

# Pengukuran Kecerahan Langit Malam arah Zenith untuk Penentuan Awal Waktu Fajar

Dhani Herdiwijaya

Kelompok Keilmuan Astronomi dan Observatorium Bosscha,  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,  
Gedung Center for Advanced Sciences, Lt. 6, Ganesha 10 Bandung, Indonesia, 40132

dhani@itb.ac.id

## Abstrak

*Cahaya dari Matahari akan berinteraksi dengan lapisan-lapisan atmosfer Bumi, sehingga muncul fase peralihan dari malam menuju siang (fajar), dan sebaliknya (senja). Fenomena fajar dan senja sangat penting bagi kehidupan, baik manusia, flora, dan fauna. Berbagai upaya telaah fisis optika atmosfer, serta dampaknya bagi kehidupan masih sangat relevan dilakukan, untuk pemahaman ilmu pengetahuan dan teknologi terkini. Salah satu cara untuk mengkuantisasi fase fajar adalah mengukur kecerahan langit dengan alat sederhana pengukur intensitas cahaya yang disebut fotometer. Makalah ini menyajikan hasil pengukuran kecerahan langit dengan fotometer saku pada arah zenith untuk hari tertentu dengan kriteria yang ditentukan, yaitu cuaca cerah, minimal awan, dan tidak ada sabit Bulan. Hasil pengukuran kecerahan langit untuk empat lokasi, yaitu Observatorium Bosscha, Cimahi, Yogyakarta, dan Kupang memperlihatkan bahwa langit tergelap malam hari terjadi di Kupang. Tetapi cahaya Zodiak (fajar semu) tidak diamati di Kupang. Sedangkan Cimahi mempunyai tingkat polusi udara dan polusi cahaya paling tinggi. Polusi sangat berpengaruh terhadap nilai kecerahan langit. Efek malam semu, yaitu kondisi dimana perubahan kecerahan langit yang kecil sampai sudut elevasi Matahari  $-11^{\circ}$ , akibat dari cahaya Matahari yang terserap oleh partikel-partikel polutan di atmosfer rendah yang terjadi di daerah dengan tingkat polusi udara tinggi. Cahaya Matahari berinteraksi melalui proses hamburan cahaya dengan lapisan atas atmosfer Bumi mulai terjadi pada sudut elevasi Matahari  $-17^{\circ}$  atau sekitar 65 menit sebelum Matahari terbit, sehingga sudut ini dapat menjadi awal dari waktu salat Shubuh. Puncak perubahan kecerahan langit terjadi pada ketinggian 7,5 km (lapisan atas troposfer). Anomali konsentrasi aerosol dan perubahan temperatur terjadi pada ketinggian 16-24 km (lapisan stratosfer). Sedangkan awal hamburan cahaya Matahari, bergantung pada tingkat polusi udara, merentang pada ketinggian 25 km (tingkat polusi udara yang tinggi, Cimahi) sampai 63 km (tingkat polusi udara rendah, Kupang).*

*Kata-kata kunci: Fotometer, kecerahan langit, waktu fajar*

## PENDAHULUAN

Perputaran Bumi atau planet-planet lainnya terhadap porosnya menyebabkan peralihan siang dan malam (*twilight*), berupa fajar dan senja, selain fenomena terbit (*rise*) dan tenggelam (*set*) dari obyek langit. Ketiga fenomena gerak Matahari harian tersebut sudah diketahui sejak awal peradaban manusia. Waktu fajar adalah periode transisi waktu malam menuju siang. Sebaliknya disebut waktu senja. Dalam satu hari, permukaan Bumi yang mengalami siang sekitar 42-45%, sedangkan malam hari mencakup 33-35%. Adapun daerah transisi pergantian siang-malam sebesar 20-25%. Kompleksitas terjadi karena waktu fajar dan senja sangat peka bergantung terhadap atmosfer atau selubung lapisan udara tipis yang melingkupi planet. Parameter ketebalan, kerapatan, suhu, ataupun komposisi kimianya bervariasi terhadap ketinggian, sehingga terjadi proses kimia dan fisika atmosfer yang unik untuk setiap ketinggian atmosfer. Jarak yang berbeda terhadap Matahari menyebabkan proses interaksi cahaya atau energi Matahari dengan lapisan-lapisan atmosfer juga

berfluktuasi [1]. Energi yang sampai permukaan berdampak terhadap semua aspek kehidupan manusia, flora, fauna, dengan berbagai spesiesnya, termasuk pengaruh terhadap metabolisme, fisiologis dan psikologis, bahkan bagaimana mereka berkomunikasi dan bersosialisasi. Dinamika angin dan gelombang laut merupakan fenomena alam yang dipengaruhi peralihan siang dan malam. Atmosfer planet Bumi sekaligus berfungsi sebagai perisai, yaitu pertama, melindungi kehidupan dari hantaman langsung bebatuan yang datang dari luar Bumi, misalkan pecahan komet, asteroid, dll., dalam skala ukuran mm sampai kilometer. Kedua, melindungi kehidupan dari paparan radiasi energi tinggi seperti ultraviolet, sinar-X, atau sinar gamma, yang berasal dari Matahari atau obyek-obyek langit yang eksplosif lainnya. Dengan demikian, manusia di permukaan Bumi, terlindung dengan sangat aman, seperti jabang bayi yang nyaman dalam kandungan ibu.

Pada abad ke-10 seorang ilmuwan Mesir, yaitu Abu Ali al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haytham (965 - 1039) atau dikenal dengan nama Alhazen memperkirakan ketinggian atmosfer berdasarkan waktu perubahan kecerahan langit saat peralihan malam dan siang. Pencapaian karya beliau dalam riset dan aplikasi optika telah diakui oleh dunia dan diperingati dalam momen *International Year of Light* tahun 2015 [2]. Pembiasan cahaya Matahari oleh lapisan-lapisan atmosfer bergantung kepada kerapatan dan komposisi kimia atmosfer, sehingga intensitas cahaya bias yang dapat dideteksi bergantung sensitivitas alat fotometer. Semakin rendah sensitivitas alat, maka semakin rendah pula ketinggian atmosfer yang dapat diperkirakan.

## WAKTU FAJAR DAN SENJA

Untuk satu lokasi di permukaan Bumi, waktu fajar (*morning twilight*) didefinisikan sebagai waktu yang berawal dari posisi Matahari masih di bawah ufuk, tetapi cahaya Matahari mulai dihamburkan oleh atmosfer Bumi sampai terbitnya Matahari. Proses sebaliknya untuk waktu senja (*evening twilight*), yaitu waktu yang berawal dari Matahari terbenam sampai cahaya Matahari relatif terserap oleh atmosfer Bumi. Proses hamburan cahaya di atas menyebabkan warna-warni fajar/senja. Kenampakan fisis waktu senja/fajar (*twilight*) tidaklah semudah untuk dilihat dan dirasakan pancaindera seperti fenomena Matahari terbit atau terbenam, meskipun semuanya juga dipengaruhi oleh kondisi atau kerapatan atmosfer Bumi. Akhir/awal waktu senja/fajar lebih sulit dipahami karena suasana yang gelap dan mata tidak sensitif untuk melihat perubahan intensitas cahaya dan pergantian warna yang redup, sehingga memerlukan alat bantu untuk mengukur hamburan cahaya dan warnanya, baik bersumber cahaya alami dan atau polusi cahaya (lampu-lampu buatan manusia), akibat struktur lapisan dan komposisi atmosfer yang tidak homogen [1,3].

Klasifikasi fajar/senja terbagi menjadi 3 waktu, tergantung terhadap sudut kedalaman posisi Matahari di bawah ufuk, yaitu fajar/senja sipil: waktu fajar ketika pusat geometris Matahari pada sudut kedalaman/elevasi 6 derajat di bawah ufuk sampai Matahari terbit atau 0,5 derajat di bawah ufuk, dan sebaliknya. Ciri waktu fajar/senja sipil adalah hamburan cahaya Matahari sudah cukup kuat (meskipun Matahari belum terbit), sehingga dengan mudah dibedakan benda-benda luar di sekitar kita dan tidak perlu bantuan lampu. Dalam kondisi cuaca cerah, batas ufuk di pantai dan awan di sekitarnya jelas terlihat. Demikian pula planet Venus masih terlihat secara visual. Kedua, fajar/senja nautikal: waktu fajar ketika pusat geometris Matahari pada sudut kedalaman/elevasi 12 derajat di bawah ufuk sampai 6 derajat di bawah ufuk, dan sebaliknya. Langit masih cukup gelap atau remang-remang, sehingga batas ufuk di pantai dan awan tidak jelas terlihat. Demikian pula obyek luar di sekitar kita tidak bisa dibedakan dengan jelas. Ketiga, fajar/senja astronomi: waktu fajar ketika pusat geometris Matahari pada sudut kedalaman/elevasi 18 derajat di bawah ufuk sampai 12 derajat di bawah ufuk, dan sebaliknya. Langit sudah gelap, sehingga obyek luar sekitar kita tidak bisa dibedakan, kecuali mata beradaptasi cukup lama dalam kegelapan. Polusi cahaya akibat pemborosan cahaya lampu kota dapat menyebabkan langit lebih terang dari kondisi normal. Kondisi di atas berlaku untuk sudut pandang pengamat kurang dari 45 derajat. Durasi waktu fajar/senja di daerah ekuator dari Matahari terbenam sampai fajar/senja astronomi sekitar 1 jam 8 menit sampai 1 jam 16 menit. Di lokasi dengan lintang tinggi, durasinya mencapai orde beberapa jam. Warna fajar/senja lebih sulit ditentukan karena bergantung terhadap kondisi meteorologis, topografi permukaan, fase Bulan, atau komposisi kimia atmosfer rendah, terutama aerosol, terlebih jika ada erupsi gunung berapi, kebakaran hutan atau partikel polutan dari industri dan kota.

Ibadah umat Islam tidak hanya ditentukan oleh posisi dan kenampakan obyek langit Matahari dan Bulan, tetapi juga bergantung terhadap media atmosfer Bumi yang berlapis-lapis dengan interaksi jejak pembiasan cahaya Matahari yang kompleks, yaitu saat waktu fajar dan senja. Acuan awal waktu fajar untuk ibadah shalat Shubuh bervariasi untuk setiap negara, karena penggunaan rentang sudut elevasi Matahari yang berbeda, yaitu antara  $-15^{\circ}$  sampai  $-20^{\circ}$ , demikian pula halnya untuk awal waktu shalat Isya'. Untuk wilayah negara Indonesia, penentuan awal waktu fajar masih berupa kesepakatan bersama, yaitu elevasi  $-20^{\circ}$ , sehingga kajian dan analisis ulang perlu dilakukan untuk memberikan dukungan basis data pengamatan, sekaligus sebagai upaya pembelajaran tentang fenomena-fenomena alam.

Makalah ini disusun untuk menentukan waktu fajar dan memperkirakan ketinggian atmosfer berdasarkan pengamatan kecerahan langit melalui alat fotometer. Data pengamatan kecerahan langit berasal dari empat

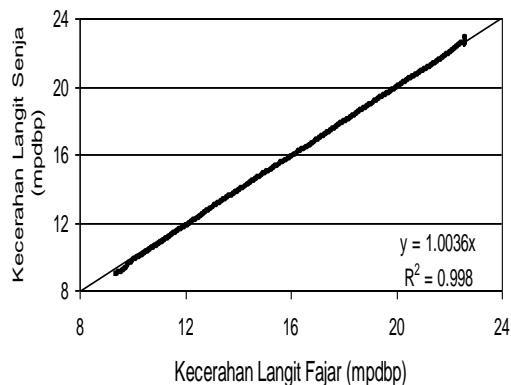
lokasi dengan ketinggian lokasi di atas permukaan laut yang berbeda. Hasilnya sekaligus untuk menguji awal waktu shalat Shubuh bagi pemeluk agama Islam.

### PENGUKURAN KECERAHAN LANGIT

Untuk mengetahui perubahan kecerahan langit secara cepat dan akurat diperlukan fotometer, atau alat pengukur tingkat kecerahan cahaya. Peralatan ini mudah dijumpai, karena banyak dijual di gerai kamera, fotografi, atau laboratorium fisika. Penggunaannya juga mudah. Untuk penelitian ini dipergunakan fotometer portabel, ringan, serta mempunyai koneksi USB, sehingga dengan mudah terkoneksi dan terakses ke komputer, yaitu *Unihedron Sky Quality Meter (SQM)*. Fotometer ini memiliki lensa dan penapis CM500 HOYA, dengan rentang spektral antara 300-720 nm (puncak 500 nm) [4]. Dengan demikian respon detektor SQM sama dengan sensitivitas spektral visual mata manusia. Keluaran dari unit ini adalah besaran terkalibrasi kecerahan langit (magnitudo per detik busur persegi - mpdbp), di mana nilai yang tinggi mencerminkan langit semakin gelap. Besaran kecerahan langit dapat dikonversi menjadi satuan *candela* (lilin) per satuan luas atau iluminasi. Aspek terpenting lainnya, fotometer ini perlu didukung perangkat lunak, sehingga mampu bekerja mandiri merekam kecerahan langit dalam jeda waktu setiap detik mulai dari Matahari terbenam sampai Matahari terbit kembali. SQM dapat digunakan dengan mudah oleh masyarakat umum untuk mendapatkan kualitas langit malam. Sudut pengukuran 20 derajat dan memiliki kestabilan temperatur dan derau nilai kecerahan langit [5,6]. Dalam penelitian ini diterapkan interval waktu pengambilan data sebesar 3-5 detik. Fotometer ini diarahkan tegak lurus atau arah zenit, lihat gambar 2. Fotometer ini telah dipergunakan untuk beberapa penelitian sebelumnya [7,8,9,10].

Menurut skala Bortle [11], skala kecerahan langit dibagi menjadi 9 kelas. Skala Bortle lebih disederhanakan dalam Kategori pertama (>21,3 mpdbp) sebagai lokasi observatorium yang ideal. Galaksi Bimasakti dan cahaya Zodiak masih terlihat. Kategori kedua (antara 20,4 – 21,3 mpdbp), polusi cahaya sudah mulai terlihat dan kenampakan galaksi Bima Sakti dan cahaya Zodiak hanya waktu tertentu. Kategori ketiga (antara 19,1 – 20,4 mpdbp), galaksi Bima Sakti hanya terlihat di arah zenith, cahaya Zodiak sulit dilihat, dan polusi cahaya sudah mencapai 35 derajat dari cakrawal. Kategori keempat (antara 18,0 – 19,1 mpdbp), cahaya Zodiak tidak terlihat, galaksi Bima Sakti terlihat arah zenith pada waktu tertentu, dan polusi cahaya sudah menyebar ke semua arah. Kategori kelima (<18,0 mpdbp), polusi cahaya sudah dominan, hanya planet-planet terang yang terlihat, kondisi langit di kota-kota besar tanpa solusi untuk mengatasi polusi cahaya. Cara termudah mengurangi tingkat polusi cahaya adalah dengan memberikan tudung lampu luar dan lampu jalan dengan bentuk tudung tanpa toleransi untuk cahaya ke atas (*full-cutoff*), pemilihan jenis lampu, melarang lampu Merkuri, dan penghijauan kota. Polusi cahaya akan sebanding dengan polusi udara.

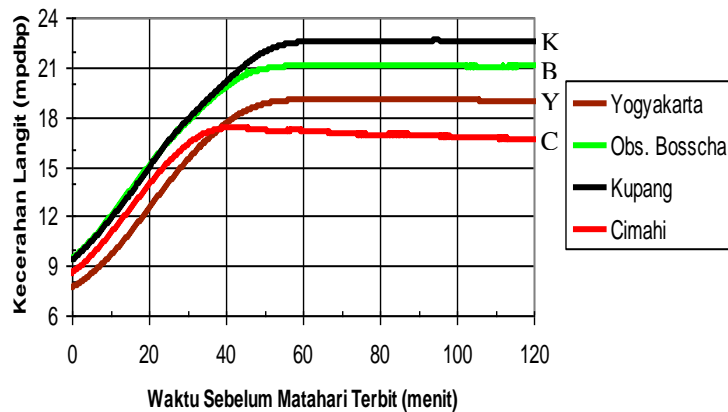
Data kecerahan langit malam dikumpulkan untuk empat lokasi, yaitu Amfoang, Kupang, Nusa Tenggara Timur (124° 0'BT; 9° 40' LS; elevasi 1300 m dpl; Tanggal 10 Mei 2013), Sleman, Yogyakarta (110° 25'BT; 7° 52' LS; elevasi 100 m dpl; Tanggal 18 Mei 2015), Observatorium Bosscha, Jawa Barat (107° 37'BT; 6° 49' LS; elevasi 1300 m dpl; Tanggal 17 Juli 2015), dan Cimahi, Jawa Barat (107° 32'BT; 6° 53' LS; elevasi 700 m dpl; Tanggal 18 Desember 2013). Kemudian, kriteria pemilihan hari adalah kondisi cuaca yang cerah tanpa awan dan cahaya Bulan. Profil kecerahan langit malam mengindikasikan kondisi tingkat polusi cahaya dan polusi udara. Gambar 1 memperlihatkan bahwa profil kecerahan arah zenith langit fajar dan langit senja, dengan nilai korelasi yang tinggi, terutama untuk nilai kecerahan lebih besar dari 12 mpdbp.



Gambar 1. Korelasi profil kecerahan langit fajar (tengah malam sampai matahari terbit) dan langit senja (Matahari terbenam sampai tengah malam) untuk lokasi di Kupang

Profil kecerahan langit fajar untuk keempat lokasi di atas terhadap waktu sebelum Matahari terbit ditampilkan dalam gambar 2. Posisi dan waktu Matahari terbit diperoleh melalui perhitungan [12]. Dalam waktu sekitar 60 menit sebelum Matahari terbit, kecerahan langit meningkat tajam atau nilainya mengecil sampai bernilai antara 6-9 mpdbp. Tetapi untuk waktu yang lebih lama, dapat dikatakan bahwa langit masih kondisi malam "gelap", seperti ditunjukkan oleh garis dengan perubahan kecerahan langit yang kecil pada nilai antara 17-22 mpdbp (bergantung lokasi). Perbedaan 5 mpdbp setara dengan 100 kali perbedaan kecerahan langit. Dalam waktu satu jam di lokasi tertentu kecerahan langit berubah drastis sebesar 10 mpdbp atau berubah 9500 kali lebih terang. Istilah "gelap" merupakan kondisi relatif perubahan pencahayaan/kecerahan sangat kecil suatu tempat, sehingga nilai kecerahan langit tergelap berbeda untuk daerah yang berlainan, akibat kondisi atmosfer lokal yang berbeda. Kondisi tergelap di Yogyakarta (kurva Y, ketiga dari atas) lebih terang dari langit yang tergelap di Observatorium Bosscha (kurva B, kedua dari atas) dan Kupang (kurva K, paling atas). Demikian pula, kondisi tergelap di Cimahi (kurva C) merupakan langit paling terang, relatif terhadap Yogyakarta, Observatorium Bosscha dan Kupang. Langit di Kupang merupakan langit tergelap, dibandingkan ketiga lokasi yang lain. Nilai kecerahan langit di atas 21 mpdbp menandakan bahwa Galaksi Bima Sakti dengan mudah dapat dilihat oleh mata langsung. Sebaliknya, kenampakan Galaksi Bima Sakti sulit terlihat di Cimahi dan Yogyakarta. Daerah Amfoang, Kupang menunjukkan tingkat polusi paling rendah, sedangkan lokasi dengan polusi terparah berada di daerah Cimahi.

Cahaya Zodiak tidak tampak dari pola kecerahan langit ataupun perekaman foto visual bukaan lama di Kupang (sebagai lokasi paling gelap), kemungkinan disebabkan oleh SQM yang mengarah ke zenith. Selain itu juga cahaya Zodiak sangat redup (sekitar 1% perbedaannya dengan kecerahan latar belakang atau sekitar 0.2 mpdbp), sehingga untuk melihatnya mensyaratkan kecerahan langit latar belakang minimal 22 mpdbp di arah cakrawala. Dalam hal ini, polusi cahaya di Observatorium Bosscha, Yogyakarta dan Cimahi menutup visualisasi cahaya Zodiak. Sehingga secara umum cahaya Zodiak tidak terlihat di ketiga lokasi tersebut.



Gambar 2. Kecerahan langit sebagai fungsi dari waktu sebelum Matahari terbit untuk empat lokasi. Langit semakin gelap untuk nilai kecerahan langit yang besar. Kurva paling atas (Kupang-K), kedua (Obs. Bosscha-B), ketiga (Yogyakarta-Y), dan keempat (Cimahi-C)

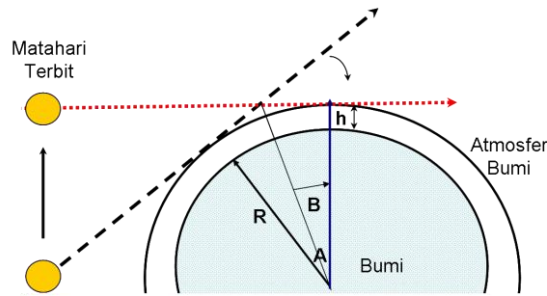
### SUDUT ELEVASI MATAHARI DAN KETINGGIAN ATMOSFER

Sudut elevasi Matahari diperoleh berdasarkan perumusan yang diberikan oleh Meuss [12], kemudian besaran sudut elevasi dikoreksi dengan model efek refraksi (*Earth System Research Laboratory*) yang dituliskan sebagai berikut [13],

$$\kappa = \frac{1^{\circ}}{3600''} \left( \frac{-20,774''}{\tan(h)} \right) \text{ untuk } \alpha < -0,575^{\circ} \quad (1)$$

dimana  $h$  adalah ketinggian atmosfer dan  $\alpha$  merupakan sudut elevasi Matahari. Efek refraksi atmosfer bergantung terhadap kondisi lokal dari parameter tekanan atmosfer, kelembaban, temperatur, dll. sehingga hasil perhitungan sudut elevasi dan posisi Matahari merupakan penyederhanaan dengan ketelitian rendah.

Ketinggian atmosfer diperoleh dengan penggambaran sederhana secara geometri, seperti terlihat dalam gambar 3 di bawah,



Gambar 3. Geometri ketinggian atmosfer, h

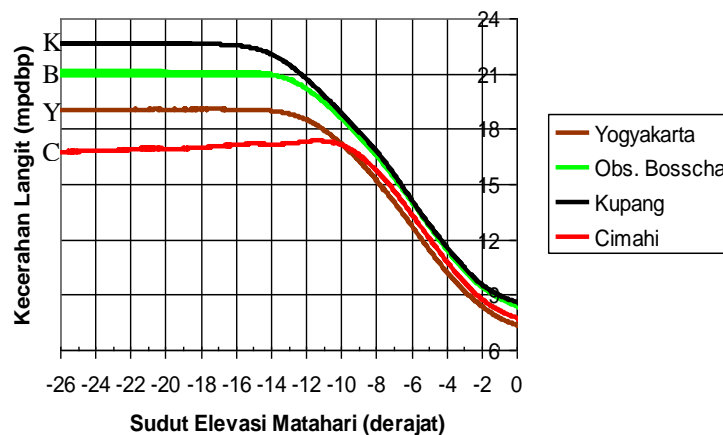
Sehingga diperoleh pendekatan seperti dirumuskan oleh Alhazen [14, 15] sebagai berikut,

$$h = R(\sec B - 1) \tag{2}$$

$$\sin A = \sin(90 - \omega) \sin(15 * \Delta T) \tag{3}$$

dimana sudut  $B=A/2$ , A: sudut elevasi Matahari; R: jejari Bumi;  $\omega$ : lintang pengamat dan  $\Delta T$  : lama waktu fajar

Gambar 4 memperlihatkan kecerahan langit sebagai fungsi sudut elevasi Matahari di bawah ufuk. Dari keempat lokasi, tampak bahwa sudut elevasi lebih kecil dari  $-18^\circ$ , perubahan kecerahan langit masih kecil atau masih sebagai kondisi malam. Hal ini sesuai dengan definisi malam untuk akhir fajar astronomi dengan sudut elevasi lebih dalam dari  $-18^\circ$ . Pengaruh polusi cahaya jelas terlihat untuk daerah Cimahi. Mulainya penurunan nilai kecerahan langit bergantung terhadap lokasi. Daerah Kupang, penurunan mulai terjadi untuk sudut elevasi sekitar  $-16^\circ$ , sedangkan daerah Cimahi mulai sekitar sudut  $-10^\circ$ . Lokasi Kupang dan Observatorium Bosscha mempunyai ketinggian yang sama, yaitu 1300 m di atas permukaan laut, sehingga mempunyai kecerahan langit yang sama, untuk fajar nautikal (sudut elevasi antara  $-12^\circ$  dan  $-6^\circ$ ) dan fajar sipil (sudut elevasi antara  $-6^\circ$  dan  $-0,5^\circ$ ). Lokasi di Cimahi, meskipun mempunyai tingkat polusi cahaya paling parah, tetapi saat fajar nautikal dan fajar sipil, kecerahan langitnya lebih gelap daripada Yogyakarta. Hal ini disebabkan oleh tingkat polusi udara lebih tinggi di Cimahi, atau secara umum di daerah Cekungan Bandung dan sekitarnya, dengan partikel-partikel polutan berukuran cukup besar ( $>10\mu\text{m}$ ) yang berasal dari industri, kendaraan bermotor, pembakaran lahan, dll. [16,17], sehingga cahaya fajar tidak dihamburkan atau dibiaskan, tetapi justru terserap oleh partikel tersebut dan berakibat langit relatif lebih gelap atau disebut "malam" semu.

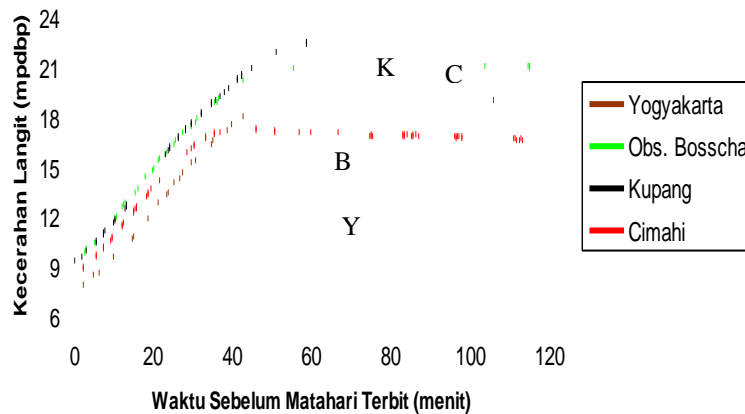


Gambar 4. Kecerahan langit sebagai fungsi dari sudut elevasi sebelum Matahari terbit. Langit semakin gelap untuk nilai kecerahan langit yang besar. Urutan dari atas, kurva dari atas Kupang-K, Obs. Bosscha-B, Yogyakarta-Y, dan Cimahi-C

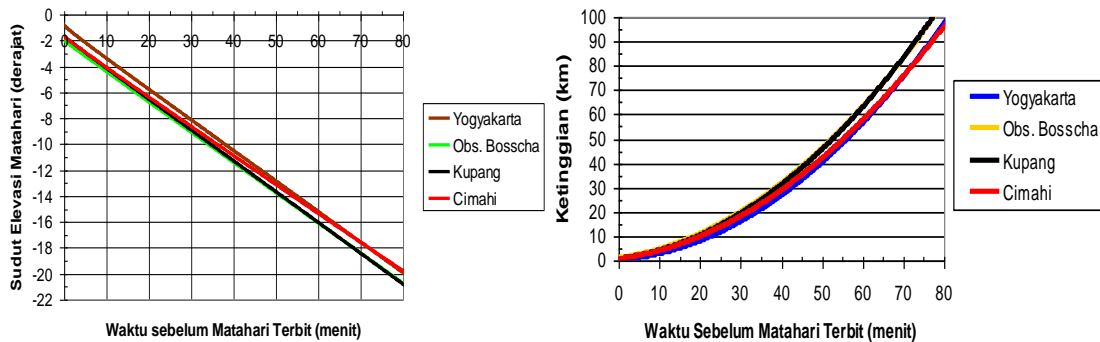
Agar identifikasi perubahan kecerahan langit lebih terlihat dengan jelas, maka diambil perbedaan nilai kecerahan langit setiap 3-5 detik, kemudian diambil rata-rata untuk 50 titik atau 150-250 detik, seperti gambar 5. Pola relatif sefasa terlihat di Kupang, Observatorium Bosscha, dan Yogyakarta. Anomali kecerahan langit akibat polusi udara dan polusi cahaya tampak jelas di daerah Cimahi. Beda kecerahan langit membesar mulai fajar astronomi dan mencapai puncaknya saat berakhirnya fajar nautikal, pada sudut elevasi Matahari  $-6^\circ$ . Dalam periode waktu fajar sipil, beda kecerahan semakin kecil sampai terbit Matahari.

Keempat lokasi mempunyai pola yang relatif sama pada periode fajar sipil, tetapi pola yang relatif tidak sama untuk periode fajar astronomi dan fajar nautikal. Sensitivitas hamburan cahaya Matahari terjadi periode fajar astronomi dan nautikal, yaitu lapisan atmosfer Bumi bagian atas.

Pada gambar 5, sudut elevasi Matahari lebih dalam dari  $-18^{\circ}$ , tidak ada fluktuasi kecerahan langit atau dikatakan masih dalam kondisi malam. Perubahan kecerahan langit mulai terjadi untuk sudut elevasi  $-17^{\circ}$  (daerah Kupang) dan seterusnya dengan sudut lebih kecil. Efek polusi udara terhadap kecerahan langit, yaitu malam semu, terlihat di Observatorium Bosscha dan Yogyakarta, serta paling parah di Cimahi, sehingga seolah-olah masih dalam suasana malam. Efek malam semu adalah kondisi kecilnya perubahan kecerahan langit, akibat cahaya Matahari terserap oleh partikel-partikel polutan yang bersumber dari polusi udara yang terakumulasi di atmosfer rendah (lapisan troposfer). Efek malam semu terjadi pada periode fajar nautikal. Di Observatorium Bosscha dan Yogyakarta, efek malam semu sampai sudut elevasi  $-15^{\circ}$ . Sedangkan di Cimahi sampai sudut elevasi  $-11^{\circ}$ . Ketinggian Observatorium Bosscha sekitar 1300 m, jauh lebih tinggi dari Yogyakarta, tetapi keduanya mempunyai profil kecerahan langit yang sefase.

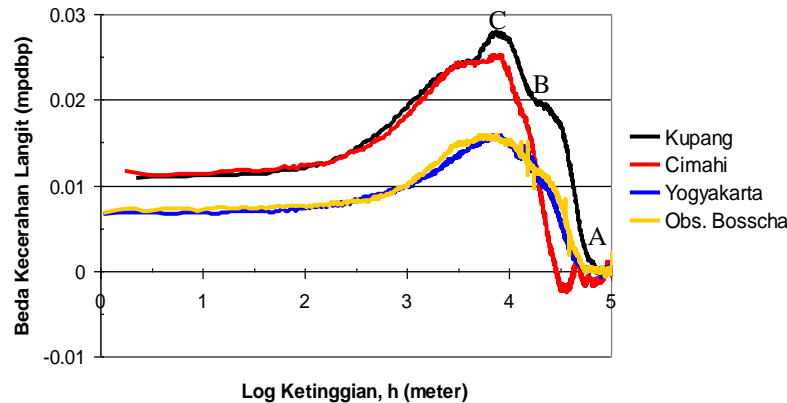


Gambar 5. Beda kecerahan langit sebagai fungsi dari sudut elevasi sebelum Matahari terbit. Label kurva adalah Kupang-K, Obs. Bosscha-B, Yogyakarta-Y dan Cimahi-C.



Gambar 6. Relasi waktu dan sudut elevasi (a, kiri) dan ketinggian km (b, kanan) sebelum Matahari terbit, secara teoritis

Gambar 6a memperlihatkan relasi antara sudut elevasi Matahari dan waktu sebelum Matahari terbit. Sudut elevasi yang sama terjadi perbedaan waktu kurang dari 4 menit. Fajar sipil dimulai antara 15-20 menit sebelum Matahari terbit dan fajar astronomi merentang sekitar 45-70 menit sebelum Matahari terbit. Sudut elevasi  $-17^{\circ}$  setara dengan waktu sekitar 65 menit sebelum Matahari terbit, sedangkan sudut elevasi  $-20^{\circ}$  untuk waktu 75-80 menit sebelum Matahari terbit. Sedangkan ketinggian atmosfer sebagai fungsi waktu sebelum Matahari terbit ditunjukkan dalam gambar 6b. Dalam waktu 80 menit sebelum Matahari terbit, kecerahan langit berasal dari lapisan atmosfer dengan ketinggian mencapai 80 km (lapisan mesosfer). Relasinya tidak linier seperti gambar 6a. Hamburan cahaya dalam fajar sipil terjadi pada ketinggian kurang dari 10 km (lapisan troposfer), fajar nautikal 10-35 km (lapisan stratosfer), dan fajar astronomi 35-80 km (lapisan stratosfer dan mesosfer). Nilai ketinggian merupakan hasil perhitungan berdasarkan sudut elevasi Matahari [12], sehingga dapat dianggap sebagai nilai maksimum.



Gambar 7. Beda kecerahan langit sebagai fungsi ketinggian (skala logaritmik, meter) sebelum Matahari terbit, secara semi-empiris

Perkiraan ketinggian atmosfer yang lebih baik yaitu berdasarkan data pengamatan kecerahan langit dari keempat lokasi atau semi-empiris, dimana peristiwa hamburan cahaya Matahari mulai berlangsung dominan dapat dilihat dalam gambar 7. Tampak bahwa cahaya fajar (titik A) berawal pada ketinggian sekitar 63 km untuk Kupang, 53 km untuk Observatorium Bosscha, 50 km untuk Yogyakarta, dan 25 km untuk Cimahi. Pengaruh polusi udara sangat besar terhadap ketinggian atmosfer dimana awal cahaya Matahari mulai dihamburkan atau awal terdeteksinya waktu fajar. Daerah punggung kurva di daerah B berada pada rentang ketinggian 16-24 km. Meskipun daerah ini hanya terlihat jelas di Kupang, tetapi terdeteksi untuk daerah lain (Yogyakarta dan Observatorium Bosscha) pada rentang ketinggian yang sama. Berdasarkan pengamatan LiDAR (*Light Detection and Ranging*) di daerah Bandung dan Watukosek, aerosol di lapisan stratosfer berada pada ketinggian 18-35 km. Konsentrasi kerapatan aerosol dan anomali temperatur (*temperature inversion layers*) terjadi pada ketinggian sekitar 16 km dan 23 km [18,19], dimana berkorelasi dengan daerah punggung B. Daerah puncak C berada pada ketinggian yang sama untuk keempat lokasi yaitu 7,5 km (lapisan atas troposfer). Dalam pengamatan LiDAR daerah ini tidak menunjukkan perbedaan kerapatan aerosol atau anomali temperatur yang besar, tetapi terjadi perubahan nisbah hamburan dan depolarisasi [18]. Warna dari langit fajar kemungkinan besar berasal pada ketinggian puncak C. Oleh karena setiap lapisan atmosfer mempunyai karakteristik yang berbeda, sehingga menyebabkan proses hamburan dan pembiasan yang kompleks, maka diperlukan peralatan yang lebih presisi untuk mengetahui profil vertikal atmosfer dengan menggunakan gabungan Raman dan Rayleigh LiDAR, dan peralatan fotometer untuk pengamatan simultan dengan resolusi temporal yang tinggi.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengamatan menggunakan fotometer dengan pencatatan setiap 3-5 detik untuk empat lokasi yang berbeda ketinggian dan tingkat polusi cahaya, maupun polusi udara, maka dapat disimpulkan bahwa

- Kecerahan langit di Kupang, NTT menunjukkan langit tergelap dengan tingkat polusi cahaya dan polusi udara paling kecil. Cahaya Zodiak tidak terdeteksi dalam pengamatan di Kupang.
- Perubahan kecerahan langit mulai terjadi pada sudut elevasi  $-17^{\circ}$  atau sekitar 65 menit sebelum Matahari terbit. Sudut elevasi ini menjadi awal dari waktu shalat Shubuh.
- Efek polusi udara dan polusi cahaya berpengaruh kuat terhadap perubahan kecerahan langit dan menyebabkan efek malam semu, akibat serapan cahaya oleh partikel-partikel polutan di atmosfer rendah. Berdasarkan perubahan kecerahan langit, secara semi-empiris awal cahaya fajar (daerah A) merentang pada ketinggian 25 km untuk Cimahi dengan tingkat polusi udara yang tinggi, 53 km untuk Observatorium Bosscha, 50 km untuk Yogyakarta, keduanya dengan tingkat polusi udara yang sedang, sampai 63 km untuk Kupang dengan tingkat polusi udara rendah.
- Puncak perubahan kecerahan langit (daerah C) berada pada ketinggian 7,5 km atau lapisan atas troposfer, dimana warna langit fajar kemungkinan disebabkan di lapisan ini. Sedangkan daerah punggung perubahan kecerahan langit (daerah B) terjadi pada ketinggian 16-24 km, yang bersesuaian dengan lapisan anomali kerapatan aerosol dan temperatur di lapisan stratosfer.

Pengukuran kecerahan langit resolusi waktu yang tinggi masih perlu dilakukan untuk banyak lokasi di Indonesia, tetapi keempat daerah di atas dapat memberikan acuan awal atau merepresentasikan kondisi daerah dengan kontras tinggi untuk beda ketinggian dan tingkat polusi cahaya atau polusi udara.

## REFERENSI

1. D.G. Andrews, *An Introduction to Atmospheric Physics*. Cambridge University Press, Cambridge (2010), ISBN-13 978-0-521-69318-9
2. International Year of Light 2015, <http://www.light2015.org/Home/ScienceStories/1000-Years-of-Arabic-Optics.html> diakses 5 Januari 2017
3. G.V. Rosenberg, *Twilight: A Study of Atmospheric Optic*. Plenum Press, Michigan (1966), doi: 10.1007/978-1-4899-6353-6
4. Unihedron. Grimsby, Canada, <http://www.unihedron.com/index.php> diakses 5 Januari 2017
5. S. Schnitt, T. Ruhtz, J. Fischer, F. Hölker dan C.C.M. Kyba, *Temperature Stability of the Sky Quality Meter*, *Sensors* **13** (2013) 12166, doi:10.3390/s130912166
6. P. den Outer, D. Lolkema, M. Haaima, R. van der Hoff, H. Spoelstra dan W. Schmidt, *Stability of the Nine Sky Quality Meters in the Dutch Night Sky Brightness Monitoring Network*, *Sensors* **15** (2015) 9466, doi:10.3390/s150409466
7. D. Herdiwijaya, S. Nurlaela, Y. Fadilah, S. Kurnia, Adam, *Penentuan Waktu Gerhana Bulan Total 16 Juni 2011 Berdasarkan Sky Quality Meter*, SEMINAR HIMPUNAN ASTRONOMI INDONESIA, Di Bandung, Indonesia, 32 (2011)
8. D. Herdiwijaya, E.P. Arumaningtyas, *Pengukuran Kecerlangan Langit Arah Zenit di Bandung dan Cimahi dengan Menggunakan Sky Quality Meter*, SEMINAR HIMPUNAN ASTRONOMI INDONESIA, Di Bandung, Indonesia, 6 (2011)
9. D. Herdiwijaya, *Implications of Twilight Sky Brightness Measurements on Fajr Prayer and Young Crescent Observation*, THE 7<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHYSICS AND ITS APPLICATIONS (ICOPIA 2014), At Yogyakarta, Indonesia (2014) 26, doi:10.2991/icopia-14.2015.5
10. D. Herdiwijaya, *Sky Brightness and Twilight Measurements at Yogyakarta City, Indonesia*, THE INTERNATIONAL SEMINAR ON SUN, EARTH, AND LIFE, At Bandung, Indonesia, Volume: IoP Journal of Physics: Conf. Ser. 771, 012033 (2016), doi: 10.1088/1742-6596/771/1/012033
11. J.E. Bortle, *The Bortle Dark-Sky Scale*. Sky Publishing Corporation (February 2001)
12. J. Meeus, *Astronomical Algorithms*. Willmann-Bell ed. ke-2, Virginia (1998), ISBN: 0-943396-61-1
13. Earth System Research Laboratory, Global Monitoring Division, NOAA, Boulder <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/calcdetails.html> diakses 5 Januari 2017
14. M. Beech, *Atmospheric Height by Twilight's Glow*, *Journal of The Royal Astronomical Society of Canada* **104** (2010) 147
15. B.P. Kumari, S.H. Kulkarni, D.B. Jadhav, A.L. Londhe dan H.K. Trimbake, *Exploring Atmospheric Aerosols by Twilight Photometry*, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **25** (2008) 1600, doi: 10.1175/2008JTECHA1090.1
16. P. Lestari dan Y.D. Mauliadi, *Source apportionment of particulate matter at urban mixed site in Indonesia using PMF*, *Atmospheric Environment* **43** (2009) 1760, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.12.044
17. M. Santoso, P.K. Hopke, A. Hidayat, D. Dwiana, *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, doi:10.1016/j.scitotenv.2008.01.057
18. S.K. Prabotosari, S. Hamdi, A. Nuryanto, dkk., *Seasonal variation of aerosol over Bandung, Indonesia, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring* Proc. SPIE 4153 (2001) 513, doi:10.1117/12.417087
19. M. Fujiwara, K. Kita, T. Ogawa, dkk., *Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5-year ground-based observations*, *Journal of Geophysical Research* **105** (2000) 1879, doi: 10.1029/1999JD900916