

Analisis Kualitas Udara dan Hubungannya dengan Deposisi Basah di Semarang

Tuti Budiwati^{1)*}, Dyah Aries Tanti¹⁾, Asri.Indrawati¹⁾, dan Muhayaton Santoso²⁾

¹.Pusat Sains Dan Teknologi Atmosfer –LAPAN

².Pusat Sains Dan Teknologi Nuklir Terapan- BATAN

*Tel/Fax). 022-6037445/022-6037443; e-mail). tuti_lapan@yahoo.com

ABSTRACT. Air quality such as NH_3 , NO_2 , SO_2 , O_3 and aerosol (particles) deteriorate will result in the occurrence of acid rain, health disruption, global warming and long-term climate change. It is therefore necessary to monitor and analyze the origin of the sources of the pollutant gases and the particles. Passive sampler for gases NO_2 , NH_3 , O_3 and SO_2 and Gent Stacked Filter Unit (SFU) are used for air particle load and analyzed for $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , Black Carbon (BC) and particle composition in Semarang City Center. Research study to find out the source of pollutant in Semarang by using air mass trajectory from HYSPLIT model. The results show that the air quality in Semarang is still below the ambient air quality standard. The mean concentration values of the sequential pollutants from high to low were NH_3 (471.16) > NO_2 (114.68) > O_3 (42.17) > SO_2 (22.88) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Gases from transportation and particle content from the sea and mounts have an impact on the chemical composition of rainwater. The source of pollutant from the north affects air quality in Semarang city within 24 hours as on the night of August 2015. The highest percentage BC in $\text{PM}_{2.5}$ is 6.08% coming from the burning fuel of the east. At noon the pollutants are transferred within 24 hours by air masses from the southeast or Indian seas until they end in Semarang.

Keywords : pollutant gas, particle, back trajectory, air mass, HYSPLIT

ABSTRAK. Kualitas udara seperti NH_3 , NO_2 , SO_2 , O_3 dan aerosol (partikel) yang memburuk akan berakibat pada terjadinya hujan asam, terganggunya kesehatan, pemanasan global dan perubahan iklim pada periode panjang. Maka perlu dilakukan pemantauan dan menganalisis asal sumber gas-gas polutan dan partikel tersebut. Passive sampler untuk gas-gas NO_2 , NH_3 , O_3 dan SO_2 dan Gent Stacked Filter Unit (SFU) digunakan untuk muatan partikel udara dan dianalisis untuk $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , Black Carbon (BC) dan komposisi partikel di Pusat Kota Semarang. Kajian penelitian untuk mengetahui sumber polutan di Semarang dengan menggunakan trayektori massa udara dari model HYSPLIT. Hasil memperlihatkan bahwa kualitas udara di Semarang masih di bawah baku mutu udara ambien. Nilai konsentrasi rata-rata dari polutan berurutan dari tinggi ke rendah adalah NH_3 (471,16) > NO_2 (114,68) > O_3 (42,17) > SO_2 (22,88) dalam $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Gas dari transportasi dan kandungan partikel dari laut dan gunung berdampak pada komposisi kimia air hujan. Sumber polutan dari utara mempengaruhi kualitas udara di kota Semarang dalam 24 jam seperti pada malam hari pada bulan Agustus 2015. Prosentase BC dalam $\text{PM}_{2.5}$ paling tinggi yaitu 6,08% berasal dari sumber pembakaran bahan bakar minyak dari timur. Pada siang hari polutan dipindahkan dalam 24 jam oleh massa udara dari tenggara atau laut Hindia sampai berakhir di Semarang.

Kata kunci : gas polutan, partikel, trayektori mundur, massa udara, HYSPLIT

1. PENDAHULUAN

Perubahan tata guna lahan di perkotaan akan menimbulkan masalah terhadap lingkungan udara, misalnya berkurangnya taman atau daerah hijau lainnya. Pembangunan harus berwawasan lingkungan yang sehat. Oleh karena itu kualitas udara yang memburuk akan menjadi masalah di masa yang akan datang. Dampaknya akan berakibat pada terjadinya hujan asam, terganggunya kesehatan, pemanasan global dan perubahan iklim pada periode panjang. Dalam pembangunan kota perlu dilakukan pengendalian dan mempertahankan tata ruang di perkotaan yang memenuhi persyaratan lingkungan.

Peningkatan emisi gas-gas hasil pembakaran bahan bakar dan biomassa seperti CO₂, karbonmonoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), N₂O, CH₄, hidrokarbon lainnya dan aerosol ke udara akan mempengaruhi konsentrasi O₃ (Houghton dkk., 2001). Reaksi fotokimia CO dan CH₄ di troposfer pada kondisi NO_x tinggi menghasilkan O₃ yang juga termasuk polutan yang berbahaya (Crutzen, 1995). O₃ dan NO₂ adalah polutan sekunder yaitu hasil dari smog oksidasi. Selain itu pada pembakaran bahan bakar maupun biomassa akan diemisikan partikel-partikel berupa Black Carbon (BC), *Suspended Particulate Matter* (SPM), PM_{2.5} dan PM₁₀. Menurut Takahashi dkk., (2010) SPM adalah partikel dengan diameter 100% pada 10 µm dan PM₁₀ (diameter partikel ≤ 10 µm), PM_{2.5} yaitu partikel dengan diameter ≤ 2,5 µm.

Di Dhaka Bangladesh, ditemukan bahwa kendaraan bermotor menyumbang sedikit BC dibandingkan dengan industri kiln batu bata. Hasil ini menunjukkan efektivitas intervensi kebijakan pemerintah dalam penggunaan bahan bakar oleh kendaraan (sebelumnya kendaraan adalah kontributor utama BC) (Begum dkk., 2013). Dalam rangka perlindungan kesehatan masyarakat maka tiap negara mempunyai standar kualitas udara. Contoh, *the United States Environmental Protection Agency* (US-EPA) memperkenalkan standar PM_{2.5} adalah 15 µg/m³ untuk rata-rata tahunan dan 35 µg/m³ untuk 24 jam maksimum di 2006. Sri Lanka, standar PM_{2.5} adalah 25 µg/m³ untuk rata-rata tahunan dan 50 µg/m³ untuk 24 jam maksimum (Seneviratne dkk., 2011). Indonesia mempunyai standar PM_{2.5} adalah 15 µg/m³ untuk rata-rata tahunan dan 65 µg/m³ untuk 24 jam maksimum, dan standar PM₁₀ adalah 150 µg/m³ untuk 24 jam (Republik Indonesia, 1999).

Perubahan iklim dan polusi udara dipertemukan dalam beberapa cara yaitu seperti dampak dari memburuknya kualitas udara dengan meningkatnya gas rumah kaca yang terdiri dari CO₂, N₂O, CH₄ dan polutan seperti O₃, CO, *black carbon* (BC) dan partikel yang berasal dari berbagai sumber antropogenik maupun alam akan menaikkan temperatur (Begum dkk., 2013). Pertukaran dengan massa air di Laut Kuning menyebabkan pengurangan konsentrasi SPM di bagian timur dan tengah Laut Bohai. Dampaknya terlihat adanya variasi musiman yaitu konsentrasi SPM lebih tinggi pada musim semi daripada di musim panas, karena pengaruh angin (Jiang dkk., 2004). Sedangkan di Semarang pada musim peralihan dari kemarau ke hujan yaitu pada bulan-bulan September Oktober Nopember, konsentrasi aerosol (SPM) tinggi dikarenakan industri dan transportasi (Budiwati dan Setyawati, 2012).

Pencemaran udara atau atmosfer oleh sulfur oksida terutama disebabkan oleh dua komponen sulfur berbentuk gas yang tidak berwarna, yaitu sulfur dioksida (SO₂) dan sulfur trioksida (SO₃), dan keduanya disebut sulfur oksida (SO_x). SO₂ dan gas-gas oksida

sulfur lainnya terbentuk saat terjadi pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur. Setelah berada di atmosfer sebagai SO_2 akan diubah menjadi sulfat (SO_3). Kemudian menjadi senyawa sulfat (H_2SO_4) oleh proses-proses fotolitik dan katalitik. Demikian pula dengan NO_2 akan dioksidasi menjadi nitrit (NO_3), selanjutnya melalui proses pengendapan basah dengan H_2O akan menjadi senyawa nitrat (HNO_3).

Lintasan udara memperlihatkan bahwa emisi yang berasal dari sumber yang jauh akan melewati wilayah dan dapat berdampak pada daerah yang tidak terpolusi (Milukaite dkk., 2000). Oleh karena itu penyebaran polusi udara dalam jarak jauh dari sumber dikenal dengan istilah *long range transport of air pollution* (LRTAP). Karena pengangkutan polutan udara dalam jarak jauh, maka sebagian besar fenomena urban seperti aktivitas antropogenik (terkait dengan bahan bakar minyak) dan/atau pedesaan (pembakaran biomassa dan pembakaran batu bata) berubah menjadi kabut (atau awan) yang dapat menjangkau area yang luas termasuk di regional, yaitu bagian penting dari sebuah daratan (Begum dkk., 2013).

Paper ini akan mengkaji hasil kualitas udara (gas dan komposisi partikel) dan hubungannya dengan deposisi basah di Semarang pada Agustus 2015, serta mengidentifikasi sumber yang mempengaruhinya dengan trayektori masa udara. Lintasan atau trayektori udara mundur digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan lokasi sumber yang berkontribusi pada konsentrasi partikel yang diamati pada sampel. Trayektori merupakan lintasan yang tak berujung dari suatu partikel kecil yang bergerak dalam ruang dan waktu.

2. METODOLOGI

2.1 Lokasi sampling

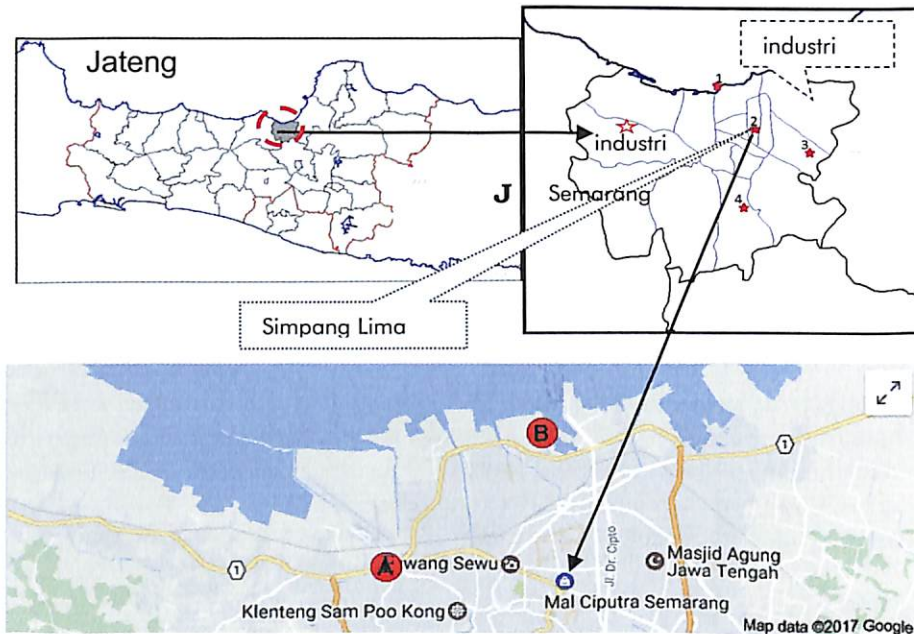
Semarang adalah sebuah kota di pantai utara pulau Jawa memiliki luas wilayah 373,70 kilometer persegi (144,29 mil persegi) dan penduduk sekitar 1.506.924 juta orang (BPS Semarang, 2009) kota ke enam terpadat dan terbesar ke lima di Indonesia setelah Jakarta, Surabaya, Bandung, dan Medan. Kota ini terletak pada $6^{\circ}58'S$ $110^{\circ}25'E$ dan Gambar 1 adalah lokasi pengamatan atau sampling di Semarang. Berdasarkan Rencana Tata Ruang Kota (RTRK) Semarang Tahun 2010-2030 terdapat kawasan industri di timur dan barat. Pusat kota terutama daerah Simpang Lima merupakan lokasi dagang untuk siang hari dan wisata di malam hari, tentunya meningkatkan jumlah transportasinya.

Sampling gas dan partikel dilakukan di Simpang Lima ($6^{\circ}51,5' S$ $110^{\circ} 25,5' BT$) tepatnya di *Green Roof Ciputra Mall* (tinggi 13 m), yang merupakan pusat perdagangan dan transportasi. Waktu pelaksanaan sampling dari tanggal 4 sampai 6 Agustus 2015 pada siang dan malam hari dengan durasi 12 jam. Sampel gas NH_3 , O_3 dan SO_2 yang terkumpul selanjutnya dianalisis dengan *ion chromatography* dan NO_2 dengan spektrofotometer.

2.2 Sampling gas dan analisis

Sampling menggunakan metode pasif dengan *passive sampler* dari CSIRO Australia (Powell, 2007), yaitu secara penyerapan dengan larutan kimia. Gas NO_2 diserap oleh larutan NaOH dan NaI , NH_3 oleh asam sitrat, gas O_3 akan diserap oleh larutan K_2CO_3 dan NaNO_2 dan SO_2 diserap oleh larutan aktif NaOH . Pengambilan sampel gas-gas NO_2 ,

NH₃, O₃ dan SO₂ dilakukan pada waktu yang bersamaan. Selanjutnya 20 sampel dari gas NO₂, NH₃, O₃ dan SO₂ yang terkumpul dianalisis di laboratorium Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN.



Gambar 1. Lokasi sampling gas dan partikel di Mal Ciputra Simpang Lima-Semarang. Keterangan karakteristik wilayah berdasarkan Rencana Tata Ruang Kota Semarang Tahun 2010-2030 (RPJMD Kota Semarang, 2011). A). pemantauan kimia air hujan oleh BMKG di Jl. Siliwangi No 291.

2.3 Sampling partikel dan analisis

Sampel dikumpulkan 12 jam sekali dari tanggal 4 sampai 6 Agustus 2015 dengan menggunakan *sampler unit Gent Stacked Filter Unit (SFU)* dalam dua fraksi ukuran 2,5 μm (fine, PM_{2.5}) sampai 10 μm (coarse, PM_{2.5-10}) (Hopke dkk., 1997). Sampel fraksi kasar dikumpulkan pada *filter Nuclepore* dengan pori-pori 8,0 μm -pori, sedangkan sampel PM_{2.5} dikumpulkan pada *filter Nuclepore* dengan 0,4- μm -pori. Sampel dilakukan pada laju alir 15-18 L/menit selama 12 jam. Massa fraksi halus dan kasar ditentukan dengan menimbang filter sebelum dan sesudah pemaparan; kemudian dibagi dengan volume udara yang melewati saringan untuk mendapatkan konsentrasi PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dan PM_{2.5-10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Konsentrasi PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) diperoleh dengan menjumlahkan kedua nilai ini. Konsentrasi BC dari sampel PM_{2.5} ditentukan oleh pengukuran pantulan dari noda asap *reflectometer (Diffusion Systems Ltd. model 43D)* (Santoso dkk., 2013).

Sampel *filter fine* PM_{2.5} yang dikumpulkan dari tanggal 4 sampai 6 Agustus 2015 hasil pengukuran siang dan malam hari (12 jam) dianalisis dengan *instrumental neutron*

activation analysis (INAA) yaitu teknik analisis nuklir untuk konsentrasi unsur. Selanjutnya dengan menggunakan dua kali iradiasi dan sejumlah sinar gamma setelah waktu pembusukan yang tepat, maka sampai 25 unsur dapat ditentukan (Santoso dkk., 2003a, b; Santoso dkk., 2005). Teknik analisis nuklir dengan INAA dilakukan di Pusat Sains Dan Teknologi Nuklir Terapan-BATAN untuk sampel fraksi halus (*fine*), sehingga didapatkan unsur logam yaitu Na (Natrium), Mg (Magnesium), Al (Aluminium), Si (Silikat), S (Sulfur), K (Kalium), Fe (Ferum), Ni (Nickel), Cu (Copper/Tembaga), Pb (Timbal), Ca (Kalsium), Ti (Titanium), Mn (Mangan), Zn (Zeng).

2.4 Analisis kimia air hujan (deposisi basah)

Berdasarkan data rata-rata bulanan kimia air hujan dari pemantauan mingguan oleh Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) di Jl. Siliwangi No.291 Pusat Kota Semarang, maka dilakukan analisis komposisi kimia rata-rata bulan Agustus 2015 di Semarang sesuai dengan bulan sampling gas dan partikel. Komposisi kimia air hujan seperti unsur pH (derajat keasaman), anion). SO_4^{2-} ; NO_3^- ; Cl^- ; dan kation). NH_4^+ ; Ca^{2+} ; Na^+ , K^+ ; Mg^{2+} , adalah hasil pembersihan polutan oleh air hujan sebagai deposisi basah. Jadi proses deposisi basah berhubungan dengan kondisi kualitas udara suatu tempat atau kota. Konsentrasi *non-sea salt sulfate* (nss-SO_4^{2-}) dan *non-sea salt calcium* (nss-Ca^{2+}) dihitung dengan asumsi bahwa Na^+ berasal dari laut (EANET, 2001; EANET, 2002). Satuan konsentrasi adalah dalam $\mu\text{mol/L}$. Konsentrasi SO_4^{2-} dan Ca^{2+} dalam garam laut adalah konsentrasi total SO_4^{2-} dan Ca^{2+} dalam air hujan dikurangi dengan (nss-SO_4^{2-}) dan *non-sea salt calcium* (nss-Ca^{2+}).

2.5 Trayektori massa udara

Trayektori massa udara dianalisis dengan menggunakan perangkat *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) Model dari NOAA USA. Penggambaran trayektori membutuhkan input data meteorologi dengan menggunakan perangkat pemodelan kualitas udara. Selanjutnya output lintasan mundur dipergunakan menganalisis transpor massa udara dan sumber dapat diidentifikasi.

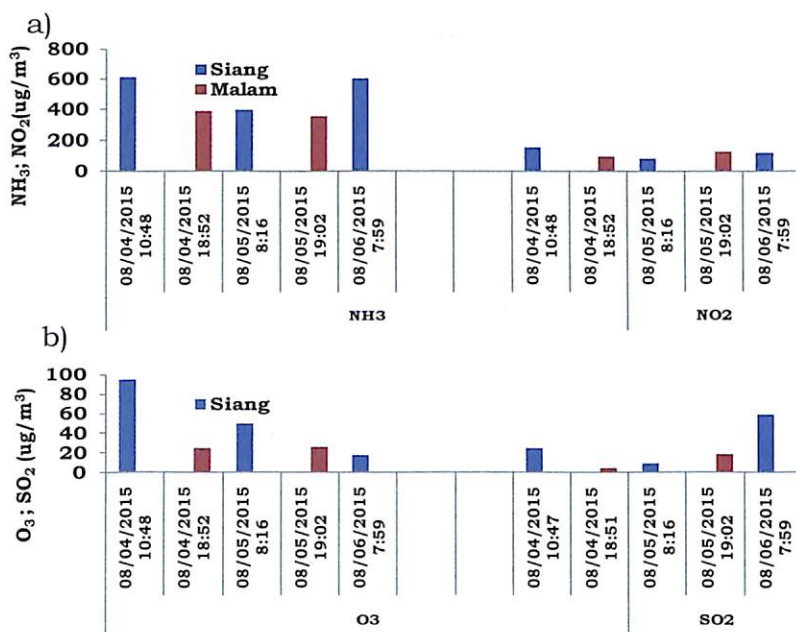
3. HASIL DAN PEMBAHASAN.

3.1 Gas NO_2 , NH_3 , O_3 dan SO_2

Adapun daerah Simpang Lima ternyata mempunyai konsentrasi rata-rata NH_3 yaitu $471,16 \pm 125,18 \mu\text{g/m}^3$. Konsentrasi NH_3 tinggi pada siang hari dibandingkan malam hari, terutama 4 Agustus 2015 dan mencapai $610,21 \mu\text{g/m}^3$ dan 6 Agustus 2015 sebesar $604,46 \mu\text{g/m}^3$. Sumber NH_3 berasal dari hasil emisi pemupukan dengan pupuk industri (misalnya urea yang mengandung NH_3 , juga pupuk nitrogen phosphorous and potassium (N-P-K), kotoran hewan, limbah sampah organik, juga dari proses-proses industri. Sebagian besar emisi NH_3 disebabkan pemecahan pupuk hewan (kotoran hewan). Jadi sumber terbesar emisi NH_3 adalah pertanian dengan penggunaan pupuk berbasis NH_3 (seperti urea), dan peternakan. Sumber-sumber lain dari NH_3 adalah proses industri (pembuatan pupuk), emisi kendaraan dan penguapan dari tanah dan lautan (Behera dkk.,

2013). Mengingat Simpang Lima adalah daerah Pusat Kota dengan kegiatan perdagangan dan transportasi (RTRK Semarang Tahun 2010-2030), maka NH₃ berasal dari limbah sampah (wisata kuliner) atau berasal dari sumber di selatan Semarang yang relatif masih banyak daerah pertanian atau laut.

Sedangkan Simpang Lima adalah daerah perdagangan dengan jumlah transportasi tinggi ternyata mempunyai konsentrasi rata-rata NO₂ sebesar $114,68 \pm 31,15 \mu\text{g}/\text{m}^3 < 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ambang batas 24 jam) dan konsentrasi rata-rata O₃ sebesar $42,17 \pm 31,34 \mu\text{g}/\text{m}^3 < 235 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ambang batas 1 jam). Di daerah perdagangan O₃ dibentuk oleh proses fotokimia dari foton sinar matahari dengan HC, NO dan CO sebagai prekursor (Cardelino dan Chameides, 2012). Emisi antropogenik sulfur dan nitrogen adalah sumber terbesar dari PM_{2.5} (Berge dkk., 1999).



Gambar 2. Distribusi gas a). NH₃ dan NO₂; b). O₃ dan SO₂ pada 4-6 Agustus 2015 di Semarang

Dampak dari jumlah transportasi yang tinggi di Simpang Lima tentunya menjadi sumber SO₂ dikarenakan pembakaran bahan bakar minyak. Konsentrasi rata-rata SO₂ sebesar $22,88 \pm 21,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi ini lebih tinggi dibandingkan lokasi lainnya di Semarang (Budiwati dkk., 2016). SO₂ dan gas-gas oksida sulfur lainnya terbentuk saat terjadi pembakaran bahan bakar fosil yang mengandung sulfur seperti solar, batubara, juga pengolahan logam (Smith dkk., 2011). Gas SO₂ di atmosfer berasal dari sumber alam seperti gunung berapi, dan oksidasi *dimethyl sulphide* (DMS) dari laut (Berresheim dkk., 1998), dan sumber antropogenik dari pembakaran batubara. Konsentrasi SO₂ masih dibawah nilai baku mutu udara ambien nasional untuk 24 jam yaitu $365 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$ (Republik Indonesia, 1999). Sehingga secara berurutan maka konsentrasi rata-rata dari polutan dari

tinggi ke rendah adalah $\text{NH}_3 > \text{NO}_2 > \text{O}_3 > \text{SO}_2$ (Gambar 2).

3.2 Masa $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10}

Tabel 1 memperlihatkan konsentrasi massa dari $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10} yang telah diukur selama periode sampling. Konsentrasi massa $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10} dari 4 sampai 6 Agustus 2015 adalah tinggi pada malam tanggal 5 Agustus 2015 sebesar $20,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $35,74 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Meskipun tidak begitu berbeda dengan konsentrasi massa pada siang harinya pada 5 Agustus yaitu $17,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk $\text{PM}_{2.5}$ dan $43,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk PM_{10} . Rata-rata jam dari $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10} masih dibawah nilai standar $\text{PM}_{2.5}$ adalah $65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk 24 jam maksimum, dan standar PM_{10} adalah $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ untuk 24 jam yang diijinkan pemerintah Republik Indonesia. Prosentase BC/ $\text{PM}_{2.5}$ (dalam $\text{PM}_{2.5}$) paling tinggi yaitu 6,08% terjadi pada siang hari tanggal 6 Agustus 2015. Sedangkan rata-rata BC/ $\text{PM}_{2.5}$ adalah 3,89%. Konsentrasi BC dikarenakan kendaraan motor dan pembakaran biomassa (Santoso dkk., 2008; Hooper, 2001; Seneviratne dkk., 2011).

Tabel 1. Konsentrasi $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10} dan BC di Simpang Lima Semarang.

Waktu (12 jam)	$\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	BC/ $\text{PM}_{2.5}$ (%)
04/08/2015 10:48	14,06	31,44	0,31	2,23
05/08/2015 8:16	17,42	34,22	0,74	4,26
05/08/2015 19:02	20,86	35,74	0,62	2,97
06/08/2015 7:59	9,76	34,69	0,59	6,08
Rata-rata	15,53	34,02	0,57	3,89

3.3 Komposisi $\text{PM}_{2.5}$ dan Deposisi Basah (Air Hujan)

Hasil analisis komposisi $\text{PM}_{2.5}$ (*fine particle*) yang diperoleh selama 4 sampai 6 Agustus 2015 diperlihatkan pada tabel 2. Berdasarkan kadar logam dalam $\text{PM}_{2.5}$ dengan nilai tertinggi ke rendah dibuat berturutan adalah $\text{Na} > \text{S} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Si} > \text{Fe} > \text{Al} > \text{Mg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Mn} > \text{Ti} > \text{Cu}$, hasilnya dapat dilihat pada tabel 3. Nilai ini hampir mirip dengan hasil penelitian di Colombo Sri Lanka oleh Seneviratne dkk (2011) seperti konsentrasi unsur Na dan Ca tinggi yang mencerminkan kota pantai karena Semarang adalah kota pantai pula. Juga unsur S yang mempunyai konsentrasi yang tinggi dikarenakan kegiatan transportasi yang cukup tinggi pula. Adapun unsur K yang tinggi menunjukkan adanya kegiatan pembakaran biomassa dan industri (industri cat, pembuatan batu bata, pembakaran batubara). *Black Carbon* (BC) dan kalium dalam partikel halus ($\text{PM}_{2.5}$) merupakan indikator pembakaran biomassa yang memberikan kontribusi terhadap konsentrasi karbon yang tinggi (Santoso dkk., 2008; Hooper (2001). *Non-soil*/tanah K (Kalium/potassium) adalah indikator yang sangat kuat dari pembakaran biomassa, jadi *non-soil* K dapat dihitung dengan persamaan (1) sebagai berikut (Seneviratne dkk., 2011):

$$\text{Non-soil K} = (\text{K} - 0,6 \text{ Fe}) \quad (1)$$

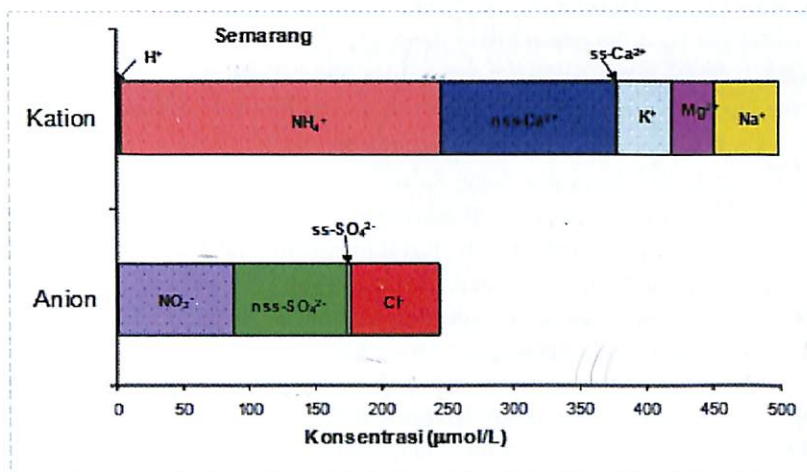
Tabel 2. Kadar logam ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) dalam $\text{PM}_{2,5}$ dan non-soil K (ng/m^3) di Simpang Lima (Pusat Kota) Semarang.

Unsur	Waktu			
	04/08/2015 10:48	05/08/2015 8:16	05/08/2015 19:02	06/08/2015 7:59
Na	829,2	644,4	598,9	1570,3
Mg	32,8	< 1,2	22,8	21,6
Al	40,6	38	42,9	40,7
Si	103,8	91,1	91,9	178
S	756,1	887,1	546,3	1037,4
K	246,8	346,1	304	349,9
Fe	60,9	64,2	50,1	78,4
Ni	2,8	2,2	2,6	4,1
Cu	1,6	3	1,1	< 0.08
Pb	8,8	12	1,9	1,8
Ca	333,7	241,3	217,1	425,8
Ti	2,3	3,9	6,2	7,1
Mn	2,6	2,7	4,7	2,4
Zn	28,4	21,1	14,9	31,8
Non-soil K	210,26	307,58	273,94	302,86

Tabel 3. Konsentrasi rata-rata (Mean) dan Standar Deviasi (SD) dari logam dalam $\text{PM}_{2,5}$ dan non-soil K di Simpang Lima (Pusat Kota) Semarang selama 4 sampai 6 Agustus 2015.

Unsur (ng/m^3)	Mean	\pm SD	Median	Max
Na	910,7	\pm 450,9	736,8	1570,3
Mg	25,7	\pm 6,1	22,8	32,8
Al	40,6	\pm 2,0	40,7	42,9
Si	116,2	\pm 41,6	97,9	178,0
S	806,7	\pm 208,2	821,6	1037,4
K	311,7	\pm 48,0	325,1	349,9
Fe	63,4	\pm 11,7	62,6	78,4
Ni	2,9	\pm 0,8	2,7	4,1
Cu	1,9	\pm 1,0	1,6	3,0
Pb	6,1	\pm 5,1	5,4	12,0
Ca	304,5	\pm 95,2	287,5	425,8
Ti	4,9	\pm 2,2	5,1	7,1
Mn	3,1	\pm 1,1	2,7	4,7
Zn	24,1	\pm 7,6	24,8	31,8
Non-soil K	273,7	\pm 44,8	288,4	307,6

Tabel 3 memperlihatkan bahwa selain unsur-unsur Na dan Ca sebagai faktor laut yang tinggi dalam kandungan PM_{2.5}, ternyata Mg, K, dan Pb tinggi pula. Unsur-unsur Ca, Mg, K, dan Pb berasal dari debu-debu bangunan bercampur debu-debu jalanan (Santoso dkk., 2012), dan akan mempengaruhi kadar logam dalam PM_{2.5}. Selanjutnya kualitas kimia PM_{2.5} akan berdampak pula pada komposisi kimia air hujan tentunya. Hal ini akan dapat diinvestigasikan dengan komposisi kimia air hujan pada bulan Agustus 2015 di Semarang (Gambar 3).



Gambar 3. Komposisi kimia air hujan pada Agustus 2015 di Semarang

Komposisi kimia air hujan berdasarkan nilai rata-rata bulanan Agustus 2015 di Semarang diperlihatkan pada Gambar 3-2, ternyata bahwa konsentrasi NH₄⁺, non sea-salt (nss) Ca²⁺ dan K⁺ sebesar 241,85 μmol/L; 133,11 μmol/L dan 40,61 μmol/L merupakan ion dengan konsentrasi tertinggi. Hal ini sangat signifikan dengan konsentrasi NH₃ (Gambar 2) yang tinggi dan kadar logam Ca (tabel 3) yang juga tinggi di Semarang, dan ss-Ca²⁺ dari laut sangat kecil yaitu 1,04 μmol/L. Jadi pengaruh partikel halus PM_{2.5} sangat kuat di Semarang terutama Simpang Lima. Tetapi ion K⁺ akan dipengaruhi oleh *non-soil*/K yang mempunyai konsentrasi tinggi yaitu 273,7±44,8 ng/m³ (Tabel 3). Emisi alkali (partikel debu dan gas NH₃) akan mempengaruhi keasaman air hujan secara signifikan, dengan menetralkan beberapa faktor asam (Mouli, dkk., 2005). Maka kondisi ion-ion kimia dalam air hujan dari konsentrasi tertinggi adalah NH₄⁺>nss-Ca²⁺>NO₃⁻>nss-SO₄²⁻>Cl⁻>Na⁺>K⁺>Mg²⁺>ss-SO₄²⁻>ss-Ca²⁺>H⁺.

Nilai rata-rata pH (derajat keasaman) adalah 5,77 diatas 5,6 yaitu nilai yang berfungsi sebagai batas hujan asam. Dalam air hujan nilai pH 5,6 adalah batas normal dari keasaman air hujan, dan pH 5,6 digunakan sebagai garis batas untuk keasaman air hujan (Seinfeld and Pandis, 1998). Hal ini juga didukung oleh faktor penetral keasaman air hujan yang mendominasi komposisi kimia air hujan dengan konsentrasi yang tinggi yaitu NH₄⁺

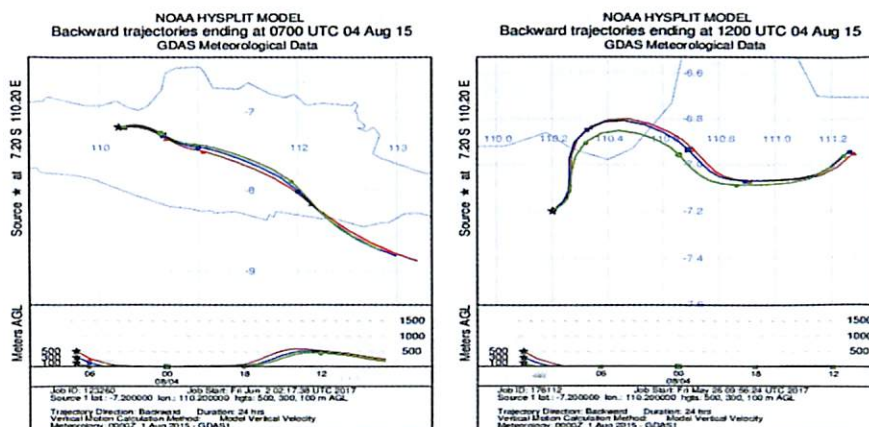
dan nss-Ca²⁺. Konsentrasi NO₃⁻ adalah 87,57 µmol/L sedikit lebih tinggi dari nss-SO₄²⁻ yaitu 84,66 µmol/L. Hal ini ada hubungannya dengan faktor transportasi yang cukup padat sebagai sumber polutan NO₂ dan SO₂ di Simpang Lima, dan konsentrasi NO₂ sebagai pembentuk NO₃⁻ lebih tinggi dibandingkan SO₂ sebagai pembentuk nss-SO₄²⁻. Maka konsentrasi NO₃⁻ dan nss-SO₄²⁻ yang tinggi di Simpang Lima ini karena faktor transportasi dan industri yang menggunakan bahan bakar minyak atau batubara, mengingat konsentrasi *sea salt* SO₄²⁻ (ss-SO₄²⁻) adalah kecil 2,91 µmol/L. Berdasarkan tabel 3 dapat dibuktikan bahwa deposisi asam nss-SO₄²⁻ disumbang oleh partikel PM_{2.5} yaitu sulfur (S) cukup tinggi rata-rata 806,7±208,2 ng/m³. Bila perbandingan NH₄⁺/nss-SO₄²⁻ adalah <0,5 mengindikasikan bahwa NH₄⁺ tidak dapat menetralkan nss-SO₄²⁻ dan sebagai asam sulfat bereaksi dengan partikel debu dan partikel garam laut (Hsu dkk., 2007). Di Semarang pada Agustus 2015 didapati bahwa NH₄⁺ /nss-SO₄²⁻ adalah 2,87 artinya NH₄⁺ dapat menetralkan nss-SO₄²⁻ dan derajat keasaman air hujan menuju ke basa. Hal ini terkait juga dengan NH₃ yang melimpah dibandingkan SO₂.

Kadar K dan Mg yang tinggi dalam partikel PM_{2.5} berkorelasi dalam konsentrasi ion K⁺ dan Mg²⁺ yang tinggi yaitu 40,61 µmol/L dan 32,04 µmol/L. Unsur Mg, Si berasal dari sumber laut dan mineral tanah. Kandungan mineral laut dari unsur yang terbesar adalah Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, K⁺ dan Ca²⁺ (Graedel dan Crutzen, 1993). Jadi sumbangan unsur lautpun sangat kuat dalam komposisi kimia air hujan di Semarang yaitu terbukti dengan konsentrasi yang tinggi dari ion Na⁺, Mg²⁺. Adanya korelasi yang kuat antara Ca²⁺ (Calcium) dengan SO₄²⁻ (sulfat) dan NO₃⁻ (r = 0,92 dan 0,90) juga antara Mg²⁺ (Magnesium) dengan SO₄²⁻ (sulfat) dan NO₃⁻ (r=0,83 dan 0,77), secara berurutan di daerah perkotaan Tirupati (India) adalah fakta bahwa komposisi ion-ion air hujan di suatu daerah dipengaruhi kuat oleh sumber-sumber dari bumi (Mouli dkk., 2005) daripada sumber antropogenik dan laut.

Nilai rata-rata dari Cl⁻/Na⁺ dalam air hujan di Semarang selama Agustus adalah 1,41. Unsur laut yang terbesar adalah sodium dan klor, maka dengan melihat angka perbandingan ini menunjukkan klor yang lebih tinggi dari sodium berasal dari laut dan sumber lainnya. Oleh karena hasil penelitian Keene dkk., (1986) menunjukkan bahwa perbandingan molar chlor terhadap sodium adalah rata-rata Cl⁻/Na⁺ = 1,137; dan SD = 0,008 adalah mendekati nilai dalam air laut adalah 1,16). Bila rasio Cl⁻/Na⁺ dalam air hujan sangat dekat dengan nilai air laut (1,16), maka berarti menunjukkan bahwa Cl⁻ benar-benar dikontribusikan oleh sumber-sumber kelautan (Kumar dkk., 2015). Konsentrasi Cl⁻ yang tinggi dipengaruhi oleh letusan gunung berapi Raung di Jawa Timur pada tanggal 27 Juli 2015, berdasarkan lintasan mundur pada Gambar 5d.

3.4 Back Trajectory Polutan

Model HYSPLIT (*Single Hybrid Single Partikel Lagrangian Integrated Trajectory*) digunakan pada kajian identifikasi sumber polutan, yaitu untuk mendapatkan lintasan massa udara. Kami menggunakan sistem berbasis web yang disebut sistem READY (*real-time environmental applications and display*) yang dikembangkan oleh *the Air Resources Laboratory* (ARL) (ARL-NOAA, 2016). Data meteorologi yaitu data *reanalysis* global dari *Global Data Assimilation System* (GDAS, 1 degree global 2006)-Ready-NOAA digunakan untuk menjalankan model HYSPLIT ini.

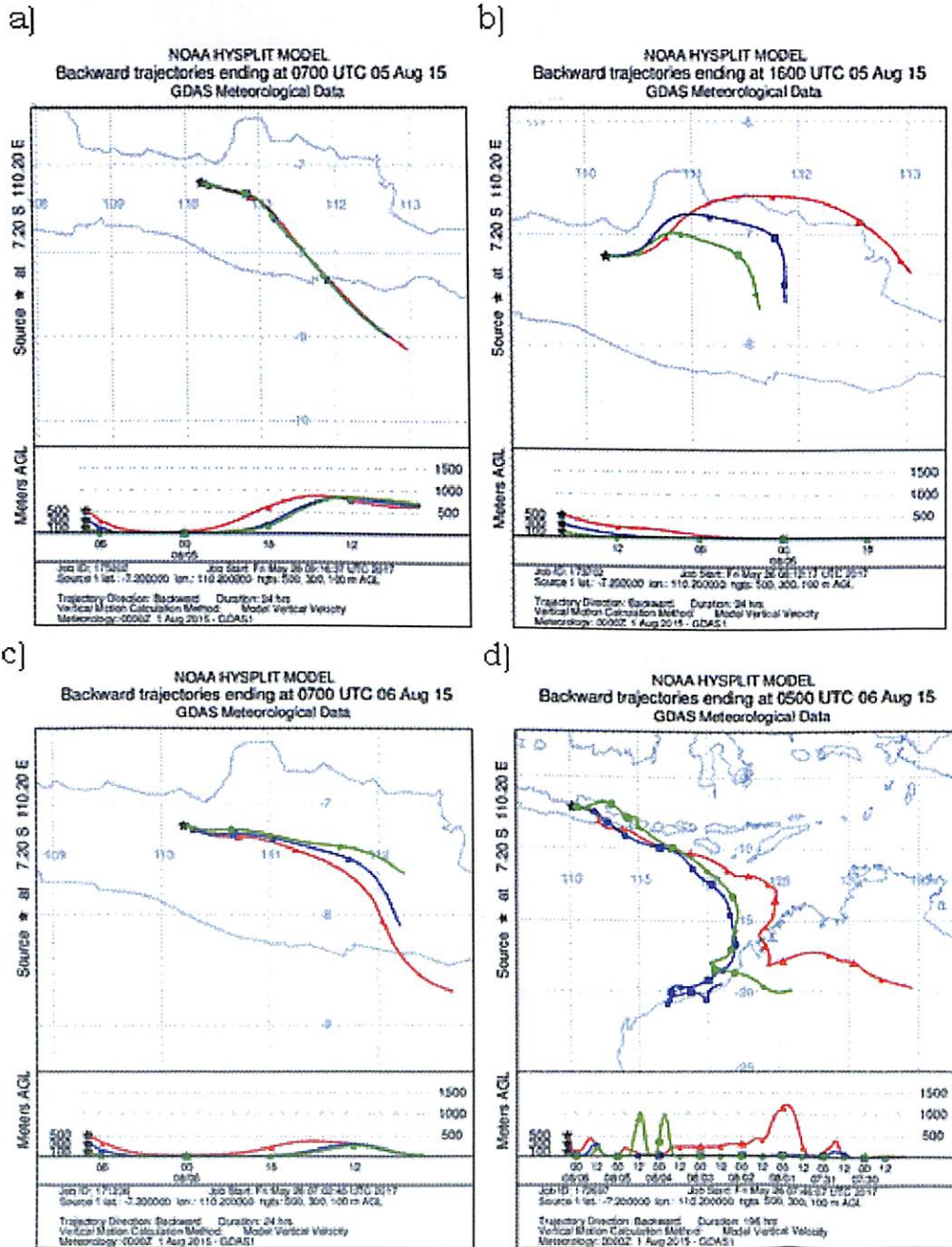


Gambar 4. Trajektori mundur (*backward*) massa udara berdasarkan 24 jam ke belakang dan berakhir pada: a). jam 14:00-4 Agustus'15; b). jam 19:00-4 Agustus'15 di Semarang

Hasil running READY diperlihatkan dalam Gambar 4 dan 5. READY juga digunakan untuk menjalankan lintasan mundur (*backward*) dan maju (*forward*) untuk beberapa lokasi sumber atau satu lokasi sumber, dan kajian model dispersi/penyebaran dan menampilkan data meteorologi (Kulshrestha dan Kumar, 2014; Kumar dkk., 2015). HYSPLIT adalah model yang paling banyak digunakan dan partikulat adalah jenis polutan yang paling sering diteliti. Lintasan mundur (*backward*) HYSPLIT adalah jenis yang paling sering dijalankan untuk identifikasi sumber (Pérez dkk., 2015).

Untuk mengetahui sumber-sumber yang mempengaruhi Semarang saat sampling gas dan partikel, maka dilakukan running sistem READY untuk lintasan mundur massa udara siang dan malam hari. Berdasarkan hasil running seperti diperlihatkan pada Gambar 4 dan 5, ternyata siang hari untuk lintasan mundur 24 jam menunjukkan sumber berasal dari timur dan tenggara. Dalam 24 jam sumber laut Hindia dan bagian selatan Jawa Tengah (banyak pembuatan batu bata) dan selatan Jawa Timur berbatasan dengan Jawa Tengah memberikan kontribusi polutan di Semarang. Berdasarkan model trayektori secara jelas memperlihatkan adanya LRTAP di Eropa yaitu bahwa transportasi atmosfer pada jarak 1000-2000 km sangat signifikan untuk sulfur dan nitrogen oksida, beberapa negara di Eropa menerima deposisi asam dari emisi negara lain (Berge dkk., 1999).

Pada tanggal 5 Agustus siang hari 14:00 (07:00 UTC) polutan yang diterima di kota Semarang untuk 24 jam kebelakang dominan berasal dari sumber polutan di Jawa Tengah bagian tenggara (Gambar 5a). Lintasan berasal dari samudra Hindia dan bagian timur Semarang (industri dan transportasi). Industri dan sumber dari laut akan menyumbangkan mineral laut seperti Na, Ca, dan S dalam *dimethyl sulphide* (DMS). Dampaknya terlihat pada konsentrasi Na, Ca, dan S dalam PM_{2.5} yang tinggi dan menceminkan karakteristik laut sebagai sumber yang mempengaruhi lokasi sampling di Pusat Kota Semarang.



Gambar 5. Trajektori mundur (*backward*) massa udara berdasarkan 24 jam ke belakang dan berakhir pada a). jam 14:00- 5 Agustus'15; b). jam 23:00-6 Agustus'15; c). jam 14:00-6 Agustus'15 dan trajektori mundur (*backward*) massa udara berdasarkan 196 jam ke belakang dan berakhir pada d). jam 12:00-6 Agustus'15 di Semarang

Demikian pula pada tanggal 6 Agustus 2015 siang hari jam 14:00 (07:00 UTC) (Gambar 5c) polutan yang diterima di Semarang terlihat dipengaruhi sumber lokal yang kuat yaitu berdasarkan lintasan (*backward trajectory*) 24 jam ke belakang. Hal ini dapat dibuktikan dari distribusi gas polutan pada Gambar 2, bahwa pengaruh lokal terlihat dari konsentrasi NH_3 dan SO_2 yang tinggi. Sedangkan Gambar 5d memperlihatkan bahwa polutan yang berasal dari Jawa Timur, samudra India akan melintasi lautan dan daratan yang membawa mineral laut dan gunung. Polutan akan sampai di Semarang dalam 196 jam pada tanggal 6 Agustus 2015 siang hari jam 12:00 dan lintasan pada ketinggian 100 m melewati Jawa Timur dan laut Jawa, dan ternyata telah mempengaruhi konsentrasi Cl- dalam komposisi kimia air hujan pada bulan Agustus 2015. Adapun tabel 2 menjelaskan adanya pengaruh yang kuat dari transportasi partikel dari sumber yang jauh dari letusan gunung Raung di Jawa Timur dengan adanya kadar S, Si, Ca, K, Fe, Ti, Zn dan Ni dalam partikel halus $\text{PM}_{2.5}$ yang signifikan tinggi sebesar 1037,4 ng/m³; 178 ng/m³; 425,8 ng/m³; 349,9 ng/m³; 78,4 ng/m³; 7,1 ng/m³; 31,8 ng/m³ dan 4,1 ng/m³, berurutan. Gunung berapi akan mengemisikan partikel $\text{PM}_{2.5}$ dengan kandungan S, Si, Ca, K, Fe, Ti, Zn dan Ni saat terjadi letusan. Hasil pelaporan dari NASA (Juli 2015) bahwa letusan gunung berapi Raung pada tanggal 27 Juli 2015 mencapai ketinggian 4-5 km dan melayang sejauh 100-200 km. Tentunya akan mempengaruhi kualitas udara di Semarang berdasarkan lintasan trayektori (Gambar 5d). Peristiwa transportasi massa udara yang membawa material gunung terjadi saat letusan gunung Rinjani dan gunung Egon di Indonesia pada Juli dan Oktober 2004. Dampaknya telah mempengaruhi tingkat konsentrasi dan komposisi kimia aerosol (dengan ClO) di atas laut India (Indian Ocean) karena emisi vulkanik dari Indonesia dan adanya monson yang mendominasi sirkulasi udara (Balasubramanian dkk., 2011).

4. KESIMPULAN

Kualitas udara, $\text{PM}_{2.5}$ dan PM_{10} masih dibawah nilai standar atau baku mutu yang diijinkan. Kualitas udara di Pusat Kota Semarang dalam urutan $\text{NH}_3 > \text{NO}_2 > \text{O}_3 > \text{SO}_2$ dipengaruhi oleh sumber lokal seperti transportasi dan industri di sekitarnya. Komposisi partikel di Semarang pada Agustus 2015 sangat dipengaruhi oleh mineral dari laut dan gunung yaitu Na dan sulfur, Ca, K, Si dan mineral lainnya. Adanya korelasi antara gas dari transportasi dan kandungan partikel dan gas dari laut dan gunung berdampak pada komposisi kimia air hujan. Kota Semarang pada siang hari dipengaruhi sumber dari tenggara dan timur, adapun malam hari sumber dari utara dalam 24 jam akan tiba di Pusat kota.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer-LAPAN yang telah membiayai penelitian ini, dan kepada Pusat Sains Dan Teknologi Nuklir Terapan-BATAN yang telah membantu analisis partikel dengan Teknik Analisis Nuklir. Kami juga sangat berterima kasih kepada BLH Kota Semarang, Manajemen Ciputra Mall, Ir. Trully Rudiarso, BMKG dan pihak-pihak lainnya yang telah membantu

selama pemantauan di Semarang. Selain itu kami mengucapkan terima kasih kepada ARL (Laboratorium Sumber Daya Udara) NOAA dan Allen Jesse dari *Earth Observatory-NASA*.

DAFTAR PUSTAKA

- ARL (Air Resources Laboratory) NOAA (2016), <https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>.
- Cardelino, C.A. and W.L. Chameides (2012). An Observation-Based Model for Analyzing Ozone Precursor Relationships in the Urban Atmosphere, *Journal of the Air & Waste Management Association*, ISSN). 1096-2247 (Print) 2162-2906 (Online).
- Badan Pusat Statistik (BPS) Kota Semarang (2009). Kota Semarang Dalam Angka Tahun 2009.
- Balasubramanian R., S. Karthikeyan, J. Potter, O. Wurl, C. Durville (2011). Chemical characterization of aerosols in the equatorial atmosphere over the Indian Ocean. *Atmospheric Environment xxx* (2011) 1-9.
- Behera, S.N., M. Sharma, V.P. Aneja, and R. Balasubramanian (2013). Ammonia in the atmosphere. a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies, *Environ Sci. Pollut. Res.* (2013) 20:8092-8131, DOI 10.1007/s11356-013-2051-9.
- Berge, E., J. Bartnicki, K. Olendrzynski, S.G. Tsyro, 1999). Long-term trends in emissions and transboundary transport of acidifying *air pollution* in Europe. *Journal of Environmental Management* (1999) 57, 31-50.
- Berresheim, H., J.W. Huey, R.P. Torn, F.L. Eisele, D.J. Tanner, A. Jefferson, 1998. Measurements of dimethyl sulfide, dimethyl sulfoxide, dimethyl sulfone, and aerosol ions at Palmer Station, Antarctica, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 103, NO. D1, pages 1629-1637, January 20.
- Begum, B.A., P.K. Hopke, A. Markwitz (2013). *Air pollution* by fine particulate matter in Bangladesh, *Atmospheric Pollution Research* 4 (2013) 75-86.
- Budiwati, T. dan W. Setyawati (2012). Analisis aerosol dan total O₃ di Jawa hasil observasi Aura Omi. Bunga Rampai Penginderaan Jauh Indonesia, ISBN 978-602-19911-1-4, Mei 2012, Pusat Penginderaan Jauh ITB, 39-54.
- Budiwati, T., Sumaryati, D. A. Tanti, dan A. Indrawati (2016). Identifikasi Sumber Polutan Berdasarkan Trayektori Massa Udara di Semarang. *Prosiding Seminar Nasional Sains Atmosfer (SNSA) 2016*, ISBN). 976-602-6465-05-4, 244-254.
- EANET (2001). Technical Documents for Wet Deposition Monitoring in East Asia. Adopted at). The Second Interim Scientific Advisory Group Meeting of Acid Deposition Monitoring Network in East Asia.
- EANET (2002). Textbook Data Reporting, Data Quality Assessment and Data Treatment of Wet Deposition Monitoring for EANET The Network Center for Acid Deposition Monitoring Network in East Asia.
- Graedel T.E., and P.J. Crutzen, 1993). *Atmospheric Change*. An Earth System Perspective. Freeman W.H. and Company, pp. 178-179.
- Hsu, S.C., S.C. Liu, S.J. Kao, W.L. Jeng, Y.T. Huang, C.M. Tseng, F. Tsai, J.Y. Tu, Y. Yang (2007). Water-soluble species in the marine aerosol from the northern South China Sea). high chloride depletion related to *air pollution*. *Journal of Geophysical Research* 112, D19304.. doi:10.1029/2007JD008844.
- Hooper M. (2001). Comparative Study of Regional Aerosol in Tropical Australia and Indonesia. *Proceedings of 7th International Joint Seminar on the Regional Deposition Processes in the Atmosphere*. November 20-22, Tsukuba-Japan). 36-43.
- Hopke, P.K., Y. Xie, T. Raunemaa, S. Biegalski, S. Landsberger, W. Maenhaut, P. Artaxo, and D. Cohen, 1997). Characterization of the gent stacked filter unit PM₁₀ sampler. *Aerosol Sci. Technol.* 27:726-35. doi:10.1080/02786829708965507

- Jiang W., Pohlmann T., Sunc J., Starke A. (2004). SPM transport in the Bohai Sea). field experiments and numerical modeling, *Journal of Marine Systems* 44 (2004) 175 – 188.
- Kulshrestha U. and B. Kumar (2014). Air mass Trajectories and *Long range transport* of Pollutants). Review of Wet Deposition Scenario in South Asia. Review Article Hindawi Publishing Corporation *Advances in Meteorology* Volume 2014, Article ID 596041, 14 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2014/596041>.
- Kumar B., S. Singh, G.P. Gupta, F.A. Lone, and U.C. Kulshrestha (2015). *Long range transport* and Wet Deposition Fluxes of Major Chemical Species in Snow at Gulmarg in North Western Himalayas (India) *Aerosol and Air Quality Research*, 16). 606–617 (2016 Copyright © Taiwan Association for Aerosol Research ISSN). 1680-8584 print / 2071-1409 online doi). 10.4209/aaqr.2015.01.0056.
- Milukaite A., A. Mikeliniskiene, and B. Giedraitis (2000). Characteristics of SO₂, NO₂, Soot and Benzo(a)pyrene Concentration Variation on the Eastern Coast of the Baltic Sea. Acid Rain 2000. Proceeding from the 6 th International Conference on Acidic Deposition). Looking back to the past and thinking of the future. Tsukuba. Japan. 10-16 December Vol. III., 1553-1558.
- Mouli P.C., S.V. Mohan, and S.J. Reddy (2005). Rainwater Chemistry at A Regional Representative Urban Site). Influence of Terrestrial Sources on Ionic Composition. *Atmospheric Environment* 39, 999 – 1008.
- Pérez I.A., F. Artuso, M. Mahmud, U. Kulshrestha, M.L. Sánchez, and M.A. García (2015). Applications of Air Mass Trajectories. Review Article Hindawi Publishing Corporation *Advances in Meteorology* Volume 2015, Article ID 284213 (20 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2015/284213>).
- Powell, J. (2007). Chemlab Wet Chemistry Measurement Work, Instruction Manual for NATA Accredited Laboratories, CSIRO Marine and Atmospheric Research Aspendale Laboratories, 109 hal.
- RPJMD Kota Semarang (2011). Rencana Pembangunan Jangka Menengah Daerah (RPJMD) Kota Semarang Tahun 2010-2015 II - 1 BAB II GAMBARAN UMUM KONDISI DAERAH, [www.semarangkota.go.id/portal/RPJMD 2011/BAB 2.pdf](http://www.semarangkota.go.id/portal/RPJMD%202011/BAB%202.pdf).
- Republik Indonesia (1999). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara. Lembaran Negara RI No 41, Jakarta). Sekretariat Negara.
- Santoso M. (2005). Short irradiation analysis of airborne particulate samples using K₀ neutron activation method. Proceeding of Nuclear Science and Technology; 2005. June 2005.
- Santoso M., H.A Das, A. Hidayat, R. Kukuh, and P. Ilham (2003). Determination of normalization factor of several Lazy Susan position of TRIGA 2000 Bandung reactor. Proceeding Seminar of Nuclear Science and Technology Computation; 2003b.
- Santoso M., P.K. Hopke, A. Hidayat, and (2008). Sources identification of the atmospheric aerosol at urban and suburban sites in Indonesia by positive matrix factorization, *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT* 397 (2008) 229– 237.
- Santoso M., D.L. Dwiana, and A. Markwitz (2012). Characterization of airborne particulate matter collected at Jakarta roadside of an arterial road. *J. Radioanal Nucl Chem*, DOI 10.1007/s10967-012-2350-5.
- Santoso M., D.L. Dwiana, and P. K. Hopke (2013). Atmospheric black carbon in PM_{2.5} in Indonesian cities, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 63:9, 1022-1025, DOI). 10.1080/10962247.2013.804465
- Seinfeld J.H. and S.N. Pandis, (1998). Atmospheric Chemistry and Physics from *Air pollution to Climate Change*, John Wiley and Sons. INC., New York, 1998, hal.1030-1033.
- Seneviratne M.C.S., V.A. Waduge, L. Hadagiripathira, S. Sanjeevani, T. Attanayake, N. Jayaratne, and P.K.Hopke (2011). Characterization and source apportionment of particulate Pollution in

- Colombo, Sri Lanka, *Atmospheric Pollution Research* 2 (2011) 207-212.
- Smith, S. J., J. van Aardenne, Z. Klimont, R.J. Andres, A. Volke, and S. Delgado Arias (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions). 1850–2005, *S. Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1101–1116.
- Takahashi H., H. Naoe, Y. Igarashi, Y. Inomata, N. Sugimoto (2010). Aerosol concentrations observed at Mt. Haruna, Japan, in relation to long-range transport of Asian mineral dust aerosols, *Atmospheric Environment* 44 (2010) 4638-4644.