jumlah tertinggi akumulasi debu dikaitkan dengan kawasan industri, sedangkan akumulasi debu terendah terjadi di kawasan pendidikan, yang merupakan daerah kontrol (Liu, Guan dan Peart, 2012).

Efek Pencemaran Partikulat terhadap Riap Pohon

Riap (*Increment*) adalah pertumbuhan tumbuh tanaman, baik pertumbuhan diameter, tinggi, jumlah daun, bobot neto. Secara lebih umum riap dikenal dengan pertumbuhan volume (kubikasi) per satuan waktu tertentu. Riap dapat dinyatakan dalam *Current Annual Increment (CAI)* atau *riap tahunan berjalan* dan *Mean Annual Increment (MAI)* atau riap tahunan rata-rata.

CAI menunjukkan data pertumbuhan setiap tahun, agar lebih mudah menilai CAI digambarkan dalam sebuah grafik pertumbuhan tanaman. Sedangkan MAI riap rata-rata dalam waktu tertentu yang



dihitung berdasarkan data terakhir dibagi dengan umur (Rianto *et al.*, 1974).

Chen *et al.* (2016) meneliti deposisi polutan pada permukaan vegetasi atau aerodinamika ruang vegetasi, apakah penanaman vegetasi dapat secara efektif mengurangi polusi udara yang disebabkan oleh PM (Arrivabene *et al.*, 2015).

Penelitian difokuskan pada pentingnya spesies vegetasi, konfigurasi penanaman, dan angin, dalam kaitannya dengan pengaruhnya pada konsentrasi PM pada skala kawasan perkotaan dan jalan raya. Medan angin yang ada pada skala kawasan perkotaan menguatkan fungsi purifikasi oleh vegetasi.

Semua konfigurasi penanaman vegetasi ternyata mampu mengurangi total partikel tersuspensi pada arah horizontal, tetapi tidak ke arah vertikal. Konfigurasi vegetasi semak-belukar dan rumputtinggi paling efektif mengurangi PM_{2.5} secara horizontal, tetapi berdampak buruk secara vertikal.

Kapasitas penangkapan PM ternyata species-specific, sehingga kriteria pemilihan spesies tidak dapat digeneralisasikan (Petroff, *et al.*, 2008; Hofman *et al.*, 2014; Song, *et al.*, 2015). Disain konfigurasi penanaman vegetasi ternyata lebih efektif dibandingkan dengan pemilihan jenis pohon dalam konteks mengurangi konsentrasi PM dalam tatanan udara perkotaan (Chen *et al.*, 2016).

Selmi *et al.* (2016) mengintegrasikan Model i-Tree-Eco untuk memperkirakan penghapusan polutan udara oleh pohon-pohon perkotaan di Kota Strasbourg, Perancis. Model ini menunjukkan bahwa pohon publik, yaitu, pohon yang dikelola oleh pemerintah kota, mampu menghapus sekitar 88 ton polutan selama periode satu tahun; nilai ini setara dengan sekitar 1 ton CO₂; 14 ton NO₂; 56 ton O₃; 12 ton PM₁₀-kasar (partikel dengan diameter mulai dari 2,5 sampai 10 µm); 5 ton PM_{2.5} dan 1 ton SO₂.

Penghapusan polusi udara ini bervariasi dengan tutupan pohon dan tingkat konsentrasi polutan udara (Yang, Chang dan Yan, 2015). Perbandingan antara tingkat penghapusan polusi simulasi dan emisi



lokal menunjukkan bahwa pohon publik kota mengurangi sekitar 7% dari PM10-kasar yang diemisikan ke dalam atmosfer kota. Namun demikian, efek pada polusi udara lainnya relative masih kecil.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pohon perkotaan merupakan elemen yang signifikan untuk mengurangi polusi udara, tetapi bukan satu-satunya solusi untuk masalah ini. Oleh karena itu direkomendasikan untuk mengkombinasikan penanaman pohon dengan pengelolaan sumberdaya hutan kota dengan mempertimbangkan karakteristik lingkungan perkotaan, yaitu struktur bangunan, desain jalan, lokasi sumberdaya lokal; dan lain-lain (Vranckx *et al.*, 2015; Selmi *et al.*, 2016).

Pertumbuhan pohon dipengaruhi oleh kerapatan, kepekaan terhadap perubahan lingkungan tempat tumbuhnya (Ozolincius, Stakenas dan Serafinaviciute, 2005; Simon dan Lena, 2016), serta berkorelasi erat dengan pertumbuhan volume tegakan dan LBD (Davis dan Johnson, 1987; Schweingruber, 1996; Marco *et al.*, 2002; Battipaglia *et al.*, 2010).

Dimensi pertumbuhan pohon mengalami perubahan menjadi semakin besar sejalan dengan penambahan umurnya (Suharlan *et al.*, 1978). Pertumbuhan pohon (riap) selalu dikaitkan dengan pertumbuhan yang terjadi di atas tanah yaitu batangnya, pertumbuhan batang pohon dikenal dengan adanya pertumbuhan tinggi dan diameter batangnya (Suharno, 1984; Stravinskiene *et al.*, 2013)

Pertumbuhan merupakan fungsi dari dua variabel, yaitu (1) faktor genetik yang bersifat tetap dan (2) faktor lingkungan atau kondisi iklim yang selalu berubah-ubah (Leonelli *et al.*, 2012; Zhang, 2015; Soudant *et al.*, 2016). Faktor pertama disebut dengan faktor dalam (*internal*) sedangkan faktor faktor yang kedua adalah faktor luar (*eskternal*)

Faktor luar merupakan faktor tempat tumbuh yang terdapat di lingkungannya. Faktor pertumbuhan ini menurut Soekotjo (1976) diartikan jumlah dari keadaan efektif yang mempengaruhi kehidupan



suatu tumbuhan atau masyarakat tumbuhan. Soekodjo (1976) membagi faktor tempat tumbuh menjadi empat kelompok, yaitu:

1. Faktor klimatis ialah faktor yang berhubungan dengan keadaan afmosfer yang mempengaruhi penghidupan tanaman, antara lain radiasi matahari, temperature udara dan tekanan udara (Kwak *et al.*, 2016).
2. Faktor edafis ialah faktor yang berhubungan dengan keadaan-keadaan antara lain pH tanah, suhu tanah, kelembaban tanah dan lain-lain.
3. Faktor fisiografis ialah keadaan yang menentukan bentuk dan stuktur permukaan tanah.
4. Faktor biotis adalah faktor-faktor langsung dan tidak langsung yang ada kaitannya dengan tumbuhan, hewan dan manusia.

Faktor-faktor tempat tumbuh dapat juga dibagi menjadi faktor-faktor yang berpengaruh secara langsung dan faktor-faktor yang berpengaruh secara tidak langsung. Faktor-faktor yang berpengaruh secara langsung seperti radiasi, kelembaban dan air tanah yang secara langsung berpengaruh terhadap fungsi tanaman dan memproduksi suatu efek yang jelas terlihat (Dinis *et al.*, 2016). Faktor-faktor yang berpengaruh secara tidak langsung seperti kelerengan, flora serta fauna yang mempengaruhi vegetasi hutan terutama melalui efek terhadap faktor yang langsung (Soekodjo, 1976).

Dimensi pohon mengalami perubahan menjadi besar sejalan dengan pertambahan umurnya (Rasmidi, 1984). Pertumbuhan pohon sebenarnya bukan saja terjadi di atas permukaan tanah tetapi batangnya, batang pohon yang mengenai pertumbuhan meninggi dan ke samping (melebar) sebagai pohon bertambah tinggi dan diameternya (Suharno, 1984). Ada tiga macam riap atau pertambahan dalam jangka waktu penentuannya, yaitu riap berjalan tahunan, riap rata-rata tahunan, dan riap rata-rata periodik.

Riap bejalan tahunan (*Current Annual Increment, CAI*) merupakan tambahan tumbuh dimensi pohon atau tegakan dalam



jangka waktu satu tahun. CAI diperoleh dari selisih perubahan dimensi dibagi dengan waktu yang diperlukan. Riap rata-rata tahunan (*Mean Annual Increment, MAI*) merupakan rata-rata pertambahan tumbuh dimensi pohon atau tegakan riap tahunannya.

MAI diperoleh dari pembagian antara besarnya dimesi yang dicapai dengan waktu yang diperlukan. Riap rata-rata periodik (*Periodik Annual Increment, PAI*) merupakan rata-rata pertambahan tumbuh dimensi pohon setiap periode tertentu. Riap periodik merupakan riap yang diukur berdasarkan jangka waktu tertentu.

Pertumbuhan membesar dan dimensi pohon (tegakan) menurut umurnya disebut dengan pertumbuhan (*growth*) (Rasmidi, 1984). Pertumbuhan dimensi pohon ini berlangsung sepanjang umur tanaman. Riap (*increment*) merupakan pertumbuhan dari dimensi pohon atau tegakan untuk jangka waktu tertentu. Riap ini mencakup pertumbuhan diameter, tinggi dan volume atau nilai suatu pohon atau tegakan selama jangka waktu tertentu (Jenus *et al.*, 1984).

Riap pohon ini mencerminkan kondisi lingkungan tumbuhnya dalam jangka panjang, selama siklus pertumbuhannya. Oleh karena itu seringkali karakter ini digunakan sebagai indikator status polusi udara di habitat tumbuhnya pohon (Ferretti, *et al.*, 2002; Dongarrà dan Varrica, 2002; Palakit *et al.*, 2012; Godek *et al.*, 2015; Coccozza *et al.*, 2016).







BAB VI

POLA SEBARAN DEBU

Pengukuran Konsentrasi Debu Terendap

Konsentrasi debu terendap (*dust fall*) hasil pengukuran selama 30 hari yang terbagi dalam lima periode pengambilan sampel, disajikan pada Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Konsentrasi debu terendap (*dust fall*) di sisi jalan angkut

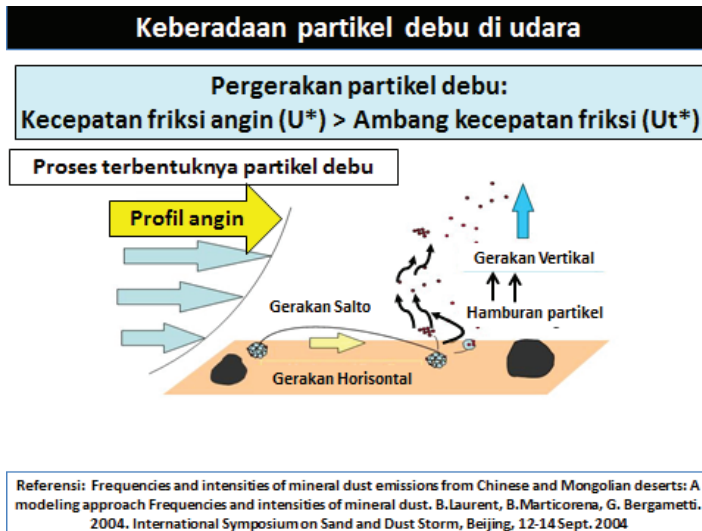
No	Jarak dari tepi jalan	Konsentrasi Debu Terendap rata-rata (ton.km ⁻² .bulan ⁻¹)					Keterangan sisi jalan	Baku Mutu *)
		P1	P2	P3	P4	P5		
1	1 meter	580,45	453,54	418,04	389,96	367,76	Kanan	10 ton/ km ² / bulan
		484,47	418,8	462,34	328,90	425,20	Kiri	
2	10 meter	237,70	189,64	203,72	108,02	144,40	Kanan	
		200,40	97,62	153,84	83,42	124,26	Kiri	
3	25 meter	92,76	64,24	76,68	64,50	63,30	Kanan	
		71,62	37,86	46,86	33,30	44,36	Kiri	
4	50 meter	42,50	28,92	31,64	26,10	30,90	Kanan	
		27,44	19,54	27,02	19,14	21,52	Kiri	
5	100 meter	19,00	12,42	14,42	7,50	13,68	Kanan	
		14,82	10,90	11,54	11,04	8,72	Kiri	

Keterangan: *) Menurut PPRI No. 41 Tahun 1999

P1: pengambilan sampel, hari ke-1; P2: pengambilan sampel, hari ke-5; P3: pengambilan sampel, hari ke-10; P4: pengambilan sampel, hari ke-20; P5: pengambilan sampel, hari ke-30; Sisi kanan jalan adalah sisi jalan truk batubara bermuatan ke arah pelabuhan atau stockpile. Sisi kiri jalan adalah sisi jalan truk batubara kosong menuju tambang.

Konsentrasi debu terendap yang terukur pada seluruh titik/lokasi menunjukkan konsentrasi yang tinggi, terutama debu terendap pada titik yang berada di tepi jalan yang hanya berjarak satu meter, terhitung konsentrasi *dust fall* tertinggi mencapai 580,45 ton.km⁻².bulan⁻¹ pada P1 (pengambilan sampel hari ke 1) dan yang terendah 328,90 ton.km⁻². bulan⁻¹ pada P4 (pengambilan sampel pada hari ke 20).

Konsentrasi rata-rata debu terendap pada titik 1 ini sangat tinggi, lebih dari 50 kali lipat dari baku mutu lingkungan yang ditetapkan (menurut PP RI No. 41 Tahun 1999, *dust fall* untuk kawasan pemukiman maupun kawasan industri adalah 10 ton.km⁻².bulan⁻¹) tingginya konsentrasi debu terendap ini sampai pada titik ukur yang terjauh (berjarak 100 meter dari sisi jalan) masih berada di atas baku mutu lingkungan yang berkisar 7,5-19,0 ton.km⁻².bulan⁻¹.



Gambar 6.1 Sketsa Gerakan Partikel Debu di Udara Atmosfir



Gambar 6.2 Foto-foto truk dan jalan batubara

Tingginya konsentrasi debu terendap yang terukur ini disebabkan oleh beberapa hal sebagaimana dijelaskan berikut ini.



Kepadatan atau volume lalu lintas angkutan batubara, merupakan faktor utama dalam mendispersikan debu dari jalan angkut ke udara ambien. Peran lalu lintas angkutan batubara ini sebagai sumber debu ataupun yang berperan sebagai pemicu terdispersinya debu dari jalan akibat dari lintasannya, tercatat volume lalu lintas yang terjadi cukup padat dan volume lalu lintas ini merata sepanjang waktu selama 24 jam, sehingga emisi debu bersifat terus menerus atau kontinyu.

Volume lalu lintas yang terjadi di jalan khusus angkutan batubara selama 24 jam adalah mobil roda 4 sebanyak 108 unit dan 148 unit, truk kapasitas 8 ton sebanyak 31 unit dan 56 unit dan truk kapasitas 20 ton atau lebih sebanyak 3.338 unit dan 1.982 unit.

Faktor penting yang berkaitan dengan emisi debu oleh aktifitas lalu lintas angkutan batubara ini adalah kepadatan / volume lalu lintas itu sendiri; jumlah truk angkutan batubara yang berkapasitas 20 ton yang merupakan unit angkutan utama di jalan ini tercatat lintasannya mencapai 3.338 unit setiap hari atau 139 unit setiap jam.

Tingginya kadar debu di sekitar jalan, terutama jalan khusus angkutan batubara ini bersesuaian dengan beberapa penelitian terdahulu, seperti; Eastwood, 2008; menyimpulkan bahwa jalur angkutan batubara pada daerah yang memiliki areal tambang diidentifikasi sebagai sumber emisi utama untuk pencemar udara berupa partikulat, oleh Holgate, 1999; Di beberapa negara maju kontribusi partikulat dari transportasi jalan raya jauh lebih tinggi dibandingkan sumber-sumber lainnya dan oleh Phalen, 2003; Dispersi partikulat paling besar disebabkan terangkatnya debu dari jalan yang tidak diaspal akibat roda kendaraan dan sebagian kecil lagi diakibatkan komponen kendaraan seperti ausnya roda, rem, knalpot dan penggunaan katalis dalam bahan bakar. Dengan demikian volume kendaraan sangat erat hubungannya dengan konsentrasi partikulat di udara ambien.

Emisi debu atau partikulat oleh aktifitas jalan raya menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan polutan gas yang juga diemisikan oleh kendaraan, hal ini disebabkan karena kondisi jalan yang materialnya



kurang kompak, sehingga saat adanya perlintasan kendaraan (yang bobotnya sangat berat) menyebabkan terjadinya gesekan antara roda kendaraan dengan badan jalan, disamping terjadinya turbulensi udara sehingga kombinasi dua hal tersebut memicu terdispersinya partikel ke udara sekitar lintasan jalan. Sedangkan polutan gas sifatnya mudah terencerkan setelah keluar dari sumber emisinya (knalpot).

Emisi debu dari jalan angkut batubara dapat diestimasi menggunakan persamaan dari Needham and Brooks, 1998 berikut:

$$E = k \cdot 1,7 \left(\frac{s}{12} \right) \left(\frac{S}{48} \right) \left(\frac{W}{2,7} \right)^{0,7} \left(\frac{w}{4} \right) \left(\frac{365-p}{365} \right), \text{ (Needham and Brooks, 1998)}$$

dimana: E: faktor emisi debu dari jalan angkut; k: konstanta ukuran partikulat (k); $2,5 \mu\text{m} = 0,095$; $15 \mu\text{m} = 0,5$; $5,0 \mu\text{m} = 0,2$; $30 \mu\text{m} = 0,8$; $10 \mu\text{m} = 0,36$; all particle = 1 (*dust fall*); s : prosentase kandungan partikulat dari permukaan jalan (%); S: rata-rata kecepatan kendaraan (km/jam); W: rata-rata bobot kendaraan (ton); w: rata-rata jumlah roda; P: jumlah hari hujan dengan curah 3 0,254 mm dalam satu tahun.

Dengan kondisi jalan angkut batubara dalam keadaan basah karena disiram dan diperkirakan kandungan partikulat pada badan jalan (s) hanya 5% (termasuk ceceran batubara dari muatan truk). Rata-rata kecepatan truk (S) = 40 km.jam^{-1} dengan bobot (W) = 40 ton.truk^{-1} dan jumlah roda (w) = 10 buah. Jumlah hari hujan pertahun = 91 hari (BPS Kab. Tapin). Maka emisi partikulat per unit truk batubara adalah:

$$E = 1 \times 1,7 \left(\frac{5}{12} \right) \left(\frac{40}{48} \right) \left(\frac{40}{2,7} \right)^{0,7} \left(\frac{10}{4} \right) \left(\frac{365-91}{365} \right)$$

$$= 7,31041 \text{ kg/km per truk}$$

Jika jumlah truk yang melintas di jalan mencapai 3.338 unit perhari, maka jumlah partikulat yang terdispersi per km jalan angkut adalah $E = 7,31041 \text{ kg.km}^{-1}.\text{truk}^{-1} \times 3.338 \text{ truk.hari}^{-1} = 24.402,1$



kg.km⁻¹.hari⁻¹, dan emisi partikulat setiap bulannya adalah: 24.402,1 kg.km⁻¹.hari⁻¹ x 30 hari.bulan⁻¹ = 732.064 kg.km⁻¹.bulan⁻¹ atau 732,1 ton.km⁻¹.bulan⁻¹ (hasil pengukuran *dust fall* pada jarak 1 meter di tepi jalan menunjukkan bahwa angka *dust fall* terhitung ini berada dalam kisaran debu yang terukur).

Hasil penelitian ini menunjukkan kesesuaian antara konsentrasi debu terendap yang terukur di lapangan menggunakan alat, dengan hasil perhitungan menggunakan formula Needham and Brooks (1998), atau dengan kata lain formula tersebut dapat digunakan untuk menduga emisi debu oleh aktifitas jalan angkut batubara.

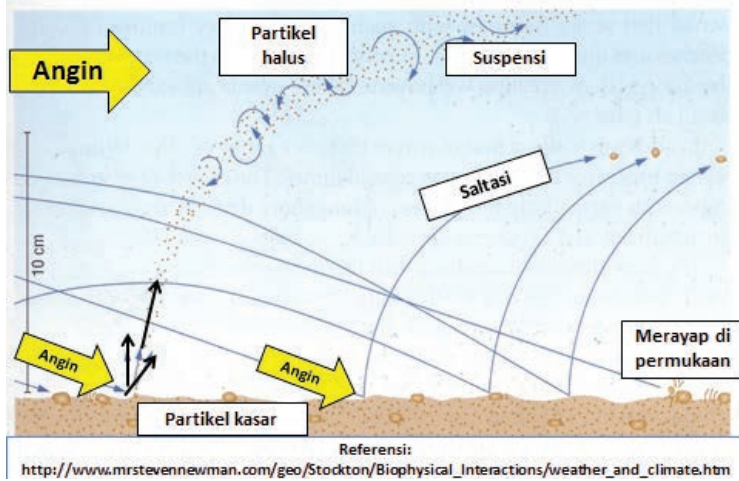
Faktor ke dua adalah kecepatan kendaraan; hasil observasi menunjukkan bahwa kecepatan kendaraan pengangkut batubara di jalan angkut adalah 30-40 km.jam⁻¹ pada saat bermuatan dan saat arus balik truk yang kosong yang mencapai 60 km.jam⁻¹.

Tingginya kecepatan kendaraan angkutan batubara di jalan ini memang dimungkinkan oleh pemilik jalan, karena rambu-rambu yang dipasang pada jalan lurus, kecepatan maksimal dump truk adalah maksimal 60 km.jam⁻¹ dan pada saat akan memasuki jalan berbelok (tikungan) kecepatan maksimalnya 40 km.jam⁻¹ (Gambar 6.3) dan kecepatan kendaraan roda 4 untuk mobil sarana (staf) diperkenankan maksimal 70 km.jam⁻¹.

Lintasan kendaraan dengan kecepatan sedang (60–70 km.jam⁻¹) ini menimbulkan hembusan angin yang kuat sehingga material padat dan ringan yang ada di jalan dapat terdispersi ke udara sebagai partikel debu.



Pukulan angin menghancurkan dan mengangkat partikel debu dari muka tanah



Gambar 6.3. Sketsa pukulan angin mengangkat partikel debu dari permukaan tanah.





Gambar 6.4 Rambu batas kecepatan *dump truck* dan kendaraan staf



Gambar 6.5 Rambu batas kecepatan di tikungan

Faktor ke tiga yang menyebabkan tingginya konsentrasi debu terendap di sekitar jalan angkut batubara ini adalah terdapatnya ceceran material batubara di sepanjang jalan. Banyaknya ceceran



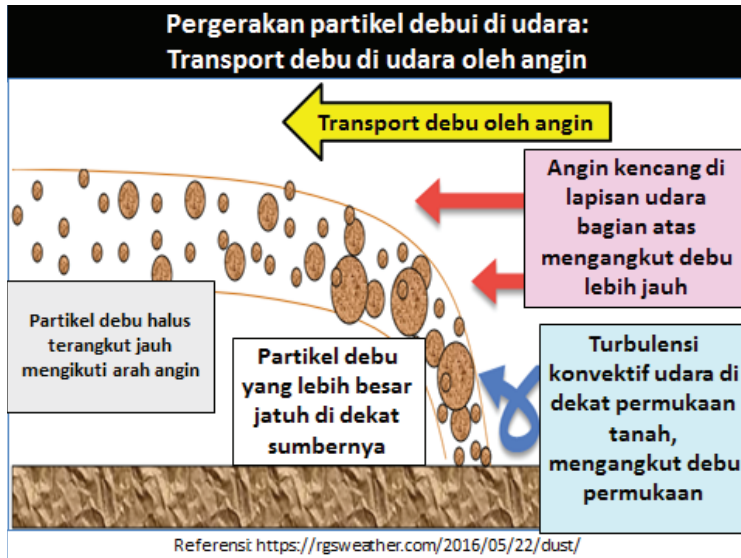
batubara di badan jalan di sepanjang jalan ini disebabkan karena muatan *dump truck* pengangkut yang berlebih, bahkan melebihi dari ketinggian bak-nya, sehingga ceceran terus terjadi di sepanjang jalan angkut (Gambar 6.6).

Ceceran batubara ini saat dilintasi oleh kendaraan akan mudah terbang menjadi debu, karena material batubara yang relatif lebih rapuh dibandingkan batuan. Faktor ini diperparah lagi dengan keadaan jalan yang kering, terlihat pada Tabel 6.2 adanya penyiraman jalan angkut batubara ini hanya pada jam-jam tertentu saja, sedangkan hal yang memicu terdispersinya debu oleh lalu lintas terjadi sepanjang waktu dan hampir merata setiap jamnya.



Gambar 6.6 Foto Truk angkutan batubara dengan muatan berlebih.





Gambar 6.6 Sketsa pengangkutan debu di udara oleh angin.

Faktor lain yang juga mendukung dispersi debu ke lingkungan sekitar jalan angkut batubara ini adalah suhu udara dan kelembaban udara, dua faktor ini berkaitan dengan sifat debu (Patty, 1976); Debu memiliki gaya berat (*settling rate*) karena itu dengan adanya gravitasi bumi maka debu akan dapat mengendap setelah beberapa saat di udara, kecepatan pengendapan partikel debu dari udara ke tanah sangat dipengaruhi oleh ukuran partikelnya, semakin besar ukuran partikel debu maka semakin cepat mengendapnya dan ini berarti sebaran debunya tidak jauh.

Sifat debu yang kedua yang berhubungan dengan kecepatan mengendapnya adalah debu dapat menggumpal dan membentuk flok yang lebih besar saat partikel debu tersebut basah (*wetting*) diselimuti oleh uap air karena tingginya kelembaban udara; pada keadaan partikel debu basah tersebut memudahkan terbentuknya flok (bersatunya beberapa partikel debu = *flocculation*) sehingga membentuk partikel yang berukuran lebih besar dengan demikian gaya beratnya bertambah dan cepat mengendap, pada keadaan demikian sebaran debu lebih kecil, namun sebaliknya saat suhu udara



tinggi dan kelembaban udara yang rendah akan mendukung dispersi debu di udara.

Kombinasi dari sifat debu; settling rate, wetting dan flocculation menentukan jauh dan tidaknya sebaran debu yang ditransportasikan oleh angin. Suhu udara saat observasi di lapangan, menunjukkan bahwa pada siang hari dapat mencapai 40,9°C, dengan kelembaban udara yang rendah yaitu 53,5%, pada kondisi demikian sangat mendukung dispersi debu dari jalan ke lingkungan sekitarnya (Tabel 6.2)

Faktor kondisi jalan juga menjadi pendukung dalam dispersi debu; kondisi jalan yang materialnya kurang kompak kepadatannya (jalan hanya terdiri dari pemadatan tanah dengan campuran batu split), juga menjadi pemicu dispersi debu.

Pada keadaan kondisi jalan yang kurang kompak ini faktor kebasahan akan berpengaruh besar. Tercatat saat observasi dalam sehari ada sekitar 16 dan 24 kali penyiraman jalan, namun penyiraman jalan ini tidak merata dalam 24 jam, sehingga pada jam-jam tertentu tidak terjadi penyiraman (Tabel 6.2).

Tabel 6.2. Hasil Observasi Suhu dan Kelembaban Udara, serta Frekuensi Penyiraman Jalan

Jam (WITA)	Observasi ke -1			Observasi ke-2		
	Suhu (°C)	Kelembaban Udara (%)	Penyiram- an (kali)	Suhu (°C)	Kelembaban Udara (%)	Penyiram- an (kali)
12.00	34,1	65,0	-	34,0	73,3	-
13.00	40,9	53,5	1	33,9	68,7	2
14.00	36,9	61,0	3	34,9	65,8	3
15.00	30,4	76,8	1	32,2	79,5	3
16.00	28,8	77,5	1	30,2	79,1	2
17.00	27,2	81,4	-	27,5	83,1	1
18.00	26,4	82,2	-	27,1	83,2	-
19.00	26,1	83,2	-	26,6	84,2	1
20.00	25,3	85,4	2	25,4	87,2	2
21.00	25,1	88,1	2	24,8	90,6	1
22.00	25,0	87,9	-	25,1	90,8	1
23.00	25,0	86,3	-	24,8	90,9	-
00.00	24,4	88,8	-	23,7	93,3	-
01.00	24,2	89,6	-	24,6	90,8	-



02.00	24,0	90,5	-	24,5	91,6	1
03.00	24,9	87,3	-	24,7	91,1	-
04.00	23,9	88,4	-	24,9	90,3	-
05.00	23,5	89,8	-	25,1	89,0	-
06.00	23,6	88,4	-	23,6	92,7	-
07.00	24,2	88,7	-	26,5	89,3	-
08.00	26,4	85,8	-	27,5	87,4	1
09.00	28,6	82,1	2	29,6	82,8	2
10.00	29,1	79,9	2	31,8	77,0	2
11.00	30,9	73,9	2	37,5	65,9	2

Pola Sebaran Debu

Jenis debu yang massanya lebih berat akan segera jatuh ke permukaan tanah, seperti; debu logam besi atau Fe (hasil dari proses *grinding*) dengan berat jenis 7,86 tentu lebih berat dari debu batubara dengan berat jenis yang hanya 1,3; dalam hal ini jika ukuran partikel debu logam (besi) dan debu batubara adalah sama maka tentu debu logam (besi) akan lebih berat bobotnya karena massa jenisnya yang lebih berat.

Demikian dengan adanya perbedaan ukuran partikel debu, secara alami; debu dari sumber yang sama (sejenis) dengan ukuran partikelnya lebih besar akan memiliki massa yang lebih berat dan dalam hal ini debunya akan lebih cepat jatuh ke permukaan tanah hanya beberapa meter dari sumber emisinya.

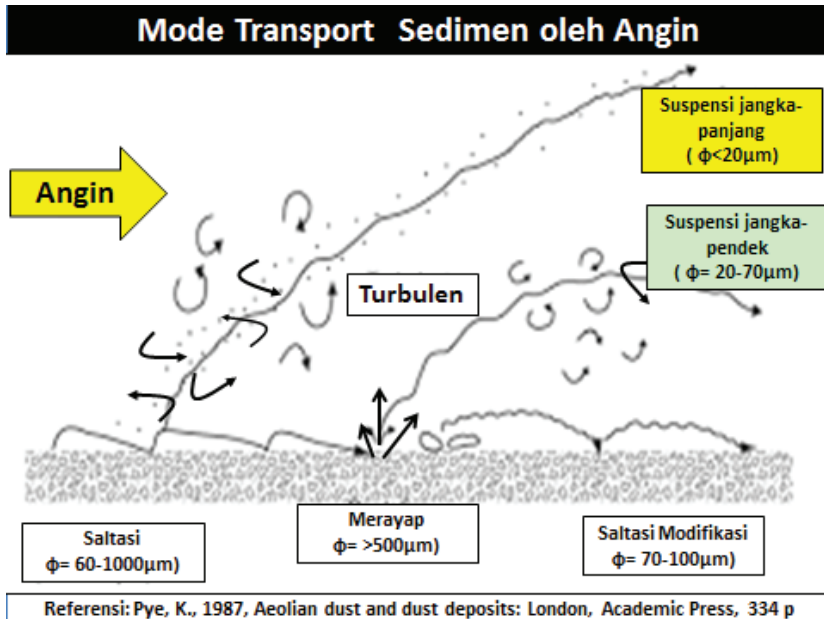
Pusat Penelitian Lingkungan Hidup Universitas Lambung Mangkurat (PPLH Unlam, 2001) Banjarmasin, pernah melakukan penelitian sebaran debu batubara yang termasuk kategori debu melayang (*total suspended particulate*) di tahun 2001.

Hasil peneltian tersebut menunjukkan bahwa sebaran debu melayang dapat mencapai sejauh 529 meter dari sumbernya yaitu jarak sebaran tersebut adalah pada konsentrasi debu yang berada di batas baku mutu yang ditetapkan, untuk TSP yaitu $230 \mu\text{g.m}^{-3}$.

Sedangkan hasil penelitian ini terhadap jenis debu terendap atau *dust fall* yang merupakan partikel debu dengan ukuran yang



lebih besar lagi dari TSP, sehingga sebaran *dust fall* ini terjauh hanya 109,3 meter dari sumbernya. Mode transport suspensi di udara oleh angin (Pye, 1987) dapat melintasi jarak yang lebih jauh dibandingkan dengan mode saltasi dan mode rayakan pada partikel yang ukurannya lebih besar (Gambar 6.6).



Gambar 6.6 Suspensi partikel halus dapat melintasi jarak yang jauh.

Perbedaan ini sangat sesuai karena obyek penelitian yang berbeda, pada penelitian yang dilakukan oleh PPLH Unlam (2001) adalah terhadap debu melayang atau total suspended partikulat, yaitu partikel yang berukuran ≤ 10 mikron (konstanta partikel $k=0,36$).

Karakteristik debu jenis ini adalah dapat melayang di udara dan akan menyebar lebih jauh dengan hembusan angin. Sedangkan pada penelitian ini adalah terhadap debu terendap (*dust fall*, dengan konstanta partikel $k=1$), yang ukuran partikelnya ≤ 50 mikron, sesuai dengan namanya debu terendap ini ukuran partikelnya lebih besar dibandingkan dengan debu melayang (TSP), sehingga memiliki gaya gravitasi yang lebih besar pula, dengan demikian lebih cepat turun



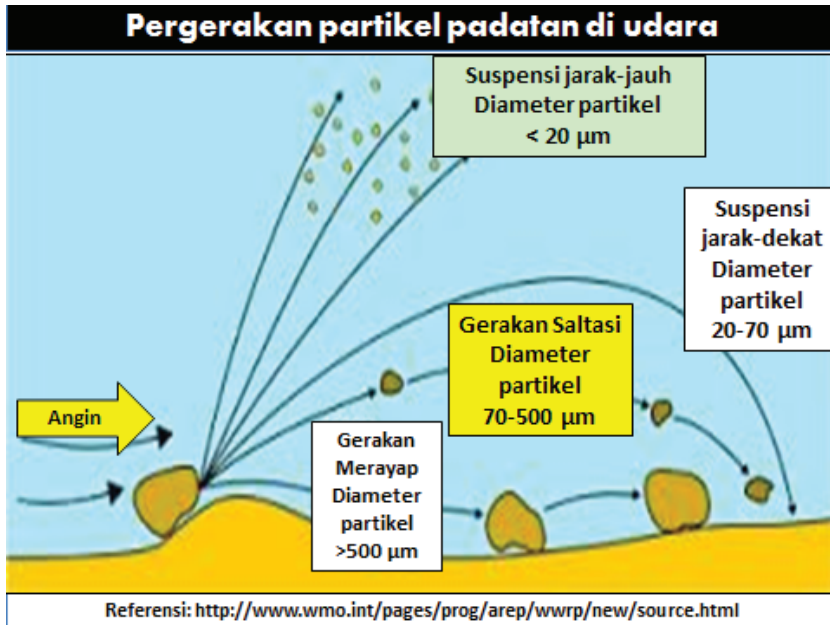
dari udara, sehingga sebarannya lebih dekat dibandingkan dengan sebaran debu melayang (TSP).

Tingginya konsentrasi debu terdendap (*dust fall*) yang terukur, bahkan pada titik sampel terjauh yaitu 100 meter dari tepi jalan konsentrasinya sebagian besar masih melebihi baku mutu yang ditetapkan (PPRI No. 41 tahun 1999), mendorong untuk diketahui sampai pada titik mana konsentrasi debu terendap ini akan memenuhi baku mutu, untuk keperluan ini dilakukan pemodelan sebaran debu secara matematis (statistik) yang menghubungkan antara konsentrasi debu sebagai variabel dependen dengan jarak dari tepi jalan sebagai variabel bebasnya.

Pola sebaran debu secara matematis ini dibuat dalam berbagai model, yaitu; pola sebaran secara linier, kuadratik, logaritmik dan eksponensial. Keputusan pemilihan model statistik sebaran debu didasarkan pada:

1. Kemaknaan secara statistik, yaitu dengan melihat tingkat signifikan $< 0,05$ (5%).
2. Melihat tingkat keeratan hubungan antara variabel independen (jarak) terhadap variabel dependen (debu terendap), dalam hal ini didasarkan atas nilai koefisien korelasi (R^2).
3. Terpenting dari semua adalah didasarkan atas kecocokan antara konsentrasi debu yang diperoleh melalui model dengan angka hasil observasi debu secara faktual di lapangan (verifikasi model dengan data lapangan).





Gambar 6.6 Sketas pergerakan partikel di udara yang dipengaruhi oleh diameternya.

Tabel 6.3 Beberapa Model Matematis Pola Sebaran *Dust Fall*

No	Model	Nilai R ²	Proba-bilitas	Persamaan Matematis	Ket.
Periode pengambilan sampel hari ke 1 (P1)					
1	Linier	0,463	0,000	Y = 274,791 – 3,175 (X)	Kanan
		0,434	0,001	Y = 326,604 – 2,798(X)	Kiri
2	Logaritmik	0,888	0,000	Y = 521,013 – 119,115 Ln (X)	Kanan
		0,884	0,000	Y = 463,835 – 108,174 Ln (X)	Kiri
3	Kuadratik	0,765	0,000	Y = 423,881 – 13,610 (X) + 0,097 (X ²)	Kanan
		0,757	0,000	Y = 376,932 – 12,617 (X) + 0,091 (X ²)	Kiri
4	Eksponensial	0,823	0,000	Y = 265,073 e ^{-0,030X}	Kanan
		0,774	0,000	Y = 206,457 e ^{-0,030X}	Kiri
Periode pengambilan sampel hari ke 5 (P2)					
1	Linier	0,404	0,001	Y = 224,947 – 2,670 (X)	Kanan
		0,333	0,005	Y = 132,638 – 1,548 (X)	Kiri
2	Logaritmik	0,829	0,000	Y = 442,872 – 103,566 Ln (X)	Kanan
		0,778	0,000	Y = 271,890 – 64,086 Ln (X)	Kiri

3	Kuadratik	0,702	0,000	$Y = 357,890 - 11,799 (X) + 0,086 (X^2)$	Kanan
		0,713	0,000	$Y = 215,153 - 7,322 (X) + 0,053 (X^2)$	Kiri
4	Eksponsensial	0,770	0,000	$Y = 197,042 e^{-0,031X}$	Kanan
		0,739	0,000	$Y = 106,183 e^{-0,026X}$	Kiri
Periode pengambilan sampel hari ke 10 (P3)					
1	Linier	0,462	0,001	$Y = 205,486 - 2,342 (X)$	Kanan
		0,383	0,002	$Y = 195,696 - 2,334 (X)$	Kiri
2	Logaritmik	0,742	0,000	$Y = 363,160 - 80,347 \ln (X)$	Kanan
		0,866	0,000	$Y = 400,741 - 95,093 \ln (X)$	Kiri
3	Kuadratik	0,713	0,000	$Y = 305,661 - 9,351 (X) + 0,065 (X^2)$	Kanan
		0,698	0,000	$Y = 318,865 - 10,953 (X) + 0,080 (X^2)$	Kiri
4	Eksponsensial	0,801	0,000	$Y = 197,875 e^{-0,029X}$	Kanan
		0,798	0,000	$Y = 165,460 e^{-0,030X}$	Kiri

Keterangan: Y: Konsentrasi debu terendap (ton/km²/bulan); X: Jarak (meter); Sisi kanan jalan adalah sisi jalan truk batubara bermuatan ke arah pelabuhan atau stockpile ; Sisi kiri jalan adalah sisi jalan truk batubara kosong menuju tambang.

Tabel 6.3 Beberapa Model Matematis Pola Sebaran *Dust Fall* (lanjutan)

No	Model	Nilai R ²	Probabilitas	Persamaan Matematis	Ket.
Periode pengambilan sampel hari ke 20 (P4)					
1	Linier	0,363	0,009	Y = 175,024 – 2,081 (X)	Kanan
		0,225	0,026	Y = 147,086 – 1,767 (X)	Kiri
2	Logaritmik	0,839	0,000	Y = 360,904 – 85,742 Ln (X)	Kanan
		0,639	0,000	Y = 329,641 – 80,552 Ln (X)	Kiri
3	Kuadratik	0,621	0,000	Y = 277,084 – 9,222 (X) + 0,066 (X ²)	Kanan
		0,461	0,003	Y = 251,970 – 9,106 (X) + 0,068 (X ²)	Kiri
4	Eksponen-sial	0,825	0,000	Y = 163,995 e ^{-0,033X}	Kanan
		0,659	0,000	Y = 98,564 e ^{-0,026X}	Kiri
Periode pengambilan sampel hari ke 30 (P5)					
1	Linier	0,523	0,000	Y = 153,475 – 1,694 (X)	Kanan
		0,305	0,008	Y = 193,179 – 2,367 (X)	Kiri
2	Logaritmik	0,852	0,000	Y = 268,911 – 58,552 Ln (X)	Kanan
		0,783	0,000	Y = 421,351 – 102,777 Ln (X)	Kiri



3	Kuadrat	0,785	0,000	$Y = 223,153 - 6,569 (X) + 0,045 (X^2)$	Kanan
		0,589	0,000	$Y = 326,032 - 11,663 (X) + 0,086 (X^2)$	Kiri
4	Eksponensial	0,787	0,000	$Y = 152,013 e^{-0,027X}$	Kanan
		0,796	0,000	$Y = 153,384 e^{-0,032X}$	Kiri

Keterangan: Y: Konsentrasi debu terendap (ton/km²/bulan); X: Jarak (meter); Sisi kanan jalan adalah sisi jalan truk batubara bermuatan ke arah pelabuhan atau stockpile; Sisi kiri jalan adalah sisi jalan truk batubara kosong menuju tambang.

Hasil pemodelan seperti terlihat pada Tabel 6.3, dilakukan secara terpisah antar periode pengambilan sampel karena nilai rata-rata konsentrasi debu terendapnya memiliki rentang yang cukup jauh. Secara statistik seluruh model sebaran debu terendap (Tabel 6.3) adalah signifikan namun dilihat dari nilai R²-nya yang menunjukkan ketergantungan variabel dependen (debu terendap) oleh variabel independen (jarak) tertinggi ada pada model matematis secara eksponensial dibandingkan dengan nilai R² pada model lainnya, sehingga berdasarkan hal tersebut maka model sebaran debu terendap secara eksponensial lebih baik digunakan untuk menduga kadar debu terendap pada jarak tertentu dari jalan angkut batubara.

Nilai R² pada model eksponensial ini terendah adalah 0,659 (pada debu di sebelah kiri jalan periode ke-4) dan tertinggi 0,825 (pada debu di sebelah kanan jalan periode ke-4), nilai ini dapat diartikan bahwa 65,9% s.d 82,5% konsentrasi debu terendap yang terukur dipengaruhi oleh jaraknya terhadap jalan angkut batubara, sedangkan sisanya 17,5% s.d 34,1% ditentukan oleh faktor lainnya, dalam hal ini adalah; kecepatan kendaraan, kondisi jalan (penyiraman jalan), suhu dan kelembaban udara dan arah maupun kecepatan angin.



DISPERSI DEBU DI UDARA

Partikel debu bercampur dengan massa udara dan diencerkan melalui proses dispersi atmosfer.

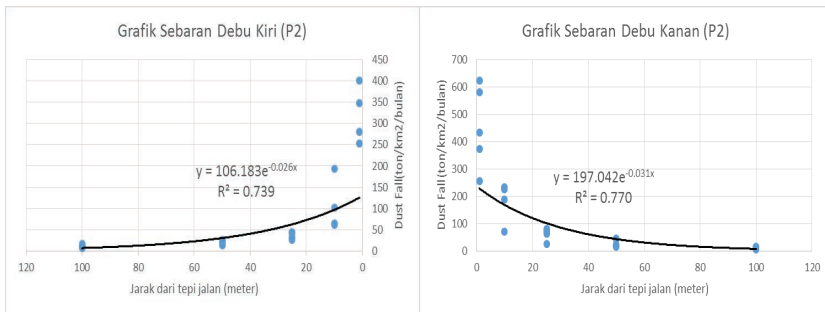
Dispersi ini disebabkan oleh turbulensi udara dan aliran udara (angin)

Kondisi meteorologis yang buruk dapat menyebabkan masalah pencemaran udara oleh partikel debu.

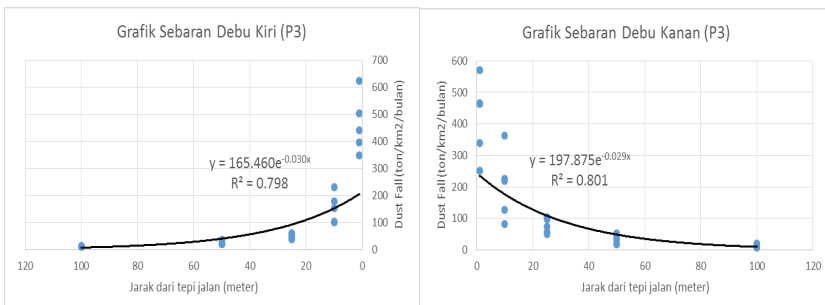
Faktor-Faktor yang mempengaruhi dispersi debu di atmosfer:

1. Kecepatan perubahan suhu dengan ketinggian tempat (Laps rate)
2. Tekanan udara
3. Angin
4. Kelembaban udara.

Gambar 6.7 Dispersi partikel debu di udara atmosfer

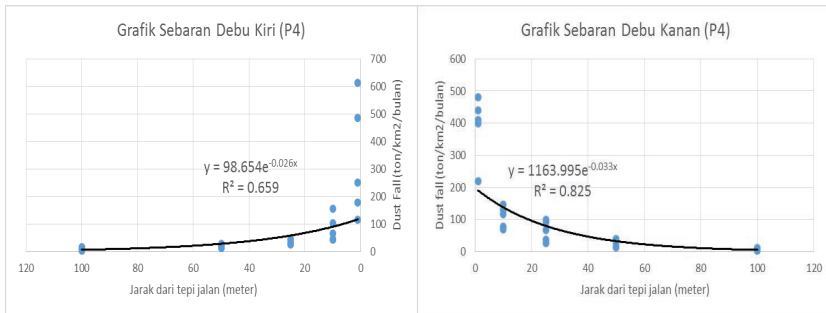


Gambar 6.8 Pola sebaran debu terendap pada pengambilan sampel hari ke-5 (P2).

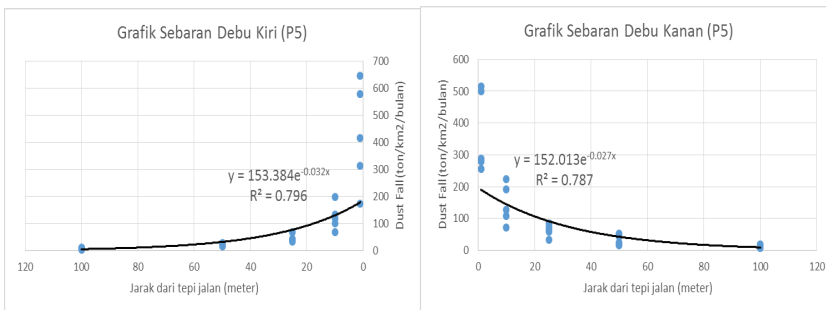


Gambar 6.9 Pola sebaran debu terendap pada pengambilan sampel hari ke-10 (P3)





Gambar 6.10 Pola sebaran debu terendap pada pengambilan sampel hari ke-20 (P4).



Gambar 6.11 Pola sebaran debu terendap pada pengambilan sampel hari ke-30 (P5)

Menurut model sebaran debu seperti yang terlihat pada Gambar 6.8 s/d. Gambar 6.11, dapat dihitung konsentrasi debu terendap yang sesuai dengan baku mutu lingkungan yang ditetapkan oleh PP Nomor 41 Tahun 1999, yaitu sebesar 10 ton.km⁻².bulan⁻¹, angka baku mutu ini dimasukan sebagai harga Y untuk selanjutnya memperhitungkan jarak atau X pada konsentrasi debu terendap tersebut, selengkapnya hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 6.4.



Tabel 6.4 Perhitungan jarak dari tepi jalan pada batas konsentrasi debu terendap sesuai baku mutu lingkungan

No	Periode	Sisi Jalan	Persamaan Matematis Eksponensial	Jarak (meter) pada kadar debu sesuai BML (10 ton.km ⁻² bulan ⁻¹)
1	Hari ke 1	Kanan	$Y = 265,073 e^{-0,030X}$	109,2
		Kiri	$Y = 206,457 e^{-0,030X}$	100,9
2	Hari ke-5	Kanan	$Y = 197,042 e^{-0,031X}$	96,2
		Kiri	$Y = 106,183 e^{-0,026X}$	90,9
3	Hari ke-10	Kanan	$Y = 197,875 e^{-0,029X}$	102,9
		Kiri	$Y = 165,460 e^{-0,030X}$	93,5
4	Hari ke-20	Kanan	$Y = 163,995 e^{-0,033X}$	84,8
		Kiri	$Y = 98,564 e^{-0,026X}$	88,0
5	Hari ke-30	Kanan	$Y = 152,013 e^{-0,027X}$	100,8
		Kiri	$Y = 153,384 e^{-0,032X}$	85,3

Keterangan: Y: Konsentrasi debu terendap (ton.km². bulan⁻¹); X: Jarak (meter); Sisi kanan jalan adalah sisi jalan truk batubara bermuatan ke arah pelabuhan (stockpile); Sisi kiri jalan adalah sisi jalan truk batubara kosong menuju tambang.

Sebaran di sebelah kanan jalan sedikit lebih jauh dibandingkan dengan sebaran ke sebelah kiri jalan, walaupun ini merupakan sisi jalan truk bermuatan yang kecepatan kendaraannya lebih rendah dari sisi jalan sebelah kanan, namun hal ini bersesuaian dengan arah angin selama periode penelitian yang dominan mengarah ke Tenggara (135°), seperti terlihat pada Tabel 5.8.

Angin berperan besar dalam menentukan arah sebaran polutan termasuk debu, arah angin yang konstan akan mengangkut polutan ke arah yang jelas, sedangkan arah angin yang bervariasi akan menghasilkan sebaran polutan yang acak (Holgate, 1999) dan sesuai arah anginnya maka di sisi sebelah kanan jalan yang sebaran debunya lebih jauh adalah merupakan posisi hilir angin (*downwind*) (Gambar 6.12 dan Gambar 6.13).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa di sisi kanan jalan yang merupakan posisi hilir angin, sebaran debu terendapnya hanya sedikit lebih jauh dibanding sisi kiri jalan (posisi hulu angin), hal ini mengindikasikan beberapa hal berikut:

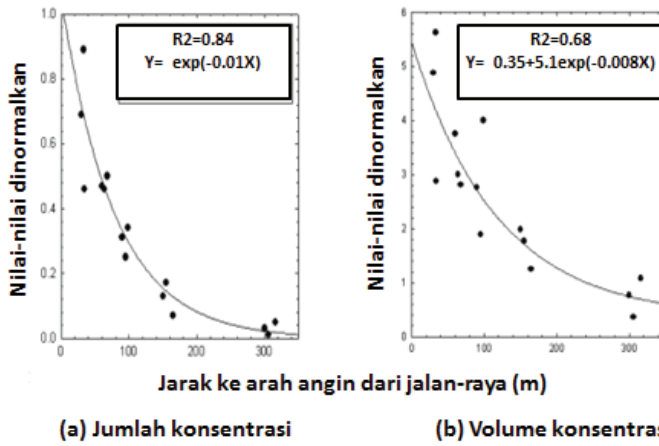


1. Bahwa debu yang diteliti adalah adalah *dust fall* atau total partikel yang berisi berbagai macam ukuran partikel, mulai dari 1 mikron sampai dengan > 50 mikron. Secara alami debu dengan ukuran partikel besar memiliki gaya gravitasi yang lebih berat sehingga partikel jenis ini akan segera jatuh setelah beberapa saat diudara dan hanya partikel yang termasuk kategori debu melayang yang ukurannya ≤ 10 mikron (*total suspended partikulat*) yang dapat melayang lebih jauh.
2. Jalan angkut batubara merupakan sumber emisi debu yang berada di permukaan (bukan pada suatu ketinggian, seperti cerobong), sehingga pencampuran partikel debu dari jalan angkut ke udara tidak terlalu tinggi, dengan demikian juga memperpendek penyebarannya.

Model sebaran debu yang terhitung tersebut di atas berlaku pada kondisi cuaca; suhu udara rata-rata 27°C , kelembaban rata-rata 84,2%, curah hujan rata-rata 323 mm.bulan⁻¹, hari hujan 17 hari, intensitas penyinaran matahari rata-rata 5,1 jam.hari⁻¹, kecepatan angin berkisar 3,92-8,79 km.jam⁻¹ dengan arah angin dominan Timur dan Tenggara (Tabel 5.3-5.8; data tahun 2015 pada bulan April, saat pelaksanaan penelitian dilakukan).



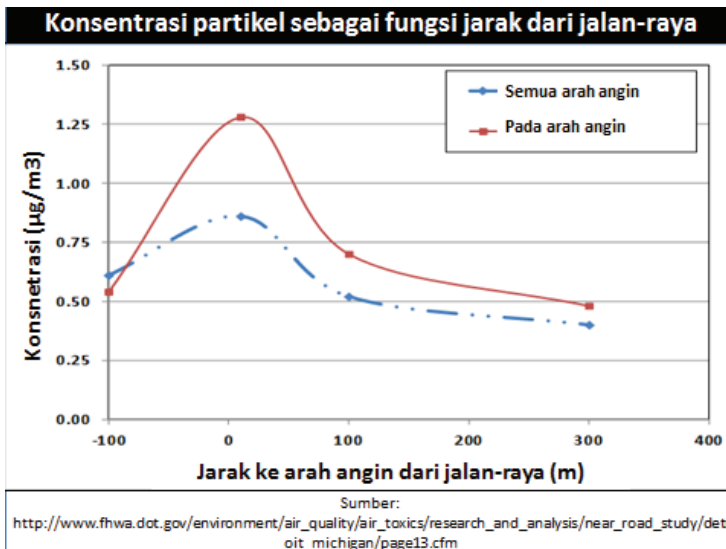
Decay Curves of Particle Concentration near the Freeways



Hinds, W.C., S. Constantinos, Z.Yifang. 2004. Relationship Between Ultrafine Particle Size Distribution and Distance From Highways. University of California - Los Angeles.

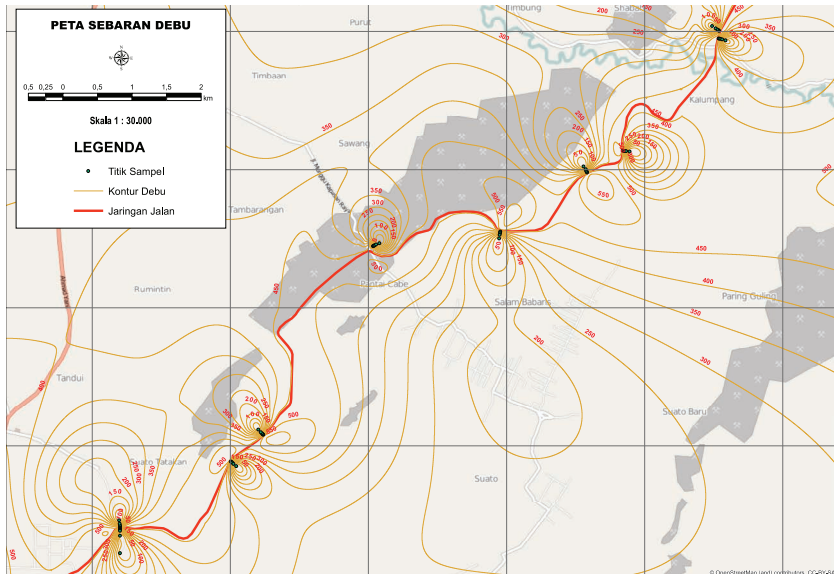
Gambar 6.12 Kurva sebaran partikel debu dengan jarak dari jalan raya

Model sebaran debu secara matematis di atas bersesuaian dengan model yang diperlihatkan melalui pengolahan data dengan *software* ArchGIS, seperti pada Gambar 6.14.



Gambar 6.13 Konsentrasi partikel debu di udara sebagai fungsi jarak dari jalan raya.





Gambar 6.14 (1) Visualisasi Pola sebaran Debu Terendap dengan ArchGIS



Keterangan:

DUST FALL (TON.KM ⁻² .BULAN ⁻¹)		
SISI KIRI JALAN	WARNA / JARAK (m)	SISI KANAN JALAN
97,5	25	125,2
46,1	50	59,1
21,8	75	27,9
10,3	100	13,2
4,9	125	6,2

Gambar 6.14 (3) Plotting Kontur Konsentrasi Debu Terendap Terhadap Jarak (potongan pada periode 1, sisi kanan dan kiri jalan)

Pada plotting Gambar 6.9, terlihat bahwa untuk sisi kanan jalan konsentrasi *dust fall* pada jarak 25 m = 125,2 ton.km⁻².bulan⁻¹, pada



jarak 50 m = 59,1 ton.km⁻².bulan⁻¹, pada jarak 75 m = 27,9 ton.km⁻².bulan⁻¹, pada jarak 100m = 13,2 ton.km⁻².bulan⁻¹ dan pada jarak 25m = 6,2 ton.km⁻².bulan⁻¹.

Sedangkan di sisi kiri jalan konsentrasi *dust fall* pada jarak 25 m = 97,5 ton.km⁻².bulan⁻¹, pada jarak 50 m = 46,1 ton.km⁻².bulan⁻¹, pada jarak 75 m = 21,8 ton.km⁻².bulan⁻¹, pada jarak 100 m = 10,3 ton.km⁻².bulan⁻¹ dan pada jarak 25 m = 4,9 ton.km⁻².bulan⁻¹.

Risiko Kesehatan

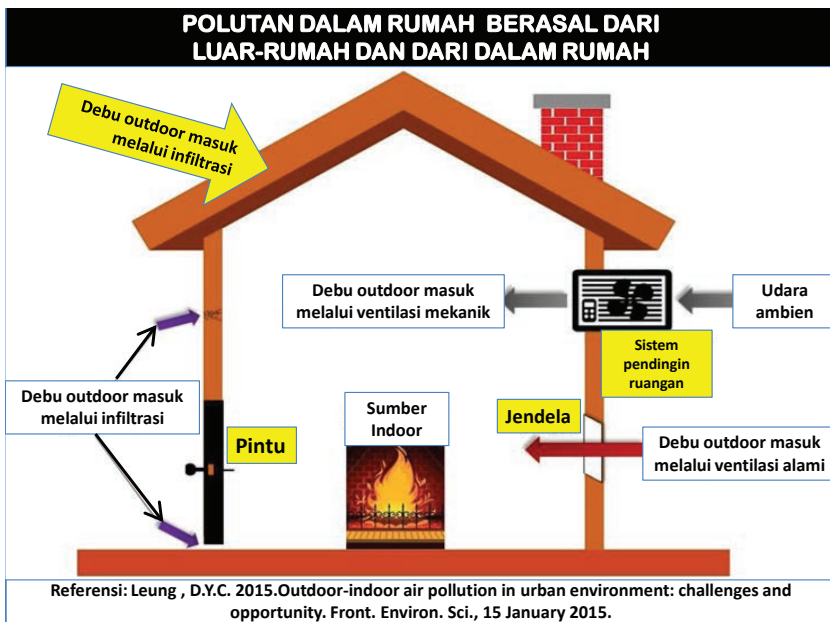
Risk atau risiko menurut Albernathy dan Roberts (1994) didefinisikan sebagai kemungkinan terjadinya kerusakan, penyakit atau kematian yang dihasilkan dari pajanan yang berasal dari agen-agen lingkungan. Sedangkan analisis risiko didefinisikan sebagai karakterisasi efek yang potensial merugikan kesehatan manusia yang disebabkan oleh pajanan bahaya lingkungan.

Dalam penelitian ini tidak menganalisis dampak pajanan debu yang ditegakan melalui diagnosis penyakit atau gejalanya, melainkan perbandingan terhadap sejumlah polutan debu yang masuk ke sistem pernapasan dibandingkan dengan konsentrasi referensi yang diturunkan dari konsentrasi yang tidak menyebabkan efek merugikan terhadap mahluk hidup dari suatu percobaan atau NOAEL (*No Observe Adverse Effect Level*).

Pendekatan penilaian pajanan dalam penelitian ini dilakukan dengan metode langsung, yaitu penilaian langsung setiap individu terpajan debu dengan mencatat konsentrasi debu dan terintegrasi dengan periode waktu tertentu. Pengukuran PM₁₀ (sebagai *risk agent*) dilakukan di tempat-tempat dimana individu terpajan menghabiskan waktunya selama sehari, juga mencatat periode waktu individu tersebut di tempat-tempat yang dimaksudkan (informasi waktu aktifitas). Penilaian pajanan dihitung dengan meng-gabungkan informasi yang tersedia dengan rumus matematis.



Individu terpajan atau subyek penelitian dalam menilai risiko kesehatan akibat pajanan debu ini adalah anak-anak usia sekolah dengan rentang usia 6-15 tahun (usia sekolah SD dan SLTP). Pemilihan subyek penelitian ini didasarkan atas pertimbangan mobilitas yang minimal. Individu terpajan dikelompokkan menjadi dua zona, yaitu individu yang tinggal dalam rumah di zona dengan konsentrasi debu udara di atas baku mutu lingkungan (yang tinggal dalam rumah dengan jarak ≤ 100 meter dari tepi jalan angkutan batubara) dan individu yang tinggal dalam rumah di zona dengan konsentrasi debu udara di bawah baku mutu lingkungan (yang tinggal dalam rumah yang berjarak > 100 meter). Penentuan zona debu ini berdasarkan perhitungan sebaran debu secara matematis, seperti yang telah diuraikan pada Bab VI.



Gambar 7.1 Debu di dalam rumah berasal dari lingkungan outdoor dan dari aktivitas di dalam rumah.



Gambar 7.2 Pemukiman penduduk yang berada di tepi jalan angkut batubara.

Setelah dilakukan sampling secara *accidental sampling*, yaitu mengambil unit atau individu yang tersedia pada saat pengumpulan data dilakukan, diperoleh subyek penelitian pada pemukiman penduduk di zona debu yang melebihi baku mutu sebanyak 25 anak.



Sampling pada pemukiman di zona debu di bawah baku mutu dilakukan dengan mengambil jumlah yang sama pada pemukiman di zona debu di atas baku mutu. Distribusi subyek penelitian berdasarkan usia dan jenis kelamin disajikan pada Table 7.1.

Tabel 7.1 Distribusi subyek penelitian menurut jenis kelamin dan usia, di masing-masing zona pemukiman

Jenis kelamin	Usia (tahun)	Zona Pemukiman		Total
		Debu > BML	Debu < BML	
Laki-laki	6	1	1	2
	8	3	3	6
	10	2	3	5
	11	1	0	1
	12	2	2	4
	13	1	1	2
	14	3	3	6
	15	1	1	2
	TOTAL	14	14	28
Perempuan	6	2	1	3
	7	2	1	3
	8	0	1	1
	9	1	1	2
	10	0	2	2
	11	4	3	7
	12	1	1	2
	13	1	0	1
	14	0	1	1
	TOTAL	11	11	22

Perbedaan usia terhadap subyek penelitian antara yang bermukim di zona debu di atas baku mutu, dengan yang bermukim di zona debu di bawah baku mutu, perbedaannya tidak signifikan yang diuji dengan *independent sample T test*.

Tabel 7.2 Perbandingan antropometri subyek penelitian

No	Parameter antropometri	T	Signifikansi	Keterangan
1.	Usia	0,108	0,915	Tidak berbeda
2.	Berat badan	1,264	0,212	Tidak berbeda
3	Tinggi badan	1,421	0,162	Tidak berbeda



Permukiman yang penghuninya paling berisiko terhadap pajanan debu di sekitar jalan khusus batubara, sebagai lokasi penelitian ini adalah permukiman yang berada di perpotongan antara jalan raya dengan jalan angkut batubara, dalam hal ini adalah permukiman penduduk di Desa Kalumpang Kecamatan Bungur Kabupaten Tapin.

Pemilihan desa ini berdasar kepada terdapatnya permukiman yang berbatasan langsung dengan jalan angkut batubara (sebagai zona lokasi yang konsentrasi debunya berada di atas baku mutu) serta permukiman yang berada di jarak > 100 meter (sebagai zona lokasi yang konsentrasi debunya berada di bawah baku mutu).

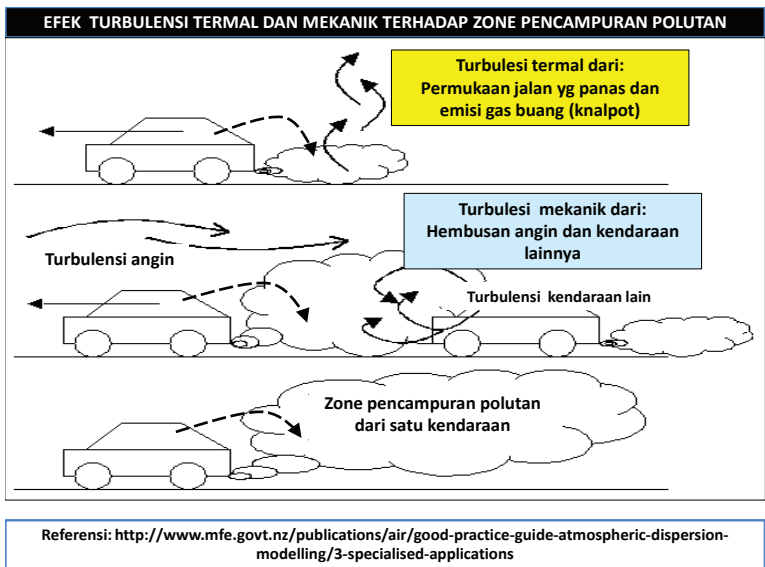
Perpotongan jalan angkut batubara dengan jalan umum, menyebabkan bertambahnya potensi pemanajan debu bagi penduduk sekitar, sehingga penduduk menerima pajanan debu dari dua sumber, yaitu;

1. Debu yang berasal dari jalan angkut batubara itu sendiri; Menurut hasil pemodelan sebaran debu secara matematis dalam penelitian ini diperoleh sebaran terjauh 109,2 meter (di sisi kanan dan kiri jalan), sebaran ini khusus untuk debu terendap atau *dust fall*. Sedangkan untuk sebaran debu melayang (*total suspended partikulat*) dapat mencapai 529 meter (PPLH Unlam, 2001)
2. Sumber kedua adalah debu yang berasal dari jalan raya. Perpotongan jalan angkut batubara dengan jalan raya menyebabkan akumulasi kotoran batubara di badan jalan raya, berupa akumulasi debu ataupun akumulasi kotoran yang tadinya menempel di roda kendaraan setelah keluar dari jalan angkut menuju jalan raya. Kotoran yang ada di badan jalan raya tersebut saat dilintasi oleh kendaraan akan mendispersikan debu ke lingkungan sekitarnya, terutama.

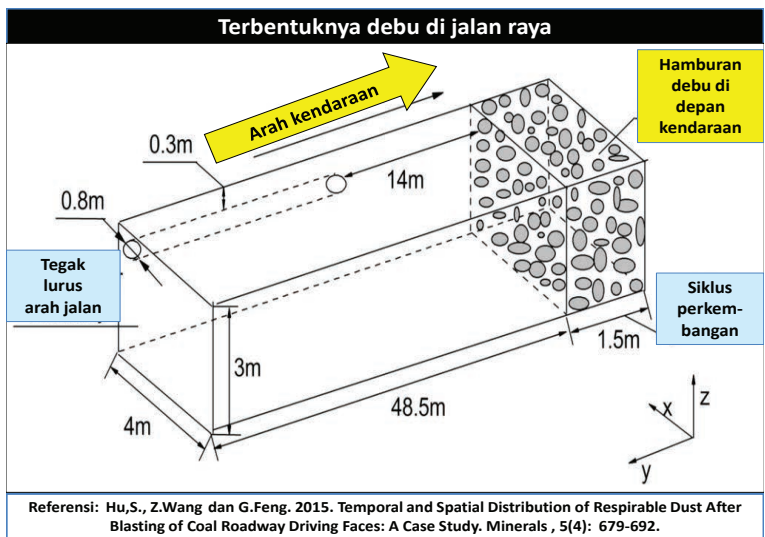
Berdasarkan hal tersebut, maka penilaian risiko kesehatan dari pajanan debu batubara, difokuskan di daerah yang berpotongan dengan jalan raya dan terdapat permukiman yang padat. Debu yang



menjadi asupan bagi penduduk di sekitar jalan angkut batubara ini adalah debu PM_{10} , yang hasilnya seperti pada Table 7.3.

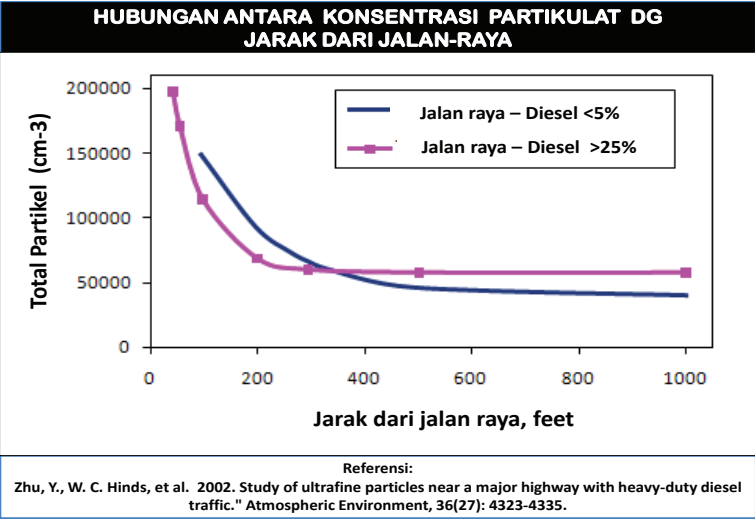


Gambar 7.3 Zone pencampuran polutan di belakang kendaraan pengangkut material di jalan raya



Gambar 7.4 Sketsa terbentuknya partikel debu oleh kendaraan angkut material di jalan raya





Gambar 7.5 Pola Dispersi partikel debu dari sisi jalan-raya

Tabel 7.3 Konsentrasi debu melayang (PM₁₀) di Pemukiman Penduduk Desa Kalumpang Kecamatan Bungur Kabupaten Tapin

Posisi Rumah	Konsentrasi debu PM ₁₀ (µg.m ⁻³)		Keterangan ; Kode individu terpajan
	Outdoor	Indoor	
> BML (kurang dari 100 meter dari tepi jalan angkut batubara)	190,4	181,2	1, 2
		148,8	3, 4
		116,4	5, 6, 7
		165,1	8, 9
		132,7	10, 11
		124,4	12, 13
		61,2	14, 15
		120,1	16, 17
		173,2	18
		144,9	19, 20, 21
		185,4	22, 23
		97,6	24, 25
< BML (lebih dari 100 meter dari tepi jalan angkut batubara)	83,4	137,6	Rerata
		32,6	26, 27
		47,4	28, 29, 30
		80,3	31, 32
		31,6	33



44,9	34, 35
82,2	36, 37
44,7	38, 39
43,2	40, 41
59,6	42, 43, 44
22,4	45, 46
54,8	47, 48
75,6	49, 50
51,6	Rerata

Konsentrasi debu PM_{10} yang terukur di luar rumah (*out door*) pada pemukiman di zona *dust fall* yang berada di atas baku mutu adalah $190,4 \mu g.m^{-3}$, konsentrasi debu PM_{10} ini telah melampaui baku mutu yang ditetapkan, yaitu maksimal $150 \mu g.m^{-3}$ artinya konsentrasi PM_{10} yang terukur bersesuaian dengan konsentrasi *dust fall*.

Bila diperhitungkan dengan nilai konstanta (k) menurut Needham dan Brokks (1998), bahwa nilai k dari PM_{10} adalah 0,36, sedangkan nilai k dari *dust fall* adalah 1 (dikategorikan sebagai *all particle*), maka dengan perbandingan dengan nilai konstanta tersebut, terhitung konsentrasi debu PM_{10} adalah konsentrasi rata-rata *dust fall* (Lampiran 1, lokasi 5 di titik 1 meter sebelah kanan= $447,9 \text{ ton.km}^{-2}.\text{bulan}^{-1}$) dikalikan dengan 0,36, atau $447,9 \times 0,36 = 161,2 \mu g.m^{-3}$, hasil perhitungan ini mendekati dengan hasil pengukuran, yaitu; $190,4 \mu g.m^{-3}$.

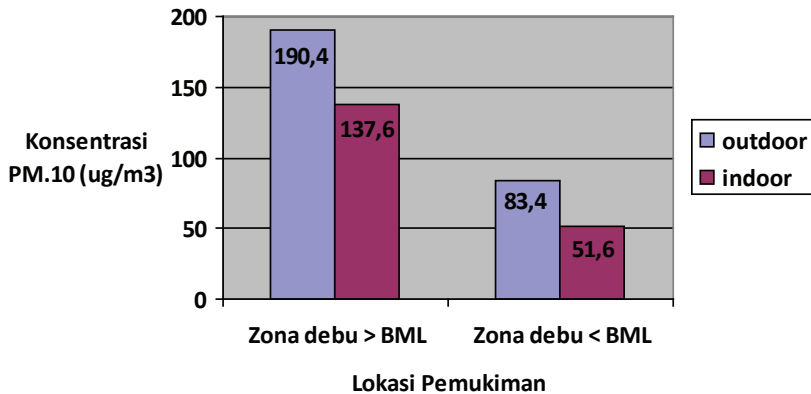
Konsentrasi PM_{10} udara di luar rumah (*outdoor*) lebih tinggi dibandingkan di dalam rumah (*indoor*), kondisi ini berlaku di daerah zona debu di atas baku mutu maupun yang di zona debu di bawah baku mutu.

Rasio konsentrasi debu *indoor-outdoor* rata-rata adalah 72,3% di zona debu di atas baku mutu atau dengan kata lain terjadi reduksi rata-rata 27,7%, namun demikian walaupun terjadi reduksi, masih terdapat 4 rumah yang konsentrasi debu PM_{10} nya masih melebihi baku mutu. Sedangkan untuk lokasi di zona debu yang di bawah baku mutu, rasio konsentrasi debu *indoor-outdoor* rata-rata adalah 61,8% atau terjadi reduksi sebesar 38,2%.



Proses masuknya partikel debu ke udara di dalam rumah salah satunya adalah penetrasi debu dari luar rumah. Hal ini dikuatkan dari hasil observasi secara visual oleh peneliti bahwa pada permukaan benda di dalam rumah terakumulasi debu dengan warna menyerupai dari debu batubara.

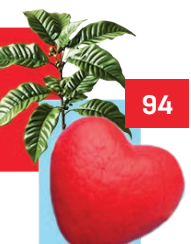
Penetrasi debu dari *outdoor* antara lain melalui pintu yang merupakan satu-satunya jalur sirkulasi udara serta celah-celah dinding bangunan yang terbuat dari papan, untuk rumah yang konstruksinya terbuat dari kayu. Penetrasi debu dari luar ke dalam bangunan dipengaruhi oleh keadaan jendela, arah dan kecepatan angin, inversi suhu, kerapatan dinding bangunan serta musim (Stern, 1977).



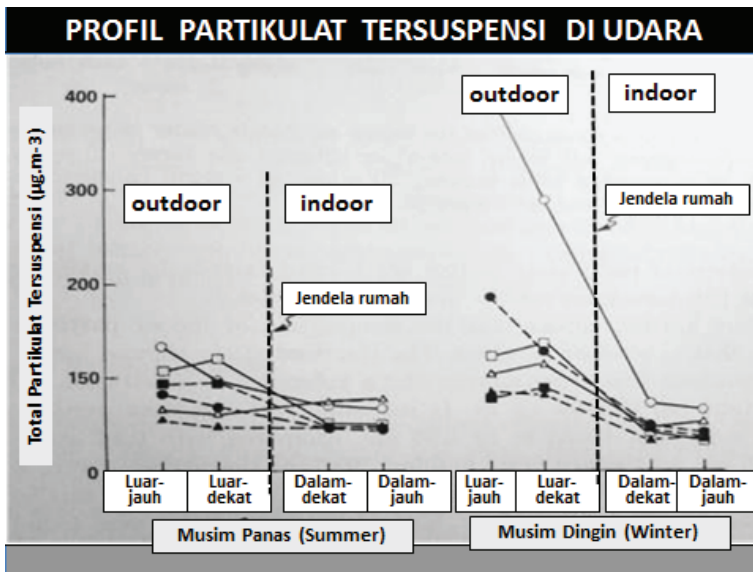
Gambar 7.6 Profil Konsentrasi PM₁₀ (μg.m⁻³) outdoor-indoor di lokasi penelitian.

Pada daerah yang tidak tercemar, konsentrasi debu mungkin lebih tinggi di dalam bangunan yang dihasilkan dari berbagai sumber seperti lantai, tempat tidur, dapur, pakaian, bagian konstruksi bangunan, dan aktifitas manusia di dalamnya. (Phalen, 2003).

Hasil penelitian ini menjelaskan bahwa pencemaran dalam ruangan pada dasarnya dapat terjadi di setiap rumah yang memungkinkannya lebih tinggi dibandingkan kondisi ambien yang bersih. Namun pada lokasi tercemar, penetrasi debu dari luar



meningkatkan konsentrasi *indoor* sehingga menjadi lebih tinggi meskipun masih di bawah konsentrasi *outdoor*.



Keterangan:

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| □ : perpustakaan non-AC siang | ■ : perpustakaan non-AC malam |
| ○ : kantor ber-AC siang | ● : kantor ber-AC malam |
| △ : perumahan non-AC siang | ▲ : perumahan non-AC malam |

Gambar 7.7 Profil *indoor-outdoor suspended particulate matter* pada beberapa tipe bangunan dan musim (Stern, 1977).

Selain pengukuran konsentrasi debu PM_{10} di luar rumah (*outdoor*) yang konsentrasinya mewakili paparan debu saat subyek penelitian berada di luar rumah, PM_{10} juga diukur di tempat-tempat lain, yaitu tempat yang digunakan oleh subyek penelitian untuk menghabiskan waktu dalam sehari. Hasil pengukuran konsentrasi debu PM_{10} di beberapa tempat tersebut dapat dilihat pada Table 7.4.

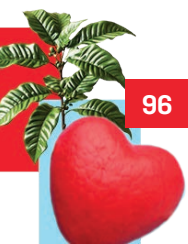


Tabel 7.4 Konsentrasi Debu Melayang (PM₁₀) di Beberapa Tempat yang Digunakan Anak untuk Menghabiskan Waktunya

Lokasi	Jenis Tempat	Konsentrasi debu PM ₁₀ (µg.m ⁻³)	Kode Individu Terpajan
> BML (kurang dari 100 meter dari tepi jalan angkut batubara)	Sekolah, SD	55,8	2, 3, 4, 6, 7, 9, 10, 1, 12, 13, 14, 15, 16 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25
	Sekolah, SLTP	78,5	1, 5, 7, 8, 17, 19
	Tempat bermain, out door	190,4	1 s.d 25
	Mushola (tempat mengaji)	120,6	7, 9, 10, 11, 14, 16, 20, 21, 23, 24
< BML (lebih dari 100 meter dari tepi jalan angkut batubara)	Sekolah, SD	55,8	26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 38, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 47, 48, 50
	Sekolah, SLTP	78,5	30, 40, 44, 49
	Tempat bermain, out door	83,4	26 s.d 50
	Mushola (tempat mengaji)	37,6	27, 28, 31, 32, 36, 38, 39, 41, 43, 45

Perhitungan asupan (*Intake*) PM₁₀ membutuhkan juga pencatatan waktu dari subyek penelitian pada tempat-tempat tertentu yang dinyatakan dalam tabel 7.5 yang merupakan aktifitas subyek penelitian. Pemajanan debu dihitung berdasarkan perkalian total konsentrasi PM₁₀ pada titik-titik aktifitas anak dengan waktu yang digunakan anak di titik tersebut.

Pendekatan ini cukup efisien karena untuk titik aktifitas yang digunakan bersama, seperti tempat bermain, sekolah dan musholla cukup diambil satu kali untuk mewakili konsentrasi terinhalasi pada seluruh anak, namun kelemahannya adalah jika dibandingkan dengan pengukuran debu menggunakan alat *personal dust sampler* (PDS) akurasi data yang diperoleh lebih rendah, karena tidak dipasang di badan anak seperti halnya PDS yang mampu mewakili seluruh aktifitas anak (Holgate, 1999).



Asupan harian PM_{10} pada setiap anak usia sekolah dihitung berdasarkan perkiraan jumlah debu yang terinhalasi di masing-masing titik aktifitas dibagi berat badan anak yang bersangkutan. Dengan demikian asupan harian yang dinyatakan dalam satuan $\mu\text{g}/\text{kg-hari}$, perhitungan asupan debu terlampir. Selengkapnya hasil perhitungan asupan disajikan pada Tabel 7.6.

Tabel 7.5 Lama waktu aktifitas subyek penelitian di beberapa tempat

Kode Individu Terpajan	Lama waktu subyek penelitian di tempat (jam)							
	Di dalam rumah		Sekolah		Tempat bermain		Mushola	
	> BML	< BML	> BML	< BML	> BML	< BML	> BML	< BML
1 / 26	13,5	19,5	7,5	3,5	3,0	1,0	0,0	0,0
2 / 27	16,5	16,5	5,5	4,5	2,0	1,0	0,0	2,0
3 / 28	16,5	15,5	5,5	4,5	2,0	2,0	0,0	2,0
4 / 29	13,5	15,0	8,5	6,0	2,0	3,0	0,0	0,0
5 / 30	14,0	14,0	7,0	8,0	3,0	2,0	0,0	0,0
6 / 31	16,0	14,5	5,0	5,5	3,0	2,0	0,0	2,0
7 / 32	16,0	16,5	6,0	5,0	1,0	1,0	1,0	1,5
8 / 33	15,0	14,0	7,0	7,0	2,0	3,0	0,0	0,0
9 / 34	17,0	17,0	3,0	4,5	3,0	2,5	1,0	0,0
10 / 35	17,0	15,5	5,0	6,5	1,0	2,0	1,0	0,0
11 / 36	17,5	15,5	3,5	4,5	2,0	2,0	1,0	2,0
12 / 37	19,0	15,0	3,0	7,0	2,0	2,0	0,0	0,0
13 / 38	15,5	13,0	5,5	7,0	3,0	2,5	0,0	1,5
14 / 39	19,0	13,0	3,0	7,0	1,0	2,0	1,0	2,0
15 / 40	16,5	14,0	5,5	7,5	2,0	2,5	0,0	0,0
16 / 41	16,5	15,5	5,5	4,5	1,0	2,0	1,0	2,0
17 / 42	14,0	17,0	7,0	5,0	3,0	2,0	0,0	0,0
18 / 43	15,0	14,5	5,0	6,5	4,0	2,5	0,0	0,5
19 / 44	14,0	13,5	7,0	7,0	3,0	3,5	0,0	0,0
20 / 45	15,5	14,5	6,0	6,0	1,0	2,0	1,5	1,5
21 / 46	17,5	16,5	3,5	6,5	2,0	1,0	1,0	0,0
22 / 47	16,5	16,0	5,5	7,0	2,0	1,0	0,0	0,0



23 / 48	15,5	15,0	5,5	7,0	2,0	2,0	1,0	0,0
24 / 49	16,0	15,0	6,0	7,0	1,0	2,0	1,0	0,0
25 / 50	16,0	16,0	5,0	7,0	3,0	1,0	0,0	0,0

Keterangan: Kode individu terpajang ; 1 s.d 25 untuk zona lokasi debu > BML; Kode individu terpajang ; 26 s.d 50 untuk zona lokasi debu < BML; Waktu di dalam rumah adalah penjumlahan dari; tidur malam, istirahat dan tidur siang; Waktu di sekolah adalah penjumlahan dari waktu masuk sekolah dan jika ada les; Waktu bermain adalah di tempat sekitar rumah (outdoor); Waktu di Musholla adalah waktu jika subyek penelitian "mengaji".

Tabel 7.6. Total asupan (intake) debu PM_{10} di Lokasi penelitian

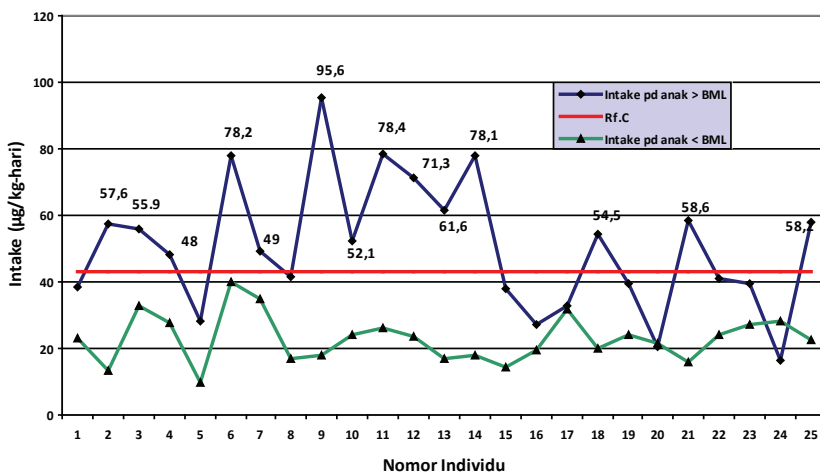
Zona Lokasi > BML				Zona Lokasi < BML			
Kode Individu terpajan	Intake ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{hr}^{-1}$)	Rf.C ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{hr}^{-1}$)	HI	Kode Individu terpajan	Intake ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{hr}^{-1}$)	Rf.C ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{hr}^{-1}$)	HI
1	38.6	42.9	0.90	26	23.0	42.9	0.54
2	57.6	42.9	1.34	27	13.5	42.9	0.31
3	55.9	42.9	1.30	28	32.9	42.9	0.77
4	48.0	42.9	1.12	29	27.8	42.9	0.65
5	28.0	42.9	0.65	30	9.6	42.9	0.22
6	78.2	42.9	1.82	31	39.8	42.9	0.93
7	49.0	42.9	1.14	32	34.9	42.9	0.81
8	41.5	42.9	0.97	33	17.1	42.9	0.40
9	95.6	42.9	2.23	34	17.8	42.9	0.42
10	52.1	42.9	1.21	35	23.9	42.9	0.56
11	78.4	42.9	1.83	36	26.0	42.9	0.61
12	71.3	42.9	1.66	37	23.5	42.9	0.55
13	61.6	42.9	1.44	38	16.7	42.9	0.39
14	78.1	42.9	1.82	39	18.1	42.9	0.42
15	37.8	42.9	0.88	40	14.3	42.9	0.33
16	27.1	42.9	0.63	41	19.6	42.9	0.46
17	33.0	42.9	0.77	42	31.7	42.9	0.74
18	54.5	42.9	1.27	43	20.1	42.9	0.47
19	39.6	42.9	0.92	44	23.9	42.9	0.56
20	20.5	42.9	0.48	45	21.6	42.9	0.50
21	58.6	42.9	1.37	46	16.0	42.9	0.37
22	40.9	42.9	0.95	47	24.1	42.9	0.56
23	39.3	42.9	0.92	48	27.1	42.9	0.63



24	16.5	42.9	0.39	49	28.4	42.9	0.66
25	58.2	42.9	1.36	50	22.6	42.9	0.53

Keterangan: Rf.C adalah Refferece Concentration, yang diturunkan dari nilai baku mutu PM_{10} , yaitu $150 \mu g.m^{-3}$, ke satuan $\mu g.kg^{-1}.hr^{-1}$ hingga menjadi $42,9 \mu g.kg^{-1}.hr^{-1}$ (lihat halaman IV.10)

Asupan PM_{10} pada subyek penelitian yang tinggal di pemukiman penduduk di zona debu di atas baku mutu, berkisar antara $28,8-95,6 \mu g.kg^{-1}.hari^{-1}$, dengan rata-ratanya $50,4 \mu g.kg^{-1}.hari^{-1}$, sedangkan asupan PM_{10} pada subyek penelitian yang bermukim di lokasi yang memiliki konsentrasi debu di bawah baku mutu hanya berkisar antara $9,6-39,8 \mu g.kg^{-1}.hari^{-1}$, dengan rata-ratanya $23,0 \mu g.kg^{-1}.hari^{-1}$, atau rata-rata asupan (*intake*) PM_{10} harian subyek penelitian yang tinggal di pemukiman zona debu di atas baku mutu 2,2 kali dibandingkan dengan asupan (*intake*) PM_{10} harian subyek penelitian yang tinggal di pemukiman zona debu di bawah baku mutu.



Gambar 7.8 Perbandingan intake/Asupan harian PM_{10} terhadap Rf.C

Selanjutnya risiko kesehatan yang dinyatakan dalam *Hazard Index* (HI), dapat ditentukan dengan memperbandingkan nilai asupan (*intake*) dengan *refferece concentration* (Rf.C), disajikan dalam Tabel 7.7.



Tabel 7.7. Tabulasi silang nilai risiko kesehatan, dalam hazard index

		<i>Hazard Index</i>		Jumlah
		HI > 1	HI ≤ 1	
Kelompok	Pemukiman > BML	14	11	25
	Pemukiman < BML	0	25	25
Jumlah		14	36	50

Berdasarkan Tabel 7.7 di atas terlihat sebanyak 14 anak (56%) di kelompok pemukiman yang memiliki konsentrasi debu di atas baku mutu, berisiko menerima gangguan pernapasan akibat inhalasi debu, dan sebaliknya pada subyek penelitian yang tinggal di pemukiman dengan konsentrasi debu di bawah baku mutu disimpulkan tidak berisiko terhadap pajanan debu karena tidak ada nilai Hi yang melebihi dari angka 1.

Risiko kesehatan akibat pajanan debu dengan nilai HI > 1, dimanifestasikan dalam penyakit gangguan pernapasan atau yang lebih serius adalah terjadinya fibrosis pada paru-paru akibat dari penumpukan debu. Efek merugikan inhalasi debu adalah setelah debu masuk dan disimpan dalam sistem pernafasan manusia. Penetrasi dan deposisi partikulat tergantung pada ukuran aerodinamis partikel, mekanisme pertahanan pernafasan, dan pola pernafasan.

Diameter aerodinamis partikel merupakan penentu utama terjadinya deposisi di saluran pernapasan (Ayres, 2006). Deposisi partikel paling tinggi di area paru adalah partikel berukuran paling kecil (2.5 µm), dan deposisi paling tinggi di *nasopharyngeal* adalah partikel berukuran paling besar (7.5 µm).

Untuk debu yang berukuran antara 5 – 10 mikron (termasuk dalam komposisi debu PM₁₀), akan dideposisikan dalam paru-paru oleh gaya impaksi inersia, yaitu proses dimana partikel yang lebih besar bergerak bersama aliran udara kemudian berbenturan dengan permukaan saat terjadi perubahan arah aliran udara.

Dampak inhalasi debu PM₁₀ yang kemudian dideposisi di saluran pernapasan menyebabkan dampak kesehatan berupa iritasi yang menyebabkan *pharyngitis* (untuk partikel debu dengan ukuran



5 mikron atau lebih), sedangkan partikel debu yang berukuran lebih kecil lagi antara 3-5 mikron dapat menimbulkan penyakit-penyakit;

1. Bronchitis, yaitu; peradangan pada lapisan membran saluran udara bronchial pada paru. Menyebabkan batuk, nafas pendek dan dada sesak
2. Alergi atau asthma, yaitu; suatu penyakit kronik (menahun) yang menyerang saluran pernafasan (*bronchiale*) pada paru dimana terdapat peradangan (*inflamasi*) dinding rongga *bronchiale* sehingga mengakibatkan penyempitan saluran nafas yang akhirnya seseorang mengalami sesak nafas.
3. Infeksi saluran pernapasan, yaitu; penyakit infeksi akut yang melibatkan organ saluran pernapasan, hidung, sinus, farink dan larink. ISPA dapat ditularkan melalui air ludah, darah, bersin, udara pernapasan yang mengandung kuman yang terhirup oleh orang sehat kesaluran pernapasannya. Infeksi saluran pernapasan bagian atas terutama yang disebabkan oleh virus, sering terjadi pada semua golongan masyarakat pada bulan-bulan musim dingin atau pada saat kualitas udara memburuk. ISPA dapat berlanjut menjadi pneumonia terutama pada anak-anak dengan status gizi kurang dan dikombinasi dengan keadaan lingkungan yang tidak hygiene.

Angka kesakitan yang tercatat di Puskesmas Banua Padang Kecamatan Bungur Kabupaten Tapin yang wilayah kerjanya melingkupi lokasi penelitian ini, menunjukkan bahwa angka penyakit ISPA selalu menduduki urutan pertama di dua tahun terakhir; pada tahun 2014 tercatat 839 kasus ISPA, Astma 74 kasus dan 2 kasus Nasopharingitis akut, sedangkan di tahun 2015 tercatat ISPA 671 kasus, ditambah beberapa kasus lain yang berhubungan dengan pernapasan, yaitu Astma 74 kasus (peringkat 12), Nasopharingitis akut 22 kasus (peringkat 17) (Dinas Kesehatan Kab. Tapin, 2016).



Tabel 7.8 Sepuluh penyakit terbanyak pada Puskesmas Banua Padang Kecamatan Bungur Kabupaten Tapin yang wilayah kerjanya melingkupi lokasi penelitian.

Tahun 2014			Tahun 2015		
No	Nama Penyakit, Gejala Penyakit	Jumlah Kasus	No	Nama Penyakit, Gejala Penyakit	Jumlah Kasus
1	Infeksi akut lain pada saluran pernapasan bagian atas	839	1	Infeksi akut lain pada saluran pernapasan bagian atas	671
2	Hipertensi primer	587	2	Hipertensi primer	576
3	Penyakit pulpa dan jaringan periapikal	379	3	Gangguan pertumbuhan gusi dan erupsi	369
4	Gangguan pertumbuhan gusi dan erupsi	257	4	Penyakit pulpa dan jaringan periapikal	335
5	Gastritis	233	5	Gastritis	286
6	Demam	184	6	Nyeri	230
7	Pusing	143	7	Dyspepsia	220
8	Nyeri	132	8	Demam	161
9	Penyakit gusi dan jaringan periodontal	126	9	Penyakit gusi dan jaringan periodontal	135
10	Hipertensi sekunder	99	10	Hipertensi sekunder	120

Sumber: Dinas Kesehatan Kabupaten Tapin, 2016

Penyakit-penyakit pernafasan seperti asma, bronchitis, dan ISPA telah dibuktikan hubungannya dengan inhalasi partikulat secara epidemiologi (Ghodis, 2005). Sebagai perbandingan dikumpulkan juga angka 10 penyakit terbanyak di salah satu puskesmas yang ada di Kabupaten Tapin yang wilayah kerjanya tidak melingkupi kegiatan batubara disajikan pada Tabel 7.9.



Tabel 7.9 Sepuluh penyakit terbanyak pada Puskesmas Margasari Kecamatan Candi Laras Utara Kabupaten Tapin yang wilayah kerjanya tidak ada kegiatan batubara

Tahun 2014			Tahun 2015		
No	Nama Penyakit, Gejala Penyakit	Jumlah Kasus	No	Nama Penyakit, Gejala Penyakit	Jumlah Kasus
1	Hipertensi sekuender	465	1	Penyakit lainnya	492
2	Nasopharingitis Acute	338	2	ISPA	441
3	Dyspepsia	245	3	Hipertensi	252
4	Athritis tidak spesifik	222	4	Penyakit sistem otot & jaringan ikat	206
5	Gastritis	140	5	Diare	76
6	Pusing	125	6	Infeksi akut lain pada saluran pernapasan bagian atas	64
7	Infeksi akut lain pada saluran pernapasan bagian atas	85	7	Penyakit kulit infeksi jamur	45
8	Demam	83	8	Penyakit kulit alergi	36
9	Conjunctivitis	81	9	Tonsilitas	27
10	ISPA	64	10	Gangguan gigi & jaringan penyangga	27

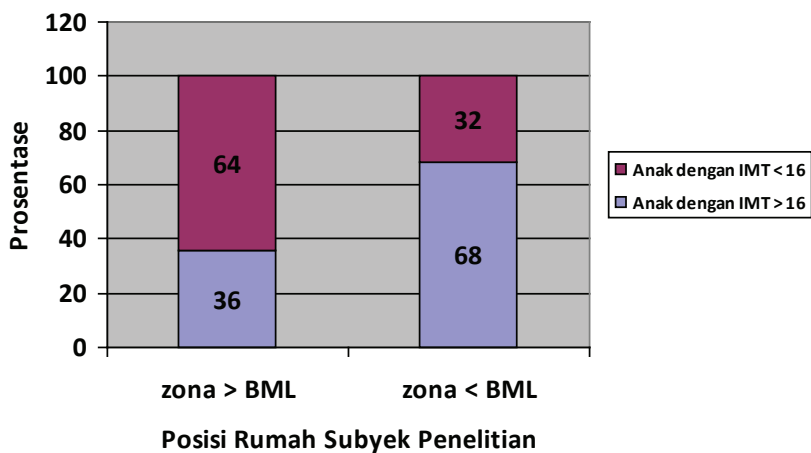
Sumber: Dinas Kesehatan Kabupaten Tapin, 2016

Perbandingan angka kesakitan antara puskesmas (Tabel 7.8 dan Tabel 7.9), menunjukkan bahwa pada puskesmas yang wilayah kerjanya tidak melingkupi kegiatan batubara angka penyakit Infeksi akut lain pada saluran pernapasan bagian atas berada pada urutan terbanyak ke-7 (tahun 2014) dan pada urutan terbanyak ke-6 (tahun 2015), padahal penyakit tersebut selalu berada pada urutan terbanyak pertama di Puskesmas Banua Padang (Kecamatan Bungur) yang wilayah kerjanya melingkupi kegiatan batubara, baik di tahun 2014 maupun di 2015. Kondisi ini menunjukkan korelasi antara adanya kegiatan batubara yang potensial menimbulkan debu terhadap angka penyakit yang berhubungan dengan pernapasan.



Faktor yang dapat memperburuk dampak kesehatan akibat inhalasi debu adalah status gizi dari individu yang terpajan. Status gizi dapat dinyatakan dengan Indeks Massa Tubuh (IMT), yaitu rasio antara Berat Badan (kg) terhadap Tinggi Badan (meter), secara umum IMT normal adalah 18,5 – 24,9. Namun demikian dapat juga menjadi sebaliknya yaitu adanya pajanan agen lingkungan (salah satunya debu) dapat menyebabkan penurunan pada status gizi.

Subyek penelitian yang tinggal pada rumah di lokasi yang konsentrasi debu di atas baku mutu memiliki Indeks Massa Tubuh (IMT) > 16 ternyata hanya 36%. Sedangkan pada subyek penelitian yang tinggal di pemukiman dengan konsentrasi debu di bawah baku mutu, terdapat 68% yang memiliki nilai IMT > 16 (Gambar 7.5). Namun demikian secara umum semua subyek penelitian merasa dalam kondisi sehat.



Gambar 7.9. Perbandingan IMT subyek penelitian yang tinggal pada rumah di zona debu diatas baku mutu dengan yang di bawah baku mutu.

Selain kondisi status gizi, kerusakan tubuh akibat inhalasi debu tergantung faktor-faktor antara lain:

1. Spesifikasi partikulat, dalam hal ini jenis debu yang menjadi obyek penelitian adalah sejenis yaitu dari satu sumber (transportasi batubara)



2. Usia (anak-anak dan orang tua lebih rentan terhadap kerusakan), dalam hal ini rentang usia antara subyek penelitian dalam satu kelompok umur, yaitu 6-15 tahun. Pada anak-anak, sistem paru-paru berkembang sesuai umur dan lebih sensitif mengalami kerusakan dibandingkan orang dewasa (McKenna, 2008)
3. Jenis kelamin (perempuan memiliki permukaan paru-paru yang lebih kecil daripada laki-laki dan memiliki tingkat deposisi alveolar yang lebih tinggi), dalam hal ini kedua subyek penelitian, jumlah perjenis kelaminnya sama (Tabel 7.1).
4. Ukuran partikel, yang mempengaruhi pengendapan / letak deposisi debu di paru-paru, dalam hal ini ukuran partikel yang menjadi obyek penelitian adalah sama yaitu; PM_{10} .
5. Komposisi partikel (kerusakan dapat berasal dari efek fisiologis pada jaringan paru, dari kandungan kimia (komponen yang larut dalam cairan alveolar dan ditransfer ke dalam darah atau bagian lain dari tubuh, komponen yang tidak larut dapat menyebabkan kerusakan dengan cara lain), dan jenis pernafasan seseorang (hidung, mulut, atau keduanya, masing-masing menyebabkan pola deposisi partikulat yang berbeda di saluran pernafasan). Dalam hal ini obyek penelitian (PM_{10}) dari sumber yang sama, sehingga komposisi partikelnya juga sama.
6. Lokasi (kedekatan dengan sumber emisi didukung temperatur yang tinggi atau kondisi klimatologi dan geografi yang mendukung respon negatif terhadap partikulat). Hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan risiko antara subyek penelitian yang tinggal di pemukiman dengan konsentrasi debu di atas baku mutu terhadap subyek penelitian yang tinggal di pemukiman dengan konsentrasi debu di bawah baku mutu, yaitu terdapat 14 anak (56%) anak yang terpajan debu $HI > 1$ pada subyek yang tinggal di pemukiman debu di atas baku mutu, sedangkan yang tinggal di pemukiman di bawah baku mutu tidak ada yang terpajan debu $HI > 1$.



Pendekatan untuk menilai atau memperkirakan dampak kesehatan dari pajanan suatu polutan, menurut peneliti lebih baik dari pada hanya menilai pajanan melalui perbandingan dengan baku mutu polutan. Hal ini dapat dilihat pada subyek penelitian dengan kode individu 1 dan 2 yang sama-sama tinggal pada satu rumah dengan konsentrasi debu yang melebihi baku mutu $181,2 \mu\text{g.m}^{-3}$ (baku mutu $150 \mu\text{g.m}^{-3}$), namun dalam perhitungan risiko kedua subyek ini memperoleh hasil yang berbeda, yaitu untuk subyek dengan kode 1 nilai Hazard index nya <1 (0,90), sedangkan untuk subyek dengan kode 2 nilai *Hazard Index* nya > 1 (1,34).

Hal ini terjadi juga pada subyek penelitian dengan kode 8 dan 9, sama-sama tinggal pada rumah dengan konsentrasi debu $165,1 \mu\text{g.m}^{-3}$ (baku mutu $150 \mu\text{g.m}^{-3}$), keduanya memiliki *Hazard Index* yang berbeda, yaitu masing-masing untuk individu kode 8 dan 9 adalah 0,97 dan 2,23.

Sebaliknya tidak semua subyek penelitian yang konsentrasi debu di dalam rumahnya di bawah baku mutu memiliki Hazard index < 1 , melainkan ada yang HI > 1 , yaitu subyek dengan kode 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 21, dan 25 atau sebanyak 12 anak dari 21 anak (57%).

Keadaan ini menunjukkan bahwa yang menentukan nilai *hazard index* adalah mobilitas dari seseorang, karena pada dasarnya setiap orang/individu selalu terpajan suatu polutan pada berbagai tempat dengan waktunya masing-masing, hal ini yang menguatkan bahwa pendekatan dengan perhitungan analisis risiko kesehatan (*risk assessment*).





BAB VII

RIAP TANAMAN KARET

Kesesuaian Habitat Tanaman Karet

Sebelum menganalisis tentang pertumbuhan karet, sebaiknya kita ketahui lebih dahulu tentang beberapa hal yang mendukung agar tanaman karet dapat tumbuh dengan baik. Agar tanaman karet dapat tumbuh dengan baik dan menghasilkan lateks yang optimal maka harus diperhatikan, syarat-syarat lingkungan yang diinginkan oleh tanaman ini. Karena kondisi lingkungan yang cocok akan menunjang pertumbuhan disamping perawatan.

Daerah tropis yang baik untuk ditanami karet mencakup luasan antara 15°LU hingga 10°LS. Kabupaten Tapin terletak antara 2°32'43"-3°00'43" LU dan 114°46'13"-115°30'33" LS. Suhu harian yang diinginkan tanaman karet adalah 25-30°C, sedangkan suhu udara, sedangkan suhu udara di Kabupaten Tapin rata-rata tahunannya berkisar antara 26,3-28,2°C. Tanaman karet dapat tumbuh dengan baik pada ketinggian antara 1- 600 m.dpl. Luas lahan terluas (67,4%) di Kabupaten Tapin, berada pada ketinggian 0-7 m.dpl.

Curah hujan yang cukup tinggi antara 2.000-2.500 mm dan akan lebih baik lagi jika curah hujan tersebut merata sepanjang tahun. Di Kabupaten curah hujan rata-rata setahun adalah 1.319,2-3.536,9 mm,

namun demikian selama 10 tahun tersebut curah hujan selalu berada > 1.400 mm.

Sinar matahari yang cukup melimpah, dengan intensitas penyinaran 5- 7 jam. Intensitas penyinaran matahari di wilayah Kabupaten Tapin, rata-rata berkisar antara 4,8-7,5 jam. Tanah dengan derajat keasaman mendekati normal paling cocok untuk tanaman karet 5-6, dengan batas toleransi pH tanah 4-8. Pengukuran pH tanah di lokasi penelitian berkisar antara 4,87-5,41, nilai pH ini masih berada dalam batas toleransi.

Dari uraian diatas menunjukkan bahwa ada kesesuaian antara syarat lingkungan yang harus dipenuhi untuk kehidupan tanaman karet dengan baik di wilayah Kabupaten Tapin sebagai lokasi penelitian ini. Kondisi perkebunan karet di sekitar jalan angkut batubara ini seluruhnya merupakan karet bibit unggul dan ditanam dengan pola tertentu; ada berjarak tanam 4 x 5 meter dan ada yang 3 x 4 meter.

Seluruh tanaman dilakukan pemeliharaan gulma, kecuali pada cluster A yang merupakan karet yang sudah tua, terlihat tidak ada pemeliharaan gulma di bawah tanaman karet ini, sedangkan yang lainnya terlihat bersih. Untuk kegiatan pemupukan pada kondisi eksisting penelitian ini tidak lagi dilakukan, pemupukan hanya dilakukan pada saat awal penanaman saja hingga umur karet 2 tahun.

Riap Tanaman Karet

Pengukuran terhadap diameter batang karet di lokasi penelitian, terbagi dalam empat kluster. Pembagian empat kluster ini berdasarkan umur tanaman yang ada di lokasi penelitian.

Kluster A. Umur tanaman karet 25 tahun, merupakan kelompok tanaman karet tertua di lokasi penelitian. Kluster tanaman karet ini tidak dianalisis karena keberadaan tanaman karet ini sudah ada sebelum jalan angkut batubara dibangun atau diperasionalkan (jalan khusus angkutan batubara ini ada sejak 16 tahun yang lalu).



- Kluster B: Umur tanaman karet 7 tahun
- Kluster C: Umur tanaman karet 6 tahun
- Kluster D: Umur tanaman karet 7 tahun
- Kluster E: Umur tanaman karet 4 tahun.

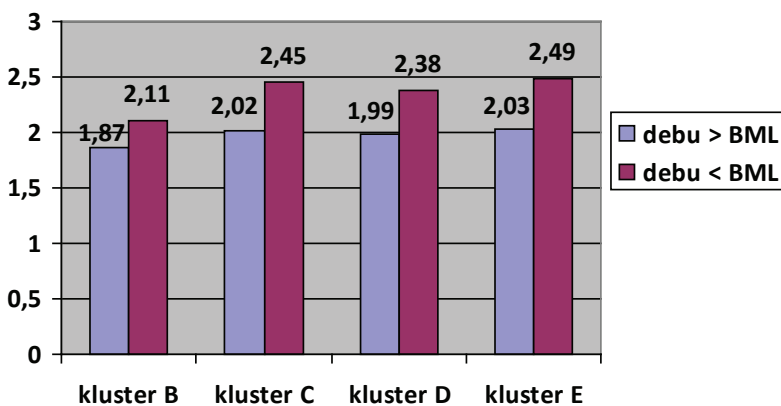
Setiap kluster ini dibagi menjadi dua, yaitu; tanaman karet yang berbatasan langsung dengan jalan batubara sampai dengan sejauh 100 meter (disebut sebagai lokasi tumbuh karet yang memiliki konsentrasi debu di atas baku mutu) dan setelah jarak 100 meter adalah tanaman karet yang dijadikan sebagai pembanding. Hasil pengukuran riap diameter tanaman karet disajikan pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1. Rekapitulasi Data Riap Diameter Tahunan Masing-masing Kluster

Ulangan Plot ke-	Riap Diameter Rata-Rata tahunan per plot (cm.tahun ⁻¹)		Rerata
	Zona debu < BML	Zona debu > BML	
Kluster B			
1	2,14	1,91	2,03
2	2,07	1,82	1,95
Rerata	2,11	1,87	-
Kluster C			
1	2,42	2,05	2,24
2	2,47	1,99	2,23
Rerata	2,45	2,02	-
Kluster D			
1	2,42	1,95	2,19
2	2,33	2,03	2,18
Rerata	2,38	1,99	-
Kluster E			
1	2,54	2,01	2,28
2	2,44	2,04	2,24
Rerata	2,49	2,03	-

Keterangan: Setiap plot sampling, dilakukan pengukuran tanaman karet sebanyak 15 tegakan karet.





Gambar 8.1. Perbandingan rata-rata pertumbuhan tanaman karet / *mean annual increament* (cm/tahun) per kluster

Hasil pengukuran diameter tanaman karet dapat dilihat Table 8.1 dan Gambar 8.1, terlihat bahwa riap rata-rata riap diameter pada tanaman karet yang tumbuh pada lokasi yang memiliki konsentrasi debu di atas baku mutu berkisar antara 1,87 s.d 2,03 cm, sedangkan rata-rata riap diameter tanaman karet yang tumbuh pada lokasi yang memiliki konsentrasi debu di bawah baku mutu berkisar antara 2,11 s.d 2,49 cm, secara keseluruhan memperlihatkan rata-rata riap diameter pada lokasi debu di atas baku mutu lebih kecil dibandingkan dengan riap pada lokasi debu di bawah baku mutu.

Perbedaan riap ini terjadi bervariasi pada masing-masing kluster, selisih untuk masing-masing kluster, yaitu; kluster B = 0,24 cm, kluster C = 0,43 cm, kluster D = 0,39 cm dan kluster E = 0,46 cm. Selisih rata-rata riap diameter terbesar terjadi pada tanaman di kluster E, yaitu tanaman karet dengan umur 4 tahun (umur karet paling muda); Gardner, 1991; mengatakan bahwa tanaman yang muda masa pertumbuhannya diarahkan pada pertumbuhan vertikal/ meninggi, dengan demikian penambahan massa dari batang menjadi lebih cepat, karena pada waktu tanaman muda terjadi pertumbuhan yang cepat pada bagian tunas dan akar tanaman.



Pertumbuhan akar berfungsi menyerap unsur hara sebanyak mungkin dan pertumbuhan tunas dimaksudkan untuk menyerap sinar matahari sebanyak mungkin, sehingga keduanya mendukung proses fotosintesis untuk menghasilkan zat makanan.

Pengujian secara statistik dilakukan untuk menganalisis perbedaan tumbuh antara tanaman karet yang tumbuh pada lokasi yang memiliki konsentrasi debu di atas baku mutu terhadap karet yang tumbuh pada lokasi yang konsentrasinya di bawah baku mutu. Pengujian tersebut menggunakan *Independent T-test*, yang hasil ujiannya disajikan pada Tabel 8.2.

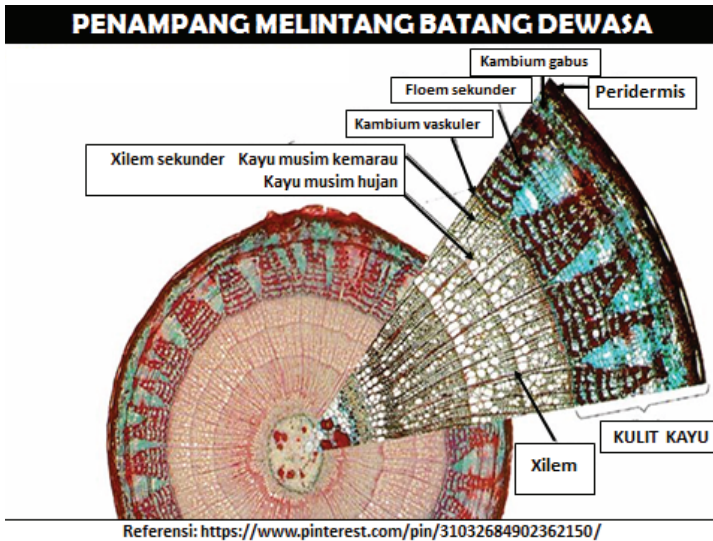
Tabel 8.2. Perbandingan riap diameter antara tanaman karet di zona debu > baku mutu dengan di zona < baku mutu di masing-masing kluster

No	Kluster	t	Signifikasi	Keterangan
1	B	3.926	0,000	Berbeda nyata
2	C	4.444	0,000	Berbeda nyata
3	D	3.447	0,001	Berbeda nyata
4	E	4.241	0,000	Berbeda nyata

Secara statistik, perbedaan riap diameter tanaman karet yang tumbuh di zona debu di atas baku mutu berbeda dengan riap diameter tanaman karet yang tumbuh pada zona debu di bawah baku mutu. Pertumbuhan suatu proses yang kompleks pada setiap bagian tanaman yang berhubungan satu dengan yang lain, pada gambar 8.2 tampak adanya jaringan kambium yang merupakan jaringan meristem sekunder Meristem sekunder yang terletak di daerah lingkaran kambium berfungsi memperbesar diameter batang tanaman.

Hal ini terjadi karena kambium selalu membelah ke arah samping. Sel-sel kambium yang terletak di bagian dalam akan terdiferensiasi menjadi xilem dan bagian luar akan terdiferensiasi menjadi floem. Kambium akan membelah kembali dan terjadi pengulangan proses seperti di atas, sehingga batang pohon terus membesar.





Gambar 8.2. Penampang melintang batang ber kayu.

Pada umumnya pertumbuhan tanaman dapat dilihat dari tambah tumbuh dari parameter ukur; tinggi pohon dan diameter batang dalam batasan waktu tertentu. Soekotjo (1976), menyatakan bahwa pertumbuhan tanaman disebabkan oleh faktor genetik yang bersifat tetap dan faktor lingkungan yang selalu berubah-ubah.

Faktor pertama biasanya disebut faktor dalam (*internal*), sedangkan faktor kedua disebut faktor luar (*eksternal*). Kedua faktor pertumbuhan ini secara bersama-sama sangat efektif mempengaruhi pertumbuhan. Lebih lanjut Soekotjo (1976), mengatakan bahwa faktor tempat tumbuh dibagi menjadi empat golongan, yaitu;

1. Faktor klimatis, yaitu faktor yang berhubungan erat dengan keadaan atmosfir (iklim, curah hujan dan kelembaban), termasuk semua faktor yang ada hubungannya dengan atmosfir yang mempengaruhi kehidupan suatu tanaman
2. Faktor edafis, yaitu; faktor yang berhubungan dengan keadaan tanah
3. Faktor fisiografis, yaitu; keadaan yang menentukan bentuk dan struktur permukaan bumi.



4. Faktor botanis, yaitu; faktor yang berhubungan dengan faktor genetis

Faktor-faktor yang berhubungan dengan pertumbuhan tanaman relatif sama, sehingga perbedaan riap diameter ini dianggap sebagai akibat dari pengaruh dari adanya pajanan debu terhadap tanaman karet. Faktor-faktor yang dikendalikan tersebut adalah:

1. Faktor klimatis, yaitu iklim, curah hujan dan penyinaran matahari. Faktor ini telah sama, karena lingkup wilayah penelitian dalam areal yang sempit sehingga berada pada satu kondisi unsur iklim yang sama.
2. Faktor edafis, yaitu keadaan tanah. Untuk faktor ini telah dilakukan uji sampel kimia tanah yang diambil mewakili lokasi/ zona tumbuh tanaman karet yang diperbandingkan di masing-masing kluster.

Hasil uji kimia tanah tersebut terlampir, dan status kesuburan tanahnya disajikan pada Tabel 8.3. Terlihat tingkat kesuburan tanah yang sama untuk seluruh kluster, sehingga faktor edafis yang dinyatakan dengan kualitas kimia tanah tidak berpengaruh.

Tabel 8.3. Status kesuburan tanah masing-masing kluster

Kluster	KTK	KB	P_2O_5	K_2O	C	Status Kesuburan
A.0	T	SR	SR	S	R	Rendah
A.1	S	SR	SR	S	R	Rendah
B.0	T	SR	SR	S	SR	Rendah
B.1	T	SR	SR	S	R	Rendah
C.0	T	SR	SR	S	R	Rendah
C.1	ST	SR	SR	T	R	Rendah
D.0	T	SR	SR	T	R	Rendah
D.1	T	SR	SR	S	SR	Rendah
E.0	T	SR	SR	S	R	Rendah
E.1	T	SR	SR	S	R	Rendah

Keterangan: KTK = Kapasitas Tukar Kation, KB = Kejenuhan Basa, P_2O_5 = Posfor; K_2O = Kalium dan C = Karbon.

3. Faktor fisiografis, yaitu kelerengan lahan faktor ini dikendalikan dengan cara memilih lokasi sampling yang kondisi fisiografisnya,



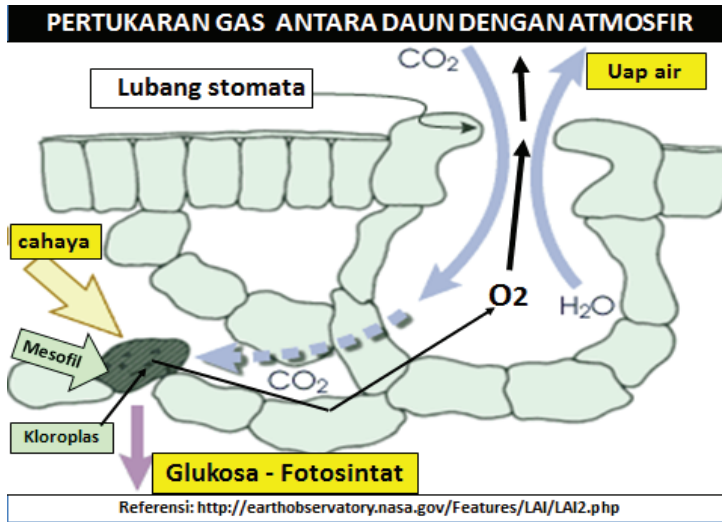
relative datan atau dengan kemiringan maksimum sampai dengan 2%, sehingga faktor ini tidak berpengaruh.

4. Faktor botanis, yaitu yang berhubungan dengan genetik atau jenis bibit tanaman karet. Jenis tanaman karet yang digunakan oleh petani saat penanaman awal adalah sama yaitu Klon GT 1 (Gondang Tapen), atas dasar binaan dari Dinas Kehutanan dan Perkebunan kabupaten pada waktu itu, sehingga faktor ini telah tidak berpengaruh

Pajanan debu di lingkungan yang sampai pada tanaman karet, menimbulkan akumulasi debu pada seluruh bagian tanaman karet, baik pada permukaan daun, batang maupun pada permukaan tanah atau akar tanaman.

Akumulasi debu pada permukaan daun menyebabkan perubahan pada warna daun menjadi kelabu (warna debu) hal ini mengindikasikan bahwa telah terjadi penutupan permukaan daun karena daun harusnya berwarna hijau tua telah berubah menjadi kelabu dan penutupan debu pada permukaan daun ini mempengaruhi fotosintesis yang merupakan proses penting bagi tanaman untuk menunjang pertumbuhan yang optimal. Penutupan partikel debu pada bagian permukaan bawah daun yang terdapat stomata daun, sehingga akan mempengaruhi proses pertukaran gas antara daun dengan atmosfir (Gambar 8.3).

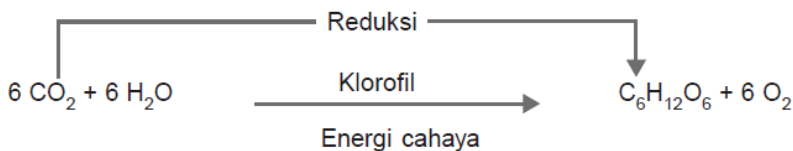




Gambar 8.3. Pertukaran gas (CO_2 , O_2 , H_2O) antara daun dnegan atmosfer melalui stomata.

Walaupun penutupan debu pada permukaan daun ini dapat berkurang oleh adanya angin dan hujan, namun mengingat emisi debu dari jalan angkut batubara ini terjadi secara terus-menerus selama 24 jam dan dalam kurun waktu tahunan, sehingga akumulasi partikel debu pada permukaan daun tidak dapat dihindari.

Tutupan debu pada daun menyebabkan pengurangan penetrasi cahaya matahari yang diperlukan untuk proses fotosintesis, sehingga proses fotosintesis akan terganggu. Fotosistesis adalah suatu proses yang terjadi pada tumbuhan yang berklorofil, dimana energi matahari (dalam bentuk foton) ditangkap dan diubah menjadi energi kimia (ATP dan NADPH). Energi kimia ini tersebut digunakan untuk fotosintesa karbohidrat dari air dan karbon dioksida (Devlin, 1983).

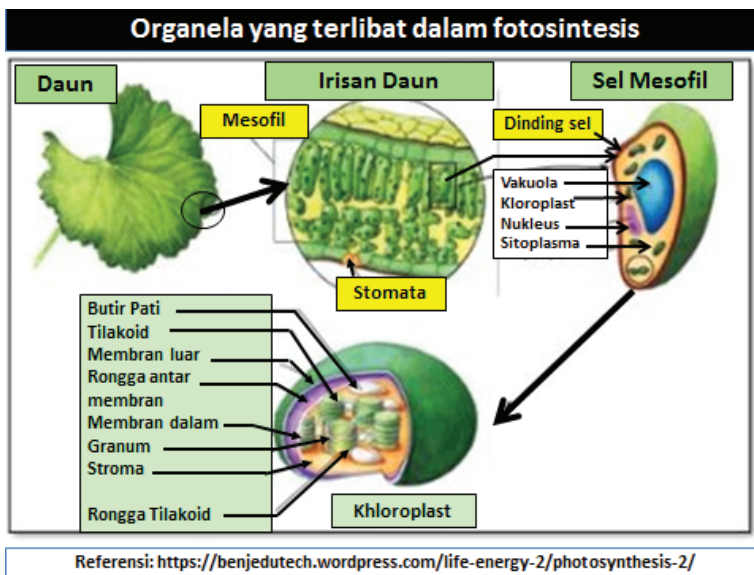


Gambar 8.4. Skematik Proses Fotosintesis.



Organela yang berperan dalam fotosintesis ialah kloroplas. Kloroplas mengandung pigmen klorofil dan menyebabkan warna hijau pada daun. Kloroplas mempunyai membran ganda (luar dan dalam) yang mengelilingi matriks fluida yang disebut stroma. Stroma mengandung enzim yang berperan untuk menangkap CO_2 dan mereduksinya.

Sistem membran di dalam stroma membentuk kantung-kantung datar yang disebut tilakoid. Pada beberapa tempat tilakoid bertumpuk membentuk grana. Klorofil dan pigmen lainnya terdapat pada membran tilakoid. Pigmen yang terdapat pada kloroplas, yaitu klorofil a (berwarna hijau), klorofil b (berwarna hijau tua), dan karoten (berwarna kuning sampai jingga). Pigmen tersebut mengelompok dalam membran tilakoid membentuk perangkat pigmen yang penting dalam fotosintesis.



Gambar 8.5. Organela yang terlibat dalam fotosintesis

Cahaya matahari ditangkap daun sebagai foton, namun tidak semua radiasi matahari mampu diserap tanaman, cahaya matahari (cahaya tampak) dengan panjang gelombang 380 s/d 700 nm, terdiri



dari; cahaya merah (610–700 nm), hijau kuning (510–600 nm), biru (410–500 nm) dan ungu (< 400 nm).

Masing-masing jenis cahaya berbeda pengaruhnya terhadap fotosintesis. Hal ini terkait pada sifat pigmen penangkap cahaya yang bekerja dalam fotosintesis. Pigmen yang terdapat pada membran grana menyerap cahaya yang memiliki panjang gelombang tertentu.

Fotosintesis berlangsung dalam 2 tahap reaksi, yaitu reaksi terang (*light-dependent reaction*) dan reaksi gelap (*light-independent reaction*). Reaksi terang berlangsung jika ada cahaya, sedangkan reaksi gelap berlangsung tanpa memerlukan cahaya.

Reaksi terang terjadi dalam membran tilakoid yang di dalamnya terdapat pigmen klorofil a, klorofil b, dan pigmen tambahan yaitu karoten. Pigmen-pigmen ini menyerap cahaya ungu, biru, dan merah lebih baik dari pada warna cahaya lain.

Reaksi terang merupakan reaksi penangkapan energi cahaya. Energi cahaya yang diserap oleh membran tilakoid akan menaikkan elektron berenergi rendah yang berasal dari H_2O . Elektron-elektron bergerak dari klorofil a menuju sistem transpor elektron yang menghasilkan ATP (dari ADP + P).

Elektron-elektron berenergi ini juga ditangkap oleh $NADP^+$. Setelah menerima elektron, $NADP^+$ segera berubah menjadi NADPH. Molekul-molekul ini (ATP dan NADPH) menyimpan energi untuk sementara waktu dalam bentuk elektron berenergi yang akan digunakan untuk mereduksi CO_2 . Reaksi terang melibatkan dua jenis fotosistem, yaitu fotosistem I dan fotosistem II.

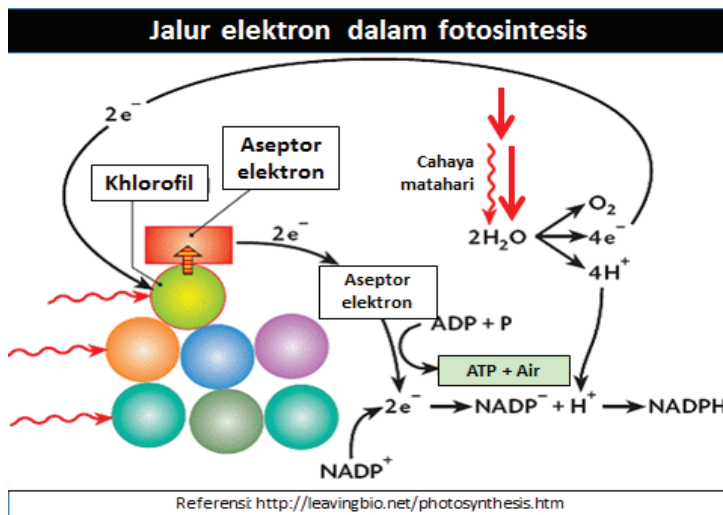
Molekul klorofil dan pigmen asesori (tambahan) membentuk satu kesatuan unit sistem yang dinamakan *fotosistem*. Setiap fotosistem menangkap cahaya dan memindahkan energi yang dihasilkan ke pusat reaksi, yaitu suatu kompleks klorofil dan protein-protein yang berperan langsung dalam fotosintesis.

Fotosistem I terdiri atas klorofil a dan pigmen tambahan yang menyerap kuat energi cahaya dengan panjang gelombang 700 nm sehingga sering disebut P700. Sementara itu, fotosistem II tersusun



atas klorofil a yang menyerap kuat energi cahaya dengan panjang gelombang 680 nm sehingga sering disebut P680.

Ketika suatu molekul pigmen menyerap energi cahaya, energi itu dilewatkan dari suatu molekul pigmen ke molekul pigmen lainnya hingga mencapai pusat reaksi. Setelah energi sampai di P700 atau di P680 pada pusat reaksi, sebuah elektron kemudian dilepaskan menuju tingkat energi lebih tinggi.

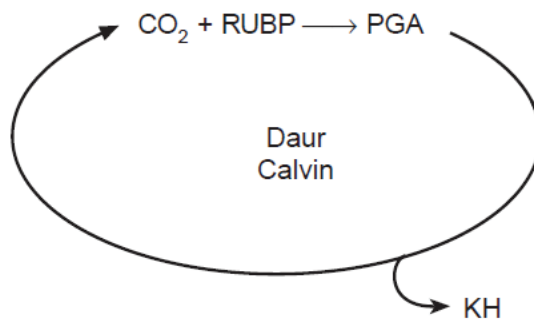


Gambar 8.6. Jalur elektron dalam fotosintesis

Reaksi gelap (*Light-Independent Reaction*) merupakan reaksi tahap kedua dari fotosintesis. Disebut reaksi gelap karena reaksi ini tidak memerlukan cahaya, reaksi ini disebut juga “*Siklus Calvin*”. Reaksi gelap terjadi di dalam stroma kloroplas berlangsung dalam tiga tahap, yaitu fase fiksasi, fase reduksi, dan fase regenerasi. Pada fase fiksasi terjadi penambatan CO_2 oleh ribulose bifosfat (Ribulose biphosphat = RuBP) menjadi 3-fosfoglisarat (3- phosphoglycerate = PGA). Reaksi ini dikatalisis oleh enzim ribulose bifosfat karboksilase (Rubisco).

Secara ringkas reaksi gelap atau siklus Calvin dijelaskan dalam skema pada Gambar 8.7.





Sumber: Dokumentasi Penerbit

Gambar 2.19
Siklus Calvin

Gambar 8.7. Sketsa Silkus Calvin.

Penutupan permukaan daun akan mengganggu reaksi terang pada fotosintesis karena reaksi terang hanya berlangsung jika ada cahaya, untuk keperluan fotosintesis cahaya yang diserap daun adalah 1-5% sisanya untuk memanaskan daun dan transpirasi (Lakitan, 2007).

Transpirasi adalah satu proses kehilangan air dari tumbuhan-tumbuhan ke atmosfer dalam bentuk uap air. Air yang diserap dari akar rerambut tumbuhan diangkut melalui xilem ke semua bagian tumbuhan khususnya daun. Namun jika terjadi kelebihan air akan dibuang melalui proses transpirasi. (Devlin, 1983).

Proses transpirasi tersebut berjalan melewati lubang stomata atau 80% dari total transpirasi yang terjadi pada tanaman, selain melalui stomata transpirasi juga bisa terjadi melalui kutikula dan lentisel (Michael, 1964) dan fungsi stomata pada daun tidak hanya sebagai lubang untuk pengeluaran air tetapi juga berfungsi sebagai masuknya gas CO_2 yang dibutuhkan untuk proses fotosintesis.

Laju fotosintesis ditingkatkan oleh naiknya tingkat radiasi cahaya dan oleh konsentrasi CO_2 yang lebih tinggi (Salisbury, 1995), oleh karena itu cahaya memegang peranan penting dalam proses fisiologis tanaman, terutama fotosintesis dan transpirasi.

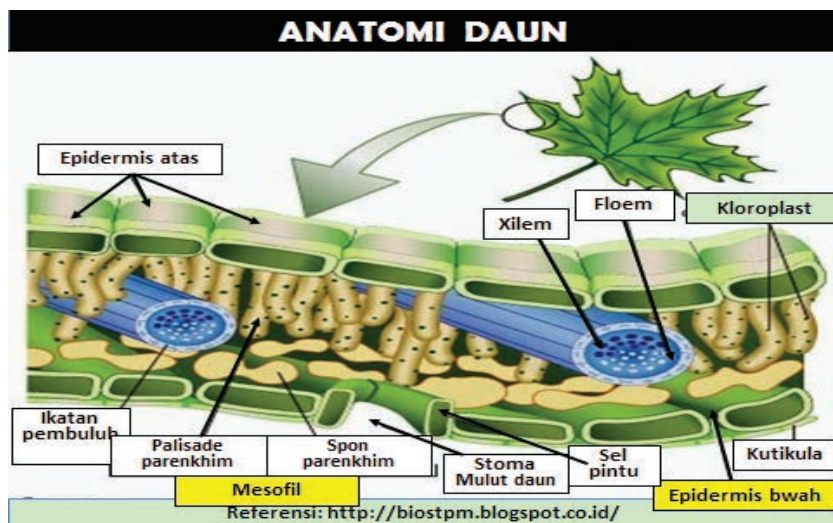
Fotosintesis dan transpirasi terjadi pada daun tanaman, penutupan debu pada permukaan daun dapat mengurangi tingkat



serapan radiasi cahaya dan penutupan stomata oleh partikel debu akan mengganggu proses transpirasi dan masuknya CO_2 pada daun, dengan demikian mengganggu fotosintesis yang terjadi di daun yang merupakan proses utama untuk menopang kehidupan atau pertumbuhan tanaman.

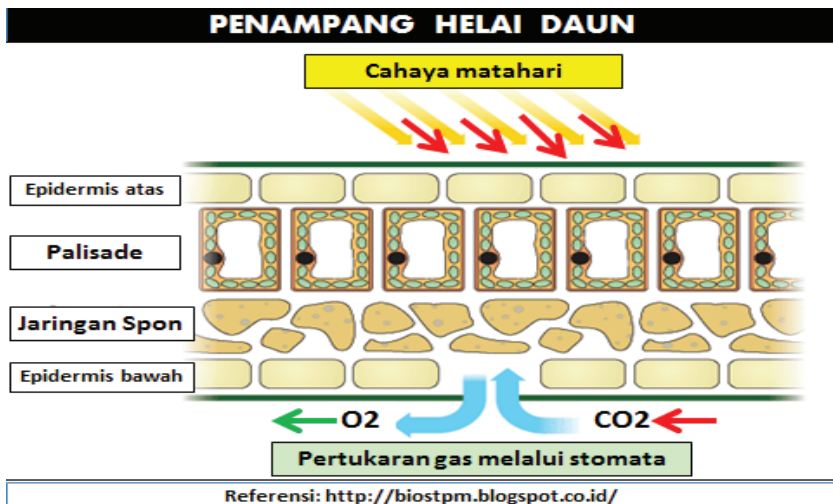
Penjelasan tersebut di atas menunjukkan bahwa kedua reaksi fotosintesis (reaksi terang dan reaksi gelap) sama-sama membutuhkan CO_2 sebagai bahan utama untuk fotosintesis, dan CO_2 ini diperoleh tumbuhan melalui lubang stomata daun, sedangkan pada reaksi terang ditambah lagi dengan keperluan cahaya matahari.

Sehingga gangguan pertumbuhan tanaman karet di lokasi penelitian ini disebabkan oleh 2 jalur, yaitu; kurangnya penetrasi cahaya ke dalam klorofil karena akumulasi debu di permukaan daun (Gambar 8.7) dan terganggunya proses asimilasi CO_2 karena tertutupnya stomata (Gambar 8.8).

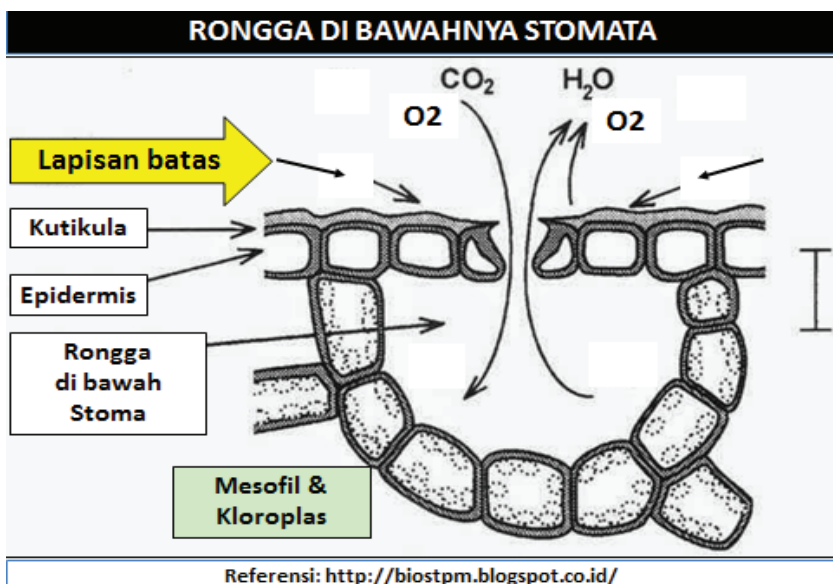


Gambar 8.8. Anatomi helai daun.



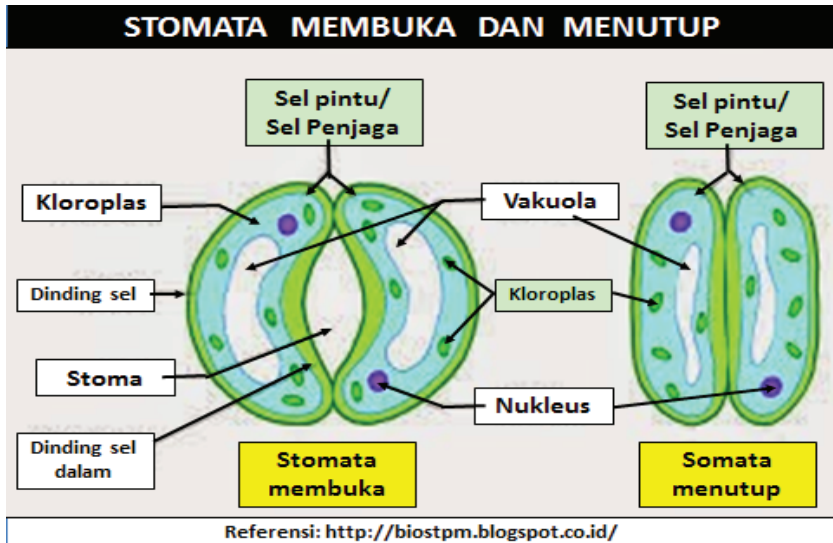


Gambar 8.9. Sketsa Irisan (Penampang) Helai Daun



Gambar 8.10. Rongga di bawah Mulut Daun





Gambar 8.11. Sketsa Stomata Membuka dan Menutup

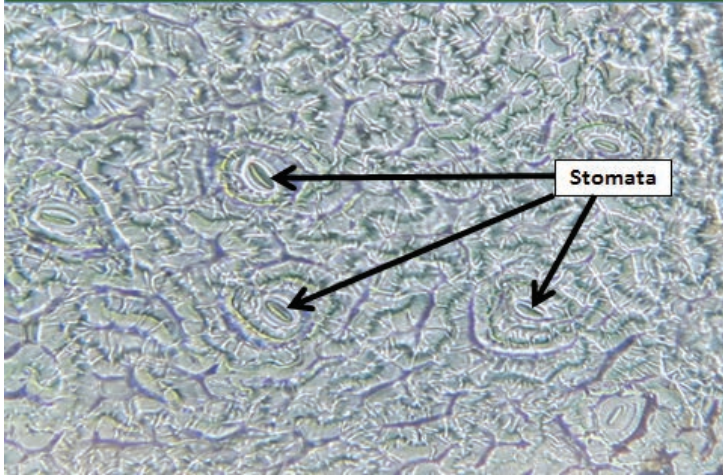




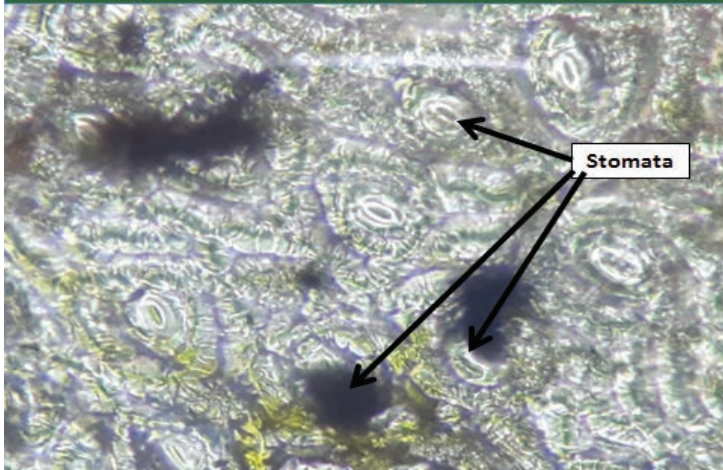
Gambar 8.12 Akumulasi debu pada daun karet di lokasi penelitian



STOMATA PADA PERMUKAAN DAUN YANG TIDAK TERTUTUP DEBU



STOMATA PADA PERMUKAAN DAUN YANG TERTUTUP DEBU



Gambar 8.13 Stomata daun yang normal dan daun yang tertutup oleh debu batubara (foto mikroskop pembesaran 40x)

Akumulasi debu pada batang, akumulasi debu pada batang karet walaupun secara observasi terlihat, namun hal ini tidak berpengaruh pada pertumbuhan tanaman. Pengaruh ini lebih tertuju pada kualitas dan mungkin jumlah lateks yang disadap, yaitu partikel debu masuk ke alur sadap, sehingga mempercepat keringnya alur sadap.



Akumulasi debu pada tanah, dalam kondisi penutupan debu terhadap tanah cukup besar memungkinkan terjadinya perubahan sifat fisik dan kimia tanah. Dari sisi fisik tanah adalah tekstur dan kapasitas infiltrasi, perubahan tekstur akan mempengaruhi struktur dan porositas yang berpengaruh lanjutan pada aerasi, penyediaan air dan sifat kimia tanah yang berkaitan dengan reaksi tanah.

Dari segi kimia tanah, akumulasi debu memungkinkan perubahan secara berangsur-angsur terhadap kandungan hara, kejenuhan basa, kapasitas pertukaran kation dan pH tanah (Moehansyah, dkk, 2003). Khusus untuk pH tanah, hasil dari analisis menunjukkan bahwa pH tanah yang berada di zona debu di atas baku mutu sedikit lebih rendah dibandingkan dengan pH tanah di zona debu yang memiliki debu di bawah baku mutu (ini terjadi di cluster A, B dan C).

Secara umum kondisi tanaman karet terlihat tumbuh dengan baik, yang dilihat dari kerimbunan daunnya, baik yang tumbuh pada zona lokasi debu di atas baku mutu maupun yang tumbuh di zona lokasi di bawah baku mutu. Namun dilihat dari warna daunnya pada beberapa pohon karet yang tumbuh di zona debu di atas baku mutu ada yang berwarna kekuningan.



**POHON KARET DI ZONE DENGAN KONSENTRASI DEBU DI ATAS BAKU
MUTU**



Gambar 8.14 Foto Daun tanaman karet yang tumbuh di zona debu di atas baku mutu

Perubahan warna daun pada tanaman merupakan gejala awal atau tanda pertama apakah tumbuhan tersebut sehat atau tidak, namun dilihat dari penyebabnya banyak sekali, antara lain; kekurangan air, kelebihan air (akar terendam air), terkena penyakit tanaman, kekurangan unsur hara terutama N (Nitrogen) dan Mg (magnesium) karena kedua unsur ini merupakan pembentuk zat hijau daun (klorofil) dan bisa juga karena pengaruh intensitas cahaya matahari yang terik. Sehingga penelitian ini tidak menyimpulkan apakah perubahan warna daun (klorosis) yang diduga ada kaitannya dengan penutupan permukaan daun oleh debu (deposisi debu di permukaan daun).





BAB VIII

KONKLUSI

Konsentrasi debu terendap (dust fall) di sekitar jalan angkutan batubara terbukti melebihi baku mutu yang ditetapkan oleh PPRI No. 41 Tahun 1999, yaitu $10 \text{ ton/km}^2/\text{bulan}$. Sebaran debu ini mengikuti pola eksponensial, dengan konsentrasi menurun seiring bertambahnya jarak dari jalan. Batas aman konsentrasi debu terendap $10 \text{ ton/km}^2/\text{bulan}$ ditemukan pada jarak sekitar 109,2-meter dari tepi jalan.

Analisis risiko kesehatan menunjukkan bahwa penduduk yang bermukim di zona dengan konsentrasi debu di atas baku mutu memiliki Hazard Index (HI) berkisar antara 0,39 hingga 2,23. Lebih dari separuh (56%) subyek penelitian di zona tersebut memiliki $HI > 1$, mengindikasikan adanya risiko kesehatan yang cukup tinggi. Sebaliknya, seluruh subyek penelitian yang bermukim di zona dengan konsentrasi debu di bawah baku mutu memiliki $HI < 1$.

Dampak debu batubara juga terlihat pada pertumbuhan tanaman karet. Riap diameter batang tanaman karet di zona dengan debu melebihi baku mutu (1,19-2,03 cm) secara signifikan lebih kecil dibandingkan dengan riap diameter batang tanaman karet di zona dengan debu di bawah baku mutu (1,32-2,49 cm).

Perbedaan ini menguatkan hipotesis bahwa paparan debu dari angkutan batubara berpengaruh negatif terhadap pertumbuhan tanaman karet. Oleh karena itu, diperlukan upaya mitigasi yang efektif untuk mengendalikan penyebaran debu dan meminimalkan dampak negatifnya terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi strategi mitigasi yang tepat dan berkelanjutan.





DAFTAR PUSTAKA

- American Forests. 2006. American Forests Kicks Off the Holiday Season With Tips on How to Care for Your Christmas Trees. http://www.americanforests.org/news/display.php?id_125.
- Andersson-Sköld, Y., S. Thorsson, D. Rayner, F. Lindberg, S. Janhäll, A. Jonsson, U. Moback, R. Bergman, M. Granberg. 2015. An integrated method for assessing climate related risks and adaptation alternatives in urban areas. *Clim. Risk Manag.* (2015) (in press)
- Antari, A.A.R.J. dan I.K.Sundra. 2002. Kandungan Timah Hitam (Plumbum) Pada Tanaman Peneduh Jalan di Kota Denpasar. <http://ejournal.unud.ac.id/abstrak/4.pdf>. 15 Maret 2012.
- Aribaskoro, F.B. 2009. Risiko Paparan Debu pada Balita yang Bermukim di Kawasan Stockpile Kelurahan Pelambuan Banjarmasin Tahun 2009. Skripsi, Jurusan Kesehatan Lingkungan, Politeknik Kesehatan Banjarmasin, Banjarbaru.
- As, Z.A. 2010. Analisis Paparan PM_{2.5} pada Permukiman di Sekitar Jalan Angkut Batubara (Studi Kasus: Kabupaten Tapin Provinsi Kalimantan Selatan). Magister Thesis, ITB, Teknik Lingkungan, Bandung.
- Ayres, J., R. Maynard dan R. Roy. 2006. *Air Pollution and Health, Air Pollution Review*, Vol. 3. Imperial College Press. London.
- Beckett, K.P., P.H. Freer-Smith dan G. Taylor. 2000. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Glob. Change Biol.*, 6: 995-1003.
- Beckett, K.P., P.H. Freer-Smith, G. Taylor. 1998. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environ. Pollut.*, 99(3): 347-360.

- Bennett, J.H. dan A.C.Hill, dan D.M.Gates. 1973. A model for gaseous pollutant sorption by leaves. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 23: 927–962
- Bennett, J.H. dan A.C.Hill. 1973. Absorption of gaseous air pollutants by a standardized canopy. *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 23: 203–206.
- Bennett, J.H. dan A.C.Hill. 1975. Interactions of air pollutants with canopies of vegetation. Dalam: Mudd J. B. dan T.T.Kozlowski. (Eds). *Responses of plants to air pollution*, pp. 273–306. Academic Press, New York.
- Bernatky, A. 1978. *Tree Ecology and Preservation*. Elsevier Scie. Co. Amsterdam
- Bidwell, R.G.S. dan D.E.Fraser. 1972. Carbon monoxide uptake and metabolism by leaves. *Can.J.Bot.*, 50: 1435–1439.
- Bouvet, T., Loubet, B., Wilson, J., Tuzet, A., 2007. Filtering of wind-borne particles by a natural windbreak. *Bound. Layer Meteorol.*, 123: 481–509.
- BPS. 2015. *Badan Pusat Statistik Kabupaten Tapin 2015, Kabupaten Tapin Dalam Angka / In Figure 2015, Katalog BPS 1102001.63.05. Rantau Kalimantan Selatan.*
- Bruse, M. dan W. Endlicher (Ed.) 2007. Particle Filtering Capacity of Urban Vegetation: a Microscale Numerical Approach. Vol. 109, *Berliner Geographische Arbeiten*. pp. 61–70
- Cairns, M.A., S. Brown, E.H. Helmer, dan G.A. Baumgardner. 1997. Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111: 1–11.
- Cardelino, C.A. dan W.L.Chameides. 1990. Natural hydrocarbons, urbanization, and urban ozone. *Journal of Geophysical Research*, 95(D9): 971–979.



- Chameides, W.L., R.W. Lindsay, J. Richardson dan C.S. Kiang. 1988. The role of biogenic hydrocarbons in urban photochemical smog: Atlanta as a case study. *Science*, 241: 1473-xx.
- Colbeck, I. dan R.M. Harrison. 1985. Dry deposition of ozone: some measurements of deposition velocity and of vertical profiles to 100 metres. *Atmospheric Environment*, 19(11): 1807-1818.
- Davidson, C. dan Y.-L. Wu. 1990. Dry deposition of particles and vapors Dalam: S.E. Lindberg, A.L. Page, S.A. Norton (Eds.), *Acidic Precipitation*, Springer, New York.
- Davidson, C., J. Miller dan M. Pleskow. 1982. The influence of surface structure on predicted particle dry deposition to natural grass canopies. *Water, Air, Soil Pollut.*, 18: 25-43
- Devlin, R.M. dan K.H. Withan. 1983. *Plant Physiology*. Williard grant press. Boston.
- Dinas Kesehatan Kabupaten Tapin, (2016), Laporan Penyakit Terbanyak di wilayah Kerja Puskesmas-puskesmas se Kabupaten Tapin, Rantau Kalimantan Selatan.
- Dinas Perkebunan Provinsi Kalimantan Selatan, <http://disbun.kalsel-prov.go.id/umum/karet.html> diakses tanggal 29 februari 2016
- Dinas Pertambangan dan Energi Provinsi Kalimantan Selatan, 2016, Laporan Produksi Batubara di Provinsi Kalimantan Selatan, Banjarbaru Kalimantan Selatan.
- Dwyer, J.F., D.J. Nowak, M.H. Noble dan S.M. Sisinni. 2000. Assessing our nation's urban forests: connecting people with ecosystems in the 21st century. USDA Forest Service General Technical Report PNW-460, Portland, OR.
- Dwyer, J.F., E.G. McPherson, H.W. Schroeder, R.A. Rowntree. 1992. Assessing the benefits and costs of the urban forest. *J. Arboric.*, 18 (5): 227-234.
- Dzierżanowski, K., R. Popek, H. Gawronska, A. Sæbø, S.W. Gawronski. 2011. Deposition of particulate matter of different size frac-



- tions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. *Int. J. Phytorem.*, 13(10): 1037–1046
- Eastwood, P. 2008. *Particulate Emissions from Vehicles*. John Wiley & Sons Ltd. England.
- EPA. US. 1997. *Exposure Factors Handbook, General Factor Vol. I*, National Center for Environmental Assessment, EPA/600/8-89/043. Washington, DC 20460.
- EPA. US. 2003. *Example Exposure Scenarios*, National Center for Environmental Assessment, EPA/600/R-03/036. Washington, DC 20460.
- Escobedo, F.J., T. Kroeger, J.E. Wagner. 2011. Urban forests and pollution mitigation: analyzing ecosystem services and disservices. *Environ. Pollut.*, 159 (2011), pp. 2078–2087
- Fakuara, M.Y. 1987. *Hutan Kota dan Permasalahannya*, Jurusan Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan Institut Pertanian Bogor, Bogor. 60 hal
- Freer-Smith, P.H., El-Khatib, A.A., Taylor, G., 2004. Capture of particulate pollution by trees: a comparison of species typical of semi-arid areas (*Ficus nitida* and *Eucalyptus globulus*) with European and North American species. *Water Air Soil Pollut.*, 155: 173-187.
- Freer-Smith, P.H., K.P. Beckett, dan G. Taylor. 2005. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* X *trichocarpa* 'Beaupre', *Pinus nigra* and *X Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environ. Pollut.*, 133: 157-167.
- Gallagher, M.W., K.M. Beswick, J. Duyzer, H. Westrate, T.W. Choularton. 1997. Measurements of aerosol fluxes to speulder forest using a micrometeorological technique. *Atmos. Environ.*, 31: 359–373.



- Ghose,M. dan S.R.Majee. 2000. Assessment of The Impact on The Air Environment Due to Opencast Coal Mining–an Indian Cast Study. *Atmospheric Environment*, 34(): xx.
- Goardner, F., R.B.Pearce dan R.L.Mitchel. 1991. *Fisiologi Tanaman Budidaya*. Universitas Indonesia Press, Jakarta.
- Godish,T. 2005. *Air Quality*, 4th Edition,. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, A CRC Press Company.
- Grey, G.W. dan F.J. Deneke. 1978. *Urban Forestry*. John Willey and Jons, Inc, New York. 279p
- Gromke, C. dan B.Ruck. 2012. Pollutant concentrations in street canyons of different aspect ratio with avenues of trees for various wind directions. *Bound. Layer Meteorol.*, 144: 41-64.
- Gromke, C., 2011. A vegetation modeling concept for building and environmental aerodynamics wind tunnel tests and its application in pollutant dispersion studies. *Environ. Pollut.*, 159: 2094-2099.
- Gromke,C. dan B.Ruck. 2008. Aerodynamic modelling of trees for small-scale wind tunnel studies. *Forestry*, 81: 243-258.
- Hakim, R. 1993. *Unsur Perancangan dalam Arsitektur Lansekap*. Bumi Aksara, Jakarta.176 hal.
- Hanson,P.J., Edwards,N.T., Garten,C.T., dan J.A.Andrews. 2000. Separating root and soil microbial Contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 48: 115–146.
- Helman. 1999. Peran Informasi Geografis untuk mengatasi Permasalahan Kota Jakarta. Dalam: *Peranan Informasi Geografis Dalam Menghadapi Millenium II*. Makalah Pada Seminar Geografi, Depok.
- Hendra,K. dan R.Alfian. 2010. Konsep Pemilihan Vegetasi Lansekap Pada Taman Lingkungan di Bunderan waru Surabaya. *Jurnal Buana Sains*, 10 (2): 181-188.



- Hendrasarie,N. 2007. Kajian Efektivitas Tanaman dalam Menjerap Kandungan Pb Udara. Jurnal Rekayasa Perencanaan, 3 (2): 2007
- Hendryx,M. dan M.M.Ahem. 2008. Relation Between Health Indicators and Residential Proximity to Coal Mining in West Virginia. American Journal of Public Health, 98(4): xx.
- Hinds,W.C. 1999. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles (second ed.). 504 pp.
- Holgate, S.M., J.M.Samet, H.S. Koren dan R.Maynard. 1999. Air Pollution and Health. Academic Press. London.
- http://www.treepeople.org/vfp.dll?OakTree_getPage_&PNPK_59.
- Hwang, H.-J., Yook, S.-J., Ahn, K.-H., 2011. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. Atmos. Environ., 45: 6987-6994.
- Imran, B. 2014. Musrenbang RKPD Provinsi Kalsel Tahun 2014, Bappeda Prov. Kalsel.
- Irawati, R. 1991. Studi pemilihan 10 Jenis Tanaman untuk Pengembangan Hutan Perkotaan di Kawasan Pabrik Semen. Skripsi. Jurusan Konservasi Sumberdaya Hutan. Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor, Bogor (tidak dipublikasi)
- Islam,M.N. K.-S.Rahman, M.M.Bahar, M.A.Habib, K.Ando, N.Hattori. 2012. Pollution attenuation by roadside greenbelt in and around urban areas. Urban Forestry & Urban Greening, 11(4): 460-464.
- Janhäll,S. 2015. Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. Atmospheric Environment, 105: 130-137.
- Janne,R.V., Y.P. Pasi, T. Holopainen, J. Jorma, P. Pertti, K. Minna. 2012. Soil drought increases atmospheric fine particle capture efficiency of Norway spruce Boreal Environ. Res., 17: 21–30



- Jenus et al (1984). Dasar-dasar Ilmu kehutanan (Buku I dan II).Badan kerjasama Perguruan Tinggi Negeri Indonesia Timur: Lembaga Penerbit Universitas Hasanuddin, Ujung Pandang.
- Kadri. 2011). Pengukuran udara ambien. Retrieved from <http://kadri-blog.blogspot.com/2010/06/cara-pengukuran-udara-ambien.html>
- Kouznetsov, R., Sofiev, M., 2012. A methodology for evaluation of vertical dispersion and dry deposition of atmospheric aerosols. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 117: xx.
- Lakitan, B. 2007. Dasar-Dasar Fisiologi Tumbuhan. PT. Raja Grafindo Persada, Jakarta.
- LAPAN. 2011. Pengaruh Emisi Polutan Udara dari Jalan Raya Terhadap Kualitas Udara Ambien. (n.d.). Retrieved 5 8, 2011, from Web site Dirgantara Lapan: <http://www.dirgantara-lapan.or.id/jizonpolud/htm/berita5.htm>
- Lequy,E., S.Conil, dan Marie-Pierre Turpault. 2012. Impacts of Aeolian dust deposition on European forest sustainability: A review. *Forest Ecology and Management*, 267: 240-252.
- Lin, M.-Y., Khlystov, A., 2011. Investigation of ultrafine particle deposition to vegetation branches in a wind tunnel. *Aerosol Sci. Technol.*, 46: 465-472.
- Lin,M., G.G.Katul, dan A.Khlystov. 2012. A branch scale analytical model for predicting the vegetation collection efficiency of ultrafine particles. *Atmos. Environ.*, 51: 293-302.
- Litschke,T., dan W. Kuttler. 2008. On the reduction of urban particle concentration by vegetation — a review. *Meteorol. Z.*, 17(3): 229-240.
- Liu,Y.S., X.X. Shen, X.L.Mao, dan R.Chen. 2004. Indoor air levels of TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ at public places in Beijing during wintertime. *Acta Sci. Circumst.*, 24(2): 190-196.



- Maher,B.A., I.A.M.Ahmed, B.Davison, V.Karloukovski, dan R.Clarke.
2013. Impact of Roadside Tree Lines on Indoor Concentrations of Traffic-Derived Particulate Matter. *Environ. Sci. Technol.*, 47(23): 13737–13744.
- McDonald,A.G., W.J. Bealey, D. Fowler, U. Dragosits, U. Skiba, R.I. Smith, et al. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conurbations. *Atmos. Environ.*, 41 (38): 8455–8467
- McKenna, J.D. 2008. Fine Particle (2.5 microns) Emissions, Regulation, Measurement, and Control. New Jersey, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- McPherson,E.G., Xiao, Q., dan E.Aguaron. 2013. A new approach to quantify and map carbon stored, sequestered and emissions avoided by urban forests. *Landscape and Urban Planning*, 120: 70–84.
- METI-LIS. 2005. Ministry of Economy, Trade and Industry Low Rise Industrial Source Dispersion Model METI-LIS Model Ver. 2.02, Operation Manual. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Research Center for Chemical Risk Management, Japan.
- Michael,P.H. 1964. General Phisiology.Kogasuma. Company:Tokyo
- Mo, L., Z.Ma, Y.Xu, F.Sun, X.Lun, X.Liu, J.Chen, dan X.Yu. 2015. Assessing the Capacity of Plant Species to Accumulate Particulate Matter in Beijing, China. *PLoS One*, 10(10): e0140664.
- Moehansyah, dkk. (2003). Tinjauan Terhadap Pengaruh Debu Pada Produksi Tanaman Karet (studi kasus di jalan angkut batubara PT. Bahari Cakrawala Sebuku Wilayah Desa Mandin), Pusat Penelitian Lingkungan Hidup Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru.



- Muchtler, J. 1973. The Industrial Environment Its Evaluation and Control., Public Health Centre for Diseases Control National Institute for Occupational Safety and Health.
- Mukono, H.J. 1997. Pencemaran Udara dan Pengaruhnya Terhadap Gangguan Saluran Pernafasan, Surabaya: Airlangga University Press.
- Nasrullah, N. 1997. Kemampuan Tanaman Jalan Raya Dalam Menyerap Polusi Udara (NO₂). Laporan Riset Unggulan Terpadu III, Bidang Teknologi Perlindungan Lingkungan, Tahun 1995 -1997, Bogor.
- Nasrullah, N., Heny, S., Soertini, G., Marietje W., dan Andi, G. 2000. Penggunaan Gas NO₂ berlabel ¹⁵N dalam Mengukur Absorpsi Polutan NO₂ oleh Tanaman. Jakarta: Badan Tenaga Atom Nasional, Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi.
- Needham, S. dan B.Denis. 1998. Dust Control, Best Practice Environmental Management in Mining, Steering Committee, Department of The Environment, Environmental Australia.
- Ngabekti, S. 2004. Manfaat tanaman peneduh jalan dalam mempengaruhi lingkungan mikro dan kualitas udara di Kota Semarang. Jurnal Mipa, 27 (1): 56-64.
- Nguyen, T., X.Yu Z.Zhang, M.Liu, dan X.Liu. 2015. Relationship between types of urban forest and PM_{2.5} capture at three growth stages of leaves. Journal of Environmental Sciences, 27: 33-41.
- Nowak, D.J., D.E. Crane, dan J.C. Stevens. 2006a. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. Urban Forestry and Urban Greening, 4: 115–123.
- Nowak, D.J., D.E. Crane, J.C. Stevens, dan M. Ibarra. 2002a. Brooklyn's Urban Forest. General Technical Report NE- 290, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, PA. 107 pp.



- Nowak,D.J., D.E.Crane, J.C. Stevens, R.E. Hoehn, J.T. Walton, J. Bond. 2008. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Arboricult. Urban For.*, 34(6): 347-358.
- Nowak,D.J., Daniel E. Crane, Jack C. Stevens. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4: 115–123.
- Nowak,D.J., K.L.Civerolo, S.T.Rao, G.Sistla, C.J.Luley, dan D.E.Crane. 2000. A modeling study of the impact of urban trees on ozone. *Atmospheric Environment*, 34: 1610-1613.
- Nowak,D.J., M.H.Noble, S.M.Sisinni dan J.F.Dwyer. 2001. Assessing the US urban forest resource. *Journal of Forestry*, 99(3): 37-42.
- Nowak,D.J., R.Hoehn dan D.E. Crane.2007. Oxygen Production by Urban Trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(3): 220–226.
- Nowak,D.J., R.Hoehn, D.E. Crane, J.C. Stevens dan J.T.Walton. 2006b. Assessing Urban Forest Effects and Values: Minneapolis' Urban Forest. Resource Bulletin NE-166. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, PA. 20 pp.
- Nowak,D.J.1994. Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago'surban forest, pp. 83–94. In *Chicago's Urban Forest Ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. McPherson, E.G., Nowak, D.J., and Rowntree, R.A., Eds. USDA Forest Service General Technical Report NE-186, Radnor, PA.
- Patra,A.D., N.Nasrullah dan E.L.Sisworo. 2004. KEMAMPUAN BERBAGAI JENIS TANAMAN MENYERAP GAS PENCEMAR UDARA (NOx). Risalah Seminar Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi, 2004
- Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999. Pengendalian Pencemaran Udara.



- Perpres RI Nomor 2 Tahun 2015. Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) Tahun 2015 – 2019, Buku I, Agenda Pembangunan Nasional, Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional / Badan Perencanaan Pembangunan Nasional.
- Petroff, A. dan L.Zhang. 2010. Development and validation of a size-resolved particle dry deposition scheme for application in aerosol transport models. *Geosci. Model Dev.*, 3: 753-769.
- Petroff, A., Mailliat, A., Amielh, M., Anselmet, F., 2008b. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part II: a new modelling approach and applications. *Atmos. Environ.*, 42: 3654-3683.
- Petroff, A., Zhang, L., Pryor, S.C., Belot, Y., 2009. An extended dry deposition model for aerosols onto broadleaf canopies. *J. Aerosol Sci.*, 40: 218-240.
- Petroff,A., A.Mailliat, M.Amielh dan F.Anselmet. 2008a. Aerosol dry deposition on vegetative canopies. Part I: review of present knowledge. *Atmos. Environ.*, 42: 3625–3653.
- Phalen, R. F. 2003. *The Particulate Air Pollution Controversy, A Case Study and Lessons Learned*. Newyork: Kluwer Academic Publishers.
- Phalen, R.P. 2009. *Inhalation Studies, Foundations and Techniques*, 2nd edition. Informa Healthcare. New York.
- Popek, R., H.Gawrońska dan S.W.Gawroński. 2015. The Level of Particulate Matter on Foliage Depends on the Distance from the Source of Emission. *Int. J. Phytoremediation*, 17(12): 1262-1268.
- Popek,R., H. Gawrońska, A. Sæbø, M. Wrochna, S.W. Gawroński. 2013. Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes — a 3-year study. *Int. J. Phytorem.*, 15(3): 245-256.
- PPLH. 2001. Pusat Penelitian Lingkungan Hidup (PPLH) Universitas Lambung Mangkurat. (2001). Laporan Penelitian Sebaran



Debu dari Aktifitas Terminal Khusus Batubara PT. Indonesia Bulk Terminal di Kabupaten Kotabaru Kalimantan Selatan. Banjarbaru.

Propinsi KALSEL. 2012. Tren Produksi Batubara Kalsel Terus Naik. (2012, 1 27). Retrieved 6 13, 2012, from Web site Provinsi Kalimantan Selatan: www.kalselprov.go.id

Przybysz, A., A.Sæbø, H.Hanslin dan S.Gawronski. 2014. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Sci. Total Environ.*, 481: 360-369.

Rasmi. 1989. Perencanaan Hutan II, Yayasan Pembinaan Fakultas Kehutanan Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

Raupach, M.R., N.Woods, G.Dorr, J.F.Ley dan H.A.Cleugh. 2001. The entrapment of particles by windbreaks. *Atmos. Environ.*, 35: 3373-3383.

Rianto dan Kusnandar. 1974. Laju Pertumbuhan (CAI) Tegakan *Acacia Mangium* Wild dan *Paraserientes falcatalia* Neils, Badan Penelitian dan Pengembangan Kehutanan, Departemen Kehutanan Palembang.

Roupsard, P., M. Amielh, D. Maro, A. Coppalle dan H. Branger. 2013. Measurement in a wind tunnel of dry deposition velocities of submicron aerosol with associated turbulence onto rough and smooth urban surfaces. *J. Aerosol Sci.*, 55: 12-24

Sæbø, A., R. Popek, B. Nawrot, H.M. Hanslin, H. Gawronska, S.W. Gawronski. 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Sci. Total Environ.*, 427-428: 347-354.

Saha, D.C. dan P.K.Padhy. 2011. Effects of stone crushing industry on *Shorea robusta* and *Madhuca indica* foliage in Lalpahari forest. *Atmospheric Pollution Research*, 2: 463-476.



- Salisbury, F.B. dan C.W. Ross. 1978. *Plant Physiology*. Wadsworth Publishing Company, Belmont, CA. 422 pp.
- Salisbury, F.B. dan R. W.Cleon. 1995. *Fisiologi Tumbuhan Jilid 2* Bandung: ITB.
- Santosh,K.P. 2012. Ecological effect of airborne particulate matter on plants *Environ. Skeptics Critics*, 1(1): 12–22
- Simeonov, L.I. 2008. *Exposure and Risk Assessment of Chemical Pollution-Contemporary Methodology*. Springer, Netherland.
- Slinn, W.G.N. 1982. Predictions for particle deposition to vegetative canopies. *Atmos. Environ.*, 16: 1785–1794
- Smith, W.H., 1990. *Air Pollution and Forests*. Springer, New York
- Smith,W.H., B.J. Staskawicz. 1977. Removal of atmospheric particles by leaves and twigs of urban trees: some preliminary observations and assessment of research needs. *J. Environ. Manag.*, 1(4): 317-330.
- Soekotjo. 1989. *Eksiklopedi Konservasi Sumberdaya*. Erlangga. Jakarta.
- Speak,A.F., J.J.Rothwell S.J.Lindley dan C.L.Smith. 2012. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. *Atmos. Environ.*, 61: 283-293.
- Stern,A.C. 1977, *Air Pollution, The Effects of Air Pollutant*, Volume II, Academic Press, Inc. New York. 197p.
- Stramler dan Kristie. 2009. Adverse Effects of Open-Cast Coal mining. *Journal The Camp for Climate Action in Scotland*.
- Sugiharti, T. 1998. Pengaruh Pencemaran Udara terhadap Kecepatan Fotosintesis dan Respirasi pada Tanaman Hutan Kota. Skripsi Fakultas Kehutanan IPB. Bogor. (tidak dipublikasi)
- Suharno. 1984. *Perencanaan Hutan II*. Kerjasama Fakultas Kehutanan UGM dan Proyek Pendidikan dan Pengendalian Tenaga Kerja Pengusaha Hutan, Departemen Kehutanan. Jakarta.



- Taha, H. 1996. Modeling impacts of increased urban vegetation on ozone air quality in the South Coast Air Basin. *Atmospheric Environment*, 30(20): 3423–3430.
- Terzaghi, E., Wild, E., Zacchello, G., Cerabolini, B.E.L., Jones, K.C., Di Guardo, A., 2013. Forest filter effect: role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs. *Atmos. Environ.*, 74: 378–384.
- Tim Penulis PS. 2008. *Panduan Lengkap Karet*. Cetakan 1, Penebar Swadaya, Jakarta.
- Tiwary, A., H.P. Morvan dan J.J. Colls. 2005. Modelling the size-dependent collection efficiency of hedgerows for ambient aerosols. *J. Aerosol Sci.*, 37: 990–1015.
- Tiwary, A. dan J. Colls. 2010. *Air Pollution, Measurement, Modelling and Mitigation*, 3rd edition. Routledge, London and New York.
- Tiwary, A., D. Sinnett, C. Peachey, Z. Chalabi, S. Vardoulakis, T. Fletcher, G. Leonardi, C. Grundy, A. Azapagic, T.R. Hutchings. 2009. An integrated tool to assess the role of new planting in PM10 capture and the human health benefits: a case study in London. *Environ. Pollut.*, 157: 2645–2653.
- TreePeople. 2006. *Get Involved—Why Trees?*
- Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 1992 tentang Perumahan dan Permukiman.
- US Environmental Protection Agency (US EPA), 2004. Incorporating Emerging and Measures in a State Implementation Plan (SIP). US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC. http://www.epa.gov/ttn/oarpg/t1/memoranda/evm_ievm_g.pdf (last accessed: October 2005)
- Vailshery, L.S., M. Jaganmohan, dan H. Nagendra. 2013. Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(3): 408–415.



- Velasco,E. M.Roth, L.Norford, dan L.T. Molina. 2016. Does urban vegetation enhance carbon sequestration?. *Landscape and Urban Planning*, 148: 99-107.
- Vong, R.J., Vong, I.J., Vickers, D., Covert, D.S., 2010. Size-dependent aerosol deposition velocities during BEARPEX'07. *Atmos. Chem. Phys.* 10, 5749e5758.
- Vos,P.E.J., B.Maiheu, J.Vankerkom dan S.Janssen. 2013. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree?. *Environmental Pollution*, 183: 113-122).
- Wang, B., Z.Wei-kang, X.Niu dan X.Y.Wang. 2015. Particulate matter adsorption capacity of 10 evergreen species in Beijing. *Huan Jing Ke Xue.*, 36(2): 408-414.
- Wang, L., H.Gong, W.Liao, dan Z. Wang. 2015b. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Sci Total Environ.*, 532: 420-434.
- Weber,F, I.Kowarik, dan I.Saeumel. 2014. Herbaceous plants as filters: immobilization of particulates along urban street corridors. *Environ. Pollut.*, 186: 234-240.
- Wesely, M.L., Cook, D.R., Hart, R.L., Speer, R.E., 1985. Measurements and parameterization of particulate sulfur dry deposition over grass. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 90: 2131-2143.
- Widyastama, R. 1991. Jenis Tanaman Berpotensi untuk Penghijauan Kota. *Kompas* 11 Juli 1991.
- Wilmer, C.M. 1983. "Stomata". Longman, London. 66p.
- Wolch,J.R., J. Byrne, J.P. Newell. 2014. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities 'just green enough. *Landsc. Urban Plan.*, 125 (2014), pp. 234–244
- Wu,Z.P., C. Wang, J.N. Xu, L.X. Hu. 2007. Air-borne anions and particulate matter in six urban green spaces during the summer. *J. Tsinghua Univ. Sci. Technol.*, 47(12): 2152–2157



- Xia,Q., J. Niu, X. Liu. 2014. Dispersion of air pollutants around buildings: a review of past studies and their methodologies. *Indoor Built Environ.*, 23 (2014), pp. 201–224
- Yang,J., J.R. McBride, J.X. Zhou, Z.Y. Sun. 2005. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction. *Urban For. Urban Green.*, 3 (2): 65–78
- Zhou,X.W. dan X.P. Kang. 2008. Study on dust-retention ability of different green plants on campus. *J. Anhui Agric. Sci.*, 36(24): 10431–10432.





DAMPAK DEBU JALAN ANGKUTAN BATUBARA

Terhadap Kesehatan Manusia
dan Tanaman Karet

Permasalahan pencemaran lingkungan mulai muncul saat jalan angkut yang awalnya hanya digunakan oleh dua perusahaan tambang, kini digunakan oleh kurang lebih 25 perusahaan. Volume lalu lintas truk batubara yang melintas di ruas jalan tersebut berkisar antara 4.000 hingga 5.000 unit perhari (As, 2010).

Dampak yang paling dirasakan adalah terjadinya pencemaran lingkungan berupa peningkatan konsentrasi debu dari jalan angkut batubara tersebut. Permasalahan ini semakin kompleks karena ruas jalan khusus angkutan batubara ini memotong beberapa ruas jalan, baik jalan kabupaten maupun jalan negara dan juga melintasi spot-spot permukiman penduduk.

Pencemaran lingkungan akibat dispersi debu yang mencapai rumah penduduk sudah lama menjadi keluhan warga, bahkan gangguan pernafasan yang cenderung meningkat diyakini juga berhubungan dengan kontaminasi debu tersebut.

Oleh sebab itu, di samping melakukan pengukuran langsung, konsentrasi dan dispersi debu juga diprediksi menggunakan model kualitas udara. Kontur konsentrasi dan dispersi partikulat ini selanjutnya menjadi input dalam menghitung risiko pajanan debu bagi masyarakat yang bermukim di sepanjang jalan khusus angkutan batubara di Kabupaten Tapin.



✉ literasinusantaraofficial@gmail.com
🌐 www.penerbitlitnus.co.id
📞 @litnuspenerbit
📞 literasinusantara_
📞 085755971589

Kesehatan +17

