

Estimasi Emisi Partikulat (PM₁₀) akibat Ragam Aktivitas Urban di Kota Surakarta

Prabang Setyono, Widhi Himawan, dan Natasha Nancy

Program Studi S1 Ilmu Lingkungan, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret Surakarta ; e-mail : prabangsetyono@gmail.com

ABSTRAK

Pelaksanaan inventarisasi emisi PM₁₀ di Surakarta bertujuan mengetahui nilai emisi tahunan PM₁₀ dan sebaran kontributornya pada aktivitas masyarakat. Metode pengumpulan data dilakukan secara bottom up pada tahun 2014 terhadap tiga sumber utama emisi yaitu : sumber area, sumber titik dan sumber bergerak serta top down pada tahun 2019. Perhitungan emisi menggunakan formula baku emisi dengan faktor emisi berdasarkan EMEP/EEA Corinair. Khusus untuk transportasi pada ruas jalan utama, data bottom up dianalisis menggunakan software Mobilev 3.0. Hasil inventarisasi emisi PM₁₀ menemukan nilai emisi total di Surakarta sebesar 220,20 ton/tahun. Nilai tersebut mayoritas dikontribusikan oleh sumber bergerak senilai 122,25 ton/tahun (55%), diikuti oleh sumber area (39%) dan sumber titik (6%). Nilai tersebut menurun menjadi 182,61 ton/tahun pada inventarisasi berbasis data top down tahun 2019. Transportasi menjadi kontributor utama emisi PM₁₀ di wilayah administratif Surakarta pada inventarisasi tahun 2014 maupun 2019. Penelitian ini menunjukkan nilai penting penggunaan data bottom up untuk menurunkan ketidakpastian pada estimasi sekaligus meningkatkan validitas dan reliabilitas mitigasi. Penggunaan data bottom up menyediakan akses ke sumber emisi penting yang kerap tidak terdokumentasi oleh data sekunder seperti konsumsi bahan bakar kayu dan arang untuk industri dan kuliner jalan raya.

Kata kunci: Emisi, Urban, Partikulat (PM10), Surakarta

ABSTRACT

The aim of this inventory is to estimate annual emission of PM₁₀ and their anthropogenic contribution. This research was divided into two phase, distinguished by data collection method (bottom up method in 2014 and top down in method 2019). The estimation used are based on a basic emission formula from IPCC and an emission factors of EMEP/EEA Corinair, except for transportation emission which analyzed with an assistance of the Mobilev 3.0 software. The emission source was classified into three cluster referred to the IPCC Guideline (2006): area sources, point sources and mobile sources. The total emission calculated was 220,20 tonnesPM₁₀ annually. This value was contributed by the mobile sources (55%), followed by area sources (39%) and point sources (6%). The emission value reduced to 182,61 tonnesPM₁₀ annually in 2019 with approaches of topdown method. Transportation was the main contributor of PM₁₀ emission either on 2014 or 2019. Result shows an advantage of using a topdown approaches, which is to reduce research uncertainties and to increase on mitigation validity and reliability. Bottom up approach provides an access to a unique emission source which generally unidentified and not documented in secondary data, for example : charcoal and woodwaste consumption and the street food vendors.

Keywords: Emission, Urban Area, Particulate Matter (PM10), Surakarta

Citation: Setyono, P., Himawan, W., dan Nancy, N. (2020). Estimasi Emisi Partikulat (PM10) akibat Ragam Aktivitas Urban di Kota Surakarta. Jurnal Ilmu Lingkungan, 18(3), 556-564, doi:10.14710/jil.18.3.556-564

1. Pendahuluan

Udara merupakan komponen lingkungan yang rentan terhadap penurunan kualitas. Penurunan tersebut berdampak signifikan pada kehidupan mengingat peran vital udara. Pencemaran udara secara umum didefinisikan sebagai adanya jangkauan luas dari suatu senyawa, campuran kimia, partikulat material atau material biologis pada udara ambien yang dapat menimbulkan ancaman dan ketidaknyamanan pada kehidupan manusia dan makhluk hidup lainnya (Genc, et.al, 2011).

Kawasan perkotaan bertanggung jawab terhadap 75-80% emisi gas rumah kaca global (Ghaemi and

Smith, 2020). Penelitian Moriarty dan Wang (2014) menemukan bahwa perkotaan menjadi konsumen bagi 75% energi global. Dominasi konsumsi bahan bakar fosil menjadikan kawasan tersebut sebagai pusat emisi di seluruh dunia (Shan et al, 2016). Fakta tersebut membuat mayoritas kajian maupun kebijakan emisi dipusatkan pada kawasan perkotaan (Pandev et al, 2011).

Surakarta, saat ini berkembang sebagai salah satu kota perdagangan modern sekaligus tujuan pariwisata nasional. Resiko peningkatan pencemaran cukup tinggi mempertimbangkan heterogenitas dan intensitas kegiatan yang ada. Transportasi

diasumsikan menjadi kontributor terbesar menilik lokasi strategis Surakarta sebagai perlintasan Pulau Jawa dan statusnya sebagai pusat kegiatan bagi kota dan sekitarnya (Sukoharjo, Boyolali, Wonogiri, Karanganyar, Klaten dan Sragen).

Inventarisasi emisi menjadi tahap mendasar penting bagi upaya pengelolaan emisi. Inventarisasi akan memunculkan estimasi beban emisi tahunan pada cakupan wilayah administrative perkotaan (Gioli et al, 2015) dalam konteks keluaran optimal. Hal tersebut, menurut Shahbazi et al (2016) menjadi basis ilmiah dan objektif bagi pemodelan kualitas udara, kaitannya dengan potensi emisi masing-masing aktivitas, distribusi emisi dan identifikasi potensi tindakan reduksi emisi.

Mendorong pengendalian emisi di daerah, pemerintah Indonesia melalui Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan merilis Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pedoman Pengendalian Pencemaran Udara Daerah. Regulasi ini mencantumkan pentingnya peran inventarisasi emisi dalam pengendalian pencemaran udara di daerah tertentu. Peraturan tersebut melengkapi sekaligus menegaskan hal yang sama dalam Peraturan Pemerintah Nomor 41 Tahun 1999.

Partikulat material merupakan istilah untuk mengidentifikasi partikel solid maupun cair yang ada di atmosfer akibat proses alam maupun aktivitas manusia. Ukurannya beragam dan memiliki kemampuan tinggal dan jangkauan atmosfer yang berbeda. Partikel ini berbahaya bagi kesehatan, terutama bila berukuran $< 10 \mu\text{m}$ karena kemampuannya untuk masuk dan terakumulasi pada saluran pernafasan manusia. Partikulat material umumnya adalah hasil dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar atau sisa gesekan antar permukaan (Popescu and Ionel, 2012).

Emisi PM₁₀ sangat beresiko bagi kesehatan, terutama bila polusi ini terjadi pada lokasi publik dengan interaksi tinggi pada manusia. Karakter berupa partikel mikro yang sulit dideteksi dan dihindari akan memudahkan masuk ke dalam pernafasan. Penelitian terdahulu menunjukkan PM menimbulkan beragam permasalahan kesehatan seperti terutama berkaitan dengan sistem pernafasan dan kardiovaskular seperti asma hingga memicu kanker paru (Gulia et.al, 2015).

Efek terhadap kesehatan yang ditimbulkan oleh emisi PM akan bervariasi tergantung pada ukurannya. Secara umum dapat dinyatakan bahwa partikel berukuran lebih kecil cenderung akan lebih berbahaya bagi kesehatan. Alasannya karena partikel dengan ukuran $>10 \mu\text{m}$ dapat difilter sebelum masuk ke dalam saluran pernafasan dan menimbulkan gangguan kesehatan. Partikel dengan ukuran lebih kecil memiliki kemampuan untuk masuk hingga trache bahkan sistem respirasi lebih dalam. Selain itu, bahaya pada partikulat juga ditimbulkan oleh logam berat dan senyawa organik yang dibawanya. Hal tersebut dapat memicu akumulasi logam berat yang

mengganggu sistem syaraf hingga kanker (Hormann, et al, 2005).

Partikulat dalam udara tidak hanya berupa partikel berukuran kecil yang mampu menyusup masuk ke sistem tubuh manusia. Seringkali partikel ini mengandung senyawa yang berbahaya seperti logam berat yang meningkatkan resiko kerusakan pada pepohonan serta menurunkan kemampuan fotosintesis tumbuhan sehingga secara tidak langsung menghambat pertumbuhannya (Prajapati, 2012). Meski demikian, keberadaan tanaman dipandang sebagai upaya efektif untuk mengurangi jumlah partikulat di udara (Yang, et.al, 2015).

Sumber emisi PM₁₀ potensial di Surakarta juga diasumsikan berasal dari penggunaan arang dan kayu oleh pedagang kaki lima (PKL) dan industri rumah tangga tradisional (batik). Sebagai destinasi wisata, kedua aktivitas tersebut menjadi daya tarik Kota Surakarta dan perlahan dianggap sebagai ciri khas kota. Secara umum, permasalahan emisi PM₁₀ belum mendapatkan proporsi penting meskipun dampak yang ditimbulkan berbahaya. Hal ini tercermin dari minimnya kesadaran masyarakat untuk mengurangi maupun melindungi diri dari emisi tersebut dalam kesehariannya.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui sumber emisi PM₁₀, menghitung asumsi emisi PM₁₀ tahunan Kota Surakarta. Keluaran kegiatan ini secara langsung berupa teridentifikasinya sumber emisi dan asumsi emisi tahunan PM₁₀ dari setiap kategori di Kota Surakarta. Manfaat keluaran tersebut adalah sebagai dasar penyusunan kebijakan perencanaan "Air Quality Management" Kota Surakarta secara khusus pada mitigasi emisi PM₁₀.

2. Metode Penelitian

2.1. Waktu dan Lokasi Kegiatan

Pelaksanaan inventarisasi emisi PM₁₀ berlangsung di Surakarta dengan cakupan seluruh sumber emisi yang ada di dalam wilayah administratif Surakarta. Penelitian ini berlangsung pada tahun 2014 dan 2019 dalam beberapa tahapan utama yaitu survey dan pengumpulan data, perhitungan emisi serta analisis dan penyajian hasil.

2.2. Koleksi Data

Survey data aktivitas dilaksanakan dengan metode bottom up untuk mencakup secara menyeluruh data-data emisi yang tersebar. Data yang digunakan mayoritas adalah data primer melalui survey total maupun sampling dan dilengkapi oleh data sekunder dari instansi pemerintahan maupun swasta. Data tersebut dikumpulkan melalui kuisioner dan wawancara.

Data aktivitas berupa data-data penunjang perhitungan emisi yang kompleksitasnya terdapat pada ketersediaan data. Data dasarnya adalah data jenis dan konsumsi bahan bakar pada aktivitas tertentu. Data pelengkap dapat berupa jenis dan teknologi peralatan, kategori pemanfaatan, luas ruang

(konstruksi), volume materi (gudang, konstruksi) dan volume penjualan (refuelling station).

Pelaksanaan survey data aktivitas diawali dengan penentuan sumber emisi potensial di wilayah administratif kota Surakarta. Sumber tersebut dibagi menjadi 3 kategori yaitu : sumber titik, sumber area dan sumber bergerak (jalan raya dan non jalan raya).

2.3. Estimasi Emisi

Asumsi emisi pada sumber titik dan area dihitung dengan rumus baku emisi :

$$E = (AD \times EF) - Efisiensi\ Pengendalian$$

Dengan :

E : Total emisi (ton/tahun);

AD : Data aktivitas;

EF : Faktor emisi;

Efisiensi pengendalian hanya dihitung pada sumber yang mengaplikasikan teknologi pengendali emisi.

Baseline year data aktivitas adalah data terbaru saat penelitian (2014) dengan toleransi untuk data sekunder dapat menggunakan baseline year 2013. Untuk perhitungan tahun 2019 seluruhnya digunakan data sekunder pemerintah (pendekatan *topdown*). Faktor emisi diambil dari EMEP/EEA Corinair menyesuaikan dengan jenis sumber, kategori kegiatan dan kompleksitas data diperoleh untuk penentuan tier (tingkatan) perhitungan.

Perhitungan emisi sumber bergerak jalan raya khususnya untuk jalur utama memanfaatkan asistensi dari software Mobilev 3.0. Data input Mobilev adalah : data *traffic count* jalan per kategori kendaraan, panjang jalan, jumlah lajur, status jalan, posisi jalan

terhadap pusat kota, kecepatan rata-rata, direksi jalan dan gradien jalan. Faktor emisi telah tersedia secara otomatis pada software ini dengan setting perhitungan pada tier 3, dengan tingkat keakuratan tinggi (Setyono et.al, 2014).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Surakarta dan Bahan Emisi Urban

Surakarta merupakan salah satu kota yang berkembang pesat pada regional Jawa Tengah. Lokasi kota ini strategis karena berada pada jalur perlintasan antar wilayah Pulau Jawa. Keterbukaan investasi seiring dengan pencanangan kota sebagai pusat perdagangan, wisata dan MICE (*meeting, incentive, convention and exhibition*) menarik investor untuk masuk dan mengembangkan berbagai aktivitas perekonomian.

Surakarta dikenal pula sebagai pusat aktivitas bagi wilayah Greater Solo atau kota-kota kecil yang ada disekitarnya. Hal ini menjadikan Surakarta sebagai pusat ekonomi dan layanan publik. Kondisi ini secara langsung semakin membebani lingkungan Surakarta, terutama oleh intensitas komuter dan aglomerasi dari wilayah sekitar.

3.2. Emisi Partikulat Pada Sumber Area

Sumber area didefinisikan sebagai sumber emisi yang seragam, dengan intensitas emisi kecil dan jumlah yang banyak namun tidak dapat diidentifikasi sebagai sebuah sumber emisi titik yang dominan (EIIP, 2001). Sebagai sumber tunggal, sumber area dikategorikan menghasilkan emisi yang kecil, namun akan membesar ketika dikelompokkan pada aktivitas serupa.

Tabel 1. Estimasi emisi partikulat (PM₁₀) pada sumber area

No	Aktivitas	Jumlah titik pengamaran	Emisi tahunan PM ₁₀ (ton/tahun)
1	Perbankan	136	0,06
2	Perumahan	146.639 rumah tangga	0,25
3	Fasilitas Pendidikan (Sekolah)	387 sekolah dengan beragam tingkatan	0,08
4	Restoran	189 restoran	9,83
5	Universitas	45 universitas	0,11
6	Pasar Tradisional	28 pasar tradisional	1,95
7	Jasa Perbengkelan	168 bengkel	0,10
8	Kegiatan konstruksi	150.742,13 m ² area konstruksi	12,24
9	Pergudangan	6 gudang	1,44
10	Pedagang Kaki Lima (PKL)	2361 unit PKL	56,69
Total Emisi Sumber Area			85,76

Berdasarkan tabel 1, maka sumber emisi area dominan adalah aktivitas pedagang kaki lima (PKL) dengan 56,69 ton/tahun atau setara dengan 70% keseluruhan emisi PM₁₀ sumber ini. Hal ini disebabkan oleh besarnya konsumsi bahan bakar arang seagai bahan bakar utama PKL makanan dan minuman. Jumlah PKL yang besar (2361unit) menjadi faktor lain tingginya emisi PM₁₀. Pedagang kaki lima menjadi aktivitas wisata utama Surakarta. Aktivasnya terentang selama 24 jam dengan vendor yang berganti-ganti.

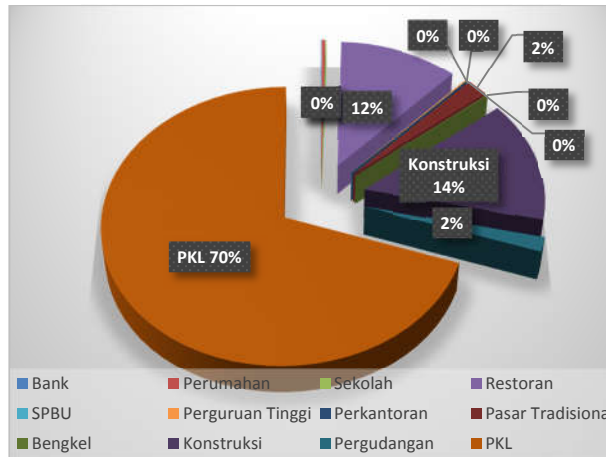
Observasi lapangan dilakukan dengan menyusuri setiap jalan di wilayah administratif Kota Surakarta.

Observasi tersebut menunjukkan bahwa aktivitas ini tersebar merata di mayoritas wilayah Surakarta. Indikasinya adalah selain menarik minat wisatawan, aktivitas PKL di Surakarta berkaitan erat dengan kebutuhan ekonomi dan sosio kultur masyarakat Surakarta.

Surakarta, merupakan contoh kota yang mengandalkan kuliner (termasuk kuliner jalanan) sebagai daya tarik utama pariwisata. Hasil dari survey primer di seluruh wilayah Surakarta pada 2012 menunjukkan jumlah PKL dengan spesifikasi pada kuliner mencapai > 2000 lapak. Hasil menarik dari survey tersebut adalah adanya pergantian jenis

kuliner pada durasi waktu harian (pagi-siang-malam) bahkan pada satu lokasi yang sama (Setyono, 2014).
 Surakarta, seperti halnya pada kota-kota lain negara berkembang menjadikan kuliner jalanan sebagai atraksi wisata, penyedia makanan masyarakat

hingga peningkatan pendapatan lokal. Meski demikian, pemerintah setempat menyadari kesulitan mengelola jumlah besar PKL tersebut (Natawidjaja, 2014).



Gambar 1. Kontribusi emisi pada setiap kegiatan kategori sumber emisi area

Sektor penyumbang emisi PM₁₀ tertinggi pada sumber area selanjutnya adalah konstruksi (14%). Aktivitas konstruksi berdasarkan EMEP/EEA Corinair (2013) dapat menghasilkan PM₁₀ 0,0812 kg/m²/tahun. Untuk inventarisasi Kota Surakarta, konstruksi yang dihitung asumsi emisinya adalah yang memiliki luasan bangunan > 500 m² karena dipandang dapat memberikan dampak signifikan bagi lingkungan maupun kesehatan.

Berbeda dengan karakter emisi pada PKL, konstruksi memberi resiko kesehatan lebih tinggi bagi para pekerja yang mempertimbangkan rutinitas dan waktu interaksi yang cukup lama pada situs konstruksi. Emisi PM pada konstruksi besar cukup signifikan daripada emisi tunggal pada suatu unit PKL. Resiko PM yang mampu memasuki saluran pernafasan hingga memberikan gangguan pada sistem membuat risikonya menjadi besar pada pekerja konstruksi yang umumnya memiliki pola pikir tradisional, awam terhadap ancaman kesehatan dan abai terhadap pemanfaatan filter PM.

Dominasi emisi PM₁₀ sektor area akibat pemanfaatan bahan bakar arang membuat aktivitas restoran menjadi sumber emisi ketiga terbesar (11%). Aktivitas yang berlangsung pada restoran relatif serupa dengan PKL yang keseluruhan berfokus pada kegiatan memasak.

Aktivitas pada pasar tradisional tidak terlampau signifikan (2%) menghasilkan emisi PM₁₀

dibandingkan ketiga sumber di atas (PKL, konstruksi dan restoran). Hal ini dikarenakan larangan aktivitas dengan memanfaatkan bahan bakar tradisional (kayu). Peralatan penghasil emisi pada pasar tradisional didominasi penggunaan kompor LPG (liquified petroleum gas) dan alat hasil modifikasi mesin-mesin motor lama seperti penggiling kelapa dan daging.

Observasi pada pasar tradisional menunjukkan kebutuhan arang dan kayu yang cukup besar karena beberapa pasar sentral juga menjadi pusat penjualan dua tipe bahan bakar tradisional tersebut. Maraknya penjualan arang maupun kayu bakar pada pasar tradisional didorong oleh permintaan yang besar. Hal ini terbukti pada inventarisasi emisi PKL dan restoran.

3.3. Emisi Partikulat Pada Sumber Titik

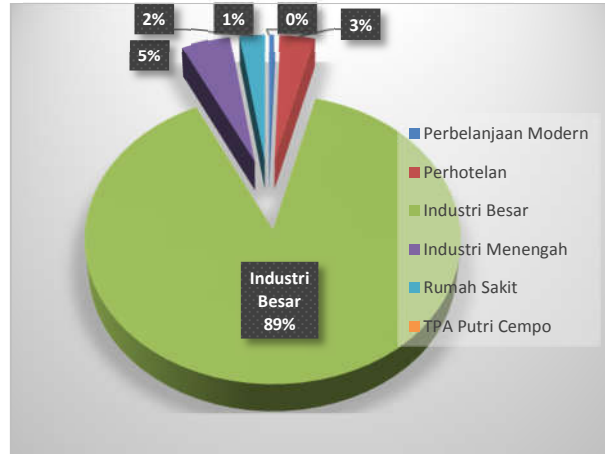
Sumber titik didefinisikan sebagai sumber emisi dengan potensi menghasilkan emisi besar, stasioner dan dapat diidentifikasi secara khusus karena kemampuannya melepas emisi ke atmosfer (Barnes et.al, 2001). Sehingga, pada kategori sumber titik ini, suatu sumber emisi tunggal telah memiliki kemampuan untuk menghasilkan emisi dalam jumlah besar dan signifikan dibanding sumber tunggal pada sumber area.

Tabel 2. Estimasi emisi partikulat (PM₁₀) pada sumber titik

No	Aktivitas	Jumlah titik pengamatan	Emisi tahunan PM ₁₀ (ton/tahun)
1	Perbelanjaan Modern	17	0,07
2	Hotel	117	0,41
3	Industri besar	5	10,85
4	Industri menengah	118	0,57
5	Rumah sakit	13	0,29
Total Emisi Sumber Titik			12,20

Aktivitas emisi dominan pada sumber titik adalah industri skala besar yang jumlah lokasinya hanya terdapat 5 industri di Surakarta. Nilai emisi aktivitas ini mencapai 10,85 ton/tahun atau setara dengan 89% emisi PM₁₀ dari sumber titik. Hanya, pada aktivitas industri besar umumnya telah mengaplikasikan peralatan pengendali emisi PM seperti scrubber dan cyclon untuk mengikuti anjuran

dan regulasi dari badan pengawas lingkungan hidup setempat. Pemanfaatan teknologi pengendali emisi pada industri besar di Surakarta diasumsikan berhasil mengurangi emisi PM₁₀ hingga 80%. Penggunaan bahan bakar pada industri besar didominasi oleh listrik yang menyebabkan emisi PM₁₀ menjadi nihil. Berdasarkan survey yang dilakukan, bahan bakar fosil yang umum digunakan adalah batubara.



Gambar 2. Kontribusi emisi pada setiap kegiatan kategori sumber emisi titik

Aktivitas dengan emisi terbesar selanjutnya adalah industri menengah (5%). Seperti halnya industri besar, industri menengah di Surakarta didominasi oleh industri tekstil terutama tekstil tradisional (batik). Survey pada beberapa industri batik menunjukkan penggunaan kayu yang cukup besar sebagai bahan bakar utama.

Komposisi emisi berikutnya pada sumber titik adalah perhotelan (3%) dan rumah sakit (2%). Aktivitas potensial emisi pada perhotelan adalah penggunaan LPG untuk memasak. Sedangkan, penggunaan genset mayoritas cukup terbatas di wilayah Surakarta karena intensitas listrik padam yang jarang terjadi.

3.4. Emisi Partikulat Pada Sumber Bergerak

Sumber bergerak dalam inventarisasi ini dikelompokkan menjadi dua yaitu sumber bergerak on road dan non road. Sumber bergerak non road berkaitan dengan transportasi jalan raya sedangkan non road adalah sumber bergerak yang ada di luar jalan raya.

Perhitungan emisi sumber bergerak on road, terutama untuk jalur-jalur utama dilakukan dengan memanfaatkan software Mobilev 3.0. Setidaknya terdapat 75 ruas jalan utama di Surakarta dianalisis dengan Mobilev berdasarkan data lalu lintas harian dan identitas jalan, termasuk pada pusat perekonomian dan aktivitas (*central business district*) Surakarta.

Tabel 3. Estimasi emisi partikulat (PM₁₀) pada sumber bergerak

No	Aktivitas	Jumlah titik pengamatan	Emisi tahunan PM ₁₀ (ton/tahun)
1	Jalur utama (jalan raya)	75	80,85
2	Jalur minor (jalan raya)	Lebih dari 700 km	40,37
3	Aktivitas perkeretaapian	3	1,01
4	Aktivitas terminal bus	1	0,02
Total Emisi Sumber Bergerak			122,25

Hasil inventarisasi dan perhitungan emisi PM₁₀ pada sumber bergerak (table 3) menunjukkan dominasi emisi on road, terutama yang terjadi pada major road senilai 80,85 ton/tahun atau setara dengan 66% emisi PM₁₀ sumber bergerak. Situasi ini wajar bila memperhitungkan jumlah kendaraan harian yang melintasi jalur-jalur utama terutama pada central business district dan akses-akses masuk kota Surakarta. Akses masuk-keluar Surakarta menjadi ruas-ruas padat karena tingginya mobilitas dari masyarakat di kota/kabupaten sekitar Surakarta

untuk beraktivitas di dalam wilayah administratif Surakarta, terutama pada saat hari kerja.

Survey yang dilakukan oleh instansi transportasi setempat menunjukkan peningkatan lebih dari tiga kali lipat jumlah kendaraan pada jam-jam kerja. Data traffic count juga mengindikasikan bahwa kepadatan pada jalur jalur masuk wilayah administratif Surakarta lebih tinggi dari kawasan pusat kota (Jl Slamet Riyadi). Jalur masuk-keluar kota, tidak hanya dipadati oleh mobilitas pekerja, namun juga lalu lintas

antar kota dengan mempertimbangkan posisi Surakarta sebagai jalur lintas antar wilayah.

Berdasarkan EMEP/EEA Corinair 2013, emisi PM₁₀ pada kendaraan bermotor dapat diakibatkan oleh 3 proses yaitu : pembakaran bahan bakar, pengelupasan ban karena pengereman dan pengelupasan permukaan jalan. Pada proses pembakaran bahan bakar, emisi PM₁₀ signifikan terjadi pada moda cars (kendaraan pribadi) dan *light duty vehicle* (kendaraan angkut barang bertonase ringan). Untuk kategori moda motor roda dua, bus dan *high duty vehicle* (kendaraan angkut bertonase besar) nilainya dalam Mobilev adalah 0 ton/tahun. Jadi meskipun terdapat emisi partikulat, namun sangat kecil. Sedangkan, untuk proses pengelupasan ban karena pengereman dan pengelupasan lapisan jalan nilai tertinggi akan terjadi pada motor ruda dua dan terendah pada kendaraan angkut bertonase besar.

Kontributor emisi PM₁₀ terbesar kedua dalam sumber bergerak adalah minor road atau jalur-jalur jalan yang lebih kecil atau tidak berperan terlampau penting dalam lalu lintas kota. Jalur-jalur ini biasanya merupakan jalan antar kecamatan, jalan alternatif dalam kota, jalan alternatif menuju luar kota dan jalan dalam pemukiman. Kepadatan jalur ini beraneka ragam tergantung pada lokasi dan fungsinya bagi masyarakat. Namun, kesamaannya adalah tidak semua moda dapat mengakses jalan ini. Umumnya, di Surakarta jalur-jalur ini hanya dapat diakses kategori kendaraan mobil pribadi, motor roda dua dan LDV.

Kondisi ini menjadikan nilai emisi PM₁₀ yang terjadi akan lebih rendah dibandingkan jalur utama (major road).

Dominasi motor roda dua dalam lalu lintas harian kota Surakarta dan informasi bahwa tidak terdapat kandungan Pb pada bahan bakar Indonesia membuat resiko logam berat tersebut pada emisi PM₁₀ sumber bergerak on road sangat kecil kemungkinannya. Hal ini menjadi sisi positif karena mengurangi resiko dampak kesehatan emisi PM₁₀ terutama mempertimbangkan resiko Pb dan akumulasinya pada manusia maupun lingkungan.

Emisi PM₁₀ akibat sumber bergerak non road besarnya tidak signifikan bila dibandingkan yang dihasilkan oleh sumber bergerak on road. Berdasar metode penghitungan, maka PM₁₀ aktivitas perkereta apian hanya akan dihasilkan oleh proses pembakaran bahan bakar moda ini (1%). Kereta api menjadi salah satu moda transportasi massa populer bagi masyarakat Surakarta terutama untuk perjalanan luar kota.

3.5. Emisi Partikulat Berbasis Data Top Down

Estimasi emisi PM₁₀ berbasis pendekatan top down dilakukan pada tahun 2019. Pendekatan ini menggunakan data sekunder dari pemerintah. Melalui pendekatan ini dapat diestimasi emisi PM₁₀ pada tiga sumber utama yaitu : sektor transportasi, penggunaan energi dan peternakan.

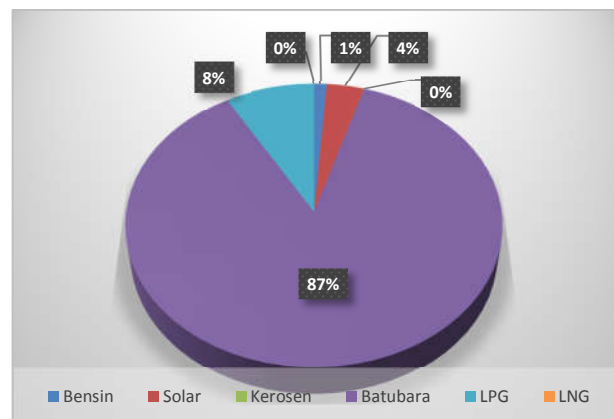
Tabel 4. Estimasi emisi partikulat (PM₁₀) dengan pendekatan top down tahun 2019

No	Sumber emisi	Emisi tahunan PM ₁₀ (ton/tahun)	Keterangan*
1	Transportasi jalan raya	159,22	Emisi dari pembakaran bahan bakar cair kendaraan
2	Industri	20,80	Emisi dari pembakaran bahan bakar industry (cair, gas dan padat)
3	Perumahan	1,73	Emisi dari pembakaran LPG
4	Perdagangan	0,17	Emisi dari pembakaran LPG
5	Peternakan	0,40	Emisi dari aktivitas peternakan berbasis jenis ternak
6	Pertanian	0,29	Emisi partikulat N dari pemupukan lahan pertanian
Total emisi PM₁₀ tahun 2019		182,61	

*Berdasarkan identifikasi dalam EMEP EEA Corinair (2013)



Gambar 3. Komposisi kontributor emisi PM₁₀ berdasarkan pada jenis industri (atas) dan berdasarkan jenis bahan bakar di Kota Surakarta tahun 2019



Hasil estimasi menunjukkan nilai emisi total PM pada tahun 2019 di Kota Surakarta mencapai 182,61 ton/tahun. Nilai tersebut terutama dikontribusikan oleh transportasi jalan raya (87%) dan industri

(12%). Intensitas konsumsi bahan bakar menjadi faktor utama penentu nilai emisi PM₁₀ pada transportasi dan industri. Transportasi karena ketergantungan bahan bakar cair (bensin dan solar

serta statusnya sebagai aktivitas utama kawasan perkotaan. Pada sektor industri, terutama didominasi pada kelompok industri tekstil disebabkan oleh adanya penggunaan batubara sebagai bahan bakar boiler. Konversi energi rumah tangga menjadi 100% LPG menjadi salah satu langkah penting menekan emisi PM₁₀ pada sektor tersebut. Hal ini dikarenakan pembakaran LPG menghasilkan emisi PM₁₀ paling rendah dibandingkan jenis energi konvensional seperti kayu bakar, arang hingga kerosen.

3.6. Pembahasan Umum

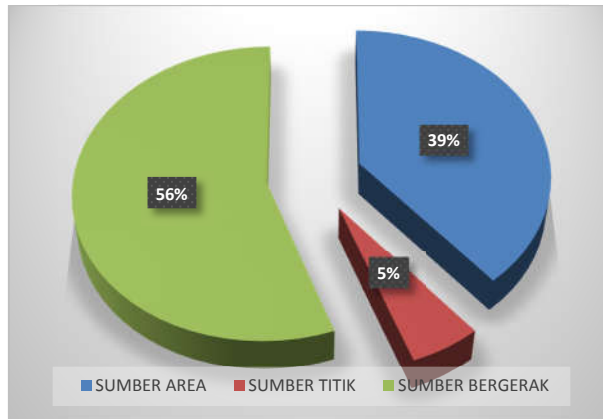
Inventarisasi PM₁₀ di Surakarta pada tahun 2014 secara keseluruhan memunculkan sumber bergerak sebagai kontributor utama (55%) disusul oleh

sumber area (39%) dan terakhir sumber titik (6%). Tren sumber bergerak sebagai kontributor utama mengikuti pola umum di mayoritas wilayah perkotaan di dunia. Namun, sumber titik berkontribusi kecil menunjukkan kekhasan aktivitas di Surakarta yang minim aktivitas industri dan didominasi sektor perdagangan dan pariwisata.

Sumber bergerak menjadi kontributor dominan karena pertumbuhan angka kendaraan pribadi yang cukup tinggi di Surakarta. Pemerintah lokal telah memulai upaya menurunkan penggunaan kendaraan pribadi melalui pengadaan transportasi umum (Batik Solo Trans). Meskipun demikian, tentunya membutuhkan waktu dan proses bertahap untuk mencapai kondisi lalu lintas dan ideal.

Tabel 5. Estimasi emisi partikulat (PM₁₀) Kota Surakarta (seluruh sumber) tahun 2014

No	Sumber emisi	Jumlah sub sumber emisi	Kontributor dominan	Proporsi emisi kontributor dominan	Emisi tahunan PM ₁₀ (ton/tahun)
1	Sumber area	11	Pedagang kaki lima	70%	85,76
2	Sumber titik	5	Industri besar	89%	12,20
3	Sumber bergerak	4	Transportasi jalan raya pada jalur utama	66%	122,25
Total emisi tahunan PM₁₀ di Surakarta tahun 2014 (ton/tahun)					220,21



Gambar 4. Kontribusi emisi PM₁₀ dari setiap kategori sumber di Kota Surakarta dengan pendekatan bottom up tahun 2014

Perdagangan dan pariwisata sebagai sektor ekonomi utama Surakarta berdampak pada hasil inventarisasi emisi PM₁₀ yang memunculkan sumber area sebagai kontributor terbesar kedua. Jika meninjau pada kategori sumber tersebut, akan tampak PKL sebagai kontributor emisi PM₁₀ utama yang tak lain merupakan salah satu daya tarik wisata dan kultural Surakarta. Pedagang kaki lima, khususnya penjual masakan jadi, mayoritas adalah pedagang tradisional yang melekukan aktivitasnya melalui proses tradisional. Artinya adalah bahan bakar yang digunakan masih tradisional (arang dan kayu) dan tanpa ada teknologi pengendalian.

Tren dari PKL akan cenderung bertambah. Peningkatan pesat vendor kuliner jalanan, kemudian berjalan seiring tren pariwisata. Kebutuhan turis terhadap produk khas wilayah menjadi faktor pendorong (Priveteria and Nesci, 2015). Hal tersebut bermakna bahwa peningkatan permintaan mendorong penyediaan dan secara langsung mengangkat ekonomi lokal. Penelitian Coldiretti (2013) dalam Priveteria and Nesci (2015)

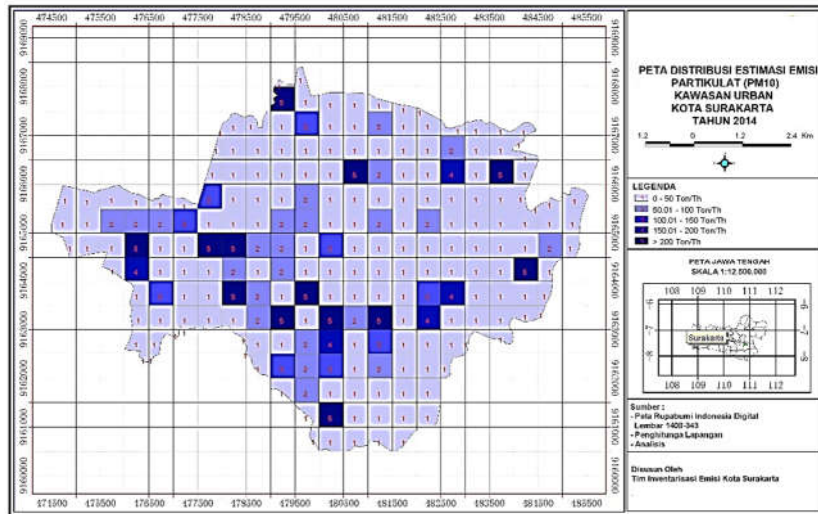
menunjukkan bahwa terdapat 3,5 milyar konsumen kuliner jalanan, dengan 45% memiliki minat makanan lokal, 24% internasional dan sisanya makanan etnik. Fakta bahwa usaha kuliner jalanan dipandang tidak memerlukan pendidikan tinggi atau modal besar menambah minat masyarakat untuk membuka usaha tersebut.

Keberadaan PKL dianggap seperti dua sisi mata uang. Pada sisi positif, tipe vendor kuliner ini menyediakan makanan secara praktis pada komunitas dan berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi lokal (Alimi, 2016). Perkembangan kekinian dengan menjamurnya penyedia kuliner jalanan berknsep mobile (mengggunakan kendaraan) memudahkan mencapai konsumen sekaligus keuntungan ekonomi. Pada sisi negatif, kuliner jalanan dianggap bersalah dalam kegagalan penyediaan makanan sehat, minimasi resiko foodborne hingga mengancam kesehatan manusia (Puspa and Kuhl, 2007).

Perdagangan dan pariwisata sebagai sektor ekonomi utama Surakarta berdampak pada hasil

inventarisasi emisi PM₁₀ yang memunculkan sumber area sebagai kontributor terbesar kedua. Jika meninjau pada kategori sumber tersebut, akan tampak PKL sebagai kontributor emisi PM₁₀ utama yang tak lain merupakan salah satu daya tarik wisata dan kultural Surakarta. Pedagang kaki lima,

khususnya penjual masakan jadi, mayoritas adalah pedagang tradisional yang meleakukan aktivitasnya melalui proses tradisional. Artinya adalah bahan bakar yang digunakan masih tradisional (arang dan kayu) dan tanpa ada teknologi pengendalian.



Gambar 5. Distribusi spasial emisi PM₁₀ dari setiap kategori sumber di Kota Surakarta

Berdasarkan tampilan spasial tersebut, grid berwarna biru lebih banyak muncul pada bagian *central business district* Surakarta. Artinya bahwa kompleksitas aktivitas pada wilayah pusat bisnis berkorelasi dengan tingginya emisi PM₁₀. Secara umum sebaran emisi tinggi cukup acak dikarenakan pada beberapa wilayah, emisi PM₁₀ juga tinggi seperti pemukiman padat dan akses-akses keluar-masuk Surakarta.

Emisi secara akumulatif akan lebih berdampak pada tumpukan nilainya pada titik tertentu. Artinya secara tunggal, baik sumber area, titik maupun bergerak belum memberi dampak cemaran terlampaui signifikan. Sebagai contoh adalah emisi PM₁₀ oleh aktivitas PKL tidak tampak berpengaruh signifikan di peta tersebut karena lokasinya yang tersebar dan secara tunggal nilai emisinya tidak terlampaui besar. Meskipun berdasarkan inventarisasi dan distribusi spasialnya emisi PM₁₀ belum terlampaui mengkhawatirkan di Surakarta, namun tren peningkatan penduduk dan aktivitas membuat pemerintah Kota Surakarta wajib mempersiapkan upaya pengendalian emisinya.

Estimasi emisi PM₁₀ dengan pendekatan topdown pada tahun 2019 menghasilkan beban emisi yang lebih rendah yaitu 182,61 ton/tahun. Komparasi dengan estimasi bottom up tahun 2014 menunjukkan nilai lebih rendah. Perbedaan sumber terinventarisasi menjadi alasan reduksi tersebut sekaligus menunjukkan keterbatasan pendekatan top down dalam menyajikan data dengan ketidakpastian rendah. Kondisi pada sektor transportasi jalan raya menjadi pembanding ideal karena terhitung pada kedua inventarisasi. Transportasi jalan raya pada tahun 2019 menghasilkan nilai emisi PM₁₀ meningkat

dibandingkan 2014, namun jika ditinjau dari selisih, maka peningkatan tersebut tidak signifikan dan memiliki ketidakpastian tinggi, mempertimbangkan tren serta dinamika penambahan kepemilikan serta penggunaan kendaraan.

Komparasi kedua metode koleksi data aktivitas dalam perhitungan emisi menunjukkan pendekatan bottom up mampu menyajikan data emisi lebih akurat. Sebagai contoh pada transportasi dengan pendekatan bottom up berdasarkan lalu lintas harian riil sedangkan top down hanya berbasis konsumsi bahan bakar dari data penjualan SPBU lokal. Bagi kota dengan karakter sebagai jalur transit dan pusat kegiatan bagi Kawasan hinterland seperti Surakarta, penggunaan data aktivitas dari penjualan bahan bakar SPBU akan menghasilkan simpangan besar. Hal ini dikarenakan banyak kendaraan emitter yang menggunakan bahan bakar dari luar daerah Surakarta melalui aktivitas komuter maupun lintas wilayah.

Pendekatan bottom up dipandang mampu menyajikan estimasi lebih mendalam dengan keterjangkauan pada data yang belum tersedia pada dokumen resmi pemerintah. Pada penelitian ini data tersebut seperti : penggunaan kayu dan arang untuk sektor industri dan PKL. Pemerintah belum memiliki data penggunaan dua jenis bahan bakar tradisional tersebut meski penjualan maupun penggunaannya masih cukup besar di beberapa industri spesifik seperti batik tradisional dan sebagai bahan bakar utama kuliner jalanan (PKL).

Ironi bahwa kedua kegiatan tersebut dijadikan tawaran wisata utama Surakarta, namun memiliki resiko lingkungan tinggi terutama akibat emisi PM₁₀ serta tidak teridentifikasi sebagai bagian mitigasi. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan topdown lebih

menjanjikan dalam sebuah perencanaan mitigasi kualitas udara. Oleh sebab itu penelitian ini merekomendasikan penggunaan pendekatan.

4. Kesimpulan

Hasil inventarisasi dengan pendekatan bottom up pada tahun 2014 menunjukkan sumber utama emisi PM₁₀ Kota Surakarta berdasar kluster emisi adalah pedagang kaki lima (berkontribusi 70% pada sumber area), industri besar (89% pada sumber titik) dan transportasi jalan raya (66% pada sumber bergerak). Emisi partikulat terbesar dikontribusikan oleh transportasi jalan raya dengan nilai 122,25 ton PM₁₀/tahun dari keseluruhan emisi partikulat Kota Surakarta senilai 220,21 ton PM₁₀/tahun. Status transportasi jalan raya sebagai contributor utama emiasi PM₁₀ Kota Surakarta masih konsisten pada estimasi berbasis topdown pada 2019 (berkontribusi pada 87 emisi keseluruhan). Berbasis data topdown, beban emisi PM₁₀ pada 2019 turun menjadi 182,61 tonPM₁₀/tahun. Kondisi tersebut terindikasi sebagai dampak kelemahan pendekatan topdown terhadap keterjangkauan data yang tidak terdokumentasi pemerintah dan kompleksitas kondisi sumber emisi pada suatu wilayah. Hal ini menjadikan inventarisasi dengan data bottom up penting dilakukan untuk mendapatkan data dasar mitigasi kualitas udara yang valid sekaligus reliabel.

Nilai emisi PM₁₀ yang signifikan dari aktivitas PKL 56,69 ton/tahun (berdasar inventarisasi bottom up), perlu mendapat perhatian dan mitigasi khusus. Hal ini tidak lepas dari status aktivitas tersebut sebagai daya Tarik wisata dan mata pencaharian penting warga, namun fakta emisi yang dihasilkan dapat pula memunculkan resiko kesehatan maupun ganggana lingkungan lainnya. Emisi partikulat (PM₁₀) memiliki distribusi lebih merata meskipun muncul kecenderungan beberapa nilai tertinggi berada pada kawasan CBD akibat sumber yang lebih bervariasi dan memiliki intensitas lebih tinggi dalam menghasilkan emisi.

DAFTAR PUSTAKA

Alimi, B.A. 2016. Risk factors in streetfood practices in developing countries : A review. *Food Sciences and Human Wellness* 5 (2016) : 141-148.

Bazrafshan, E., F. Kord Mustafapour, M. Farzadkia, K.A. Ownagh, A.H. Mahvi. 2012. Slaughter house Wastewater Treatment by Combined Chemical Coagulation and Electrocoagulation Process. *Plos ONE* 7 (6): e40108. Doi:10.1371/journal.pone.0040108.

Effendi, H. 2003. Telaah kualitas air bagi pengelola sumber daya dan lingkungan perairan. Yogyakarta. Kanisius.

Emission Inventory Improvement Program. 2001. Introduction to Area Source Emission Inventory Development. Volume III Chapter 1. US. EPA.

Emission Inventory Improvement Program. 2001. Introduction to Stationary Point Source Emission Inventory Development. Volume II Chapter 1. US. EPA.

European Environment Agency. 2013. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013, Technical Guidance to Prepare National Emission Inventory. Luxembourg : Publications Office of The European Union.

Genc, S., Zadeoglurari, Z., Fuss, S.H., and K. Genc. 2011. The Adverse Effects of Air Pollution on The Nervous System. *Journal of Toxicology* 2012 (Article ID 782462) : 1-23.

Ghaemi, Z. and A.D. Smith. 2019. A review of the quantification of life cycle greenhouse gases emissions at urban scale. *Journal of Cleaner Production* 252 (2020) 119634.

Gioli, B., Gualtieri, G., Busillo, C., Calastrini, F., Zaldei, A., and P. Toscano. 2015. Improving high- resolution emission inventories with local proxies and urban eddy covariance flux measurement. *Atmospheric Environment* 115: 246-256.

Gulia, S., Nagendra, S.M.S., Khare, M., and I. Khanna. 2014. Urban Air Quality Management: A Review. *Atmospheric Pollution Research* 6 (2015): 286-304

Hormann, S., Pfeler, B., and E. Stadlober. 2005. Analysis and Prediction of Particulate Matter (PM10) for the Winter Season in Graz. *Austrian Journal of Statistics* 34 (4) : 307-326.

Moriarty, P. and S.J. Wang. 2014. Low carbon cities : lifestyle changes are necessary. *Energy Procedia* 61 : 2289-2292.

Natawidjaja, R.S., Rahayu, E.S. and J. Sutrisno. 2015. Inclusive governance of informal markets : The street vendors of Surakarta. IEED : London.

Pandey, D., Agrawal, M., and J.S. Pandey. 2011. Carbon footprint : current methods of estimation. *Environ. Monit. Asses* 178 : 135-160.

Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup Nomor 12 Tahun 2010 tentang Pelaksanaan Pengendalian Pencemaran Udara.

Popescu, F. and Ionel, I. 2010. Anthropogenic Air Pollution Sources. *Air Quality* (Edited by Ashok Kumar). Intechopen Europe. Rijeka : Sciyo.

Prajapati, S.K. 2012. Ecological Effect of Airborne Particulate Matter on Plants. *Environmental Skeptics and Critics* 2012 1(1) : 12-22. www.iaees.org.

Priveteria, D., and F.S. Nesci. 2015. Globalization vs local. The role of streetfood in the urban food system. *Procedia Economics and Finance* 22 (2015) : 716-722.

Puspa, J. and R. Kuhl. 2007. Food quality and safety measures and controls : The future challenge for Indonesia. *Proceedings. Conference on international agricultural research for development. Tropentag*.

Setyono, P., Pranoto, Purnawan, C., Himawan, W., Mawahib, S.H., Rahman, K., and Arsianti, A. 2014. Final Report Emission Inventory for City of Surakarta. Ministry of Environmental-GIZ.

Shahbazi, H., Taghvaei, S., Hosseini, V., and H. Afshin. 2016. A GIS-based emission inventory development for Tehran. *Urban Climate* 17 (2016): 216-229.

Shan, Y., Guan, D., Liu, J., Liu, Z., Schroeder, H., Chen, Y., and Q. Zhang. 2016. Carbondioxide emissions inventory in Chinese cities. *Atmos. Chem. Phys.* 1-26.

Yang, J., Chang, Y., and P. Yan. 2015. Ranking The Suitability of Common Urban Tree Species for Controlling PM_{2.5} Pollution. *Atmospheric Pollution Research* 6 (2015) : 267-277.