

# Hubungan Aerosol Optical Depth (AOD) dengan Materi Partikulat 10 Mikron (PM<sub>10</sub>): Studi Literatur

Mila Dirgawati<sup>1</sup> dan Nabila Ayu Larasati<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut Teknologi Nasional; \*e-mail: [mila.dirgawati@itenas.ac.id](mailto:mila.dirgawati@itenas.ac.id)

## ABSTRAK

Studi ini mengkaji berbagai penelitian mengenai hubungan aerosol optical depth (AOD) yang diperoleh dari pengukuran data satelit dengan materi partikulat 10 mikron (PM<sub>10</sub>) hasil pengukuran ground-based di negara dua dan empat musim. Referensi yang digunakan adalah jurnal yang telah dipublikasikan tahun 2013-2022 yang dengan menggunakan Mendeley dan Google Scholar. Hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> ditinjau dari nilai koefisien korelasi ( $r$ ) dan koefisien determinasi ( $R^2$ ). Berdasarkan nilai  $r$ , ditemukan bahwa hubungan antara AOD dan PM<sub>10</sub> di negara dua musim sangat kuat dengan nilai  $r \geq 0,80$ , sedangkan di negara empat musim nilai hubungannya sangat bervariasi, yaitu  $r = 0,1-0,9$  tergantung musim. Hubungan AOD-PM<sub>10</sub> di negara dua musim dipengaruhi oleh penggunaan lahan, kegiatan manusia, dan kondisi meteorologi (kelembapan relatif dan temperatur permukaan). Hubungan AOD-PM<sub>10</sub> di negara empat musim dapat dipengaruhi oleh kondisi topografi, kegiatan manusia (industri), dan faktor meteorologi dengan kelembapan relatif merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap hubungan AOD dan PM<sub>10</sub>. Berdasarkan nilai  $R^2$  yang dihasilkan, ditemukan bahwa nilai AOD dari data satelit mampu merepresentasikan konsentrasi PM<sub>10</sub> lebih dari 70% di negara dua musim dan lebih dari 83% di negara empat musim sehingga nilai AOD dapat digunakan untuk estimasi konsentrasi PM<sub>10</sub>.

**Kata kunci:** Aerosol Optical Depth (AOD), partikulat 10 mikron (PM<sub>10</sub>), hubungan, data satelit, negara dua musim, negara empat musim

## ABSTRACT

This study examines various studies on the relationship between aerosol optical depth (AOD) obtained from satellite data measurements and 10micron particulate matter (PM<sub>10</sub>) obtained from ground-based measurements in two- and four-season countries. The references used are journals that have been published in 2013-2022 using Mendeley and Google Scholar. The relationship between AOD and PM<sub>10</sub> is assessed from the value of the correlation coefficient( $r$ ) and the determination coefficient( $R^2$ ). The relationship between AOD and PM<sub>10</sub> in two-season countries was very strong with  $r$  values  $\geq 0.80$ , while in four-season countries the relationship value varied greatly ( $r = 0.1-0.9$ ) depending on the season. The AOD-PM<sub>10</sub> relationship in two-season countries is influenced by land use, human activities, and meteorological conditions (relative humidity and surface temperature). The AOD-PM<sub>10</sub> relationship in four-season countries can be influenced by topographic, human activities (industry), and meteorological conditions with relative humidity as the most influential factor in the AOD-PM<sub>10</sub> relationship. Based on the resulting  $R^2$ , the AOD value from satellite data have ability to represent PM<sub>10</sub> concentrations of more than 70% in two-season countries and more than 83% in four-season countries, suggesting AOD values can be used for PM<sub>10</sub> concentration estimation.

**Keywords:** Aerosol Optical Depth (AOD), particulate matter 10 micron (PM<sub>10</sub>), relationship, two-seasons countries, four-season countries

**Citation:** Dirgawati, M. dan Larasati, N. A. (2024). Hubungan Aerosol Optical Depth (AOD) dengan Materi Partikulat 10 Mikron (PM<sub>10</sub>): Studi Literatur. Jurnal Ilmu Lingkungan, 22(3), 704-711, doi:10.14710/jil.22.3.704-711

## 1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara saat ini mendapat perhatian cukup besar karena merupakan masalah bagi lingkungan terutama di wilayah dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi, kegiatan industri yang tinggi, dan wilayah rawan kebakaran hutan. Partikulat dikenal sebagai suatu pencemar kontributor utama pada pencemar yang berdampak terhadap kesehatan (Driejana dkk., 2020). Partikulat berukuran 10 mikron (PM<sub>10</sub>) merupakan salah satu parameter

pencemar udara yang telah banyak diamati lebih dari satu dekade terakhir karena memiliki risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik yang membahayakan kesehatan manusia, mempengaruhi tingkat visibilitas, serta mempengaruhi iklim regional maupun global (Ihsan dkk., 2021; Pujiastuti dkk., 2013). Selain itu, PM<sub>10</sub> juga dijadikan salah satu parameter penting dalam menentukan tingkat kualitas udara ambien dan dapat merubah kriteria kualitas udara (Rita dkk., 2016).

Pengamatan mengenai konsentrasi PM<sub>10</sub> secara langsung (in-situ) dapat diukur melalui stasiun pemantau pencemaran udara menggunakan berbagai jenis alat pengukur (Syafrijon dkk., 2018; Yahi dkk., 2013). Namun, pengamatan di stasiun pemantau pada *ground level* membutuhkan biaya yang cukup mahal. Jumlah stasiun pemantau di suatu wilayah relatif sedikit menyebabkan cakupan spasial yang terbatas, dan terdapat parameter yang tidak dapat diukur. Selain itu, pengukuran di stasiun pemantau kurang dapat mewakili variasi konsentrasi PM<sub>10</sub> di suatu wilayah, terutama di wilayah yang luas karena biasanya stasiun pemantau hanya mengukur parameter pencemar udara hanya pada skala kota (Hernawati dan Darmawan, 2020). Oleh karena itu, saat ini, banyak peneliti yang telah menggunakan penginderaan jauh satelit untuk mengatasi keterbatasan dalam memperkirakan konsentrasi PM<sub>10</sub> di permukaan pada skala spasial yang lebih luas dan telah dilakukan di berbagai belahan dunia (Han dkk., 2015; Saleous dkk., 2021; Syafrijon dkk., 2018; Yahi dkk., 2013).

Teknik penginderaan jauh satelit telah digunakan para peneliti untuk memperkirakan konsentrasi pencemar udara dalam cakupan spasial dan temporal yang luas serta dapat menunjukkan distribusi spasial dari pencemar udara. Data satelit yang digunakan untuk memperkirakan konsentrasi PM<sub>10</sub> berupa aerosol optical depth (AOD). AOD mengukur jumlah cahaya optik dalam kolom vertikal atmosfer karena penyerapan dan penghamburan aerosol, sementara PM<sub>10</sub> dapat menyatakan jumlah aerosol dalam atmosfer (Nisantzi dkk., 2012; Ranjan dkk., 2020). Dalam satu dekade terakhir, peneliti telah mencoba menghubungkan AOD dan PM<sub>10</sub> dimana kemampuan AOD untuk merepresentasikan konsentrasi PM<sub>10</sub> dinyatakan berdasarkan koefisien determinasi (R<sup>2</sup>). Hasil berbagai penelitian tersebut menunjukkan perbedaan antara satu wilayah dengan wilayah lain, dan diperkirakan dipengaruhi oleh variasi kelembapan relatif (Kanabkaew, 2013; Arvani dkk., 2016). Oleh karena itu, perlu dilakukan kajian dari berbagai penelitian terdahulu untuk mengetahui bagaimana hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> di negara yang memiliki dua musim dan empat musim yang dapat menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya dengan topik serupa.

## 2. METODE

Fokus kajian literatur ini adalah mengenai hubungan antara AOD yang diperoleh dari instrumen satelit dengan PM<sub>10</sub> yang terukur di permukaan meliputi negara dua musim dan negara empat musim. Sumber referensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah jurnal yang telah dipublikasikan pada tahun 2013 hingga 2022. Pencarian jurnal-jurnal tersebut dilakukan menggunakan Mendeley dan Google Scholar dengan berbagai kata kunci, yaitu: *aerosol optical depth (AOD)*, *aerosol optical thickness (AOT)*, *particulate matter (PM)*, *PM<sub>10</sub>*, *AOD satellite remote sensing*, *correlation AOD PM*, dan *relationship AOD PM*.

Kata kunci tersebut tidak hanya mengarah pada kata kunci yang ada pada jurnal, tetapi juga mengarah pada abstrak jurnal. Dari pencarian tersebut, ditemukan jurnal dari berbagai penerbit, seperti Elsevier, Springer, Taylor and Francis, MDPI, dan ATMOS.

Kriteria jurnal yang dipilih untuk dibahas adalah: (1) tahun terbit jurnal antara tahun 2013-2022; (2) data yang digunakan dalam jurnal adalah AOD dari satelit dan PM<sub>10</sub> yang diukur dari permukaan; (3) pengukuran satelit dalam jurnal hanya mengukur di atas permukaan tanah, bukan di atas lautan; (4) hasil yang diperoleh dalam jurnal dengan menunjukkan nilai koefisien korelasi (r) dan/atau nilai koefisien determinasi (R<sup>2</sup>).

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Materi Partikulat 10 Mikron atau PM<sub>10</sub>

Partikulat merupakan campuran partikel padat dan cair yang mengandung berbagai komponen organik dan anorganik yang tersuspensi di atmosfer dengan waktu tinggal relatif lama (Oktaviani, 2018), seperti debu, kotoran, jelaga, atau asap. Partikulat utamanya berasal dari proses kegiatan industri, pembakaran bahan bakar fosil, kegiatan transportasi, erosi tanah yang menghasilkan debu *fugitive*. Beberapa partikel berukuran besar dapat dilihat langsung oleh mata, juga beberapa partikulat berukuran sangat kecil yang hanya dapat dideteksi menggunakan mikroskop elektron (EPA, 2022). US EPA (2022) mengkategorikan partikulat sebagai berikut: PM<sub>2.5</sub> atau disebut juga *fine inhalable particles* berdiameter aerodinamis kurang dari 2,5 μm; dan PM<sub>10</sub> disebut juga *inhalable particles* yang umumnya berdiameter aerodinamis kurang dari 10 μm.

Pada rentang ukuran partikulat 0,0002-500 μm, partikel memiliki waktu tinggal dalam bentuk suspensi di atmosfer. Partikulat memiliki sifat optik, yang mana ukuran partikulat yang sangat halus lebih kecil dari ukuran panjang gelombang sinar, sehingga dapat mempengaruhi sinar dan menyebabkan refraksi. PM<sub>10</sub> terdiri dari sulfat, ammonium, nitrat, elemen karbon, senyawa organik terkondensasi, serta logam. PM<sub>10</sub> bersifat higroskopis dan mengandung partikel yang terikat dengan air (Lindawaty, 2010). Partikulat yang terdapat di atmosfer mempengaruhi jumlah dan jenis radiasi matahari yang akan mencapai permukaan bumi. Hal ini dikarenakan partikulat dapat menyerap dan menghamburkan sinar. Jumlah partikulat setiap musim cukup beragam (Ratnani, 2008).

PM<sub>10</sub> umumnya dapat dipantau secara otomatis menggunakan serangkaian alat pada Stasiun Pemantauan Kualitas Udara (SPKU) atau disebut juga dengan Air Quality Monitoring System (AQMS). Suatu AQMS memiliki teknik pemantauan yang berbeda di setiap negara dalam memantau konsentrasi PM<sub>10</sub>. Pada **Tabel 1** terdapat daftar jenis satelit dan sensor yang digunakan pada penelitian terdahulu dalam memperoleh data AOD.

Berdasarkan **Tabel 1**, pemantauan konsentrasi PM<sub>10</sub> diperoleh dari jaringan pemantauan atau

stasiun pemantau. Sebagian besar peneliti tidak mencantumkan teknik atau pemantauan yang digunakan pada stasiun pemantau di wilayah studinya. Namun, pada tabel tersebut dapat diketahui bahwa teknik pemantauan konsentrasi PM<sub>10</sub> yang dapat digunakan adalah Beta Attenuation Monitor (BAM) dan Tapered Element Oscillating Micro-balance (TEOM). Hal ini juga tercantum dalam penelitian Zeeshan dan Oanh (2014) bahwa secara umum, PM<sub>10</sub> dapat diukur dengan BAM, TEOM, dan gravimetri. Kemudian Arvani dkk. (2016) menambahkan bahwa pengukuran BAM dan TEOM ekuivalen dengan teknik pengukuran gravimetri.

**3.2. Aerosol Optical Depth (AOD)**

AOD atau bisa disebut juga dengan *aerosol optical thickness* (AOT) merupakan suatu parameter yang sedang dikembangkan oleh Para peneliti untuk mengukur partikel di permukaan bumi melalui satelit

(Engel-Cox dkk., 2013). AOD adalah ukuran dari berbagai jenis aerosol yang terdistribusi di kolom udara dan menggambarkan berapa banyak sinar matahari yang dapat dicegah oleh aerosol untuk mencapai permukaan tanah (Wei dkk., 2019). AOD memanfaatkan sifat partikel aerosol yang dapat menyerap atau menghamburkan cahaya untuk menghalangi sinar yang masuk. Sehingga dapat mengindikasikan jumlah cahaya yang hilang di kolom atmosfer (Ranjan dkk., 2020). AOD tidak memiliki dimensi, namun memiliki nilai berkisar dari 0 hingga sekitar 4, tetapi umumnya AOD memiliki nilai 0 hingga 1 (Engel-Cox dkk., 2013). Nilai AOD di atas 3,00 mengindikasikan adanya peristiwa debu (Kim dkk., 2019). Rendahnya nilai AOD menunjukkan bahwa cahaya matahari mudah menembus lapisan atmosfer, sedangkan tingginya AOD menunjukkan bahwa cahaya matahari terhambur sehingga sulit untuk menembus lapisan atmosfer.

**Tabel 1.** Teknik Pemantauan Konsentrasi PM<sub>10</sub> yang Digunakan di Stasiun Pemantauan Kualitas Udara pada Penelitian Terdahulu

Referensi	Periode Penelitian	Lokasi Penelitian	Jaringan/Sumber Data	Teknik/ Alat Pemantauan (Tingkat Akurasi)	Jumlah AQMS	Waktu Pengukuran
(Zeeshan dan Oanh, 2014)		Kawasan Metropolitan Bangkok (Thailand)	Pollution Control Department, Ministry of Natural Resource and Environment	-	22 stasiun	Per jam
(Retalis dkk., 2015)	2002-2012	Kota Athena (Yunani)	EARTH Monitoring Network	-	10 stasiun	Per jam
(Arvani dkk., 2016)	2010-2012	Kawasan Po Valley (Italia)	Agency for Environmental Protection Network	1. BAM (2%) 2. TEOM-FDMS ( $\pm 2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 3. BAM SWAM 5A RL by FAI Instrumen (kurang dari $\pm 10\%$ )	1. 18 stasiun 2. 19 stasiun 3. 36 stasiun	Per jam selama 24 jam
(You dkk., 2016)	2011-2013	Kota Xi'an (China)	Ministry of Environmental Protection	TEOM ( $\pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )	13 stasiun	Per jam selama 24 jam
(Syafrijon dkk., 2018)	2015	Kabupaten Kototabang, Kota Jambi, dan Kota Pekanbaru (Indonesia)	Indonesian Agency for Meteorological, Climatological and Geophysics	Portable TSI Dust Trak II	-	Per jam
(Kim dkk., 2019)	2012-2013	Kota Seoul (Korea Selatan)	Korea Meteorological Administration	-	22 stasiun	Per jam
(Saleous dkk., 2021)	2018	Kota Al Ain (Uni Emirat Arab)	Abu Dhabi Environment Agency	-	5 stasiun	harian
(Recto dkk., 2022)	2017-2020	Kota Metro Manila (Filipina)	Department of Environment and Natural Resources Environmental Management Bureau	-	16 stasiun	-

Keterangan: BAM = Beta Attenuation Monitor; TEOM = Tapered Element Oscillating Micro-balance; TEOM-FDMS = Tapered Element Oscillating Micro-balance - Filter Dynamics Measurement System.

Terdapat dua cara yang dapat digunakan untuk mengukur AOD, yaitu dengan alat *ground sun photometer* dan menggunakan sensor yang terpasang pada satelit. Dengan menggunakan *ground sun photometer*, akan didapatkan data berupa nilai AOD secara *real time*. Data AOD *ground sun photometer* dipantau oleh suatu jaringan yang banyak digunakan di seluruh dunia, yaitu Aerosol Robotic Network (AERONET). AOD AERONET memiliki kemampuan untuk memverifikasi AOD dari satelit dengan efisien, namun membutuhkan biaya yang besar dalam mengoperasikan AERONET. Selain itu, jangkauan spasialnya pun terbatas pengukurannya kurang komprehensif. Mengukur AOD menggunakan sensor yang terpasang pada satelit dapat mengatasi keterbatasan jangkauan spasial pada pengukuran *ground sun photometer* karena melalui satelit, jangkauan spasial dalam mengukur AOD jauh lebih luas, dapat dilakukan pada skala regional ataupun skala global, sekalipun pada wilayah yang sulit dijangkau. Sehingga kedua jenis pengukuran AOD ini dapat saling melengkapi untuk memperoleh data AOD yang lebih akurat (Ranjan dkk., 2020; Wei dkk., 2019).

AOD diklasifikasikan berdasarkan sifat sensor dalam memantulkan cahaya, yaitu sensor optik (EOS MODIS dan ESA MERIS), sensor *multi-angle* (EOS MISR), sensor polarisasi (ADEOS POLDER/PARASOL) dan sensor lidar (NASA dan NCES CALIPSO). AOD yang diperoleh dari sensor yang berbeda dimungkinkan

menghasilkan nilai AOD yang berbeda dan tidak cocok satu sama lain karena kondisi permukaan bumi yang sangat kompleks, metode *cloud masking* yang digunakan, perbedaan metode kalibrasi, algoritma AOD yang berbeda (Kanniah dkk., 2014; Wei dkk., 2019; Zeeshan dan Oanh, 2014). Pada **Tabel 2** terdapat daftar jenis satelit dan sensor yang digunakan pada penelitian terdahulu dalam memperoleh data AOD. Untuk penjelasan lebih rinci mengenai satelit dan sensor pengukur AOD, dapat dilihat pada penelitian yang dilakukan oleh Wei dkk. (2019) dan Ranjan dkk. (2020).

Berdasarkan **Tabel 2**, pengukuran nilai AOD menggunakan penginderaan jauh satelit telah diterapkan di beberapa negara di dunia yang memiliki dua musim dan empat musim, dan dengan berbagai skala, yaitu skala kota dan skala regional, serta memungkinkan mengukur AOD untuk skala global. Satelit yang digunakan dalam memperoleh nilai AOD adalah satelit Terra dan Aqua, atau keduanya. Sensor yang paling umum digunakan adalah sensor MODIS dengan panjang gelombang 550 nm. Penggunaan algoritma yang beragam ini disesuaikan dengan kondisi wilayah studi yang diamati. Pada dua tahun terakhir, telah diterapkan algoritma MAIAC dengan resolusi spasial 1 km yang memungkinkan pengukuran nilai AOD yang lebih akurat. Nilai AOD umumnya diunduh atau diekstraksi melalui website NASA.

**Tabel 2.** Satelit dan Sensor yang Digunakan pada Penelitian Terdahulu dalam Memperoleh Data AOD.

Referensi	Periode Penelitian	Lokasi Penelitian	Jenis Satelit	Sensor- Algoritma	Panjang gelombang	Resolusi	Sumber ekstraksi AOD
(Kanniah dkk., 2014)	2007-2011	10 kota di Semenanjung Malaysia	-	MERIS	550 nm	1,2 km	-
(Grguric dkk., 2014)	2008-2012	Kroasia – Empat musim	-	-	-	-	-
(Retalis dkk., 2015)	2002-2012	Kota Athena (Yunani)	Aqua	MODIS-Dark Target	550 nm	3 km dan 10 km	-
(You dkk., 2016)	2011-2013	Kota Xi’an (China)	Terra, Aqua	MODIS	550 nm	3 km	-
(Zeeshan dan Oanh, 2015)	2002-2010	Kota Bangkok (Thailand)	Terra	MODIS dan MISR	470 nm, 550 nm, 660 nm (MODIS); 446 µm, 558 µm, 672 µm, 866 µm (MISR)	10 km (MODIS); 17,6 km (MISR)	NASA ASDC
(Arvani dkk., 2016)	2010-2012	Kawasan Lembah Po (Italia)	Aqua	MODIS dan MODIS-MAIAC	550 nm	10 km (MODIS); 1 km (MAIAC)	-
(Zaman dkk., 2017)	2007-2011	Malaysia	Terra	MODIS	550 nm	10 km	-
(Syafrijon dkk., 2018)	2015	3 kota di Indonesia	Terra	MODIS	550 nm	10 km	-
(Kim dkk., 2019)	2012-2013	Kota Seoul (Korea Selatan)	Terra, Aqua	MODIS-Deep Blue	550 nm	10 km, per jam	NASA LAADS DAAC
(Saleous dkk., 2021)	2018	Kota Al Ain (Uni Emirat Arab)	Terra, Aqua	MODIS-MAIAC	550 nm	1 km	NASA LAADS DAAC
(Recto dkk., 2022)	2017-2020	Kota Metro Manila (Filipina)	-	MODIS-MAIAC	550 nm	1 km	GEE

Keterangan: ASDC = *Atmospheric Science Data Center*; GEE = *Google Earth Engine*; LAADS DAAC = *Level-1 and Atmospheric Archive and Distribution System Distributed Active Archive Center*; MAIAC = *Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction*; MERIS = *Medium Resolution Imaging Spectroradiometer*; MISR = *Multi-angle Imaging Spectro Radiometer*; MODIS = *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*; NASA = *National Aeronautics and Space Administration*

**3.3. Hubungan AOD dan PM<sub>10</sub>**

Penelitian mengenai hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> telah dilakukan di berbagai wilayah dengan iklim dan penelitian mengenai hubungan ini lebih banyak

dilakukan pada skala kota. Ringkasan Penelitian terdahulu mengenai hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> di berbagai negara dengan dua musim dan negara empat musim disajikan pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Hasil dari Penelitian Terdahulu Mengenai Hubungan AOD dan PM<sub>10</sub>

Referensi, Tahun terbit	Periode penelitian	Wilayah studi – Jumlah Musim	Parameter meteorologi	Hasil R dan/atau R <sup>2</sup>
(Kanabkaew, 2013)	Januari-April 2007 dan Januari-April 2012	Kota Chiangmai (Thailand) – Dua musim	Temperatur permukaan dan kelembapan relatif	R <sup>2</sup> = 0,21 (tanpa temperatur dan kelembapan) R <sup>2</sup> = 0,71 (dengan temperatur dan kelembapan)
(Syafrijon dkk., 2018)	2015	Kabupaten Kototabang, Kota Jambi, dan Kota Pekanbaru (Indonesia) – Dua musim	-	R = 0,86 (Kototabang), R = 0,80 (Jambi), R = 0,81 (Pekanbaru)
(Saleous dkk., 2021)	2018	Kota Al Ain (Uni Emirat Arab) – Dua musim	-	R <sup>2</sup> = 0,75 R = 0,86
(Grguric dkk., 2014)	2008-2012	Kroasia – Empat musim	Ketinggian <i>Planetary Boundary Layer</i> (PBL), temperatur permukaan, kecepatan angin, arah angin, dan tekanan permukaan	R = 0,60 (tanpa kategori musim) R = 0,61 (dengan kategori musim) R = 0,69 (musim gugur), R = 0,66 (musim dingin), R = 0,59 (musim panas), R = 0,49 (musim semi).
(You dkk., 2016)	2011-2013	Kota Xi’an (China) – Empat musim	Ketinggian PBL, visibilitas, dan kelembapan relatif	R = 0,77 (keseluruhan), R = 0,827 (musim dingin), R = 0,680 (musim gugur), R = 0,660 (musim semi), R = 0,522 (musim panas)
(Arvani dkk., 2016)	2010-2012	Kawasan Po Valley, yaitu Piemonte, Lombardia, dan Emilia Romagna (Italia) – Empat musim	Ketinggian PBL dan kelembapan relatif	MODIS R <sup>2</sup> = 0,83 (tanpa kelembapan dan ketinggian PBL) R = 0,56 (musim dingin), R = 0,45 (musim semi), R = 0,44 (musim panas), R = 0,44 (musim gugur) R <sup>2</sup> = 0,96 (hanya dengan ketinggian PBL) R = 0,52 (musim dingin), R = 0,46 (musim gugur), R = 0,36 (musim semi), R = 0,28 (musim panas) R <sup>2</sup> = 0,93 (kelembapan dan ketinggian PBL)  MODIS-MAIAC R <sup>2</sup> = 0,4483 (tanpa kelembapan dan ketinggian PBL) R = 0,46 (musim panas), R = 0,45 (musim gugur), R = 0,44 (musim semi), R = 0,42 (musim dingin) R <sup>2</sup> = 0,95 (hanya dengan ketinggian PBL) R = 0,44 (musim dingin dan musim gugur), R = 0,34 (musim semi), R = 0,30 (musim panas) R <sup>2</sup> = 0,92 (dengan kelembapan dan ketinggian PBL)
(Segura dkk., 2017)	2007-2016	Burjassot, Kota Valensia (Spanyol) – Empat musim	-	Terra-MODIS R = 0,57 (musim dingin), R = 0,29 (musim semi), R = 0,13 (musim panas), R = 0,10 (musim gugur)  Aqua-MODIS R = 0,51 (musim dingin), R = 0,19 (musim semi), R = 0,12 (musim gugur), R = 0,05 (musim panas)
(Kim dkk., 2019)	2012-2013	Kota Seoul (Korea) – Empat musim	-	R = 0,43 (keseluruhan), R = 0,57 (musim dingin), R = 0,53 (musim panas), R = 0,42 (musim gugur), R = 0,41 (musim semi)
(Tuygun dan Elbir, 2020)	2008-2016	Kota Mersin (Turki) – Empat musim	-	R = 0,24 (keseluruhan), R = 0,53 (musim gugur), R = 0,36 (musim semi), R = 0,29 (musim panas), R = 0,14 (musim dingin)

Hubungan antara AOD dan PM<sub>10</sub> bervariasi di masing-masing negara, sehingga hubungan di satu negara mungkin kurang cocok apabila diterapkan untuk menentukan hubungan di negara lain. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan kondisi meteorologi, topografi, dan iklim masing-masing negara. Selain itu, perbedaan nilai hubungan juga dipengaruhi oleh pemilihan parameter meteorologi yang digunakan peneliti dalam analisisnya. Dalam studi ini, akan dibahas mengenai faktor-faktor yang mempengaruhi hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> pada negara dengan dua musim dan empat musim.

### 3.3.1. Hubungan AOD-PM<sub>10</sub> di Negara Dua Musim

Penelitian mengenai hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> telah dilakukan di negara yang memiliki dua musim, yaitu musim hujan dan musim kemarau. Pada wilayah ini, didapatkan korelasi yang cukup kuat antara AOD dan PM<sub>10</sub> dengan nilai koefisien korelasi (R) lebih besar dari 0,80. Penelitian di wilayah ini umumnya tidak menganalisis hubungan pada setiap musim, hanya menganalisis hubungan secara keseluruhan dalam satu tahun atau beberapa tahun seperti yang dilakukan oleh Kanabkaew (2013), Syafrijon dkk. (2018), dan Saleous dkk. (2021). Hal ini dikarenakan perubahan kondisi meteorologi pada musim hujan dan musim kemarau yang tidak ekstrem. Misalnya, di negara beriklim tropis, seperti Malaysia memiliki temperatur permukaan pada musim hujan dan musim kemarau masing-masing 22-33°C dan 36-39°C, sementara kelembapan relatif pada musim hujan dan musim kemarau keduanya masih dalam rentang 70-80% (Zaman dkk., 2017).

Nilai AOD pada negara tropis dapat dipengaruhi oleh kegiatan manusia di suatu wilayah. Pada penelitian Zaman dkk. (2017) dihasilkan bahwa nilai AOD di Semenanjung Malaysia pada musim kemarau cukup tinggi, yaitu sebesar 0,5-1,8 yang ditemukan di daerah dengan tingkat populasi yang tinggi, area industri, area hutan yang rawan kebakaran, dan daerah perkotaan. Kemudian pada musim hujan, nilai AOD di Semenanjung Malaysia lebih rendah, kecuali pada daerah perkotaan yang tercemar dengan aktivitas lalu lintas yang tinggi. Selama musim hujan, Malaysia mengalami kondisi cuaca ekstrem dengan curah hujan yang tinggi, namun nilai AOD masih tetap tinggi dikarenakan adanya kontaminasi awan. Hal ini menunjukkan bahwa kegiatan manusia, penggunaan lahan, dan kondisi cuaca dapat mempengaruhi nilai AOD yang kemudian juga akan mempengaruhi hubungannya dengan PM<sub>10</sub>.

Hubungan antara AOD dan PM<sub>10</sub> di negara yang memiliki dua musim akan meningkat secara signifikan apabila hubungan ini mempertimbangkan faktor meteorologi, seperti temperatur permukaan dan kelembapan relatif. Kanabkaew (2013) juga menambahkan bahwa hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> tidak hanya bergantung pada konsentrasi massa kering partikulat, tetapi juga bergantung pada faktor meteorologi. Dalam hasil penelitian Kanabkaew (2013), nilai koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) meningkat

dari 0,21 menjadi 0,71 sehingga nilai R pun meningkat dari 0,46 menjadi 0,84 setelah memasukkan temperatur permukaan dan kelembapan relatif dalam model regresinya. Hal ini menunjukkan bahwa temperatur permukaan dan kelembapan relatif dapat memperkuat hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> di negara yang memiliki dua musim.

### 3.3.2. Hubungan AOD-PM<sub>10</sub> di Negara Empat Musim

Di negara yang memiliki empat musim, yaitu musim dingin, musim semi, musim gugur, dan musim panas, diperoleh korelasi yang sangat bervariasi di setiap musimnya dengan rentang nilai koefisien korelasi 0,1-0,9. Pada penelitian yang dilakukan oleh You dkk. (2015), dan Kim dkk. (2019), korelasi terbaik diperoleh pada musim dingin. Kedua penelitian tersebut menunjukkan bahwa korelasi di musim dingin dan musim gugur lebih tinggi dari musim hangat seperti musim semi dan musim panas. Hal ini disebabkan oleh ketinggian PBL di musim hangat yang lebih tinggi menjadikan konsentrasi PM<sub>10</sub> lebih rendah karena mengalami dilusi (pengenceran) sementara nilai AOD tidak dipengaruhi oleh ketinggian PBL sehingga korelasi antara AOD dan PM<sub>10</sub> bisa menurun. You dkk. (2016) juga menjelaskan bahwa korelasi yang dihasilkan dari penelitian Kim dkk. (2019) lebih rendah dari korelasi dari penelitian You dkk. (2015) karena pada penelitian Kim dkk. (2019) tidak mempertimbangkan faktor meteorologi dalam perhitungan regresi liniernya.

Korelasi yang diperoleh dari kedua penelitian di atas berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh Tuygun dan Elbir (2020) dimana korelasi terbaik didapatkan pada musim gugur dengan nilai R = 0,53 dan korelasi terendah terdapat di musim dingin dengan nilai R = 0,14. Perbedaan nilai koefisien korelasi ini disebabkan oleh perbedaan kondisi musim-musim di Turki. Tuygun dan Elbir (2020) menjelaskan bahwa kondisi pada musim dingin di Turki cenderung hangat dan lembap serta musim panas yang cenderung terik dan kering. Kelembapan relatif yang tinggi di musim dingin menyebabkan peningkatan kandungan uap air di atmosfer, partikel akan menyerap uap air tersebut sehingga partikel mengalami *hygroscopic growth* dan ukuran partikel menjadi lebih besar. Ukuran partikel yang besar membuat nilai AOD yang dihasilkan akan menjadi lebih tinggi. Selain itu, hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> di musim dingin dapat melemah karena pengukuran AOD dalam kondisi langit yang tertutup awan dan permukaan yang tertutup salju (You dkk., 2016). Hal ini menunjukkan bahwa kelembapan relatif berpengaruh terhadap hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> karena dapat mempengaruhi konsentrasi PM<sub>10</sub>. Tutupan awan di atmosfer dan tutupan salju di permukaan tanah menjadi penghambat dalam pengukuran AOD. Hal ini juga menunjukkan bahwa korelasi AOD dan PM<sub>10</sub> akan berbeda pada wilayah

studi yang berbeda walaupun wilayah studi di atas masih merupakan negara empat musim.

Arvani dkk. (2016) menjelaskan bahwa di kawasan Po Valley (Italia), konsentrasi PM<sub>10</sub> tinggi di musim dingin dan musim gugur karena terjadi peristiwa penumpukan polutan-polutan di dekat permukaan tanah dan terperangkap pada lapisan yang stabil selama beberapa jam. Hal ini juga dapat dikaitkan dengan lokasi kawasan Po Valley yang dekat dengan wilayah pegunungan serta aktivitas manusia yang merupakan pusat kegiatan industri. Oleh karena itu, konsentrasi PM<sub>10</sub> juga dipengaruhi oleh kondisi topografi dan kegiatan manusia.

### 3.4. Kemampuan AOD dalam Merepresentasikan PM<sub>10</sub>

Koefisien determinasi atau biasanya dilambangkan dengan R<sup>2</sup> menunjukkan seberapa besar pengaruh suatu variabel bebas dalam menjelaskan variasi dari variabel terikat (Ghozali, 2016). Nilai R<sup>2</sup> yang semakin tinggi, yaitu mendekati 1, menunjukkan bahwa variabel bebas mampu memberikan seluruh informasi untuk memperkirakan variabel terikat, dan sebaliknya (Ghozali, 2016). Oleh karena itu, untuk melihat apakah nilai AOD dapat menjelaskan atau merepresentasikan konsentrasi PM<sub>10</sub>, digunakan perhitungan nilai R<sup>2</sup>.

Nilai R<sup>2</sup> pada hasil penelitian Kanabkaew (2013) dan Saleous dkk. (2021) dilaporkan cukup baik, yaitu masing-masing 0,71 dan 0,75 untuk negara dua musim. Hal ini menunjukkan bahwa lebih dari 70% konsentrasi PM<sub>10</sub> dapat direpresentasikan oleh nilai AOD pada wilayah tersebut sedangkan 30% lainnya dijelaskan oleh variabel selain AOD. Saleous dkk. (2021) juga menyatakan bahwa menggunakan nilai AOD untuk mengestimasi konsentrasi PM<sub>10</sub> cukup menjanjikan.

Nilai R<sup>2</sup> juga dapat dipengaruhi oleh parameter meteorologi. Pada hasil penelitian Arvani et al. (2016), didapatkan nilai R<sup>2</sup> sebesar 0,83. Ketika parameter meteorologi ketinggian PBL digunakan, nilai R<sup>2</sup> meningkat pesat menjadi 0,96. Namun, nilai R<sup>2</sup> mengalami penurunan saat ditambahkan lagi dengan penggunaan parameter kelembapan relatif (RH) walau tidak serendah saat tidak menggunakan parameter meteorologi. Arvani et al. (2016) juga menjelaskan bahwa RH di kawasan Po Valley memiliki rata-rata RH bulanan 35% sepanjang tahun. Hal ini menunjukkan bahwa koreksi oleh RH kurang dapat meningkatkan atau bahkan menurunkan nilai R<sup>2</sup> dalam hubungan AOD dan PM<sub>10</sub> apabila RH di wilayah yang diteliti cenderung homogen. Meskipun terdapat penurunan nilai R<sup>2</sup> pada hubungan AOD dan PM<sub>10</sub>, terlihat bahwa nilai AOD tetap dapat merepresentasikan konsentrasi PM<sub>10</sub> dengan baik dalam penelitian Arvani et al. (2016), yaitu sebesar 83% hingga 96%.

## 4. KESIMPULAN

Hubungan antara AOD-PM<sub>10</sub> secara spasial maupun temporal (berdasarkan musim) dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk faktor meteorologi, aktivitas antropogenik, keragaman penggunaan lahan, topografi, dan lainnya. Hubungan AOD-PM<sub>10</sub> akan semakin kuat di wilayah perkotaan dengan tingkat konsentrasi PM<sub>10</sub> yang tinggi. Faktor meteorologi yang paling berpengaruh pada hubungan antara AOD-PM<sub>10</sub> di negara dua musim adalah temperatur permukaan dan kelembapan relative, sedangkan variasi ketinggian PBL pada setiap musim menjadi faktor utama pada hubungan AOD-PM<sub>10</sub> di negara empat musim. Hasil studi ini menunjukkan bahwa data AOD dari pengukuran satelit dapat digunakan untuk menggambarkan konsentrasi PM<sub>10</sub> di permukaan. Konsentrasi PM<sub>10</sub> yang terwakili oleh AOD akan menjadi informasi penting mengenai status pencemaran PM<sub>10</sub> terutama di area dengan kemampuan atau sumberdaya yang terbatas untuk melakukan pemantauan PM<sub>10</sub>.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arvani, B., Pierce, R. B., Lyapustin, A. I., Wang, Y., Ghermandi, G., dan Teggi, S. (2016). Seasonal Monitoring and Estimation of Regional aerosol Distribution over Po Valley, Northern Italy, Using a High-Resolution MAIAC Product. *Atmospheric Environment*, 141, 106-121. doi:10.1016/j.atmosenv.2016.06.037
- Driejana, Kadir, A. I. N. K., dan Santoso, M. (2020). Komposisi Kimia Pencemar Partikulat Kasar dan Halus di DKI Jakarta pada Musim Hujan dan Musim Kemarau. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 522-530.
- Engel-Cox, J. A., Huff, A. K., Kanabkaew, T., dan Oanh, N. T. K. (2013). Satellite Tools for Air Quality Management with Focus on Particulate Matter. In N. T. K. Oanh (Ed.), *Integrated Air Quality Management ASIAN Case Studies*. New York: CRC Press.
- EPA, U. (2022). *Particulate Matter (PM) Pollution*.
- Ghozali, I. (2016). *Aplikasi Analisis Multivariete Dengan Program IBM SPSS 23 Vol. 2023*.
- Grguric, S., Križan, J., Gašparac, G., Antonic, O., Špiric, Z., Rodelise, Mamouri, E., Christodoulou, A., Nisantzi, A., Agapiou, A., Themistocleous, K., Fedra, K., Panayiotou, C., dan Hadjimitsis, D. (2014). Relationship between MODIS based Aerosol Optical Depth and PM<sub>10</sub> over Croatia. *Central European Journal of Geosciences*. doi:10.2478/s13533-012-0135-6
- Han, Y., Wu, Y., Wang, T., Zhuang, B., Li, S., dan Zhao, K. (2015). Impacts of elevated-aerosol-layer and aerosol type on the correlation of AOD and particulate matter with ground-based and satellite measurements in Nanjing, southeast China. *Science of the Total Environment*, 5(32), 196-207.
- Hernawati, R., dan Darmawan, S. (2020). Spatial distribution of PM<sub>10</sub> derived from Landsat 8 imagery in Bandung, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 500.
- Ihsan, I. M., Yani, M., Hidayat, R., dan Permatasari, T. (2021). Fluktuasi Cemar Udara Partikulat dan Tingkat Risikonya terhadap Kesehatan Masyarakat Kota Bogor. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 22, 038-047.

- Dirgawati, M. dan Larasati, N. A. (2024). Hubungan Aerosol Optical Depth (AOD) dengan Materi Partikulat 10 Mikron (PM<sub>10</sub>): Studi Literatur. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 22(3), 704-711, doi:10.14710/jil.22.3.704-711
- Indonesia, P. R. (2021). Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia.
- Kanabkaew, T. (2013). Prediction of Hourly Particulate Matter Concentrations in Chiangmai, Thailand Using MODIS Aerosol Optical Depth and Ground-Based Meteorological Data. *Environment Asia*, 6(2), 65-70.
- Kanniah, K. D., Zaman, N. A. F. K., Lima, H. Q., dan Rebaa, M. N. M. (2014). Monitoring Particulate Matters in Urban Areas in Malaysia Using Remote Sensing and Ground-based Measurements. Paper presented at the SPIE.
- Kim, D., Kim, J., Jeong, J., dan Choi, M. (2019). Estimation of Health Benefits from Air Quality Improvement Using the MODIS AOD Dataset in Seoul, Korea. *Environmental Research*, 173, 452-461. doi:10.1016/j.envres.2019.03.042
- Lindawaty. (2010). Partikulat (PM<sub>10</sub>) Udara Rumah Tinggal yang Mempengaruhi Kejadian Infeksi Saluran Pernapasan Akut (ISPA) Pada Balita (Penelitian di Kecamatan Mampang Prapatan, Jakarta Selatan Tahun 2009-2010). (Magister), Universitas Indonesia, Depok.
- Nisantzi, A., Hadjimitsis, D. G., Akylas, E., Agapiou, A., Panayiotou, M., Michaelides, S., Tymvios, F., Charalambous, D., Athanasatos, S., Retalis, A., Paronis, D., Perdikou, S., Koutrakis, P., Evans, J. S., dan Achilleos, S. (2012). Study of Air Pollution with the Use of MODIS Data, LIDAR and Sun Photometers in Cyprus. *Climatology and Atmospheric Physics*. doi:DOI 10.1007/978-3-642-29172-2\_158
- Oktaviani, E. (2018). Paparan Particulate Matter (PM<sub>10</sub>) dan Total Suspended Particulate (TSP) di Trotoar Beberapa Jalan Kota Surabaya. (Sarjana Tugas Akhir), Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Pujiastuti, P., Soemirat, J., dan Dirgawati, M. (2013). Karakteristik Anorganik PM<sub>10</sub> di Udara Ambien terhadap Mortalitas dan Morbiditas pada Kawasan Industri di Kota Bandung. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional [Reka Lingkungan]*, 1, 24-34.
- Ranjan, A. K., Patra, A. K., dan Gorai, A. K. (2020). A Review on Estimation of Particulate Matter from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Data, Methods, and Challenges. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*. doi:10.1007/s13143-020-00215-0
- Ratnani, R. D. (2008). Teknik Pengendalian Pencemaran Udara yang Diakibatkan Oleh Partikel. *Momentum*, 4.
- Recto, B. A. B., Torres, R. A. B., Ramos, R. V., Tamondong, A. M., Cayetano, M. G., dan Jiao, B. J. D. (2022). Hotspot Analysis and Comparison Between Satellite-Derived Aerosol Optical Depth and Ground-based Particulate Matter Measurements in Metro Manila. Paper presented at the GeoSpatial Conference - Joint 6th SMPR and 4th GIResearch Conferences, Tehran, Iran.
- Retalis, A., Paronis, D., dan Katsanos, D. (2015). Intercomparison between MODIS 3 Km Aerosol Optical Depth and Ground PM<sub>10</sub> Measurements over Athens-Greece. Paper presented at the SPIE.
- Rita, Lestiani, D. D., Hamonangan, E., Santoso, M., dan Yulinawati, H. (2016). Kualitas Udara (PM<sub>10</sub> dan PM<sub>2.5</sub>) untuk Melengkapi Kajian Kualitas Lingkungan Hidup. *Ecolab*, 10(1), 1-48.
- Saleous, N., Issa, S., dan Alsuwaidi, M. (2021). Using MODIS Aerosol Optical Depth to Predict PM<sub>10</sub> over Al Ain Region, UAE. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021, 5. doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-419-2021
- Segura, S., Estelles, V., Utrillas, M. P., dan Martinez-Lozano, J. A. (2017). Long Term Analysis of the Columnar and Surface Aerosol Relationship at an Urban European Coastal Site. *Atmospheric Environment*, 167, 14. doi:10.1016/j.atmosenv.2017.08.012
- Syafrijon, Marzuki, Emriadi, dan Pratama, R. (2018). Relationship Between MODIS-based Aerosol Optical Depth and PM<sub>10</sub> over Sumatra to Overcome the Limitations of Air Quality Monitoring Data Availability. *Oriental Journal of Chemistry*, 34, 2163-2169. doi:10.13005/ojc/3404058
- Tuygun, G. T., dan Elbir, T. (2020). Long-term Temporal Analysis of the Columnar and Surface Aerosol Relationship with Planetary Boundary Layer Height at a Southern Coastal Site of Turkey. *Atmospheric Pollution Research*, 11, 2259-2269. doi:10.1016/j.apr.2020.09.008
- Wei, X., Chang, N.-B., Bai, K., dan Gao, W. (2019). Satellite Remote Sensing of Aerosol Optical Depth: Advances, Challenges, and Perspectives. *Environmental Science and Technology*. doi:10.1080/10643389.2019.1665944
- Yahi, H., Marticorena, B., Thiria, S., Chatenet, B., Schmechtig, C., Rajot, J. L., dan Crepon, M. (2013). Statistical Relationship between Surface PM<sub>10</sub> Concentration and Aerosol Optical Depth over the Sahel as a Function of Weather Type, Using Neural Network Methodology. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 13,265-213,281. doi:10.1002/2013JD019465
- You, W., Zang, Z., Zhang, L., Zhang, M., Pan, X., dan Li, Y. (2016). A Nonlinear Model for Estimating Ground-level PM<sub>10</sub> Concentration in Xi'an Using MODIS Aerosol Optical Depth Retrieval. *Atmospheric Research*. doi:10.1016/j.atmosres.2015.09.008
- Zaman, N. A. F. K., Kanniah, K. D., dan Kaskaoutis, D. G. (2017). Estimating Particulate Matter Using Satellite Based Aerosol Optical Depth and Meteorological Variables in Malaysia. *Atmospheric Research*. doi:10.1016/j.atmosres.2017.04.019
- Zeeshan, M., dan Oanh, N. T. K. (2014). Assessment of the Relationship between Satellite AOD and Ground PM<sub>10</sub> Measurement Data Considering Synoptic Meteorological Patterns and Lidar Data. *Science of the Total Environment*, 473, 609-618. doi:10.1016/j.scitotenv.2013.12.058
- Zeeshan, M., dan Oanh, N. T. K. (2015). Relationship of MISR Component AODs with Black Carbon and Other Ground Monitored Particulate Matter Composition. *Atmospheric Pollution Research*, 6, 62-69. doi:10.5094/APR.2015.008