

MODEL HUBUNGAN KONSENTRASI *PARTICULATE MATTER* 10 μM (PM_{10}) DI UDARA AMBIEN DENGAN KARAKTERISTIK LALU LINTAS DI JARINGAN JALAN PRIMER KOTA PADANG

Hendra Gunawan^{1*}, Yenni Ruslinda², Vera Surtia Bachtiar², Annisa Dwinta².

¹Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

²Jurusan Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

Kampus Universitas Andalas, Limau Manis, Padang-25163

hendra@eng.unand.ac.id

Abstrak

Salah satu jenis pencemar yang dihasilkan dari aktivitas transportasi adalah *Particulate Matter* 10 μm (PM_{10}), yang merupakan partikel *inhalable* dengan diameter kecil dari 10 μm . Partikel ini akan masuk ke paru-paru dan bertahan di dalam tubuh untuk waktu yang lama, sehingga dapat mengganggu sistem pernapasan manusia. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model hubungan konsentrasi PM_{10} di udara ambien dengan karakteristik lalu lintas di jaringan jalan primer Kota Padang. Penelitian dilakukan di Jl. Sudirman mewakili jalan arteri primer, Jl. Imam Bonjol mewakili jalan kolektor primer, dan Jl. M. Yunus mewakili jalan lokal primer. Pengambilan sampel PM_{10} menggunakan alat *Low Volume Sampler* dan analisisnya dengan neraca analitik. Konsentrasi PM_{10} yang diperoleh selama 24 jam di ketiga lokasi penelitian berkisar antara 100,19-131,26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, yang masih berada di bawah baku mutu Peraturan Pemerintah No. 41 Tahun 1999. Konsentrasi PM_{10} dengan semua parameter karakteristik lalu lintas memiliki hubungan korelasi kuat hingga sangat kuat dengan nilai r berkisar antara 0,680-0,990, serta menunjukkan hubungan yang signifikan ($\alpha < 0,05$). Berdasarkan uji validasi, model persamaan dengan jumlah kendaraan berdasarkan jenis lebih direkomendasikan untuk pendekatan perhitungan konsentrasi PM_{10} di udara ambien pada ketiga jalan dengan nilai persentase error (E) 2-3%.

Kata kunci: jaringan jalan primer, karakteristik lalu lintas, PM_{10} , udara ambien

Abstract

One kind of pollutant produced from transport activity is 10 μm Particulate Matter (PM_{10}), which is an inhalable particle with a diameter smaller than 10 μm . These particles get into the lungs and stay in the body for a long time, so will disturb the human respiratory system. This research aims to develop the model of the relationship between PM_{10} concentrations in ambient air with the characteristics of the traffic on Padang primary road network. The study was conducted in Jl. Sudirman, Jl. Imam Bonjol, and Jl. M. Yunus as the represents of primary arterial, collector, and local roads. Sampling of PM_{10} are performed using Low Volume Sampler and then analyze with analytical balance. The concentrations of PM_{10} obtained during 24 hours in all three locations ranged from 100.19 to 131.26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. All these results still below the quality standards according to Government Regulation No. 41/1999. The correlation between concentrations of PM_{10} with all the traffic characteristic parameters have the strong to very strong relationship, with r values ranging from 0.680 to 0.990. All the results also showed the significant correlations ($\alpha < 0.05$). Based on the validation tests, models with the traffic volumes based on vehicle type are recommended to estimate the concentrations of PM_{10} in ambient air on all three type of roads, with percentage errors (E) between 2 to 3%.

Keywords: primary road networks, traffic characteristics, PM_{10} , ambient air

PENDAHULUAN

Dari berbagai sektor yang potensial dalam mencemari udara, sektor transportasi memegang peran yang sangat besar dibandingkan dengan sektor lainnya (Taylor and Nakai, 2012). Di kota-kota besar, kontribusi gas buang kendaraan bermotor sebagai sumber polusi udara mencapai 60-70%. Kegiatan transportasi yang melibatkan penggunaan kendaraan berbahan bakar fosil akan menghasilkan pencemar udara berupa gas dan partikulat (Farahdiba dan Juliani, 2016). Bahan pencemar utama yang terdapat di dalam gas buang kendaraan bermotor adalah CO, berbagai senyawa Hidrokarbon, SO_x dan NO_x serta partikulat dan debu (Kusminingrum dan Gunawan, 2008, Panjaitan, dkk, 2011, Mohamed, 2015). Selain itu, lalu lintas kendaraan bermotor juga dapat meningkatkan kadar partikulat debu yang berasal dari permukaan jalan, komponen ban, dan rem (Saepudin dan Admono, 2005).

Salah satu jenis partikulat debu yang diemisikan dari aktivitas transportasi adalah PM₁₀. PM₁₀ merupakan partikulat yang berukuran lebih kecil daripada 10 µm. PM₁₀ terdiri dari partikel halus berukuran kecil dari 2,5 µm dan sebagian partikel kasar yang berukuran 2,5 µm sampai 10 µm. Partikel-partikel ini terdiri dari berbagai ukuran, bentuk, dan ratusan bahan kimia yang berbeda. PM₁₀ berasal dari debu jalan, debu konstruksi, pengangkutan material, buangan kendaraan, dan cerobong asap industri, serta aktivitas *crushing* dan *grinding* (USEPA, 2013). PM₁₀ diketahui dapat meningkatkan angka kematian yang disebabkan oleh penyakit jantung dan pernafasan (Zeng, et al. 2017). Pada konsentrasi 140 µg/m³ dapat menurunkan fungsi paru-paru pada anak-anak, sementara pada konsentrasi 350 µg/m³ dapat memperparah kondisi penderita *bronchitis* (Huboyo dan Sustrisno, 2009).

PM₁₀ merupakan salah satu bahan pencemar udara yang digolongkan ke dalam kelompok pencemar primer (*primary pollutant*), yaitu bahan pencemar yang diemisikan langsung ke udara dari sumber cemar, seperti kendaraan bermotor (Wijayanti, 2010). Di samping mengganggu estetika, partikel berukuran kecil di udara dapat terhisap ke dalam sistem pernapasan dan menyebabkan penyakit gangguan pernapasan

serta kerusakan paru-paru (Alves, et al, 2017). Ada tiga cara masuknya bahan polutan seperti PM₁₀ dari udara ke tubuh manusia yaitu melalui inhalasi, ingesti dan penetrasi kulit. Inhalasi bahan polutan udara ke paru-paru dapat menyebabkan gangguan pada paru-paru dan saluran nafas. Refleksi batuk juga akan mengeluarkan bahan polutan dari paru-paru yang kemudian bila tertelan akan masuk ke saluran pencernaan. Permukaan kulit juga dapat menjadi pintu masuk bahan polutan di udara khususnya bahan organik yang dapat melakukan penetrasi kulit dan dapat menimbulkan efek sistemik. Kerusakan kesehatan akibat PM₁₀ tergantung pada lamanya kontak, konsentrasi partikulat dalam udara, jenis partikulat itu sendiri dan lain-lain (Agusnar, 2008). Nilai angka baku mutu ambien konsentrasi PM₁₀ sesuai dengan PP No. 41 tahun 1999 tentang Pengendalian Pencemaran Udara adalah 150 µg/m³ untuk pengukuran selama 24 jam.

Peningkatan pencemaran udara dari sektor transportasi di Indonesia diperkirakan terjadi akibat peningkatan jumlah kendaraan bermotor yang tidak sebanding dengan peningkatan panjang jalan, penggunaan Bahan Bakar Minyak (BBM) dengan kualitas yang masih rendah, serta dipengaruhi oleh karakteristik lalu lintas seperti volume kendaraan, kecepatan dan kepadatan lalu lintas, jenis kendaraan, pola berkendara, dan lain sebagainya (Saepudin, dan Admono, 2005). Kota Padang sebagai ibu kota Propinsi Sumatera Barat juga mengalami peningkatan jumlah kendaraan setiap tahunnya. Data Badan Pusat Statistik Kota Padang tahun 2015 menunjukkan prosentase peningkatan jumlah kendaraan lebih daripada 20% pertahun, sehingga berdampak terhadap kualitas udara di kawasan jalan padat lalu lintas.

Pemantauan kualitas udara saat ini di Kota Padang dilakukan dengan pengukuran *grab sampling* (sampling sesaat) yang membutuhkan waktu, tenaga, dan biaya yang besar. Hal ini dikarenakan Kota Padang belum memiliki stasiun pemantau udara otomatis yang dapat mengukur kualitas udara pada lokasi-lokasi tertentu setiap saat, karena alat ini bekerja otomatis selama 24 jam. Untuk itu, penelitian ini bertujuan membuat model hubungan antara konsentrasi PM₁₀ di udara ambien dengan karakteristik lalu lintas di

jaringan jalan primer Kota Padang. Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat diestimasi konsentrasi PM_{10} berdasarkan data karakteristik lalu lintas pada masing-masing klasifikasi fungsi jalan primer di Kota Padang.

Menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia no. 34 tahun 2006 tentang Jalan, sistem jaringan jalan primer merupakan sistem jaringan jalan dengan peranan pelayanan distribusi barang dan jasa untuk pengembangan semua wilayah di tingkat nasional, dengan menghubungkan semua simpul jasa distribusi yang berwujud pusat-pusat kegiatan. Berdasarkan fungsinya jalan terdiri atas jalan arteri, jalan sekunder dan jalan lokal. Jalan arteri merupakan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan utama dengan ciri perjalanan jarak jauh, kecepatan rata-rata tinggi, dan jumlah jalan masuk ke jalan ini sangat dibatasi secara berdaya guna. Jalan kolektor merupakan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan dengan ciri-ciri perjalanan jarak sedang, kecepatan rata-rata sedang dan jumlah jalan masuk dibatasi. Jalan lokal merupakan jalan umum yang berfungsi melayani angkutan setempat dengan ciri-ciri perjalanan jarak pendek, kecepatan rata-rata rendah, dan jalan masuk tidak dibatasi.

METODE

Langkah-langkah pada penelitian ini terdiri dari pengumpulan data sekunder, penelitian pendahuluan, pemilihan lokasi dan waktu penelitian, pengambilan data primer, analisis laboratorium, pengolahan, dan analisis data. Data sekunder yang dikumpulkan berupa data klasifikasi jalan Kota Padang yang diperoleh dari Dinas Perhubungan Kota Padang, peta lokasi penelitian yang diperoleh dari *Google Map*, data arah dan kecepatan angin dominan Kota Padang lima tahun terakhir dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Kota Padang yang dipergunakan untuk menentukan *windrose* Kota Padang. Data *windrose* diperlukan untuk peletakan alat sampling. Penelitian pendahuluan dilakukan untuk menentukan lokasi sampling dengan menghitung volume lalu lintas di beberapa ruas jalan di Kota Padang, yang diprediksi berpotensi menghasilkan konsentrasi polutan udara. Perhitungan volume lalu lintas dilakukan dengan menghitung jumlah kendaraan setiap

jam, kemudian dikonversi ke satuan smp/jam (satuan mobil penumpang per jam). Data primer berupa konsentrasi PM_{10} dan data karakteristik lalu lintas dilakukan dengan pengambilan sampel langsung ke lokasi sampling.

Lokasi sampling ditetapkan sebanyak tiga titik yang mewakili klasifikasi jaringan jalan primer Kota Padang yaitu jalan arteri primer, jalan kolektor primer dan jalan lokal primer. Pemilihan lokasi pengukuran ini mengacu pada SNI 19-7119.9-2005 tentang Penentuan Lokasi Pengambilan Contoh Uji Pemantauan Kualitas Udara *Roadside*. Dalam SNI tersebut jalan yang dipilih untuk lokasi pemantauan kualitas udara jalan raya adalah jalan yang tegak lurus dengan arah angin dominan. Dari data BMKG diperoleh angin dominan di Kota Padang pada siang hari berasal dari Barat (dari lautan), sedangkan pada malam hari berasal dari Timur (dari daratan). Hal ini dikarenakan Kota Padang merupakan kota pantai yang dipengaruhi oleh fenomena angin darat dan angin laut (Ruslinda dan Hafidawati, 2012). Selain itu pertimbangan pemilihan lokasi pengukuran juga didasarkan pada persamaan karakteristik ketiga jalan dan merupakan volume lalu lintas tertinggi pada masing-masing fungsi jalan. Jalan yang terpilih sebagai lokasi pengambilan sampel udara untuk jaringan jalan primer adalah Jl. Sudirman mewakili jalan arteri, Jl. Imam Bonjol mewakili jalan kolektor dan Jl. M. Yunus mewakili jalan lokal. Waktu sampling dilakukan setiap empat jam selama dua hari, dengan rentang waktu mulai dari 00.00-04.00 WIB, 04.00-08.00 WIB, 08.00-12.00 WIB, 12.00-16.00 WIB, 16.00-20.00 WIB dan 20.00-00.00 WIB.

Sampling dilakukan terhadap konsentrasi PM_{10} di udara ambien, kondisi meteorologi, dan karakteristik lalu lintas di jaringan jalan primer Kota Padang. Sampling PM_{10} menggunakan alat *Low Volume Sampler* (LVS) merek Sibata SL-15pm. Prinsip kerja alat ini adalah filtrasi partikulat pada filter dengan cara melewatkan udara melalui pompa penghisap udara dengan laju 20 l/menit. Filter yang digunakan sebagai media penyaring partikulat adalah filter *fiber glass*. Sesuai SNI 19-7119.9-2005 pengambilan sampel polutan udara pada jalan raya mengharuskan peletakan alat sampling 1-5 m dari pinggir jalan dengan

ketinggian 1,5-3,0 meter dari permukaan tanah. Selanjutnya sampel PM₁₀ yang tertahan pada filter dianalisis konsentrasinya dengan metode gravimetri di laboratorium, menggunakan alat neraca analitik. Pengukuran data kondisi meteorologi dilakukan langsung di lokasi sampling setiap interval waktu 15 menit selama sampling. Parameter yang diukur adalah temperatur udara dan tekanan udara dengan menggunakan *pocket weatherman* dan penentuan arah angin dengan menggunakan kompas. Data kondisi meteorologi ini berguna untuk pengolahan data konsentrasi PM₁₀.

Pengukuran karakteristik lalu lintas meliputi jumlah kendaraan berdasarkan jenis dan bahan bakar, volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas. Untuk penentuan volume lalu lintas dibutuhkan data jumlah kendaraan berdasarkan jenis yaitu kendaraan ringan, kendaraan berat, dan sepeda motor. Menurut Manual Kapasitas Jalan Indonesia (1997) kendaraan ringan (*Light Vehicle, LV*) merupakan kendaraan bermotor ber-as dua dengan 4 roda dan dengan jarak as 2,0-3,0 m meliputi mobil penumpang, oplet, mikrobis, dan *pick up*. Kendaraan berat (*Heavy Vehicle, HV*) adalah kendaraan bermotor dengan jumlah roda lebih dari 4 dan jarak as lebih dari 3,5 m meliputi bis, truk 2 as, truk 3 as dan truk kombinasi dan truk kecil. Selanjutnya, sepeda motor (*Motor Cycle, MC*) merupakan kendaraan bermotor beroda 2 atau 3. Pengukuran jumlah kendaraan yang melintasi masing-masing jalan juga dilakukan setiap empat jam. Pengukuran dilakukan secara manual dengan alat *counter* dan untuk membantu perhitungan ditambahkan alat *video camera* untuk merekam kejadian di lapangan. Pengukuran kecepatan lalu lintas dilakukan secara langsung di lapangan menggunakan alat *speed gun Bushnell* seri *velocity* yang bekerja menggunakan radar atau gelombang ultrasonik yang diarahkan pada kendaraan yang lewat. Pantulan gelombang tersebut memiliki frekuensi yang berbeda dan perubahan frekuensi ini akan sebanding dengan kecepatan kendaraan yang lewat. Kecepatan kendaraan dapat dibaca langsung pada layar digital. Pengukuran kecepatan dilakukan setiap lima menit dan dirata-ratakan setiap jam.

Pengolahan dan analisis data meliputi analisis konsentrasi polutan udara, analisis karakteristik lalu lintas, dan analisis hubungan

konsentrasi polutan di udara ambien dengan karakteristik lalu lintas. Analisis konsentrasi PM₁₀ dilakukan dengan metode gravimetri yaitu dengan menimbang berat partikulat yang tertahan di permukaan filter (selisih $\frac{p_s \times V_s \times T_{stp}}{T_s \times p_{stp}}$ berat filter sesudah dan sebelum sampling). Setelah penimbangan filter kemudian dilakukan perhitungan PM₁₀ dengan persamaan-persamaan berikut:

$$V_{stp} = \quad (1)$$

dimana:

P_s = tekanan udara saat sampling (mmHg)

V_s = volume udara saat sampling (m³)

T_s = temperatur udara saat sampling (°C)

P_{stp} = tekanan udara keadaan standar (mmHg)

V_{stp} = volume udara keadaan standar (m³)

T_{stp} = temperatur udara keadaan standar (°C)

$$C = \frac{(W_t - W_0) \times 10^6}{V_{stp}} \quad (2)$$

dimana:

C = konsentrasi PM₁₀ (µg/m³)

W_0 = berat awal filter (gram)

W_t = berat akhir filter (gram)

V_{stp} = volume udara terhisap setelah dikoreksi.

Analisis karakteristik lalu lintas terdiri dari perhitungan volume, kecepatan, dan kepadatan lalu lintas. Volume lalu lintas didapatkan dengan mengkonversi jumlah kendaraan yang melewati lokasi penelitian menjadi satuan smp (satuan mobil penumpang) dengan menggunakan persamaan 3.

$$Q = (n_{LV} \times f_{LV}) + (n_{HV} \times f_{HV}) + (n_{MC} \times f_{MC}) \quad (3)$$

dimana:

Q = volume lalu lintas (smp/jam).

n_{LV} = jumlah kendaraan *light vehicle*.

n_{HV} = jumlah kendaraan *heavy vehicle*.

n_{MC} = jumlah kendaraan *motor cycle*.

f_{LV} = nilai faktor ekuivalen mobil penumpang (emp) untuk *light vehicle*.

f_{HV} = nilai faktor ekuivalen mobil penumpang (emp) untuk *heavy vehicle*.

f_{MC} = nilai faktor ekuivalen mobil penumpang (emp) untuk *motor cycle*.

Kecepatan lalu lintas diperoleh dari angka yang tertera pada alat *speed gun meter*

dan dirata-ratakan. Kepadatan lalu lintas diperoleh dengan membagi data volume dan kecepatan lalu lintas, sesuai dengan persamaan 4.

$$K = Q / V \quad (4)$$

dimana:

K = kepadatan kendaraan (smp/km)

Q = volume kendaraan (smp/jam)

V = kecepatan kendaraan (km/jam).

Pemodelan hubungan konsentrasi PM_{10} di udara ambien dengan karakteristik lalu lintas dilakukan dengan analisis regresi-korelasi. Analisis regresi digunakan untuk mendapatkan model matematis hubungan antara konsentrasi PM_{10} di udara ambien sebagai variabel tidak bebas (y) dan karakteristik lalu lintas sebagai variabel bebas (x), sedangkan analisis korelasi untuk mengukur derajat kedekatan relasi yang terjadi antarvariabel. Koefisien korelasi (r) dapat didefinisikan sebagai ukuran tingkat hubungan linear antara dua variabel. Angka koefisien korelasi berkisar antara 0 (tidak ada korelasi sama sekali) sampai dengan ± 1 (korelasi sempurna). Angka koefisien korelasi yang semakin mendekati 1 berarti korelasi semakin erat sedangkan yang mendekati 0 berarti korelasi semakin lemah (Hasan, 2008). Dari analisis ini didapatkan bentuk fungsi, model matematis, nilai koefisien determinasi (R^2) dan nilai koefisien korelasi (r). Tipe regresi yang digunakan adalah regresi linear dan regresi non linear.

Selanjutnya dilakukan uji signifikansi terhadap model persamaan yang dihasilkan menggunakan analisis regresi dalam SPSS 20, untuk mendapatkan nilai signifikansi hubungan antara konsentrasi PM_{10} di udara

ambien dengan karakteristik lalu lintas. Jika nilai signifikansi $\alpha < 0,05$, maka model dapat diterima, sebaliknya jika $\alpha > 0,05$ maka model ditolak. Untuk mengetahui seberapa jauh perbedaan konsentrasi polutan udara hasil perhitungan dari model dengan konsentrasi polutan udara hasil pengukuran di lapangan, dilakukan uji validasi dengan perhitungan nilai persentase kesalahan (*error percentage*, E) menggunakan persamaan 5 (Sengkey dkk, 2011):

$$E = \quad (5)$$

dimana:

E = persentase kesalahan (*error percentage*)

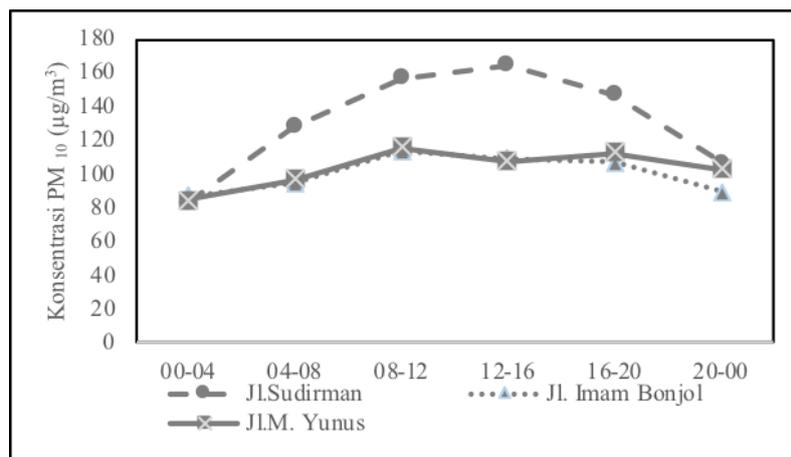
$$c_1 = \frac{|c_t - c_p|}{|c_t|} \times 100\% \quad \text{konsentrasi} \quad \text{di}$$

lapangan

c_p = konsentrasi dari persamaan/model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsentrasi PM_{10} rata-rata tertinggi berturut-turut berada di Jl. Sudirman sebagai jalan arteri primer $131,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Jl. M. Yunus sebagai jalan lokal primer $103,39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan Jl. Imam Bonjol yang mewakili jalan kolektor primer $100,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fluktuasi konsentrasi PM_{10} di ketiga lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1. Konsentrasi PM_{10} di ketiga lokasi penelitian mulai meningkat pada pukul 04.00-08.00 WIB. Konsentrasi PM_{10} mencapai puncaknya di Jl. Sudirman pada pukul 12.00-16.00 WIB, di Jl. Imam Bonjol dan Jl. M. Yunus pada pukul 08.00-12.00 WIB. Fluktuasi ini sesuai dengan banyaknya jumlah kendaraan yang melintasi masing-masing jalan pada jam tersebut. Konsentrasi PM_{10} di ketiga lokasi penelitian mulai menurun setelah pukul 20.00 WIB.

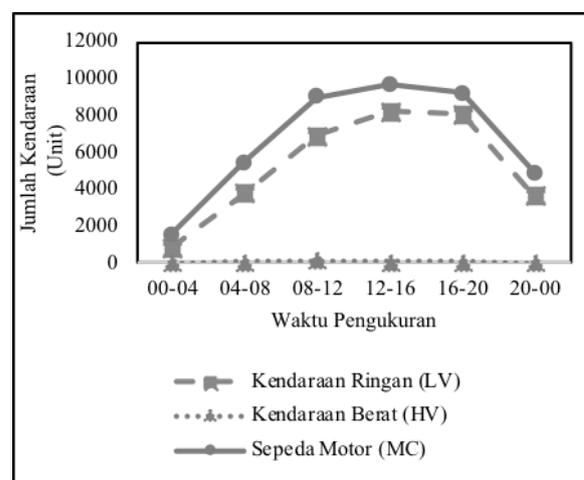


Gambar 1. Fluktuasi Konsentrasi PM₁₀ di Ketiga Lokasi Penelitian

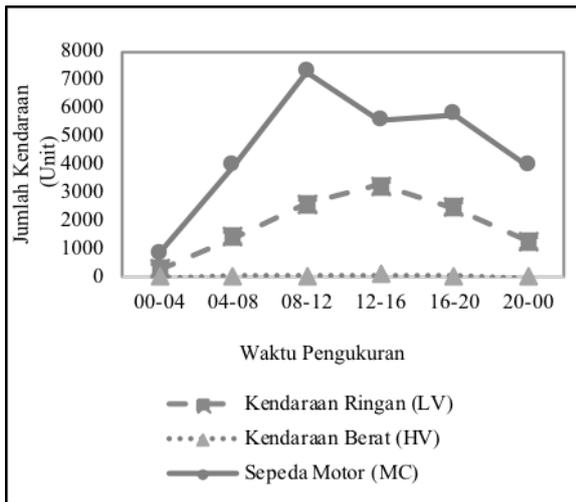
Konsentrasi PM₁₀ lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi gas hidrokarbon di jaringan jalan primer, yang berkisar antara 55,62 - 119,58 µg/m³, dengan konsentrasi lebih tinggi juga ditemukan di Jl. Sudirman 101,88 µg/m³ (Gunawan et al, 2017). Berdasarkan hasil pengukuran ini didapatkan konsentrasi PM₁₀ masih berada di bawah baku mutu menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia tahun 1999 yaitu 150 µg/m³. Namun untuk jam puncak sudah melebihi baku mutu, terutama di Jl. Sudirman sebesar 164,38 µg/m³ pada pukul 12.00-16.00 WIB. Hal ini dikarenakan banyaknya jumlah kendaraan yang melintasi jalan, sehingga konsentrasi PM₁₀ semakin tinggi. Hal yang sama juga terjadi di jaringan jalan sekunder Kota Padang yaitu di Jl. Raya By Pass, konsentrasi PM₁₀ pada saat jam puncak sudah melebihi baku mutu yaitu 176,262 µg/m³ pada pukul 08.00-12.00 WIB (Ruslinda, dkk., 2015).

Hasil pengukuran di ketiga lokasi penelitian menunjukkan jumlah kendaraan per hari berturut-turut dari yang tertinggi hingga terendah adalah di Jl. Sudirman 71.821 unit, di Jl. M. Yunus 59.214 unit dan di Jl. Imam Bonjol 38.843 unit. Jenis kendaraan ringan dan kendaraan berat lebih banyak melintas di Jl. Sudirman yang mewakili jalan arteri primer. Hal ini dipengaruhi oleh posisi Jl. Sudirman yang terletak di pusat kota sehingga jenis kendaraan seperti mobil pribadi, oplet, bus, *pick up*, mini bus lebih banyak melintasi ruas jalan ini. Di samping itu, lebar jalan yang lebih besar juga menjadikan jalan ini banyak dilalui kendaraan. Sebaliknya jumlah sepeda motor lebih banyak melintas di Jl. M. Yunus yang

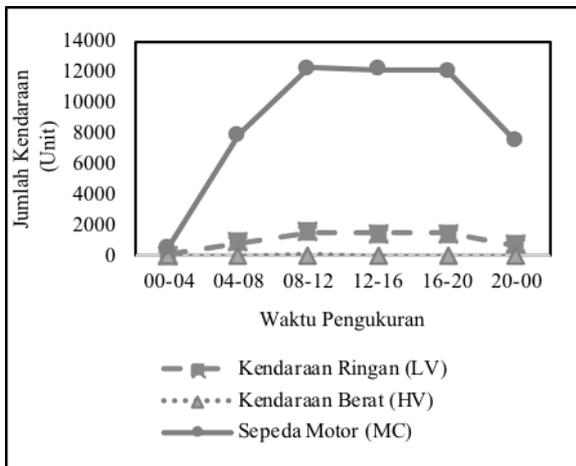
merupakan jalan lokal primer. Jalan lokal memiliki jumlah kendaraan sepeda motor tertinggi karena fungsi jalannya melayani jarak pendek. Sepeda motor merupakan jenis kendaraan yang paling umum digunakan untuk melayani jarak pendek, dikarenakan secara fisik berukuran kecil sehingga lebih leluasa berkendara di jalan yang tidak terlalu lebar. Selain itu, sepeda motor juga merupakan kendaraan yang lebih hemat pemakaian bahan bakarnya. Gambar 2 sampai dengan Gambar 4 memperlihatkan fluktuasi jumlah kendaraan ringan, kendaraan berat dan sepeda motor yang melintas di lokasi penelitian.



Gambar 2. Fluktuasi Jenis Kendaraan di Jalan Arteri

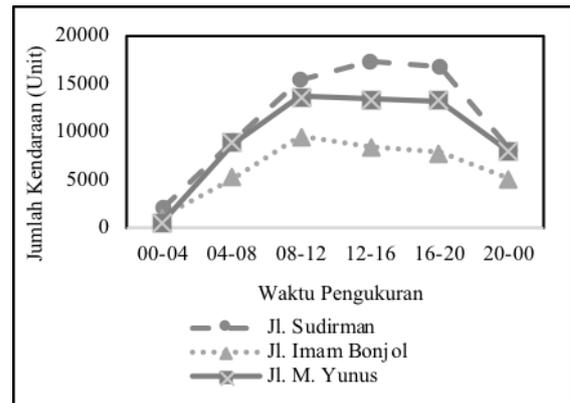


Gambar 3. Fluktuasi Jenis Kendaraan di Jalan Kolektor

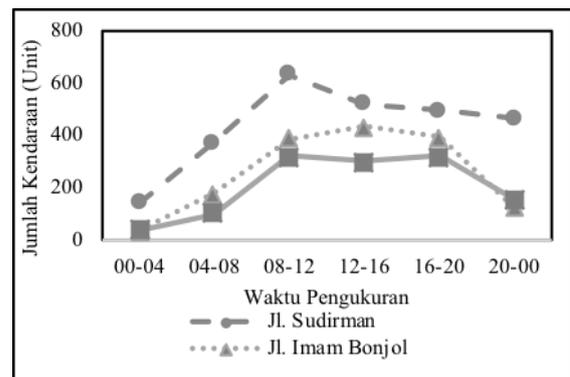


Gambar 4. Fluktuasi Jenis Kendaraan di Jalan Lokal

Jumlah kendaraan berdasarkan bahan bakar dikelompokkan menjadi dua, yaitu kendaraan berbahan bakar bensin dan berbahan bakar solar. Persentase jumlah kendaraan berbahan bakar bensin sebesar 95,97 - 97,88%, lebih besar dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar solar sebesar 2,12 - 4,03%. Hal yang sama juga didapatkan pada jaringan jalan sekunder Kota Padang, dengan persentase kendaraan menggunakan bahan bakar bensin 86,59 - 97,19% dan menggunakan bahan bakar solar 2,81 - 13,4% (Gunawan, dkk., 2015). Jumlah kendaraan berbahan bakar bensin dan solar terbanyak adalah di Jl. Sudirman yang merupakan jalan arteri. Gambar 5 dan Gambar 6 menampilkan fluktuasi jumlah kendaraan berdasarkan bahan bakar di ketiga jalan.



Gambar 5. Fluktuasi Kendaraan Bensin

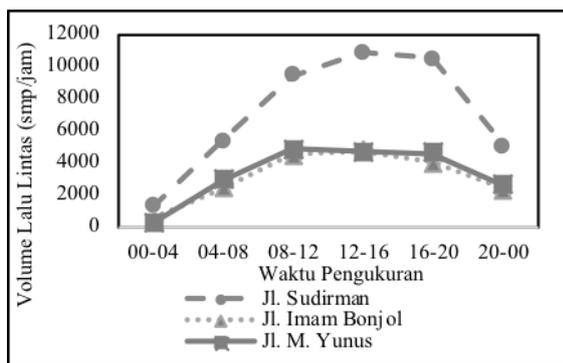


Gambar 6. Fluktuasi Kendaraan Solar

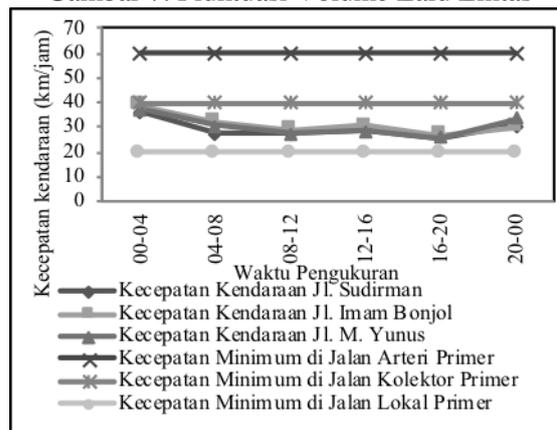
Hasil analisis volume lalu lintas rata-rata per jam tertinggi terdapat di Jl. Sudirman 1.753 smp/jam, Jl. M. Yunus 826 smp/jam dan Jl. Imam Bonjol 765 smp/jam. Hal ini sesuai dengan banyaknya jumlah kendaraan yang melewati ketiga jalan. Sebaliknya hasil pengukuran kecepatan lalu lintas di ketiga jalan didapatkan kecepatan lalu lintas rata-rata paling rendah berturut-turut berada di Jl. Sudirman 29,34 km/jam, Jl. M. Yunus yaitu 30,38 km/jam dan Jl. Imam Bonjol yaitu 31,24 km/jam. Kecepatan lalu lintas di Jl. Sudirman lebih rendah dari ke dua jalan lainnya dikarenakan volume lalu lintas di jalan ini lebih tinggi. Menurut Peraturan Pemerintah No. 34 Tahun 2006, kecepatan minimum untuk jalan arteri primer sebesar 60 km/jam, jalan kolektor primer sebesar 40 km/jam dan jalan lokal primer sebesar 20 km/jam. Berdasarkan hasil penelitian ini, Jl. Sudirman dan Jl. Imam Bonjol tidak memenuhi kriteria kecepatan minimum yang telah ditetapkan. Hal ini dikarenakan kondisi Jl. Sudirman dan Jl. Imam

Bonjol memiliki banyak persimpangan yang membuat kecepatan kendaraan di kedua jalan ini menjadi rendah, sedangkan Jl. M. Yunus sebagai jalan lokal primer memenuhi syarat kecepatan minimum yang ditetapkan.

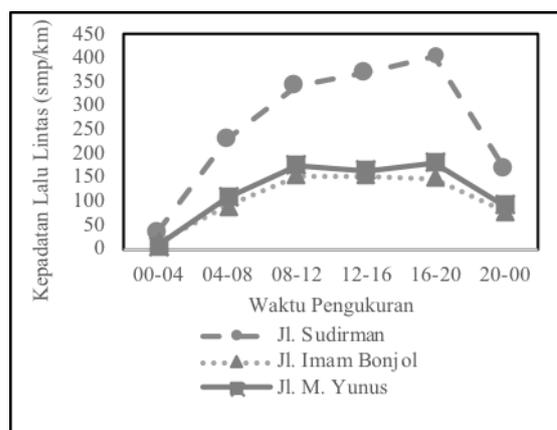
Kepadatan lalu lintas tertinggi berada di Jl. Sudirman 258 smp/km, Jl. M.Yunus 122 smp/km dan terendah di Jl. Imam Bonjol 107 smp/km. Kepadatan lalu lintas yang tinggi di Jl. Sudirman dipengaruhi oleh volume lalu lintas yang tinggi dan kecepatan lalu lintas yang rendah di jalan tersebut. Gambar 7 sampai dengan Gambar 9 menampilkan fluktuasi volume, kecepatan dan kepadatan lalu lintas di ketiga jalan. Dari gambar-gambar tersebut terlihat peningkatan jumlah kendaraan, volume lalu lintas dan kepadatan lalu lintas mulai terjadi pada rentang pukul 04.00-12.00 WIB dan mencapai puncaknya pada pukul 08.00-16.00 WIB. Setelah pukul 20.00 WIB, kecenderungan terjadi penurunan karakteristik lalu lintas. Hal ini juga sejalan dengan fluktuasi konsentrasi PM₁₀ di udara ambien ketiga jalan.



Gambar 7. Fluktuasi Volume Lalu Lintas



Gambar 8. Fluktuasi Kecepatan Lalu Lintas



Gambar 9. Fluktuasi Kepadatan Lalu Lintas

Tabel 1 Model Hubungan Konsentrasi PM₁₀ dengan Karakteristik Lalu Lintas

Parameter	Tipe Regresi	Persamaan	R ²	r	Korelasi
Jalan Arteri Primer (Jl. Sudirman)					
Jenis Kendaraan	Linear Berganda	$y = 0,002989 LV + 0,206411HV + 0,003624 MC + 73,31036$	0,966	0,983	Sangat Kuat
Bensin	Eksponensial	$y = 79,572e^{4E-05x}$	0,919	0,958	Sangat Kuat
Solar	Eksponensial	$y = 78,629e^{0,0011x}$	0,631	0,794	Kuat
Volume Lalu Lintas	Linear	$y = 0,0314x + 76,266$	0,906	0,952	Sangat Kuat
Kecepatan Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 617,29e^{-0,054x}$	0,634	0,796	Kuat
Kepadatan Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 81,105e^{0,0018x}$	0,918	0,958	Sangat Kuat
Jalan Kolektor Primer (Jl. Imam Bonjol)					
Jenis Kendaraan	Linear Berganda	$y = -0,00267 LV + 0,347732 HV + 0,001598 MC + 83,87803$	0,980	0,990	Sangat Kuat
Bensin	Eksponensial	$y = 80,78e^{3E-05x}$	0,855	0,925	Sangat Kuat

Parameter	Tipe Regresi	Persamaan	R ²	r	Korelasi
Solar	Eksponensial	$y = 85,615e^{0,0006x}$	0,819	0,905	Sangat Kuat
Volume Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 81,729e^{6E-05x}$	0,878	0,937	Sangat Kuat
Kecepatan Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 178,65e^{-0,019x}$	0,463	0,680	Kuat
Kepadatan Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 82,003e^{0,0018x}$	0,864	0,929	Sangat Kuat
Jalan Lokal Primer (Jl. M. Yunus)					
Jenis Kendaraan	Linear Berganda	$y = 0,002937 LV + 0,102743 HV + 0,001345 MC + 84,26207$	0,898	0,947	Sangat Kuat
Bensin	Eksponensial	$y = 83,645e^{2E-05x}$	0,870	0,933	Sangat Kuat
Solar	Linear	$y = 0,088x + 85,105$	0,867	0,931	Sangat Kuat
Volume Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 83,742e^{6E-05x}$	0,888	0,942	Sangat Kuat
Kecepatan Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 195,7e^{-0,021x}$	0,702	0,838	Kuat
Kepadatan Lalu Lintas	Eksponensial	$y = 84,063e^{0,0017x}$	0,909	0,954	Sangat Kuat

Hasil analisis regresi dan korelasi antara konsentrasi PM₁₀ dengan masing-masing karakteristik lalu lintas dapat dilihat pada Tabel 1. Berdasarkan model persamaan yang diperoleh untuk ketiga lokasi penelitian, nilai r didapatkan berkisar antara 0,680 – 0,990 yang dapat diinterpretasikan sebagai hubungan kuat hingga sangat kuat. Nilai koefisien determinasi (R²) di ketiga lokasi penelitian berkisar antara 0,463- 0,980. Hal ini menunjukkan sekitar 46 – 98 % konsentrasi PM₁₀ dipengaruhi oleh karakteristik lalu lintas. Dari hasil uji signifikansi terhadap model persamaan, didapat nilainya berkisar antara 0,000-0,002 yang berarti kurang dari 0,05 sehingga dengan tingkat kepercayaan 95%, semua model persamaan dalam penelitian ini dapat diterima. Untuk menentukan sejauh mana model persamaan dapat mewakili nilai konsentrasi PM₁₀ di lapangan dilakukan uji validasi. Berdasarkan hasil uji validasi diperoleh nilai persentase *error* (E) berkisar antara 2-11 %. Dari uji validasi ini, persamaan yang direkomendasikan untuk pendekatan perhitungan konsentrasi PM₁₀ berdasarkan karakteristik lalu lintas untuk ketiga jalan adalah dengan persamaan yang menggunakan jumlah kendaraan berdasarkan jenis kendaraan sebagai variabel penentu. Rekomendasi didasarkan pada nilai E terkecil, yaitu 2-3%, dan kemudahan pengukuran di lapangan.

SIMPULAN DAN SARAN

Fluktuasi konsentrasi PM₁₀ di udara ambien mempunyai pola yang sama dengan fluktuasi karakteristik lalu lintas di jaringan jalan primer Kota Padang. Dari hasil analisis hubungan konsentrasi PM₁₀ dengan karakteristik lalu lintas didapatkan nilai korelasi kuat hingga sangat kuat dengan nilai r antara 0,680 – 0,990 dan koefisien determinasi berkisar antara 0,463 - 0,980. Hal ini menunjukkan bahwa sekitar 46 – 98 % konsentrasi PM₁₀ dipengaruhi oleh variabel karakteristik lalu lintas.

Berdasarkan uji signifikansi dan validasi, model persamaan yang direkomendasikan untuk perhitungan konsentrasi PM₁₀ di udara ambien berdasarkan data karakteristik lalu lintas adalah dengan menggunakan jumlah kendaraan berdasarkan jenis sebagai variabel penentu, karena memberikan nilai persentase *error* (E) terkecil yaitu 2-3%. Model persamaan untuk jalan arteri primer adalah $y = 0,002989 LV + 0,206411 HV + 0,003624 MC + 73,31036$, untuk jalan kolektor primer $y = -0,00267 LV + 0,347732 HV + 0,001598 MC + 83,87803$ dan untuk jalan lokal adalah $y = 0,002937 LV + 0,102743 HV + 0,001345 MC + 84,26207$, dimana y adalah konsentrasi PM₁₀ di udara ambien, LV adalah jumlah kendaraan ringan, HV adalah jumlah kendaraan berat, dan MC adalah jumlah sepeda motor.

DAFTAR PUSTAKA

- Agusnar. 2008 *Analisa Pencemaran dan Pengendalian Pencemaran*. Medan: USU Press
- Alves, C. A., Vicente, A. M., Custódio, D., Cerqueira, M., Nunes, T., Pio, C., Lucarelli, F., Calzolari, G., Nava, S., Diapouli, E., Eleftheriadis, K., Querol, X., and Bandowe, B. A. 2017. Polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives (nitro-PAHs, oxygenated PAHs and azaarenes) in PM from Southern European cities, *Science of the Total Environment*. 595:494-504
- Costabile, F. and Allegrini, I. 2008 An intelligent transport system based on the control of traffic air pollution. *Environmental Modelling and Software*. 23:258- 267
- Farahdiba, U.A dan Juliani, A. 2016. Analisis Pengaruh Kepadatan Lalu Lintas Terhadap Udara di Kawasan Kampus Terpadu Universitas Islam Indonesia. *Jurnal Teknologi Technoscientia*. 8(2): 118-126
- Gunawan, H., Ruslinda, Y., Anggela, Y. 2015. *Pengaruh Konsentrasi Karbon-monoksida (CO), di Udara Ambien Roadside dengan Karakteristik Lalu Lintas di Jaringan Jalan Sekunder Kota Padang*. Proceedings of 18th FSTPT International Symposium, Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Gunawan, H., Ruslinda, Y. and Alfionita, A. 2017. Relationship Models Between Hydrocarbon Concentrations in Roadway Ambient Air with Traffic Characteristics, *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 8(10):1017–1028
- Gusnita, D. 2012 Transportasi Ramah Lingkungan dan Kontribusinya dalam Mengurangi Polusi Udara. *Berita Dirgantara*. 11(2):1-9
- Hasan, M. I. 2008 *Pokok-pokok Materi Statistik 2 (Statistik inferensif)* Edisi 2. Bumi Aksara. Jakarta
- Huboyo, S.H dan Sustrisno H. (2009) *Analisis Konsentrasi Particulate Matter 10 (PM₁₀) pada Udara di Luar Ruang*. 30 (1):44-48
- Kusminingrum, N dan Gunawan. 2008. Polusi Udara Akibat Aktivitas Kendaraan Bermotor di Jalan Perkotaan Pulau Jawa dan Bali. *Jurnal Pusat Litbang Jalan dan Jembatan*. 25(3):314-326
- Departemen Pekerjaan Umum: *Manual Kapasitas Jalan Indonesia*. 1997.
- Mohamed, W. 2015. Variability in vehicle' exhaust emissions and fuel consumption in urban driving pattern, *American Journal of Vehicle Design*. 3(1):31-38
- Panjaitan T.P.M, Bambang P, Manuwoto dan Poernomosidhi P. 2011. Pengelolaan Pencemaran Udara Akibat Transportasi di Kawasan Perumahan Pinggir Metropolitan. *Jurnal Sabua*. 3(1):1-8
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 41 Tahun 1999 tentang *Pengendalian Pencemaran Udara*.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia no. 34 tahun 2006 tentang *Jalan*.
- Ruslinda, Y dan Hafidawati. 2012. *Komposisi Kimia Partikel Halus dan Partikel Kasar pada Siang dan Malam Hari di Udara Ambien Kota Padang*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia TOPI Universitas Riau 2012
- Ruslinda, Y, Gunawan, H., Nugraha, N. 2015. *Analisis Konsentrasi PM₁₀ di Udara Ambien Roadside Jaringan Jalan Sekunder Kota Padang*. Prosiding 2nd ACE National Conference 2015, Padang
- Saepudin, A. dan Admono, T. 2005. Kajian Pencemaran Udara Akibat Emisi Kendaraan Bermotor di DKI Jakarta. *Teknologi Indonesia*. 28(2): 29-39
- Sengkey, L. S., Jansen, F. dan Wallah, S. 2011. Tingkat Pencemaran Udara CO Akibat Lalu Lintas dengan Model Prediksi Udara Skala Mikro. *Jurnal*

Ilmiah Media Engineering. 1(2):119-126.

SNI 19-7119.9-2005 tentang *Penentuan Lokasi Pengambilan Contoh Uji Pemantauan Kualitas Udara Roadside*

Taylor, E.T. and Nakai, S. 2012. Monitoring the Levels of Toxic Air Pollutants in the Ambient Air of Freetown, Sierra Leone. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 6(7):283-292.

USEPA. 2013. Health Effects of Particulate Matter. <http://www.epa.gov/pm/health.html> diakses tanggal 14 Mei 2016

Wijayanti, R. N. 2010. Analisis Pengaruh Kepadatan Lalu Lintas Terhadap Konsentrasi PM₁₀. Teknik Lingkungan. Universitas Diponegoro. Semarang

Zeng, X-W., Qian, Z., Vaughn, M. G., Nelson, E. J., Dharmage, S. C., Bowatte, G., Perret, J., Chen, D-H., Ma, H., Lin, S., de Foy, B., Hu, L-W., Yang, B-Y., Xu, S-L., Zhang, C., Tian, Y-P., Nian, M., Wang, J., Xiao, X., Bao, W-W., Zhang, Y-Z., and Dong, G-H. 2017. Positive association between short-term ambient air pollution exposure and children blood pressure in China—Result from the Seven Northeast Cities (SNEC) study, *Environmental Pollution*. 224:698-705