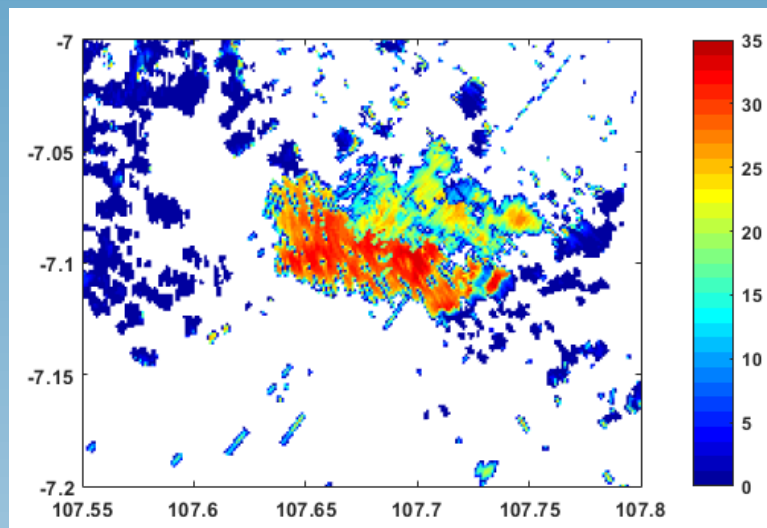


# **JURNAL** **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

Vol. 18 No. 1 Desember 2020

P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873

Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015



---

Diterbitkan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional  
Jakarta – Indonesia

J. Si. Dirgant.

Vol. 18

No. 1

Hal. 0-60

Bandung, Desember 2020

ISSN 2597-7873

# **JURNAL** **SAINS DIRGANTARA** **Journal of Aerospace Sciences**

**Vol. 18 No. 1 Desember 2020**

**P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873**

**Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015**

Jurnal Sains Dirgantara (JSD) berisi hasil penelitian, pengembangan, dan/atau pemikiran di bidang sains atmosfer dan antariksa.  
Jurnal ini terbit sejak tahun 2004 dan dipublikasikan dua kali dalam setahun (Juni dan Desember)

## **SUSUNAN DEWAN PENYUNTING JURNAL SAINS DIRGANTARA**

### **Ketua Editor**

Dr. Rhorom Priyatikanto

### **Editor**

Dr. Trismidianto (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)

Dr. Noersomadi (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)

Fitri Nuraeni, M.Si. (Fisika Magnetosferik dan Ionosferik)

Dr. Johan Muhamad (Astronomi dan Astrofisika)

Tiin Sinatra, M.Si. (Lingkungan Atmosfer dan Aplikasinya)

### **Korektor Naskah**

Dr. Wiwiek Setyawati

Visca Wellyanita, M.Si.

Risyanto, M.Sc.

Emmanuel Adetya, S.Kom.

Santi Sulistiani, M.Si.

Ferdhiansyah Noor, S.Kom.

## **SUSUNAN SEKRETARIAT REDAKSI JURNAL SAINS DIRGANTARA**

### **Pemimpin Umum**

Ir. Halimurrahman, M.T.

### **Pemimpin Redaksi Pelaksanaan**

Dra. Clara Yono Yatini, M.Sc.

Dr. Didi Satiadi

### **Redaksi Pelaksana**

Amalia Nurlatifah, M.T.

M. Faizal Eko Saputro, S.Kom.

Devi Rafsanjani, S.Kom.

### **Penata Letak**

Anton Winarko, S.Si.

Gammameridianti, S.Si.

Siti Maryam, S.T.

Indah Susanti, S.Si.

Berdasarkan SK Kepala LIPI Nomor 818/E/2015 Jurnal Sains Dirgantara ditetapkan sebagai Majalah Berkala Ilmiah Terakreditasi.

Berdasarkan Keputusan Direktur Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan, Kemenristekdikti RI Jurnal Sains Dirgantara ditetapkan sebagai Jurnal Ilmiah Terakreditasi Peringkat 2.

Gambar sampul: Mosaik hasil pengamatan beberapa radar hujan yang berkolokasi (lihat Sinatra *et al.*, halaman 50)

### **Alamat Penerbit**

LAPAN Jl. Dr. Djundjungan No. 133 Bandung

Telepon: (022) 6012602

E-mail: [jsd@lapan.go.id](mailto:jsd@lapan.go.id)

Situs: <http://www.lapan.go.id>

[http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal\\_sains](http://jurnal.lapan.go.id/index.php/jurnal_sains)

# JURNAL SAINS DIRGANTARA Journal of Aerospace Sciences

Vol. 18 No. 1 Desember 2020

P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873

Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

## DAFTAR ISI

	Halaman
<p><b>PEMANTAUAN KONSENTRASI GAS (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) DAN PARTIKULAT (PM<sub>2.5</sub>) PADA STRUKTUR HORIZONTAL DI KAWASAN DAYEUEHKOLOT, CEKUNGAN UDARA BANDUNG RAYA</b>  <b>(MONITORING OF HORIZONTAL STRUCTURE OF GASES (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) AND PARTICULATE (PM<sub>2.5</sub>) CONCENTRATIONS IN DAYEUEHKOLOT, GREATER BANDUNG AIR BASIN)</b>                      Aziz, F., Abdurrachman, A., Chandra, I., Majid, L. I., Vaicdan, F., Salam, R. A.</p>	1 - 12
<p><b>PERHITUNGAN ELEMEN ORBIT BINTANG GANDA WDS 03264+3520 MENGGUNAKAN METODE SEMI-DEFINITE PROGRAMMING</b>  <b>(ORBITAL ELEMENTS DETERMINATION OF BINARY SYSTEM WDS 03264+3520 USING SEMI-DEFINITE PROGRAMMING METHOD)</b>                      Rozzykin, A. Z., Pangestu, A. D., Dermawan, B.</p>	13 - 22
<p><b>DETEKSI MANUEVER ORBIT MENGGUNAKAN METODE MOVING WINDOWS CURVE FITTING (MWCF)</b>  <b>(ORBITAL MANEUVER DETECTION USING MOVING WINDOWS CURVE FITTING (MWCF) METHOD)</b>                      Nor, M. F. A. &amp; Pangestu, A. D.</p>	23 - 32
<p><b>A PROTOTYPE OF TRUE DAWN OBSERVATION AUTOMATION SYSTEM</b>  <b>(PROTOTIPE SISTEM OTOMATISASI OBSERVASI FAJAR)</b>                      Basthoni, M.</p>	33 - 42
<p><b>OPTIMASI DATA RADAR HUJAN DAN PERLUASAN JANGKAUANNYA MENGGUNAKAN JARINGAN RADAR</b>  <b>(DATA OPTIMIZATION OF RAIN RADAR AND ITS COVERAGE EXPANSION USING RADAR NETWORK)</b>                      Sinatra, T., Nugroho, G. A., Awaludin, A.</p>	43 - 54

# JURNAL SAINS DIRGANTARA Journal of Aerospace Sciences

Vol. 18 No. 1 Desember 2020

P-ISSN 1412-808X; E-ISSN 2597-7873

Nomor: 671/AU3/P2MI-LIPI/07/2015

## DARI REDAKSI

Sidang Pembaca yang kami hormati,

Puji syukur kita panjatkan ke hadirat Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga Jurnal Sains Dirgantara Vol. 18, No. 1, Desember 2020, hadir ke hadapan sidang pembaca dengan menengahkan 5 (lima) artikel dengan beragam bidang fokus. Dalam kondisi pandemi COVID-19 serta pembatasan sosial selama ini, editorial Jurnal Sains Dirgantara telah berusaha sekuat tenaga untuk terus menjaring dan memroses makalah yang ada.

Pada terbitan kali ini, Aziz *et al.* (halaman 1) melaporkan hasil pemantauan konsentrasi gas CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> serta partikulat di kawasan Dayeuhkolot, Bandung. Rozzykin *et al.* (halaman 13) menerapkan *Semi-Definite Programming* dalam penentuan elemen orbit bintang ganda WDS 03264+3520. Kemudian, Nor & Pangestu membahas implementasi metode *Moving Windows Curve Fitting* dalam proses deteksi manuver orbit satelit, berikut juga kinerja dari metode tersebut di halaman 23. Prototipe piranti pengamatan fajar sejati yang bekerja secara otomatis disampaikan pada halaman 33. Terakhir, Sinatra *et al.* (halaman 43) melaporkan hasil optimasi data dan ekspansi jangkauan radar hujan menggunakan jejaring radar.

Kami berterima kasih kepada sejumlah kolega mitra bestari yang berkenan melakukan telaah serta memberikan komentar/saran konstruktif terhadap makalah yang dikirimkan ke Jurnal Sains Dirgantara. Di antara mitra bestari tersebut adalah:

- Abdul Rachman, M.Si. (LAPAN, University of Bern)
- Dr. Dhani Herdiwijaya (ITB)
- Dr. Adyati Pradini Yudison (ITB)
- Dr. Edi Riawan (ITB)
- Drs. A. Gunawan Admiranto (LAPAN)
- Mochamad Irfan, M.Si. (ITB)
- Dr. Asif Awaludin (LAPAN)
- Dr. Rhorom Priyatikanto (LAPAN)

Terakhir, kami senantiasa mengundang sidang pembaca yang budiman untuk berpartisipasi aktif dengan mengirimkan karya tulis ilmiah yang sesuai dengan lingkup jurnal ini.

Demikian kami sampaikan, semoga sidang pembaca dapat mengambil manfaatnya.

Bandung, Februari 2021

# Pemantauan Konsentrasi Gas (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) dan Partikulat (PM<sub>2.5</sub>) pada Struktur Horizontal di Kawasan Dayeuhkolot, Cekungan Udara Bandung Raya

## (Monitoring of Horizontal Structure of Gases (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) and Particulate (PM<sub>2.5</sub>) Concentrations in Dayeuhkolot, Greater Bandung Air Basin)

Muhammad Farisqi Aziz, Arief Abdurrachman, Indra Chandra, Lutfi Ikbal Majid, Furqan Vaicdan, Rahmat Awaludin Salam

Program Studi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

### Riwayat naskah

Diterima: 19-11-2019

Direvisi: 18-11-2020

Disetujui: 30-11-2020

### Korespondensi:

Indra Chandra  
indrachandra@telkomuniversity.  
ac.id

### ABSTRAK

Salah satu sumber polusi lokal yang terjadi di Bandung Raya berasal dari kendaraan bermotor. Dari penelitian sebelumnya terindikasi bahwa konsentrasi *organic carbon* (OC) lebih tinggi dari *elemental carbon* (EC), konsentrasi OC primer lebih tinggi dari OC sekunder, dan konsentrasi *char-EC* lebih tinggi dari *soot-EC*. Penelitian tersebut menggunakan metode *dry sampling* dengan perangkat *cascade impactor* dan teridentifikasi bahwa OC, OC primer, dan *char-EC* berasal dari kendaraan bermotor khususnya mesin diesel, asap pabrik, dan debu jalan. Penelitian ini bertujuan untuk memantau dan menganalisis persebaran polusi lokal secara horizontal di daerah Dayeuhkolot, cekungan udara Bandung Raya. Pemantauan kualitas udara (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan PM<sub>2.5</sub>) dengan menggunakan sepeda dilakukan pada tiga tipe lintasan: (1) jalur hijau, (2) lalu lintas rendah, dan (3) jalan raya. Ketiga lintasan memiliki karakteristik yang unik sesuai dengan estimasi sumber pencemar dan faktor lingkungan seperti pepohonan. Alat ukur yang digunakan berbasis *low-cost sensors* (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan PM<sub>2.5</sub>), serta dilengkapi dengan sensor temperatur (T), kelembapan relatif (RH), dan *data logger*. Pengukuran dilakukan selama 15 kali pada Februari-Maret 2019. Rata-rata pengamatan dilakukan setiap ~2 jam dengan kecepatan rata-rata sepeda ~10 km jam<sup>-1</sup>. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa alat dapat mendeteksi fluktuasi konsentrasi emisi gas/partikulat, yang dipengaruhi oleh konsentrasi polutan di udara sesaat yaitu dari kendaraan bermotor, pembakaran sampah, aktivitas pasar minggu, dan pengaruh hujan. Pada saat lampu merah di persimpangan jalan, tampak bahwa emisi langsung dari kendaraan bermotor dapat meningkatkan konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan NO<sub>2</sub> menjadi 110 µg m<sup>-3</sup> dan ~0,15 ppm pada selang waktu pengukuran ~10 menit. Faktor lainnya yang dapat meningkatkan nilai konsentrasi PM<sub>2.5</sub> sebesar ~163 µg m<sup>-3</sup> dari kondisi udara ambien (77-86 µg m<sup>-3</sup>) adalah pembakaran sampah (~4 menit). Sedangkan kegiatan rutin di pasar minggu pagi dapat meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> menjadi ~931 ppm dan ~0,13 ppm (~8 menit). Air hujan yang biasa terjadi pada sore hari dapat menurunkan konsentrasi gas dan PM<sub>2.5</sub>. Tingkat pembilasan partikulat (*r*) akibat hujan adalah ~30%.

**Kata kunci:** CO<sub>2</sub>, kualitas udara, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, pemantauan melalui sepeda.

### ABSTRACT

One of the main sources of local air pollution in Greater Bandung comes from vehicles. Based on previous studies, organic carbon (OC), primary OC, and char-elemental carbon (char-EC) concentrations are higher than EC, secondary OC, and soot-EC, respectively. A cascade impactor-based measurement of dry sampling has identified that OC, primary OC, and char-EC originated from diesel engines, factory fumes, and road dust. This study aims to monitor and analyze horizontal distribution of polluted air in

Dayeuhkolot, Greater Bandung air basin. We measured gases (CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub>) and particulate (PM<sub>2.5</sub>) concentrations using a bicycle on three-types of trails, that is (1) green lanes, (2) less traffic, and (3) roads. These paths have unique characteristics based on their pollutant sources and environmental factors such as trees. The measurement used a developed instrument of low-cost sensors (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, and PM<sub>2.5</sub>) which was also equipped by the temperature (T) and relative humidity (RH) sensors and data logger. We conducted field observation 15 times during February to March 2019. Each observation was carried out for ~2 hours with an average speed of the bicycle of ~10 km hour<sup>-1</sup>. Those sensors can detect the fluctuation of pollutant concentration sourcing from transportation, residential waste-burning, market activity, and rain effect. Motor vehicles can increase the concentration of PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub> up to 110 µg m<sup>-3</sup> and ~0.15 ppm in ~10 minutes. A sudden increase (~4 minutes) of PM<sub>2.5</sub> concentration (peak of ~163 µg m<sup>-3</sup>) from ambient level (77-86 µg m<sup>-3</sup>) is coming from waste combustion. Meanwhile, routine activities of Sunday morning market can increase CO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> to ~931 ppm and ~0.13 ppm (~8 minutes). Rainwater that usually occurs in the afternoon can reduce gas and PM<sub>2.5</sub> concentrations. The scavenging rate of particulates (r) due to rain is ~30%.

**Keywords:** air quality, bike-borne monitoring, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>.

## 1. Pendahuluan

Bandung Raya merupakan salah satu wilayah metropolitan di Indonesia yang meliputi Kota Bandung, Kabupaten Bandung, Kabupaten Bandung Barat, Kota Cimahi, dan Kabupaten Sumedang (Jupri dan Mulyadi, 2017). Daerah ini terletak di Provinsi Jawa Barat dengan topografi berupa dataran tinggi yang dikelilingi oleh pegunungan sehingga membentuk sebuah cekungan. Kondisi tersebut tidak mendukung persebaran polusi udara secara horizontal (Sumaryati, 2011). Polusi yang ada dapat terperangkap di dalamnya. Salah satu penyebab pencemaran udara di Bandung Raya adalah emisi lokal yang berasal dari pabrik, transportasi, dan pembakaran sampah. Emisi secara langsung tersebut menyebabkan kualitas udara dapat melebihi batas ambang yang dapat mengganggu kesehatan masyarakat dan/atau tanaman. Sedangkan secara vertikal, polutan yang berada di dalam kota dapat tereduksi sampai ketinggian lapisan pencampuran di atmosfer (*atmospheric mixing layer height*) khususnya pada malam hari (Sumaryati, 2011).

Pola persebaran polusi udara ditentukan oleh kondisi meteorologi seperti arah/kecepatan angin. Arah angin dari tempat berpolusi dapat membawa polutan yang sangat jauh berpindah ke tempat lainnya. Barus dkk. (2019) telah melakukan penelitian di lantai 10, Gedung Tokong Nanas, Universitas Telkom, kawasan Dayeuhkolot, pada musim kemarau (Agustus-September 2018). Hasil penelitian tersebut menunjukkan

bahwa jalur massa udara mayoritas berasal dari arah tenggara (menggunakan NOAA HYSPLIT *back trajectory*) dengan lokasi sumber polusi seperti aktivitas biogenik dan antropogenik dari benua Australia dan sebagian dari wilayah Indonesia itu sendiri, serta transportasi kapal laut. Hal tersebut teridentifikasi dari kandungan partikulat yang dominan berupa amonium sulfat, amonium nitrat, dan garam laut (Majid dkk., 2019). Oleh karenanya, analisis permasalahan polusi udara di kawasan Bandung Raya semakin kompleks.

Salah satu daerah di kawasan Bandung Raya adalah Kecamatan Dayeuhkolot tepatnya di Kabupaten Bandung. Berdasarkan pengamatan pra studi yang telah kami lakukan, Kecamatan Dayeuhkolot merupakan daerah yang padat oleh aktivitas kendaraan bermotor yang merupakan salah satu sumber polusi lokal (Majid dkk., 2019; Vaicdan dkk., 2019; Abdurrachman dkk., 2020; Firdaus dkk., 2020; Nugroho dkk., 2020; Shidki dkk., 2020; Sya'bani dkk., 2020). Emisi yang dihasilkan dari kendaraan bermotor diantaranya berupa gas karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>), hidrokarbon (HC), dan partikulat (PM<sub>2.5</sub>) (Ong *et al.*, 2011). Majid dkk. (2019) melakukan analisis karbon pada sampel dan terukur bahwa nilai konsentrasi dari *organic carbon* (OC), OC primer, *char-elemental carbon* (*char-EC*) lebih tinggi daripada EC, OC sekunder, dan *soot-EC*. Hal ini mengindikasikan bahwa lokasi pengukuran dipengaruhi secara signifikan

oleh kendaraan bermotor, asap pabrik, debu jalanan, dan pembakaran sampah rumah tangga.

Banyaknya aktivitas kendaraan bermotor dan sumber polutan langsung lainnya mendorong kami untuk melakukan penelitian pengamatan emisi gas dan partikulat secara horizontal di Kecamatan Dayeuhkolot, cekungan udara Bandung Raya. Kami membuat alat ukur gas dan partikulat berbasis *low-cost sensors* (CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan PM<sub>2.5</sub>) yang dilengkapi dengan sensor temperatur (T) dan kelembapan relatif (RH). Penggunaan sensor ini dipilih karena berbiaya murah, ringkas, dan portabel jika dibandingkan dengan alat ukur utama (Genikomsakis *et al.*, 2018). Kami melakukan pengukuran secara bergerak dengan memasang alat tersebut pada sepeda, kemudian mengukur pada lintasan yang sudah kami rancang. Beberapa penelitian mengenai penggunaan sepeda sebagai media pengukuran bergerak dari polusi udara telah dilakukan oleh Hankey and Marshall (2015), Gozzi *et al.* (2016), dan Velasco *et al.* (2016). Dari hasil pengukuran lapangan, sensitivitas sensor dapat mengukur dengan baik setiap perubahan konsentrasi gas dan partikulat yang disebabkan oleh sumber polutan. Analisis penyebab naik turunnya konsentrasi gas dan partikulat dibahas pada Hasil dan Pembahasan baik secara kuantitatif maupun kualitatif.

## 2. Metodologi

### 2.1. *Low-cost Sensors Gas dan Partikulat*

Detektor gas portabel yang kami rancang berbasis *low-cost sensors*. Parameter ukur yang digunakan dalam alat ini terdiri dari konsentrasi CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan PM<sub>2.5</sub>, serta T dan RH. Sensor CO<sub>2</sub> (model SKU:SEN0219) yang digunakan bekerja menggunakan prinsip *non-dispersive infrared* (NDIR). NDIR menggunakan cahaya *infrared* (IR) yang dipancarkan oleh sumber IR ( $\lambda = 4,3 \mu\text{m}$ ) dan memiliki salah satu panjang gelombang yang sama dengan CO<sub>2</sub> (2,7, 4,3, dan 15  $\mu\text{m}$ ). Terdapat empat komponen utama pada sensor NDIR yaitu sumber IR, ruang ukur, filter, dan detektor IR. Sumber IR berada di ujung ruang pengukuran, sedangkan detektor IR berada di sisi yang

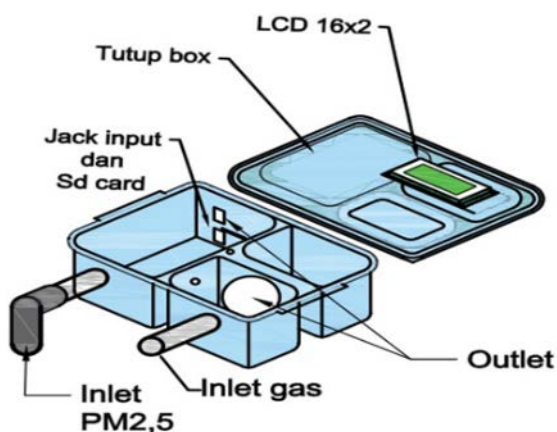
berlawanan. Ketika sejumlah intensitas cahaya yang dipancarkan oleh sumber IR melewati ruang pengukuran, maka CO<sub>2</sub> yang ada di dalamnya akan menyerap cahaya tersebut sedangkan cahaya yang tidak diserap akan diteruskan melewati filter. Filter berfungsi untuk menyaring frekuensi IR saja yang dapat diteruskan ke detektor IR. Intensitas cahaya IR yang diserap sebanding dengan jumlah konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam ruang ukur (Hodgkinson *et al.*, 2013).

Sensor NO<sub>2</sub> (model DGS-RESPIRR 968-041) menggunakan prinsip dasar sel elektrokimia (sel Galvani/Volta) untuk menghasilkan energi listrik dari reaksi reduksi-oksidasi (redoks). Sensor terdiri dari penghalang difusi (*diffusion barrier*), elektroda kerja (*sensing electrode*), elektroda *counter*, dan elektrolit. Pada lingkungan yang bebas dari gas reaktif, misalnya NO<sub>2</sub>, oksigen akan berdifusi ke dalam sensor dan diserap oleh kedua elektroda. Hal tersebut akan menyebabkan tidak adanya perbedaan potensial listrik dari kedua elektroda sehingga tidak ada arus yang mengalir. Ketika gas reaktif berdifusi ke dalam sensor, gas tersebut akan mengalami reaksi redoks dan terjadi perbedaan potensial, sehingga arus dapat dihasilkan. Arus yang dihasilkan sebanding dengan konsentrasi gas yang masuk ke dalam sensor (Anderson and Hadden, 1999).

Sensor PM<sub>2.5</sub> (model SKU:SEN0177) bekerja dengan prinsip hamburan cahaya. Partikulat (PM<sub>2.5</sub>) yang ada di lingkungan akan masuk ke dalam *inlet* dengan cara ditarik oleh kipas. Laser ( $\lambda = 630-680 \text{ nm}$ ) akan memancarkan cahaya secara lurus ke ruang kosong. Apabila terjadi hamburan cahaya ketika terdapat PM<sub>2.5</sub>, maka foto detektor akan menerima intensitas cahaya tersebut berdasarkan sudut hamburan, panjang gelombang, indeks bias, dan bentuk/jenis partikulat. Sinyal listrik keluaran foto detektor akan diperkuat dengan *filter amplifier*, kemudian dikonversi melalui *analog-to-digital converter* (ADC) pada mikrokontroler (MCU) menjadi sinyal digital. Sinyal tersebut sebanding dengan nilai konsentrasi massa PM<sub>2.5</sub> yang telah dikalibrasi sebelumnya (Vaicdan dkk., 2019). Jenis/model sensor yang digunakan, parameter ukur, dan jangkauan data pengukuran dari perangkat ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. *Low-cost sensors* yang digunakan dalam pengukuran konsentrasi gas (CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>) dan partikulat (PM<sub>2.5</sub>), serta parameter meteorologi (T dan RH) di kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

Sensor	Parameter Ukur	Jangkauan	Kesalahan
SKU:SEN0219	Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> )	0 – 5000 ppm	±50 ppm
DGS-RESPIRR 968-041	Nitrogen Dioksida (NO <sub>2</sub> )	0 – 20 ppm	±0,4 ppm
SKU:SEN0177	Partikulat (PM <sub>2.5</sub> )	0 – 500 µg m <sup>-3</sup>	±10 ppm
DHT 22	Temperatur dan Kelembapan	-40 – 80 °C dan 0 – 100%	±0,5 °C ±2 %



Gambar 1. Perancangan boks portabel detektor gas yang digunakan pada pengukuran konsentrasi gas (CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>) dan partikulat (PM<sub>2.5</sub>), serta T dan RH di kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

Semua sensor dihubungkan dengan MCU, jenis Arduino UNO, melalui jalur komunikasi analog dan serial, serta data hasil pengukurannya disimpan melalui *data logger* (Vaicdan dkk., 2019; Abdurrachman dkk, 2020). Detektor gas portabel dirancang melalui sebuah boks yang memungkinkan untuk menempatkan komponen/modul sensor, MCU, dan baterai yang dapat dipasang pada sepeda (Gambar 1). *Inlet* PM<sub>2.5</sub> berbentuk ke bawah dengan tujuan dapat melindungi masuknya partikel besar (> 2,5 µm) dan air saat turun hujan. Material pada boks berbahan plastik menjadikannya tahan air dan pemasangannya pada sepeda dikondisikan agar tahan guncangan sehingga pengukuran konsentrasi gas dan partikulat tersebut dapat dilakukan pada struktur horizontal di kawasan Dayeuhkolot dengan baik.

## 2.2. Kalibrasi Sensor

Pada penelitian ini kami melakukan pengujian sensor CO<sub>2</sub> dengan membandingkan datanya dengan CO<sub>2</sub> Meter (model GCH-2018, Lutron Co. Ltd.). CO<sub>2</sub>

meter merupakan alat untuk mengukur konsentrasi gas karbon dioksida, kelembapan, dan temperatur. Alat ukur tersebut bekerja berdasarkan NDIR dengan jangkauan pengukuran konsentrasi CO<sub>2</sub> 0-4000 ppm. Kedua alat ditempatkan di ruangan secara bersamaan dan berdampingan dalam waktu 1 jam. Berdasarkan hasil pengukuran, sensor dapat mengikuti pembacaan detektor dengan nilai linierisasi moderat (R<sup>2</sup> = 0,5) (Abdurrachman dkk., 2020).

Sementara itu, kalibrasi pada sensor NO<sub>2</sub> tidak dilakukan. Kami hanya melakukan *setting zero-offset* pada sensor sesuai standar pabrik dan membandingkannya dengan sensor sejenis lainnya untuk melihat kualitas sensor yang digunakan. Hal ini untuk memastikan pembacaan datanya sesuai dengan prosedur yang dikeluarkan oleh pihak pengembang (Abdurrachman dkk., 2020). *Setting zero-offset* dilakukan dengan menghidupkan sensor selama satu jam di dalam ruangan menggunakan perangkat lunak *open source* (Tera Term). Pembacaan sensor akan menjadi lebih stabil ketika telah dilakukan proses *warming up*. Hal tersebut kami lakukan sesaat sebelum melakukan pengukuran di lapangan dan/atau ketika sensor NO<sub>2</sub> telah lama tidak dipakai dan nilai pembacaan konsentrasinya tidak stabil.

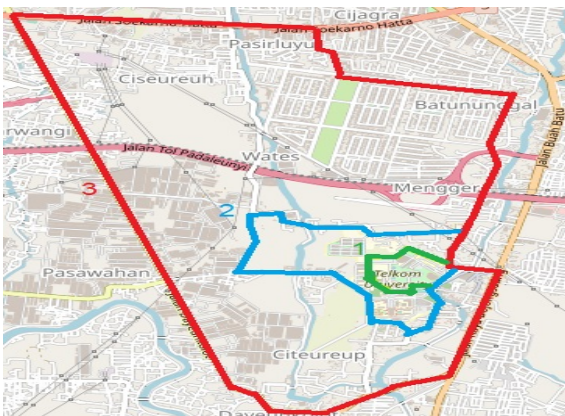
Sensor PM<sub>2.5</sub> telah dikalibrasi dengan eksperimen yang dikerjakan oleh Vaicdan dkk. (2019). Alat-alat yang digunakan untuk kalibrasi adalah generator partikel, *diffusion dryer*, dan *optical partikel counter* (OPC, model KC-01E, Rion Co., Ltd.). Generator partikel bekerja dengan prinsip *nebulizer* yang mengubah larutan *polystyrene latex spheres* (PSL) menjadi *droplet* dengan ukuran diameter (Dp) yang digunakan yaitu 0,309 µm, 0,479 µm, dan 1,005 µm. Partikel dengan tingkat kelembapan yang tinggi kemudian dilewatkan ke *diffusion dryer*. Di dalam *diffusion dryer* terdapat silika gel yang berfungsi untuk menghilangkan uap air yang terkondensasi pada partikel-partikel tersebut.



Konsentrasi partikel kemudian diukur oleh sensor dan OPC secara simultan.

### 2.3 Lokasi Pengamatan dan Mekanisme Pengukuran

Pada penelitian ini, kami melakukan pemantauan konsentrasi gas dan partikulat, serta parameter meteorologi dengan menggunakan sepeda pada tiga tipe lintasan: (1) jalur hijau (jalan di dalam kampus Universitas Telkom), (2) lalu lintas rendah (jalan di lingkaran luar kampus), dan (3) jalan raya (Gambar 2). Lintasan 1 memiliki udara yang relatif lebih bersih dibandingkan dua jalur lainnya. Hal ini dikarenakan banyaknya ruang terbuka hijau (RTH) di kawasan tersebut dan rendahnya aktivitas kendaraan bermotor. Lintasan 2 banyak dipengaruhi oleh kegiatan masyarakat terutama pembakaran sampah rumah tangga secara langsung. Selain itu, jalur ini juga lebih banyak dilalui oleh kendaraan yang lewat untuk memotong waktu tempuh yang disebabkan jalur utama lebih ramai dan macet. Pada hari Minggu, terdapat kegiatan pasar dadakan di pintu masuk kampus. Lintasan 3 merupakan salah satu jalur terpadat di kawasan Bandung Raya dan tingginya potensi emisi lokal berasal dari kendaraan bermotor.



Gambar 2. Tiga lintasan yang digunakan untuk pemantauan konsentrasi gas ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ ) dan partikulat ( $\text{PM}_{2.5}$ ): (1) jalur hijau, (2) lalu lintas rendah, dan (3) jalan raya, kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

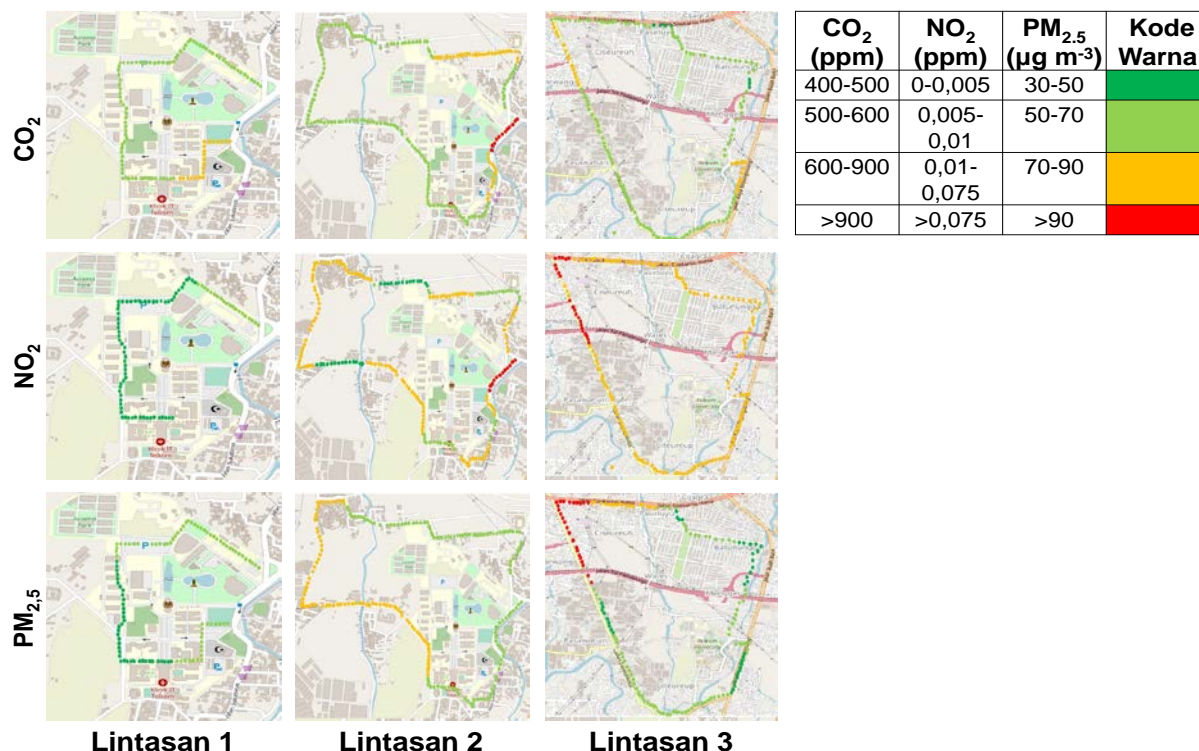
Pengukuran dilakukan selama 15 kali pada periode Februari-Maret 2019, yaitu setiap hari Minggu, serta pada hari kerja dan

libur. Pengukuran pada hari kerja dilakukan sebanyak tiga kali sedangkan satu kali pengukuran dilakukan pada hari libur. Tipikal waktu pengukuran dilakukan pada pagi (06:30-08:30 WIB), siang (13:00-15:00 WIB), dan sore (16:00-18:00 WIB) hari selama ~2 jam dengan kecepatan rata-rata sepeda yaitu ~10 km jam<sup>-1</sup>. Sebelum proses observasi dilakukan, alat ukur, sepeda, dan kamera dipersiapkan sampai pada pembacaan sensor gas stabil, sepeda sudah siap digunakan, serta baterai kamera telah terpasang dan empat buah baterai cadangan disimpan di tempat yang mudah untuk dikeluarkan-masukkan dan terhindar dari air hujan. Stabilitas sensor gas dilakukan dengan menunggu selama ~1 jam sebelum proses pengukuran dilakukan.

Proses pengukuran dimulai pada lintasan 1 dengan jarak ~1,5 km selama ~10 menit. Selanjutnya pengukuran dilanjutkan pada lintasan 2 dengan jarak ~5 km selama ~35 menit. Lintasan 3 ditempuh sejauh ~13 km selama ~78 menit. Pada saat pengukuran, terutama di sore hari, biasanya terjadi hujan. Data hasil pengukuran disimpan pada *SD Card*. Analisis data dilakukan secara *offline* dengan melihat validasi data dari sensor dan melihat secara kualitatif melalui kamera. Secara umum, pengukuran tidak terganggu masalah teknis. Debu atau partikel berukuran besar ( $> 2,5 \mu\text{m}$ ) diantisipasi dengan rancangan *inlet* pada boks. Sensor temperatur dan kelembapan ditempatkan di bawah boks untuk menghindari air hujan tetapi dapat bersentuhan dengan udara sekitar secara langsung.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Persebaran nilai konsentrasi emisi gas dan partikulat yang terukur di setiap lintasan berbeda-beda, contohnya dapat dilihat pada tanggal 10 Februari 2019 yang ditampilkan pada Gambar 3 (terlihat gradasi warna dari hijau sampai merah atau dari konsentrasi rendah sampai tinggi). Perlu diperhatikan bahwa waktu pengukuran konsentrasi polutan adalah per 2 menit dan fluktuasi data yang disajikan bersifat spasial dan temporal, serta kategori yang digunakan tidak mengindikasikan baku mutu udara di lokasi pengukuran.



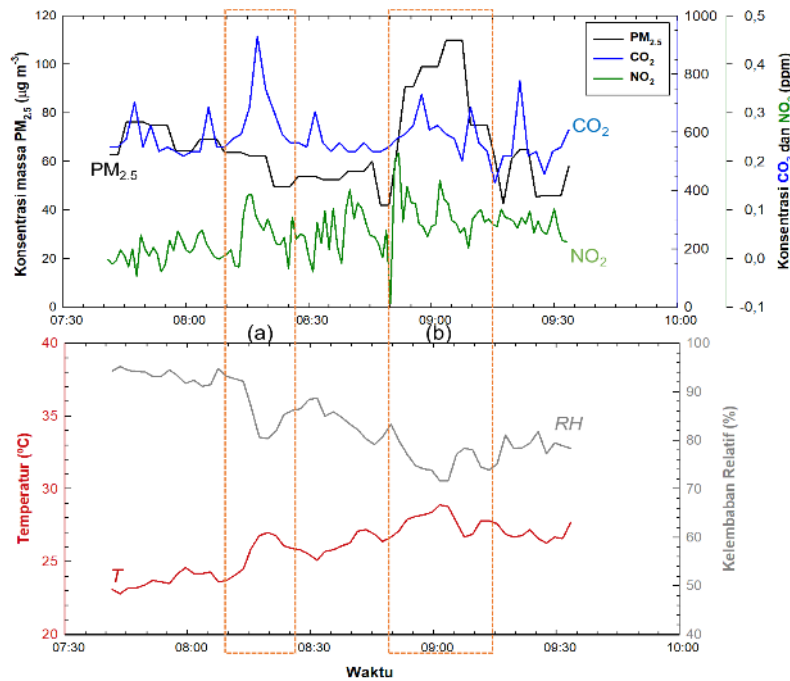
Gambar 3. Hasil pengukuran konsentrasi gas (CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub>) dan partikulat (PM<sub>2.5</sub>) pada 10 Februari 2019 di tiga lintasan: (1) jalur hijau, (2) lalu lintas rendah, dan (3) jalan raya, kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa pada lintasan pertama, konsentrasi polutan per lintasan dilihat secara vertikal cenderung bersih karena berada di dalam kawasan kampus dengan lalu lintas yang rendah serta banyaknya pepohonan. Konsentrasi CO<sub>2</sub> sebesar 600-900 ppm yang teridentifikasi di Gerbang 3 dipengaruhi oleh kendaraan yang masuk-keluar kampus. Lintasan kedua sedikit tercemar karena berada di lingkaran luar kawasan kampus yang merupakan jalan perumahan/ penduduk serta padat pemukimannya. Aktivitas di Minggu pagi (10 Februari 2019) didominasi oleh kegiatan masyarakat seperti pasar dadakan (konsentrasi CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> yang tinggi) dan pembakaran sampah langsung dan/atau kendaraan bermotor (PM<sub>2.5</sub> >65 µg m<sup>-3</sup>). Lintasan ketiga merupakan jalan raya, sehingga udara cenderung terpapar polusi khususnya di persimpangan jalan, dengan sumber emisi terbesar disebabkan oleh kendaraan bermotor. Kinerja *low-cost sensor* dalam penelitian ini, mampu mendeteksi fluktuasi data konsentrasi polutan yang disebabkan oleh perubahan lingkungan.

### 3.1. Pengaruh Pasar Minggu dan Kendaraan Bermotor

Pada pengukuran 10 Februari 2019, terdapat faktor yang meningkatkan konsentrasi CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan PM<sub>2.5</sub> yaitu aktivitas pasar minggu yang berada di jalan bagian depan pintu masuk utama kampus Universitas Telkom (lintasan 2) dan kendaraan bermotor di persimpangan Jalan Moh. Toha (lintasan 3) (Gambar 4).

Data yang ada telah divalidasi secara kualitatif dengan rekaman kamera. Pada kegiatan pasar, konsentrasi CO<sub>2</sub> berada pada rentang 550-931 ppm, konsentrasi NO<sub>2</sub> 0-0,13 ppm, dan PM<sub>2.5</sub> stabil di ~62 µg m<sup>-3</sup>, yang terukur pada temperatur 24-27°C dan kelembapan 80-92%. Peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> yang signifikan diakibatkan oleh banyaknya respirasi manusia (Kapalo *et al.*, 2019). Terlihat konsentrasi NO<sub>2</sub> sedikit meningkat pada lintasan 2 dibandingkan sebelumnya (sebelum jam 08:10) yang disebabkan oleh adanya aktivitas kendaraan bermotor (Ong *et al.*, 2011). Pada jam tertentu di hari Minggu, terutama di waktu sebelum pukul 10:00, kegiatan didominasi oleh aktivitas masyarakat di pasar. Hal ini didukung dengan tidak banyaknya aktivitas keluar-masuk kendaraan bermotor dari/ke kampus pada jam tersebut.



Gambar 4. Pengaruh (a) pasar minggu (lintasan 2) dan (b) kendaraan bermotor (lintasan 3) pada 10 Februari 2019 yang masing-masing menyebabkan konsentrasi gas ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ ) dan partikulat ( $\text{PM}_{2.5}$ ) meningkat.

Pada lintasan 3, ketika pengukuran berada di persimpangan jalan raya, terlihat perubahan konsentrasi massa  $\text{PM}_{2.5}$  yang mendadak mencapai  $110 \mu\text{g m}^{-3}$  akibat tidak Bergeraknya kendaraan bermotor karena lampu merah, dengan kondisi temperatur  $29^\circ\text{C}$ , dan kelembapan 72%. Perubahan konsentrasi massa  $\text{PM}_{2.5}$  akibat sektor transportasi juga telah dilaporkan oleh Franco *et al.* (2016). Sementara itu, konsentrasi  $\text{NO}_2$  meningkat secara gradual karena perpindahan lintasan dari 1 ke 2 dan dari lintasan 2 ke 3, dengan nilai puncaknya berada pada lintasan 3 (0,21 ppm), serta kembali lagi ke konsentrasi rendah pada saat posisi pengukuran berada di kawasan kampus. Fluktuasi konsentrasi gas dan partikulat akibat kondisi di atas dapat terukur dengan baik menggunakan *low-cost sensors*.

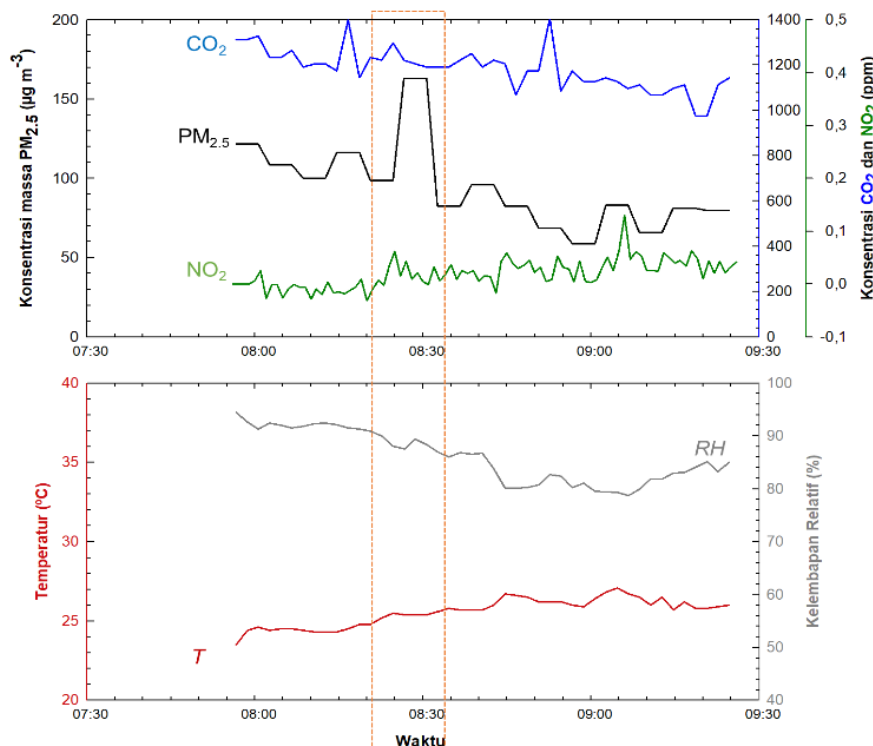
Perlu diketahui bahwa data dari sensor  $\text{PM}_{2.5}$  telah dilakukan koreksi terhadap kelembapan  $>80\%$ . Sedangkan konsentrasi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ , masing-masing tidak dilakukan koreksi faktor temperatur/kelembapan dan sensitivitas terhadap gas lainnya.

### 3.2. Pengaruh Pembakaran Sampah

Pada pengukuran 17 Maret 2019, terdapat faktor lain yang meningkatkan emisi gas ( $\text{CO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ ) dan  $\text{PM}_{2.5}$  yaitu

pembakaran sampah secara langsung.  $\text{CO}_2$  dan  $\text{NO}_2$ , misalnya, yang merupakan gas yang tidak mudah terbakar (*non-flammable*), merupakan hasil dari pembakaran sempurna akibat reaksi dari sampah rumah tangga (organik/anorganik/campuran) dengan zat yang mudah terbakar seperti karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur, dan klorin (Wielgosiński, 2012). Sementara itu, pembentukan partikulat berasal dari bahan padat anorganik yang tidak mudah terbakar.

Hasil observasi pada lintasan 3 (Gambar 5), dengan jarak  $\sim 10$  meter dari jalan raya, menunjukkan konsentrasi massa  $\text{PM}_{2.5}$  mencapai  $99\text{-}163 \mu\text{g m}^{-3}$  dan konsentrasi  $\text{CO}_2$   $\sim 1190$  ppm, sedangkan konsentrasi  $\text{NO}_2$  relatif stabil ( $\sim 0,06$  ppm). Pengaruh kecepatan dan arah angin tidak diukur dalam pengamatan ini. Namun demikian, cukup jelas bahwa kenaikan konsentrasi gas dan partikulat tersebut mengindikasikan bahwa pembakaran sampah secara langsung berakibat pada tercemarnya udara sekitar. Penelitian lebih lanjut akibat pembakaran sampah dan dampaknya terhadap lingkungan perlu dilakukan dengan menggunakan sensor gas lainnya seperti metana ( $\text{CH}_4$ ), karbon monoksida ( $\text{CO}$ ), dan hidrokarbon ( $\text{HC}$ ) (Ojha *et al.*, 2017; Shuk *et al.*, 2019).



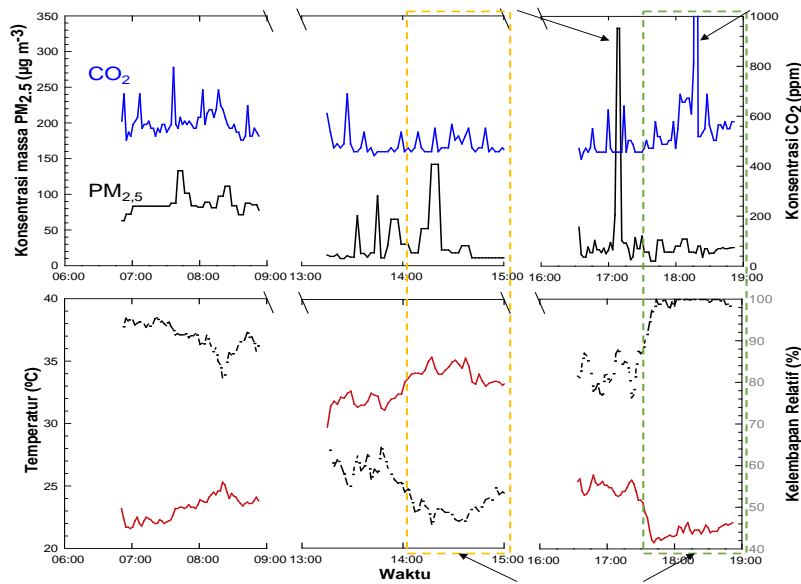
Gambar 5. Pengaruh pembakaran sampah rumah tangga secara langsung pada konsentrasi massa PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub>, di kawasan Dayeuhkolot, Bandung, pada 17 Maret 2019.

### 3.3. Pengaruh Hujan

Pengukuran 4 Februari 2019 dilakukan sebanyak 3 kali (pagi, siang dan sore). Pada sore hari hasil pengamatan dipengaruhi oleh hujan (Gambar 6). Pada saat pengukuran tersebut, tidak dilakukan pengukuran konsentrasi NO<sub>2</sub>. Pada pagi hari, rerata konsentrasi CO<sub>2</sub> (>500 ppm) dan PM<sub>2.5</sub> (>50 µg m<sup>-3</sup>) sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan data yang terukur pada siang dan sore hari. Konsentrasi CO<sub>2</sub> pada siang hari adalah ~450 ppm, diukur pada temperatur 27-34°C dan kelembapan 47-70%. Sementara itu, konsentrasi PM<sub>2.5</sub> pada periode terbatas (<20 menit) dapat mencapai 142 µg m<sup>-3</sup> yang diakibatkan oleh kendaraan bermotor. Perlu diketahui bahwa pada saat pengukuran di sore hari, terdapat data konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> sesaat (beberapa menit) yang mengandung kesalahan dikarenakan faktor yang tidak diketahui (pada PM<sub>2.5</sub>) serta

perangkat yang *reset* dengan sendirinya (CO<sub>2</sub>).

Hujan terjadi pada sore hari di jalan raya kawasan Dayeuhkolot (lintasan 3) sekitar pukul 17:32 WIB dengan durasi hujan deras ~30 menit yang ditunjukkan pada Gambar 6. Saat hujan turun, dapat terlihat dengan jelas perubahan drastis temperatur dari 26°C ke 21°C dan kelembapan dari 76% ke 100%. Saat hujan di sore hari, terjadi penurunan konsentrasi massa PM<sub>2.5</sub> (~36,4 µg m<sup>-3</sup>; biru) dibandingkan konsentrasi pada siang hari (52 µg m<sup>-3</sup>; titik berwarna jingga). Hal ini diakibatkan oleh adanya pembilasan polutan akibat air hujan dengan rasio pembilasan (*scavenging ratio* (*r*)) ~30%, dihitung berdasarkan konsentrasi massa partikulat sebelum dan sesudah terjadinya hujan (Feng dan Wang, 2012).



Gambar 6. Pengaruh perubahan konsentrasi massa  $PM_{2.5}$  pada 4 Februari 2019 di lintasan 3 pada (a) siang hari dan (b) saat turun hujan di sore hari, kawasan Dayeuhkolot, Bandung.

#### 4. Kesimpulan

Telah dilakukan studi lapangan pengukuran konsentrasi gas ( $CO_2$  dan  $NO_2$ ) dan partikulat ( $PM_{2.5}$ ) dengan menggunakan sepeda di kawasan Dayeuhkolot, cekungan udara Bandung Raya, pada Februari-Maret 2019 (15 kali pengamatan). Observasi dilakukan setiap hari minggu, hari kerja, dan hari libur, masing-masing dilakukan pada pagi (~06:30 WIB), siang (~13:00 WIB), dan/atau sore hari (~16:00 WIB), selama ~2 jam dengan kecepatan rata-rata sepeda ~10 km  $jam^{-1}$ . Tiga jalur yang dilalui, dirancang untuk dapat melihat perbedaan yang signifikan antara jalur hijau (di dalam kawasan kampus Universitas Telkom), lalu lintas rendah, dan pengaruh aktivitas kendaraan bermotor di jalan raya, serta mengukur sensitivitas dari *low-cost sensors* yang digunakan terhadap berbagai faktor lingkungan yang terjadi. Ketiga sensor telah dikalibrasi di laboratorium.

Hasil pengukuran menunjukkan ketiga lintasan memiliki karakteristik yang unik dan memiliki hubungan yang kuat, khususnya akibat dari aktivitas manusia (antropogenik). Kegiatan pasar di hari Minggu (10 Februari 2019) dapat meningkatkan konsentrasi  $CO_2$  dibandingkan hari lainnya. Hal ini dikarenakan banyaknya warga yang aktif beraktivitas pada kegiatan tersebut. Sedangkan konsentrasi  $PM_{2.5}$  meningkat cukup signifikan, sampai 68  $\mu g m^{-3}$  lebih dari kondisi sebelumnya, ketika dilakukan pengamatan di persimpangan jalan raya. Pada 17 Maret 2019, pembakaran

sampah rumah tangga secara langsung juga ikut berkontribusi pada penambahan konsentrasi massa  $PM_{2.5}$  sebesar ~64  $\mu g m^{-3}$ . Selama periode pengukuran, sering terjadi hujan di sore hari, ditunjukkan dengan penurunan konsentrasi massa partikulat sebesar 30% yang teridentifikasi pada 4 Februari 2019. Tampak bahwa sensitivitas *low-cost sensors* cukup baik, karena masih dapat mendeteksi setiap perubahan konsentrasi polutan di ketiga jalur dengan kondisi lingkungan berbeda.

Perlu dicatat bahwa pengujian paparan emisi dari berbagai sumber menggunakan *low-cost sensors* belum menjadi acuan standar pengukuran. Namun demikian, melihat fluktuasi yang terekam pada alat ukur tersebut dan sensitivitasnya di setiap perubahan lokasi pengamatan, penggunaan alat ini cukup menjanjikan dan bisa menjadi pra-studi pemantauan kualitas udara. Kalibrasi pada skala laboratorium dan pengukuran secara bersamaan dengan alat ukur standar lainnya secara berkala, dapat meningkatkan metode pengukuran dan kualitas data hasil pengukuran, serta analisis dan interpretasi datanya. Adapun faktor-faktor teknis yang mempengaruhi proses pengukuran dengan *low-cost sensors* masih terus dipelajari dan ditingkatkan, baik dari sisi pengukuran, pengambilan data parameter ukur, maupun validasi datanya secara komprehensif pada penelitian lainnya.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Kualitas Udara, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Indonesia, dan Thermal Fluid and Particle System Laboratory, Kanazawa University, Jepang, atas kesempatannya untuk menggunakan perangkat ukur dalam rangka mengalibrasi sensor yang digunakan, serta Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, Indonesia, melalui program *Post-Doctoral* yang secara tidak langsung memberikan salah satu luaran yang digunakan dalam penelitian ini. Distribusi kontribusi penulisan makalah ini adalah sebagai berikut: Penulis Pertama dan Penulis Ketiga merupakan kontributor utama yang merancang penelitian serta menulis sebagian besar makalah ini; Penulis Pertama juga melakukan akuisisi dan pengolahan data; Penulis Kedua dan Penulis Kelima berkontribusi pada persiapan alat ukur berbasis *low-cost* sensor; Penulis Keempat dan Keenam berkontribusi dalam melakukan analisis dan interpretasi data.

## Rujukan

- Abdurrachman, A., Chandra, I., & Salam, R.A. (2020). Rancang Bangun Alat Ukur Konsentrasi Gas CO<sub>2</sub> dan NO<sub>2</sub> untuk Pengamatan Emisi dari Pembakaran Sampah Rumah Tangga. *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1342-1349.
- Anderson, G.L. & Hadden, D.M. (1999). The Gas Monitoring Handbook. *New York, Ickus Guides*, Avocet Press Inc.
- Barus, R.A.A., Chandra, I., & Fathona, I.W. (2019). Rancang bangun Portable Weather Station dalam Mendukung Pengamatan Mikropartikel di Cekungan Udara Bandung Raya. *e-Proceeding of Engineering*, 6 (1), 1290-1297
- Feng, X. & S. Wang, S. (2012). Influence of Different Weather Events on Concentrations of Particulate Matter with Different Sizes in Lanzhou, China. *Journal of Environmental Sciences*, 24 (4), 665-674. doi: 10.1016/S1001-0742(11)60807-3.
- Firdaus, A.H., Utami, A.R.I., & Chandra, I. (2020). Prastudi Pemantauan Bioaerosol di Dalam Ruangan dan Analisisnya, *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1320-1327.
- Franco, J.F., Segura, J.F. & Mura, I. (2016). Air Pollution alongside Bike-paths in Bogotá-Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 4 (77). Doi: 10.3389/fenvs.2016.00077.
- Genikomsakis, K.N., Galatoulas, N.-F., Dallas, P.I., Ibarra, L.M.C., Margaritis, D., & Ioakimidis, C.S. (2018). Development and on-Field Testing of Low-cost Portable System for Monitoring PM<sub>2.5</sub> Concentrations. *Sensors*, 18 (4), 1056. doi: 10.3390/s18041056.
- Gozzi, F., Ventura, G.D., & Marcelli, A. (2016). Mobile Monitoring of Particulate Matter: State of Art and Perspectives. *Atmospheric Pollution Research*, 7 (2), 228-234.
- Hankey, S. & Marshall, J.D. (2015). On-bicycle Exposure to Particulate Air Pollution: Particle Number, Black Carbon, PM<sub>2.5</sub>, and Particle Size. *Atmospheric Environment*, 122, 65-73.
- Hodgkinson, J., Smith, R. Ho, W.O., Saffell, J.R. & Tatam, R.P. (2013). Non-dispersive Infra-red (NDIR) Measurement of Carbon Dioxide at 4.2 μm in a Compact and Optically Efficient Sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 186, 580-588. doi: 10.1016/j.snb.2013.06.006.
- Jupri, & Mulyadi, A. (2017). Suburban Zoning of Bandung Raya Area. *Jurnal Pendidikan Geografi*, 17, 105-116, doi: 10.17509/gea.v17i2.6888.
- Kapalo, P., Mečiarová, L. Vilčeková, S., Burdová, E.K., Domnita, F., Bacotiu, C. & Péterfi, K.E. (2019). Investigation of CO<sub>2</sub> Production Depending on Physical Activity of Students. *International Journal of Environmental Health Research*, 29 (1), 31-44. doi: 10.1080/09603123.2018.1506570.
- Majid, L.I., Chandra, I. & Utami, A.R.I. (2019). Observasi Lapangan Mikro-Partikel di Atmosfer Menggunakan Nanosampler pada Cekungan Udara Bandung Raya. *e-Proceeding of Engineering*, 6 (1), 1149-1156.
- Nugroho, S., Chandra, I., & Salam, R.A. (2020). Potensi Kadar Konsentrasi CO<sub>2</sub> dan PM<sub>2.5</sub> yang Dihasilkan dari Pembakaran Sampah Organik dan Anorganik Menggunakan Insinerator. *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1312-1319.
- Ojha, B., Illyaskutty, N., Knoblauch, J., Balachandran, M.R., & Kohler, H. (2017). High-temperature CO / HC gas

- Sensors to Optimize Firewood Combustion in Low-power Fireplaces. *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 237–246. Doi: 10.5194/jsss-6-237-2017.
- Ong, H.C., Mahlia, T.M.I., & Masjuki, H.H., (2011). A Review on Emissions and Mitigation Strategies for Road Transport in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (8), 3516-3522. doi: 10.1016/j.rser.2011.05.006.
- Shidki, H., Chandra, I., & Djunaedy, E. (2020). Analisis Kualitas Udara Dalam Ruangan pada Kantor Terbuka di Universitas Telkom. *e-Proceeding of Engineering*, 7 (1), 1121-1128.
- Shuk, P., Mcguire C., & Brosha, E. (2019). Methane Gas Sensing Technologies in Combustion: Comprehensive Review. *Sensors & Transducers*, 229, 1-10.
- Sumaryati, (2011). Polusi Udara di Kawasan Cekungan Bandung. *Berita Dirgantara*, 12 (3), 83-89.
- Sya'bani, A., Chandra, I., Majid, L.I., Vaicdan, F., Barus, R.A.A., Abdurrachman, A. & Salam, R.A. (2020). Pemantauan Konsentrasi PM<sub>2.5</sub> dan CO<sub>2</sub> Berbasis Low-cost Sensor Secara Real-time di Cekungan Udara Bandung Raya. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21 (1), 009-015.
- Vaicdan, F., Chandra, I., & Suhendi, A. (2019). Pengamatan Konsentrasi Massa PM<sub>2.5</sub> di Cekungan Udara Bandung Raya. *e-Proceeding of Engineering*, 6 (1), 1181-1188.
- Velasco, A., Ferrero, R., Gandino, F., Montrucchio, B. & Rebaudengo, M. (2016). A Mobile and Low-Cost System for Environmental Monitoring: A Case Study. *Sensors*, 16, 710.
- Wielgosiński, G., (2012). Pollutant Formation in Combustion Processes, *Advances in Chemical Engineering*, Dr. Zeeshan Nawaz (Ed.). *InTech*, 295-324.





# Perhitungan Elemen Orbit Bintang Ganda WDS 03264+3520 Menggunakan Metode *Semi-Definite Programming* (Orbital Elements Determination Of Binary System WDS 03264+3520 Using *Semi-Definite Programming Method*)

Achmad Zainur Rozykin<sup>1,3</sup>, Ayu Dyah Pangestu<sup>2,3</sup>, Budi Dermawan<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Jurusan Sains, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

<sup>2</sup>Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Bandung

<sup>3</sup>Program Studi Magister Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung

<sup>4</sup>Kelompok Keilmuan Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung

---

## Riwayat naskah

Diterima: 30-10-2020

Direvisi: 15-12-2020

Disetujui: 16-12-2020

## Korespondensi:

A.Z. Rozykin

zein.rozykin48@gmail.com

## ABSTRAK

Banyak metode yang digunakan untuk menentukan elemen orbit elips bintang ganda. Salah satu metode yang relatif baru digunakan dalam penentuan elemen orbit adalah *Semi-Definite Programming* (SDP). Metode ini digunakan untuk menyelesaikan persamaan umum elips dari data pengamatan dengan batasan tertentu, yang memberikan solusi tunggal melalui konsep optimisasi konveks. Salah satu keunggulan metode SDP adalah mampu mendapatkan elips terbaik dari jumlah titik data yang terbatas dengan persebaran yang sempit (mengelompok). Tujuan penelitian ini adalah menentukan elemen orbit bintang ganda WDS 03264+3520 atau HDS 430 dengan terlebih dahulu mendapatkan koefisien persamaan elips orbit proyeksinya melalui SDP. Kemudian dengan menggunakan metode Kowalsky, didapatkan nilai elemen orbit elips sejati dari bintang ganda ini. Implementasi skema paralaks dinamika menghasilkan massa masing-masing bintang melalui proses iteratif dengan melibatkan nilai magnitudo mutlak bolometrik bintang. Hasil perhitungan elemen orbit dan massa bintang ganda ini menunjukkan bentuk orbit yang lebih lonjong (eksentrik) dengan massa bintang yang sedikit lebih rendah daripada hasil studi sebelumnya.

**Kata kunci:** bintang ganda, *Semi-Definite Programming*, paralaks dinamika

## ABSTRACT

There are several methods available to determine orbital elements of a binary system. One of them which is somewhat new is Semi-Definite Programming (SDP). This method is used to solve an equation of general ellipse using observational data with some constraints, to reveal a unique solution based on convex optimization concept. One of the advantages of SDP is its capability to reveal a best-fit ellipse although the number of data is limited and distributed in a small spatial distribution. Our aim is to determine orbital elements of the true orbit of a binary system WDS 03264+3520 or HDS 430, whose elements of the projected orbit are derived by SDP. The orbital elements of the true orbit are determined by applying the Kowalsky method. Masses of the components are then calculated by using a scheme of dynamical parallax through an iterative process by involving bolometric absolute magnitudes of the components. Results of the orbital elements and the masses show a more eccentric orbit and a bit lower stellar masses compared to those known in a previous study.

**Keywords:** binary system, Semi-Definite Programming, dynamical parallax

## 1. Pendahuluan

Bintang ganda merupakan suatu sistem dua bintang yang bergerak mengitari pusat massa sistem. Terdapat beberapa tipe bintang ganda yang diklasifikasikan berdasarkan metode deteksinya, yaitu bintang ganda visual, bintang ganda spektroskopi, bintang ganda gerhana, dan bintang ganda astrometri. Namun, tidak semua tipe bintang ganda tersebut tampak pergerakannya di bidang langit. Hanya bintang ganda visual yang mana kedua komponen bintangnya dapat diamati dengan teleskop, dan bintang ganda astrometri yang bisa diamati dari pergerakan sejati salah satu komponen bintangnya yang mengalami gangguan atau seperti 'bergoyang' (*wobble*).

Bintang ganda visual menjadi salah satu sistem yang penting untuk dipelajari karena berdasarkan orbitnya, dapat diketahui gaya gravitasi pada sistem tersebut sehingga dapat diketahui pula massa dari masing-masing bintang. Massa bintang menjadi salah satu parameter yang sangat penting pada studi evolusi bintang melalui hubungan massa dan luminositas pada diagram Hertzsprung-Russell (HR).

Pada penelitian lainnya, Nurmi (2005) dengan menggunakan evolusi bintang tunggal dan bintang ganda dapat mensimulasikan distribusi bintang pada arah tertentu di Galaksi dan didapatkan pula parameter model Galaksi. Simulasi tersebut dianalisis dan dioptimasi sehingga dapat memprediksi parameter observasional bintang ganda dengan mempertimbangkan kemampuan pengamatan oleh misi Gaia. Hasilnya, diestimasi sebesar  $1,10 \times 10^7$  jumlah sistem bintang ganda visual yang dapat dideteksi oleh Gaia sesuai dengan limit deteksinya. Jumlah tersebut mencakup bintang ganda visual dari seluruh jenis spektrum bintang. Oleh karena itu, penelitian terkait bintang ganda visual sangat menarik untuk dilakukan.

Tampakan gerak bintang ganda visual di langit merupakan proyeksi dari (bentuk elips) gerak sejatinya. Data tampakan atau pengamatan gerak ini pada *epoch* tertentu dinyatakan dengan dua besaran, yaitu sudut posisi ( $\theta$ ) dan jarak sudut ( $\rho$ ) dari komponen bintang sekunder relatif terhadap bintang primernya.

Beberapa metode telah digunakan untuk menghitung elemen orbit bintang ganda visual, salah satunya adalah metode Kowalsky yang dapat menentukan elemen orbit sejati bintang ganda secara analitis (Smart, 1986) serta penentuan massa kedua bintang menggunakan paralaks dinamika seperti yang digunakan oleh Siregar (2014). Sementara itu, salah satu metode yang relatif baru digunakan untuk menghitung elemen orbit (proyeksi) bintang ganda adalah metode *Semi-Definite Programming* (SDP), yang menerapkan konsep optimisasi konveks (Branham, 2009). Solusi SDP ini diperoleh melalui *ellipsoidal fitting* terhadap titik-titik data. Sekalipun jumlah data sangat terbatas, dengan formulasi dan batasan tertentu, SDP memberikan jaminan bahwa solusi tersebut ada dan tunggal (Calafiore, 2002).

Menurut Branham (2009), penggunaan metode SDP ini untuk penentuan elemen orbit bintang ganda visual masih belum banyak dilakukan, sehingga pada pekerjaan ini, akan dihitung elemen orbit dan massa bintang ganda WDS 03264+3520 atau yang selanjutnya disebut sebagai HDS 430 menggunakan metode SDP. Objek ini dipilih untuk menguji metode SDP karena jumlah data pengukuran yang sedikit dan memiliki kecenderungan sudut posisi ( $\theta$ ) yang membesar. Hal tersebut merupakan batasan dari kode program perhitungan yang digunakan. HDS 430 memiliki koordinat ekuatorial (asensio rekta, deklinasi) =  $(\alpha, \delta) = (3^h 26^m 21,05^s, +35^\circ 20' 26,1'')$  pada *epoch* J2000 (Gambar 1).

Elemen orbit sejati bintang ganda ini diperoleh dengan mengolah elemen elips proyeksi hasil SDP menggunakan metode Kowalsky (Smart, 1986). Beberapa nilai elemen orbit sejati menjadi masukan untuk menghitung massa kedua bintang menggunakan skema paralaks dinamika (Siregar, 2014) dengan melibatkan nilai magnitudo mutlak bolometrik kedua bintang.

Dengan demikian, pekerjaan ini bertujuan untuk menghitung elemen orbit bintang ganda WDS 03264+3520 atau HDS 430 menggunakan metode SDP, untuk menguji metode tersebut ketika dihadapkan pada jumlah data yang sedikit, serta untuk mendapatkan nilai massa kedua komponen bintang menggunakan paralaks dinamika.



Gambar 1. Citra objek HDS 430 pada peta langit dengan medan pandang selebar 11,98 menitbusur (Aladin Sky Atlas, 2017).

## 2. Data dan Metode

Bintang ganda WDS 03264+3520 atau yang juga dikenal sebagai HDS 430, HD 21183, maupun HIP 16025 memiliki parameter observasional yang diambil dari katalog *Washington Double Star* (WDS Catalog) seperti yang ditabulasikan pada Tabel 1.

Jumlah data pengamatan bintang ganda HDS 430 yang tersedia sangat terbatas (Cvetkovic *et al.*, 2016), yaitu delapan titik (Tabel 2), dan menjadi tantangan dalam mengaplikasikan metode SDP. Untuk keperluan ini digunakan modul CVX (optimisasi konveks, Grant & Boyd, 2017) yang diintegrasikan ke dalam pemrograman MATLAB.

Orbit proyeksi bintang ganda yang tampak pada bidang langit dimodelkan secara matematis menjadi persamaan umum elips dalam koordinat Kartesian dua dimensi ( $x, y$ ),

$$A'x^2 + B'y^2 + H'xy + G'x + F'y + L' = 0 \quad (1)$$

dengan  $A'$ ,  $B'$ ,  $H'$ ,  $G'$ ,  $F'$ , dan  $L'$  adalah koefisien-koefisien elips proyeksi. Aplikasi metode SDP bertujuan untuk mendapatkan nilai koefisien-koefisien persamaan (1) yang membangun elips proyeksi terbaik.

Metode SDP membuat penyederhanaan formulasi persamaan (1) menjadi bentuk persamaan linier dan mengkonstruksi suatu batasan berupa fungsi

Tabel 1. Parameter umum bintang ganda HDS 430.

Sistem HDS 430	
RA (J2000)	3h 26m 21.05s
Dek (J2000)	+35° 20' 26.1"
Separasi sudut	0,2 detikbusur
Komponen primer	
$m_v$	8,80
Kelas/tipe	F6V
Komponen sekunder	
$m_v$	10,58
Kelas/tipe	G9V

Tabel 2. Data hasil pengamatan astrometri HDS 430. Sudut posisi ( $\theta$ ) dinyatakan dalam derajat sementara separasi sudut ( $\rho$ ) dinyatakan dalam milidetikbusur (*miliarcsecond*, mas).

Epoch (tahun)	$\theta$ (°)	$\rho$ (mas)	Ref
1991,2500	172,0	240	ESA (1997)
1998,7776	217,6	283	Balega <i>et al.</i> (2002)
1999,6399	222,8	291	Horch <i>et al.</i> (2002)
2000,7623	226,2	290	Horch <i>et al.</i> (2002)
2000,7677	227,2	291	Horch <i>et al.</i> (2002)
2004,8158	244,2	279	Balega <i>et al.</i> (2007)
2008,7023	265,6	244	Horch <i>et al.</i> (2012)
2010,8923	278,2	230	Orlov <i>et al.</i> (2011)

objektif sebagai kriteria dalam mencari solusi (Calafiore, 2002). Berdasarkan Hukum II Kepler, terdapat batasan konstanta luas sapuan. Persamaan (2) menyatakan hubungan konstanta luas sapuan ( $C$ ) dengan  $\rho$  dan kecepatan sudut orbit  $d\theta/dt$  dengan  $t$  menyatakan waktu,

$$\rho^2 \left( \frac{d\theta}{dt} \right) = C \quad (2)$$

Nilai  $d\theta/dt$  dihitung melalui metode interpolasi *spline* menggunakan data pada Tabel 2. Persamaan (2) menjadi syarat yang ditambahkan ke dalam fungsi objektif sebelumnya sebagai kriteria untuk mendapatkan solusi (Naufal, 2017).

Untuk keperluan visualisasi orbit proyeksi, digunakan formulasi yang melibatkan solusi SDP dan koefisien-koefisien persamaan (1) sehingga dapat diketahui letak pusat elips relatif terhadap titik fokusnya (0,0) (Asada *et al.*, 2007).

Manipulasi matematis koefisien-koefisien elips proyeksi digunakan untuk mendapatkan koefisien-koefisien elips sejati  $A, B, H, F,$  dan  $G$  pada persamaan (3) yang kemudian dinormalisasi (Naufal, 2017). Persamaan (3) merupakan persamaan umum irisan kerucut (elips) sejati orbit yang digunakan sebagai model matematis dari data pengamatan.

$$Ax^2 + By^2 + 2Hxy + 2Gx + 2Fy = 1 \quad (3)$$

Manipulasi tersebut menggunakan metode Kowalsky (Smart, 1986). Metode tersebut merupakan metode analitis yang dapat mencari elemen geometri dari orbit sejati bintang ganda visual apabila orbit proyeksinya sudah diketahui. Dari persamaan elips proyeksi yang telah diketahui nilai koefisiennya berdasarkan metode SDP, yakni nilai koefisien dari persamaan (1), dan dengan bintang primer berada di titik asal, koefisien elips proyeksi tersebut digunakan untuk mendapatkan koefisien elips sejati dari persamaan (3) melalui manipulasi matematis. Proses analitik matematisnya seperti yang dijelaskan oleh Smart (1986).

Selanjutnya, didapatkan nilai elemen orbit sejati seperti bujur nodal naik ( $\Omega$ ), inklinasi ( $i$ ), argument periastron ( $\omega$ ), sumbu semimayor ( $a$ ), dan eksentrisitas ( $e$ ). Penggunaan metode ini memerlukan konsistensi dan kecermatan tanda matematis. Nilai elemen orbit lainnya, yaitu periode orbit ( $P$ ) dan waktu lewat periastron ( $T$ ), didapatkan melalui metode least-square dari persamaan-persamaan yang berkorespondensi dengan jumlah data. Nilai  $P$  dan  $a$  yang diperoleh digunakan untuk

menghitung massa masing-masing bintang ( $M_1$  dan  $M_2$ ).

Nilai ketidakpastian untuk setiap elemen orbit dihitung menggunakan persamaan seperti pada Branham (2017), yaitu dengan memanfaatkan matriks kovarian. Untuk setiap elemen orbit, anggap  $\Sigma$  sebagai matriks kovarian untuk  $A', B', C', \dots, \Omega, i, \omega, \dots, P, T$ . Maka, nilai ketidakpastian untuk sebuah elemen (misal  $\Omega$ ) dapat dinyatakan melalui persamaan (5) dengan  $V$  merupakan sebuah matriks yang didefinisikan pada persamaan (4).

$$V = \left[ \frac{\partial \Omega}{\partial A}, \frac{\partial \Omega}{\partial B}, \frac{\partial \Omega}{\partial C}, \dots \right] \quad (4)$$

$$d\Omega^2 = MAD \cdot V^T \cdot \Sigma \cdot V \quad (5)$$

MAD pada persamaan (5) adalah *mean absolute deviation* (MAD) yaitu jumlah nilai mutlak dari residual pada data dibagi dengan derajat kebebasan.

Penentuan massa kedua bintang, yaitu nilai  $M_1$  dan  $M_2$  dihitung menggunakan skema paralaks dinamika yang mencakup persamaan (6),

$$p = a \left[ (M_1 + M_2) P^2 \right]^{-\frac{1}{3}} \quad (6)$$

dengan  $p$  adalah paralaks dalam satuan detikbusur.

Selain itu juga menggunakan hubungan magnitudo mutlak bolometrik ( $M_b$ ) dengan magnitudo semu bolometrik ( $m_b$ ) yang dinyatakan dengan persamaan (7),

$$M_b = m_b + 5 + 5 \log(p) \quad (7)$$

Hubungan massa-luminositas bintang (Cox, 2002) pada persamaan (8) dan (9) kemudian digunakan untuk mendapatkan massa kedua bintang dalam satuan massa Matahari ( $M_\odot$ ).

$$\log \left( \frac{M}{M_\odot} \right) = 0,46 - 0,10M_b \quad (8)$$

apabila  $M_b \leq 7.5$ , atau

$$\log \left( \frac{M}{M_\odot} \right) = 0,75 - 0,145M_b \quad (9)$$

apabila  $M_b > 7.5$ .

Perhitungan ini dilakukan secara iteratif dengan memasukkan nilai-nilai awal  $p, M_1,$  dan  $M_2$ , sedangkan nilai  $m_b$  kedua bintang didapatkan dari data *bolometric correction*

(BC) dan magnitudo semu visual bintang. Nilai BC diperoleh dari data kelas spektrum kedua bintang dengan menggunakan tabel BC dari Cox (2002). Sedangkan nilai paralaks didapatkan dari data Hipparcos. Perhitungan iteratif dilakukan hingga ketiga besaran ( $p$ ,  $M_1$ , dan  $M_2$ ) konvergen dengan masing-masing nilai kesalahan relatifnya  $10^{-4}$ .

### 3. Hasil dan Pembahasan

Tabel 3 menyajikan hasil perhitungan kecepatan sudut orbit ( $d\theta/dt$ ) dan konstanta luas  $C$  dari setiap titik data pada Tabel 2 yang digunakan dalam SDP untuk menghasilkan elips proyeksi terbaik mengikuti persamaan (1). Koefisien elips proyeksi terbaik hasil *ellipsoidal fitting* terhadap titik data menggunakan SDP diberikan pada Tabel 4.

Sementara itu, orbit proyeksi hasil SDP beserta dengan ketidakpastiannya diberikan pada Gambar 2. Orbit proyeksi tersebut berbentuk elips yang hampir seperti lingkaran. Namun tampak bahwa lokasi titik fokus terpisah cukup jauh dari pusat elips, sekitar separuh radius orbit proyeksi. Hal ini menunjukkan bahwa gambar orbit proyeksi tersebut bukan berbentuk lingkaran, melainkan elips dengan nilai eksentrisitas tertentu dan menghasilkan prediksi bahwa bentuk orbit sejati akan lebih eksentrik/lonjong daripada bentuk orbit proyeksi. Tidak semua ketidakpastian tergambar jelas pada orbit proyeksi dikarenakan nilai ketidakpastian beberapa titik data sangat kecil sehingga tidak tergambar dalam garis ketidakpastian.

Berdasarkan Gambar 2, tampak bahwa ketidakpastian setiap data bisa dikatakan cukup kecil untuk orbit proyeksi yang terbentuk. Peran metode SDP adalah memilih orbit proyeksi terbaik dari setiap titik data pengamatan meskipun jumlahnya sedikit dan sebaran yang terbatas dengan menghasilkan nilai ketidakpastian yang paling minimal.

Gambar 3 menunjukkan orbit sejati (Kartesian tiga dimensi) yang mengimplementasikan persamaan (3) dengan nilai koefisien-koefisiennya adalah

Tabel 3. Hasil perhitungan kecepatan sudut orbit ( $d\theta/dt$ ) dan konstanta luas  $C$ .

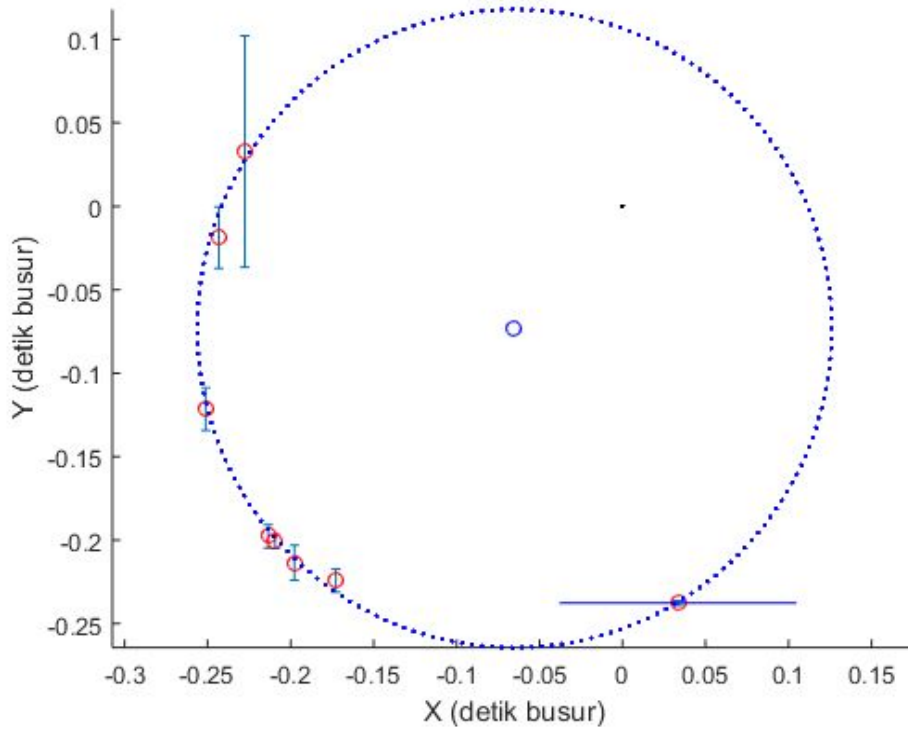
$\theta$ ( $^\circ$ )	$d\theta/dt$ ( $^\circ/\text{tahun}$ )	$C$
172,0	$8,200 \pm 0,296$	$4,723 \pm 0,170$
217,6	$-0,959 \pm 0,001$	$0,768 \pm 0,001$
222,8	$0,846 \pm 0,004$	$0,717 \pm 0,003$
226,2	$-3,217 \pm 0,006$	$2,706 \pm 0,005$
227,2	$-3,236 \pm 0,008$	$2,740 \pm 0,007$
244,2	$0,770 \pm 0,002$	$0,599 \pm 0,001$
265,6	$8,200 \pm 0,002$	$4,723 \pm 0,001$
278,2	$-0,959 \pm 0,003$	$0,768 \pm 0,002$

Tabel 4. Nilai koefisien-koefisien elips proyeksi hasil SDP.

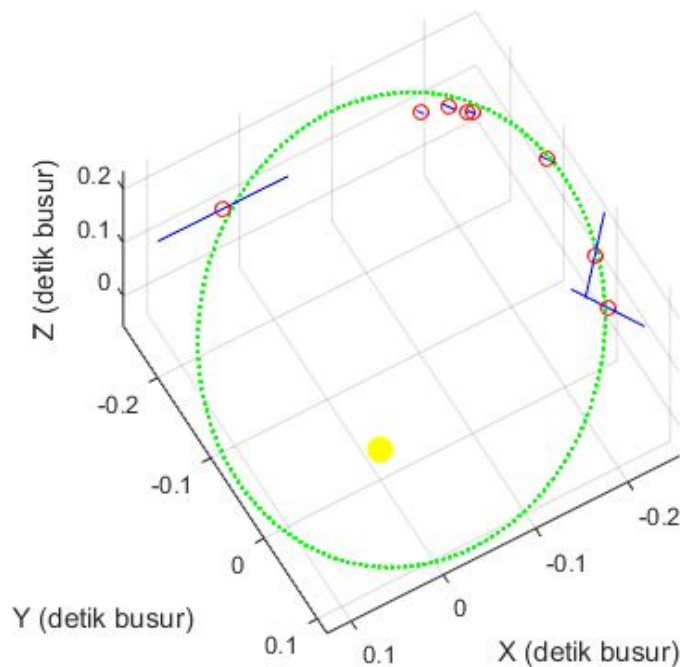
Koefisien	Nilai
$A'$	$0,50 \pm 0,02$
$B'$	$0,50 \pm 0,02$
$G'$	$(3,40 \pm 0,11) \times 10^{-8}$
$H'$	$(3,20 \pm 0,10) \times 10^{-7}$
$F'$	$(3,50 \pm 0,11) \times 10^{-7}$
$L'$	$(-3,20 \pm 0,10) \times 10^{-13}$

transformasi dari koefisien-koefisien pada Tabel 4 (Naufal, 2017). Sumbu  $z$  positif mengarah ke pengamat di Bumi dan arah utara bidang langit ditunjukkan dengan sumbu  $y$  positif. Nilai ketidakpastian pada orbit sejati ini juga cukup kecil sehingga tidak tergambar dengan jelas pada Gambar 3.

Metode Kowalsky diaplikasikan menggunakan nilai koefisien-koefisien persamaan (3) untuk mendapatkan nilai-nilai elemen orbit sejati yang ditampilkan pada Tabel 5. Nilai elemen orbit ini kemudian dibandingkan dengan rujukan (Cvetkovic et al., 2016).



Gambar 2. Orbit proyeksi (titik-titik melingkar) sistem bintang ganda HDS 430 hasil SDP dalam koordinat Kartesian. Lingkaran kosong adalah titik-titik data tampak atau pengamatan pada Tabel 2. Titik asal (0,0) merupakan titik fokus elips yang merupakan posisi bintang primer, sedangkan lingkaran biru adalah lokasi pusat elips.



Gambar 3. Orbit sejati (titik-titik melingkar) sistem bintang ganda HDS 430 hasil penerapan metode Kowalsky pada koordinat Kartesian. Keterangan gambar sama dengan pada Gambar 2.

Tabel 5. Nilai elemen orbit HDS 430 hasil studi ini dan hasil dari Cvetkovic *et al.* (2016).

Elemen Orbit	Hasil Studi Ini	Hasil Cvetkovic <i>et al.</i> (2016)
$\Omega$ ( $^{\circ}$ )	$138,354 \pm 0,717$	$54,5 \pm 1,1$
$i$ ( $^{\circ}$ )	$30,833 \pm 0,324$	$41,2 \pm 0,7$
$\omega$ ( $^{\circ}$ )	$270,000 \pm 1,059$	$313,4 \pm 3,3$
$e$	$0,512 \pm 0,054$	$0,091 \pm 0,007$
$a$ (detikbusur)	$0,223 \pm 0,001$	$0,2732 \pm 0,0033$
$P$ (tahun)	$53,531 \pm 0,186$	$54,695 \pm 0,881$
$T$ (tahun)	$2005,700 \pm 0,874$	$2021,606 \pm 0,576$

Perbandingan hasil pada Tabel 5 memperlihatkan perbedaan yang mencolok pada nilai  $\Omega$ ,  $\omega$ , dan  $e$ . Perbedaan ini dapat muncul akibat perbedaan metode yang digunakan untuk mendapatkan koefisien elips proyeksi. Metode yang digunakan pada Cvetkovic *et al.*, (2016) melibatkan penambahan data fiktif untuk mengakomodasi titik data yang mengelompok atau dengan melakukan ekstrapolasi. Sedangkan dalam studi ini, data yang digunakan murni dari data pengamatan yang tersedia.

Pada studi ini, jumlah data yang digunakan terbatas, hanya delapan titik, yang bagi metode tertentu berpengaruh pada hasil perhitungan. Metode SDP berperan dominan dalam mendapatkan elips proyeksi terbaik meskipun persebaran data mengelompok pada satu kuadran saja (Naufal, 2017). Hasil pada Gambar 2 telah mengindikasikan bahwa elips sejati akan memiliki nilai  $e$  yang besar, sehingga nilai  $e$  pada Tabel 5 diyakini valid meskipun sangat berbeda dengan hasil yang didapatkan Cvetkovic *et al.* (2016). Nilai suatu elemen orbit mempengaruhi besar nilai pada elemen orbit lainnya.

Metode SDP memberikan elips proyeksi terbaik secara cepat meskipun dengan data yang sedikit dan sebaran data yang mengelompok pada satu kuadran saja, sehingga dapat diaplikasikan pada data yang lebih banyak dengan sebaran yang lebih luas. Selain itu, metode ini juga dapat memberikan elips proyeksi langsung dari titik data pengamatan, tanpa menambahkan data

Tabel 6. Nilai paralaks ( $p$ ) dan massa komponen ( $M_1$  dan  $M_2$ ) dari sistem HDS 430.

Parameter	Hasil Studi Ini	Hasil Cvetkovic <i>et al.</i> (2016)
$p$ (mas)	$13,17 \pm 1,47$	$15,60 \pm 0,44$
$M_1$ ( $M_{\odot}$ )	$1,05 \pm 0,12$	1,30
$M_2$ ( $M_{\odot}$ )	$0,79 \pm 0,09$	0,97
$M_1 + M_2$	$1,83 \pm 0,15$	$2,12 \pm 0,47$

fiktif untuk mengakomodasi wilayah sebaran data yang kosong. Apabila semakin banyak data yang digunakan dengan jangkauan kuadran yang luas maka hasil perhitungan elemen orbit akan menjadi lebih baik/akurat. Hasil perhitungan iteratif  $p$ ,  $M_1$ , dan  $M_2$  menggunakan skema paralaks dinamika diberikan pada Tabel 6.

#### 4. Kesimpulan

Penentuan elemen orbit bintang ganda WDS 03264+3520 atau HDS 430 dapat dilakukan dengan metode *Semi-Definite Programming* dan menghasilkan solusi tunggal. Perbandingan elemen orbit hasil penerapan metode SDP dengan rujukan (Cvetkovic *et al.*, 2016) menunjukkan perbedaan pada beberapa nilai elemen. Walaupun demikian, metode ini dapat memberikan elips proyeksi terbaik secara cepat meskipun dengan data yang sedikit dan sebaran yang mengelompok pada satu kuadran saja, sehingga dapat diaplikasikan

pada data yang lebih banyak dengan sebaran yang lebih luas.

Selain itu, metode ini juga dapat memberikan elips proyeksi langsung dari titik data pengamatan, tanpa menambahkan data fiktif untuk mengakomodasi wilayah sebaran data yang kosong. Semakin banyak data yang digunakan dengan jangkauan kuadran yang luas maka hasil perhitungan elemen orbit menjadi lebih baik/akurat.

Nilai massa bintang ganda HDS 430 sedikit lebih rendah daripada rujukan (Cvetkovic *et al.*, 2016), yakni sebesar  $1,05 \pm 0,12 M_{\odot}$  untuk massa bintang pertama dan  $0,79 \pm 0,09 M_{\odot}$  untuk massa bintang kedua. Sementara hasil Cvetkovic *et al.*, (2016) untuk massa bintang pertama dan kedua masing-masing adalah 1,30 M dan 0,97 M. Perbedaan ini bukan akibat efek komputasi, melainkan karena adanya perbedaan cara memperoleh nilai BC, yang berakibat pada perbedaan nilai massa bintang.

Bertambah majunya teknologi instrumentasi observasi astronomi, khususnya untuk bintang ganda, membuat perolehan data orbit dan fisis bintang ganda dengan paralaks menjadi semakin cermat. Dengan demikian penentuan massa bintang ganda juga bisa dilakukan dengan lebih akurat.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Alm. Bapak Suryadi Siregar yang telah menjadi dosen pengampu mata kuliah Metodologi Penelitian sehingga penulis dapat menulis makalah ilmiah ini.

Makalah ini telah melalui proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Johan Muhamad selaku editor.

### Pernyataan Kontribusi

A.Z. Rozzykin dan A.D. Pangestu merupakan kontributor utama yang merancang penelitian, menulis sebagian besar makalah, dan melakukan analisis data. B. Dermawan berkontribusi dalam pemantapan teori, proses pengolahan data, dan analisis data.

### Rujukan

- Aladin Sky Atlas, diakses melalui <http://aladin.u-strasbg.fr/AladinLite/> pada 21 Desember 2017.
- Asada, H., Akasaka, T., Kudoh, K. (2007). Simplified Solution to Determination of a Binary Orbit. *The Astronomical Journal*, 133, 1243-1246.
- Balega, I. I. *et al.* (2002). Speckle Interferometry of Nearby Multiple Stars. *Astronomy & Astrophysics*, 385, 87-93.
- Balega, I. I. *et al.* (2007). Speckle Interferometry of Nearby Multiple Stars. IV. Measurements in 2004 and New Orbits. *Astrophysical Bulletin*, 62, 339-351.
- Branham, R. L. (2009). Double Star Orbits with Semi-Definite Programming and Alternatives. *Astronomy & Astrophysics*, 507, 1107-1115.
- Branham, R. L. (2017). A Three-Dimensional Orbit for the Binary Star Alpha Andromedae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 1095-1101.
- Calafiore, G. (2002). Approximation of n-Dimensional Data Using Spherical and Ellipsoidal Primitives. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics – Part A: Systems and Humans*, 32, 269-278.
- Cox, A. N. (2002). *Allen's Astrophysical Quantities Fourth Edition*. Los Alamos, Springer.
- Cvetkovic, Z., Pavlovic, R., Ninkovic, S. (2016). Orbits for Nine Binaries and One Linear Solution. *The Astronomical Journal*, 151, 83 (11pp).
- ESA (1997). *The Hipparcos and Tycho Catalogues*. Noordwijk, European Space Agency.
- Grant, M. C., Boyd, S. P. (2017). *The CVX User's Guide Release 2.1*. CVX Research Inc.
- Horch, E. P. *et al.* (2002). Speckle Observations of Binary Stars with The Wyn Telescope. II. Relative Astrometry Measures During 1998-2000. *The Astronomical Journal*, 123, 3442-3459.
- Horch, E. P. *et al.* (2012). Speckle Observations of Binary Stars with The Wyn Telescope. VII. Measures During



- 2008-2009. *The Astronomical Journal*, 143, 10 (10pp).
- Naufal, F. Z. (2017). *Perhitungan Elemen Orbit Asteroid Menggunakan Metode Semi-Definite Programming*. Tugas Akhir Sarjana Astronomi ITB.
- Nurmi, P. (2005). Galaxy Simulations of Visual Binary Stars, *Proceedings of the Gaia Symposium "The Three-Dimensional Universe with Gaia"*. Paris, 4-7 Oktober 2004.
- Orlov, V. G. *et al.* (2011). Speckle Interferometry at the Observatorio Astronomico Nacional. III. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, 47, 211-217.
- Siregar, S. (2014). *Teori & Komputasi Orbit Bintang Ganda Visual*. Bandung, Program Studi Astronomi ITB.
- Smart, W. M. (1986). *Spherical Astronomy*. Cambridge, Cambridge Univ. Press.



# Deteksi Manuver Orbit Menggunakan Metode *Moving Windows Curve Fitting* (MWCF) (Orbital Maneuver Detection Using Moving Windows Curve Fitting (MWCF) Method)

Mohamad Fikri Aulya Nor<sup>1</sup>, Ayu Dyah Pangestu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Bandung

<sup>2</sup>Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Bandung

---

## Riwayat naskah

Diterima: 06-11-2020

Direvisi: 14-12-2020

Disetujui: 14-12-2020

## Korespondensi:

M.F.A.. Nor

mohfikri.aulyanor@s.itb.ac.id

## ABSTRAK

Manuver orbit merupakan anomali atau perubahan drastis pada parameter orbit tertentu dalam waktu yang singkat untuk mempertahankan orbit satelit. Untuk mendeteksi hal tersebut, digunakan metode *moving windows curve fitting* (MWCF). Metode ini menggunakan analisis statistik parameter orbital tertentu dari data *two-line element* (TLE) satelit untuk mendeteksi pencilaan dalam segmen "jendela yang bergeser". Hasil deteksi manuver dari beberapa satelit menunjukkan bahwa selain konfigurasi parameter algoritma MWCF, pemilihan parameter orbit yang menjadi data landasan deteksi dan jenis satelit mempengaruhi performa deteksi. Karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver juga diperoleh, tetapi akurasi bergantung pada performa deteksi. Dari 567 variasi uji coba deteksi manuver, ternyata efek konfigurasi parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi dapat dikonfirmasi dengan adanya hubungan-hubungan linear di antaranya.

**Kata kunci:** deteksi manuver, *moving windows curve fitting*, *two-line element*

## ABSTRACT

The orbital maneuver is an anomaly or a drastic change of certain orbital parameters in a short period of time in order to maintain the satellite's orbit. To detect the maneuver, we use the moving windows curve fitting (MWCF) method. This method uses statistical analysis of specific orbital parameters from satellites two-line element (TLE) data to detect outliers within each "running window" segments. The detection result from several satellites show that besides the configuration of MWCF algorithm's parameters, the orbital parameters that we use as the detection database and satellite's type are affecting the detection performance. We also obtained the orbital parameter characteristic when the maneuver happens, but the accuracy depends on the detection performance. From 567 detection experiment variations, evidently the effect of the configuration of MWCF algorithm's parameter on detection performance is confirmed by the linear relationships among them.

**Keywords:** maneuver detection, moving windows curve fitting, two-line element

---

## 1. Pendahuluan

Model orbital yang digunakan pada satelit bermacam-macam, salah satunya adalah *Simple General Perturbation 4* (SGP4). Model ini menghasilkan data

*two-line element* (TLE). Data ini memungkinkan penalaran gerakan objek antariksa secara cepat dan akurat (Vallado & Cefola, 2012). Namun, prediksi dengan model tersebut belum cukup karena adanya

space event, salah satunya manuver. Manuver orbit merupakan anomali atau perubahan drastis pada parameter orbit tertentu dalam waktu yang singkat untuk mempertahankan orbit satelit.

Banyak metode yang dikembangkan untuk melakukan deteksi manuver orbit. Terdapat dua arus besar perkembangan metode tersebut, yakni yang menggunakan penalaran orbit dan yang menggunakan analisis statistik dari nilai parameter-parameter orbit spesifik. Yang tergolong dalam kategori terakhir salah satunya adalah *moving windows curve fitting* (MWCF; Patera, 2008; Kelecy et al., 2007; Li et al., 2018).

Dalam studi ini, metode MWCF digunakan untuk mendeteksi manuver orbit satelit dengan berbagai konfigurasi parameter. Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui efek konfigurasi parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi manuver dan mengetahui perbedaan karakteristik parameter orbit antara manuver dan evolusi alami orbit.

## 2. Data dan Metodologi

### 2.1. Metode *Moving Windows Curve Fitting* (MWCF)

Metode MWCF disebut sebagai “jendela” karena adanya segmen dengan panjang (*win*)  $m$  sampel data yang digunakan. Jendela ini berperan sebagai penyaring (*filter*) yang dapat “menghaluskan” tren data yang tidak konsisten akibat adanya anomali dengan *fitting* kurva. Dalam metode TTSA (Lemmens & Krag, 2014), panjangnya segmen dapat membesar hingga ukuran maksimal. Namun dalam studi ini, digunakan panjang segmen konstan, yaitu  $win = 5, 7,$  dan  $15$ .

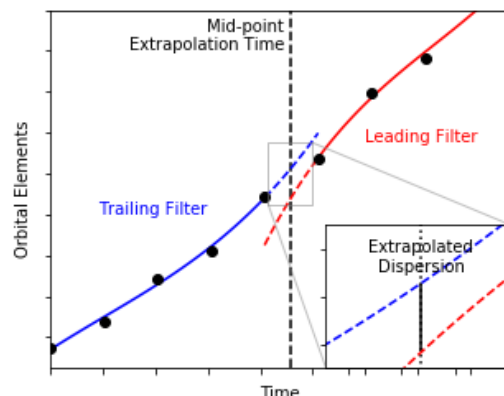
*Fitting* tersebut menghasilkan estimator nilai rata-rata untuk periode waktu tertentu yang akan bergeser dengan langkah tertentu (*sliding-average*). Dalam Li & Chen (2019), besar langkah (*step-size*) yang digunakan adalah setengah dari panjang jendela atau  $m/2$ . Tetapi dalam studi ini, digunakan besar langkah tetap, yaitu  $1$ , seperti yang dipaparkan dalam Chen et al. (2017).

Model *fitting* yang digunakan adalah fungsi polinom,

$$p(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + \dots + c_n t^n \quad (1)$$

dengan  $p$  adalah parameter orbit sebagai fungsi dari  $t$  atau seri waktu data TLE. Orde (*order*) yang digunakan biasanya adalah  $3$  (Chen et al., 2017). Dalam studi ini, digunakan nilai orde =  $1, 3,$  dan  $5$ .

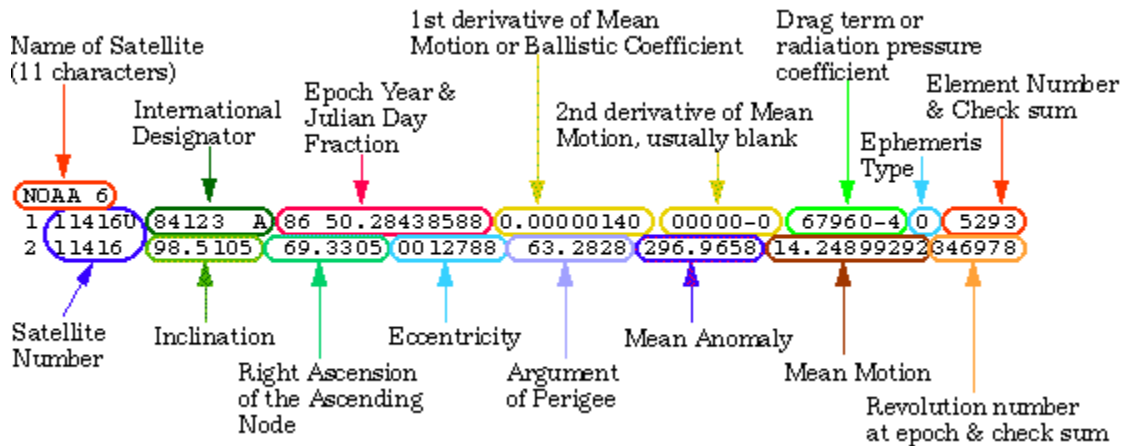
Menurut Patera (2008), *fitting* ini hanya valid di dalam jendelanya masing-masing. Namun dalam Kelecy et al. (2007), digunakan *extrapolated difference* yang tidak sesuai dengan ketentuan tersebut. *Extrapolated difference* berperan sebagai dispersi nilai-nilai parameter orbit yang dihitung dari selisih nilai ekstrapolasi *leading filter* dan *trailing filter*. Pada dasarnya, kedua filter tersebut sama-sama merupakan jendela tempat *fitting* dilakukan, tetapi yang satu merupakan jendela depan (*leading*) dan yang satu merupakan jendela belakang (*trailing*).



Gambar 1. Ilustrasi dari *extrapolated dispersion/difference*.

Dispersi dari eksplorasi tadi digunakan untuk mendeteksi adanya manuver. Apabila terjadi perubahan parameter orbit yang mencolok, maka nilai dispersinya akan membesar secara drastis. Apabila nilai itu melampaui ambang batas tertentu ( $n\sigma$ ), maka pada saat itu diduga terjadi manuver. Ambang batas yang digunakan dalam studi ini adalah  $n = 1, 2,$  dan  $3$ .

Panjang jendela (*win*), orde polinom (*order*), dan ambang batas ( $n$ ) dijadikan sebagai parameter algoritma MWCF. Namun, selain ketiga parameter di atas, terdapat sebuah parameter tambahan yang disebut *time lag*. Sebenarnya, *time lag* merupakan masalah intrinsik dalam data TLE mentah.



Gambar 2. Struktur data elemen orbit yang disimpan dalam format *Two-Line Element* (sumber: <https://spaceflight.nasa.gov/>).

Menurut Patera (2008), faktor ini menyebabkan jeda waktu selama 2-3 hari dengan simpangan baku 2,4 hari. Nilai ini digunakan dalam studi ini.

Performa deteksi dari metode ini diukur dengan peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi. Peluang deteksi benar adalah jumlah deteksi benar per jumlah total deteksi, sedangkan peluang manuver terdeteksi adalah jumlah manuver terdeteksi per jumlah manuver seharusnya—yang diperoleh dari data manuver satelit. Karena hanya menggunakan analisis statistik sederhana, secara komputasi, metode ini sangat efisien dan tidak memerlukan prediksi keadaan orbit (Chen *et al.*, 2017).

**2.2. Sumber Data**

Data yang menjadi basis deteksi manuver orbit satelit adalah set data TLE yang berasal dari *North American Aerospace Defense Command* (NORAD). Struktur data TLE terdiri dari dua baris yang mengandung data parameter orbit, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.

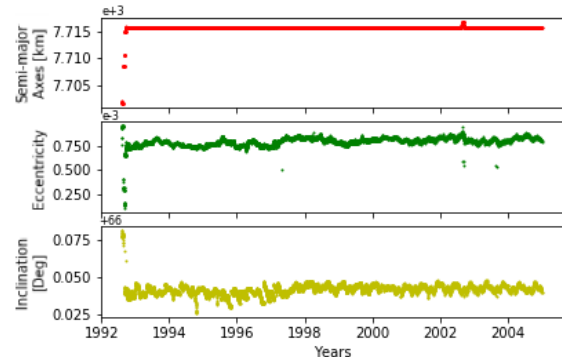
Parameter orbit yang digunakan adalah sumbu semi mayor, inklinasi, dan eksentrisitas. Sumbu semi mayor diperoleh dari persamaan,

$$a = \sqrt[3]{\frac{n^2 GM}{4\pi^2}} \tag{2}$$

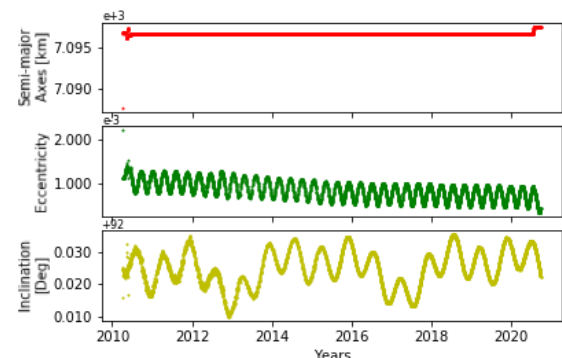
dengan  $n$  adalah gerak rerata yang tercantum dalam data TLE,  $G$  adalah konstanta gravitasi universal, dan  $M$  adalah massa Bumi. Ketiga parameter tersebut

dipilih karena *orbit control maneuver* menyebabkan perubahan inklinasi dan *control maneuver* menyebabkan perubahan sumbu semi mayor dan eksentrisitas.

Rujukan data dari *International Laser Ranging Service* (ILRS) digunakan untuk membandingkan hasil deteksi dengan manuver aktual. Dari sinilah performa deteksi dapat diukur.



Gambar 3: Data historis parameter orbit dari satelit Topex (22076).



Gambar 4: Data historis parameter orbit dari satelit Cryosat 2 (36508).

Sebelum digunakan untuk deteksi, data TLE mentah harus melalui tahap seleksi pencilan awal. Pencilan-pencilan ini dapat mengganggu performa deteksi sehingga perlu dieliminasi. Normalnya terdapat sekitar 20% pencilan yang berada di luar konteks *space event*. Dalam Chen *et al.* (2017), data pencilan diseleksi dengan data multidimensi dan jarak Mahalanobis. Namun, dalam studi ini cukup dilakukan dengan menggunakan data dalam rentang waktu tertentu yang tidak mengandung pencilan dengan simpangan yang tidak terlalu besar. Pencilan yang terlalu jauh bukan merupakan pencilan dalam konteks manuver, sehingga bisa disebut sebagai pencilan tidak wajar. Dalam hal ini, porsi data yang digunakan adalah 80% dari keseluruhan data.

Gambar 3 dan 4 merupakan tampilan data historis parameter orbit dari beberapa satelit yang dianalisis dalam studi ini. Seleksi pencilan dilakukan terhadap pencilan yang tak wajar pada kedua set data, yakni pada segmen awal dan tengah (untuk satelit Topex), serta akhir (untuk satelit Cryosat 2).

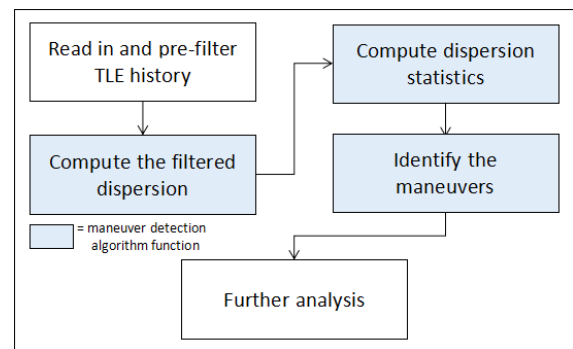
Pengecualian dilakukan untuk satelit Topex karena pencilan tak wajarnya berada di tengah, sehingga porsi data yang digunakan adalah 68%. Ini merupakan sebuah kekurangan metode MWCF dalam studi ini sehingga terjadi ketidakefektifan penggunaan data.

Seharusnya terdapat metode *pre-filter* data untuk mendeteksi pencilan yang tak wajar, tetapi tidak menyoroti pencilan dalam konteks manuver.

### 2.3. Metode Penelitian

Setelah mengekstrak data TLE dan menyeleksi pencilan, dilakukan deteksi manuver dengan metode MWCF dengan berbagai parameter algoritmanya terhadap berbagai parameter orbit, mengikuti alur pada Gambar 5. manuver yang telah dideteksi akan dianalisis lebih lanjut mengenai karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver dan efek parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi.

Dalam analisis yang terakhir, digunakan model *Multiple Linear Regressions* (MLRs). Model MLRs digunakan untuk melakukan analisis regresi linear dengan lebih dari satu variabel bebas. Dari model tersebut, dilakukan uji-*T* individual dengan tingkat ke-



Gambar 5. Algoritma deteksi manuver berdasarkan metode MWCF.

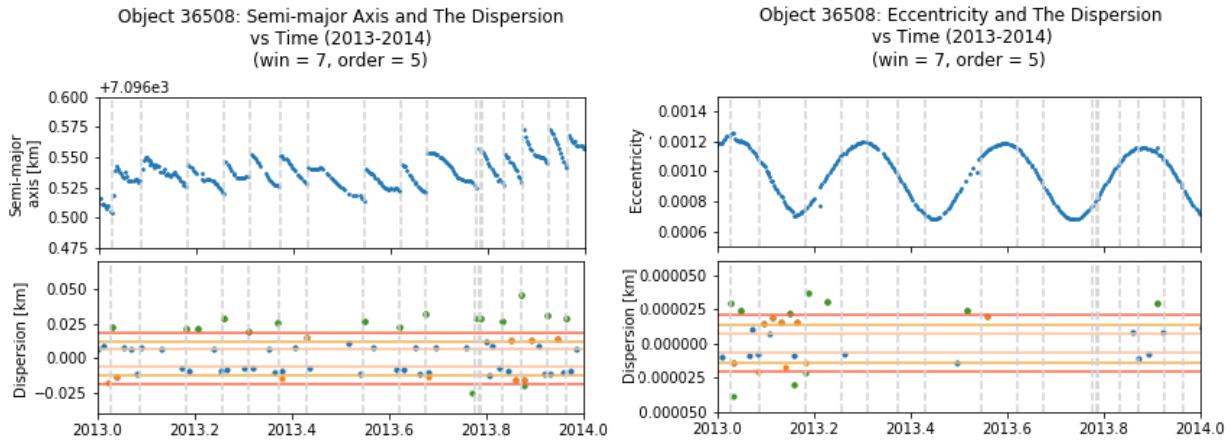
percayaan (*confidence level*) sebesar 95% untuk menyeleksi variabel yang signifikan. Selain itu, dilakukan juga analisis uji  $R^2$  dengan batas nilai 80 untuk menentukan apakah model regresi linear ini cukup menggambarkan data (Walpole *et al.*, 2012).

Dalam studi ini, telah dilakukan deteksi manuver terhadap beberapa satelit, yaitu Cryosat 2 (36508), Envisat (27386), Jason-3 (41240), Saral (39086), Sentinel 3-A (41335), Sentinel 3-B (43437), dan Topex (22076). Satelit-satelit ini dipilih karena ketersediaan data TLE dan data manuvernya sehingga memungkinkan untuk dilakukan evaluasi performa deteksi.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil deteksi manuver orbit satelit dirangkum dalam Tabel 1. Hasil tersebut merupakan hasil deteksi dengan performa optimal (baik yang peluang deteksi benarnya maksimum, maupun peluang manuver terdeteksinya maksimum) di antara deteksi dengan berbagai konfigurasi parameter algoritma MWCF.

Setiap manuver dideteksi berdasarkan parameter orbit tertentu. Metode deteksi satelit harus memperhatikan pilihan parameter orbit karena hal tersebut mencerminkan *space event* atau anomali orbit tertentu (Chen *et al.*, 2017). Kebanyakan deteksi manuver dilakukan berdasarkan data sumbu semi mayor ( $a$ ) dan inklinasi ( $i$ ). Seharusnya eksentrisitas ( $e$ ) juga dapat dijadikan sebagai landasan data deteksi manuver karena parameter ini terdampak oleh *control maneuver*. Oleh karena itu, perlu diselidiki pengaruh pemilihan parameter orbit terhadap performa deteksi.



Gambar 6. Plot antara parameter orbit dan dispersinya terhadap waktu dari hasil deteksi manuver satelit Cryosat 2 (36508) dengan  $win = 7$  dan  $order = 5$ . Gambar di sebelah kanan adalah untuk eksentrisitas, sedangkan di sebelah kiri adalah untuk sumbu semi mayor. Garis horizontal berwarna kuning, oranye, dan merah menunjukkan ambang batas deteksi  $n = 1, 2,$  dan  $3$ . Garis vertikal putus-putus merepresentasikan waktu terjadinya manuver. Titik-titik yang melewati ambang batas menandakan hasil deteksi. Dapat dilihat bahwa titik-titik pada grafik kiri hampir berhimpitan dengan garis-garis manuver, sedangkan titik-titik di grafik kanan terletak lebih acak, bahkan banyak garis manuver yang terlewatkan. Ini menunjukkan bahwa deteksi berlangsung cukup baik untuk data sumbu semi mayor, dan sebaliknya untuk data eksentrisitas.

Hasil pada Tabel 1 menunjukkan bahwa data inklinasi dan data eksentrisitas tidak terlalu baik untuk digunakan dalam deteksi manuver. Tanpa meninjau jenis satelit, berdasarkan data tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya masing-masing hanyalah 42,3% dan 25,4%, sedangkan rata-rata peluang manuver terdeteksinya hanya sekitar 23%. Sementara itu, deteksi berdasarkan data sumbu semi mayor menunjukkan hasil optimal dengan rata-rata peluang deteksi benarnya mencapai 60,4%, sedangkan rata-rata peluang manuver terdeteksinya mencapai 30,2%. Perbedaan performa deteksi ini digambarkan lebih jelas dalam Gambar 6, yakni antara hasil deteksi manuver berdasarkan data sumbu semi mayor dan data eksentrisitas pada satelit dan konfigurasi parameter algoritma MWCF yang sama.

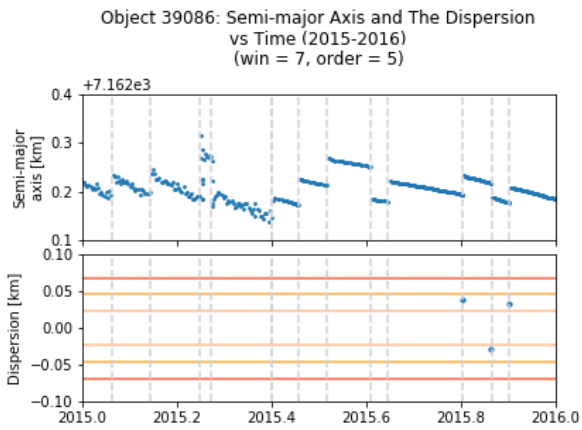
Selain faktor pemilihan parameter orbit, perbedaan satelit juga mempengaruhi performa deteksi. Hal ini dapat terjadi karena masing-masing satelit mempunyai kondisi unik, seperti ketinggian, tipe orbit, manuver yang dijalankan, dan akurasi data TLE-nya.

Dari ketujuh sampel satelit, yang memberikan hasil deteksi terbaik adalah satelit Sentinel 3-A, Sentinel 3-B, dan Cryosat 2. Peluang deteksi benar pada deteksi manuver satelit Sentinel 3-B

merupakan yang terbesar. Tanpa meninjau perbedaan parameter orbit, berdasarkan data satelit tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya mencapai 66,4%. Namun, rata-rata peluang manuver terdeteksinya hanya 23,5%. Jadi meskipun cukup berhasil mendeteksi dengan benar, tetapi manuver yang belum terdeteksi masih sangat banyak.

Sementara itu, deteksi manuver satelit Sentinel 3-A menghasilkan peluang manuver terdeteksi yang terbesar. Tanpa meninjau perbedaan parameter orbit, berdasarkan data satelit tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya hanya 21,2%. Namun, rata-rata peluang manuver terdeteksinya mencapai 46,5%. Hasil ini hampir berkebalikan dengan hasil deteksi sebelumnya, yakni meskipun banyak manuver yang terdeteksi, tetapi hasil deteksinya cenderung lebih tidak akurat atau lebih sering mendeteksi anomali yang bukan manuver.

Satelit yang mempunyai performa yang cukup tinggi dan berimbang adalah satelit Cryosat 2. Tanpa meninjau perbedaan parameter orbit, berdasarkan data satelit tersebut, rata-rata peluang deteksi benarnya mencapai 40,8% dan rata-rata peluang manuver terdeteksinya mencapai 32,9%. Interpretasinya adalah cukup banyak manuver yang terdeteksi dan hasil deteksi-



Gambar 7. Hasil deteksi manuver satelit Saral (39086) dengan  $win = 7$  dan  $order = 5$  dalam rentang waktu awal tahun 2015-2016. Keterangan lainnya sama dengan Gambar 6.

nya lebih bisa dipercaya.

Performa deteksi pada satelit-satelit lain tidak lebih baik daripada ketiga satelit tersebut, kecuali untuk satelit Saral yang mempunyai peluang deteksi benar rata-rata mencapai 55,0%. Namun, peluang manuver terdeteksinya hanya 12,8%, sehingga tidak termasuk sebagai hasil deteksi manuver yang terbaik. Gambar 7 merupakan hasil deteksi manuver pada satelit Saral dengan parameter orbit dan konfigurasi yang sama dengan hasil deteksi manuver pada satelit Cryosat 2 yang ditunjukkan oleh Gambar 6 (kiri). Dapat dilihat bahwa titik-titik deteksi pada Gambar 7 berada sangat tepat dengan terjadinya manuver, tetapi deteksi yang dihasilkannya sangat sedikit sehingga lebih banyak manuver terlewatkan dibanding hasil deteksi dari satelit Cryosat 2 pada Gambar 6.

Meskipun deteksi manuver dengan metode MWCF dalam studi ini belum sempurna, informasi perkiraan karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver dapat diperoleh. Karakteristik ini diperoleh dari ambang batas deteksi. Tabel 2 sampai 4 yang merangkum karakteristik tersebut akan menjawab pertanyaan mengenai kapan terjadinya manuver. Manuver diperkirakan terjadi ketika perubahan drastis pada sumbu semi mayor mencapai sekian meter, inklinasi mencapai sekian derajat, atau eksentrisitas mencapai nilai tertentu pada masing-masing satelit. Namun perkiraan tersebut akan semakin baik seiring meningkatnya performa deteksi.

Dari pembahasan sebelumnya, diketahui bahwa hasil deteksi sangat terpengaruh oleh pemilihan parameter orbit dan jenis satelit. Namun secara umum, performa deteksi merupakan produk dari algoritma MWCF itu sendiri. Diduga terdapat hubungan yang berlaku secara umum antara konfigurasi parameter algoritma MWCF ( $win$ ,  $order$ , dan  $n$ ) dan performa deteksi (peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi). Dalam studi ini, dilakukan analisis MLRs untuk mengetahui hubungan tersebut.

Analisis ini dilakukan terhadap hasil-hasil deteksi manuver dari seluruh variasi konfigurasi parameter algoritma MWCF dalam studi ini ( $3 \times 3 \times 3$  konfigurasi) untuk seluruh parameter orbit (3 parameter) dan untuk seluruh sampel satelit (7 satelit) sehingga totalnya menjadi  $3 \times 3 \times 3 \times 3 \times 7 = 567$  variasi. Ternyata model MLRs tidak merepresentasikan hubungan antara konfigurasi parameter algoritma MWCF dan peluang deteksi benar. Hal ini karena nilai  $R^2$  yang diperoleh kurang dari 80. Namun untuk hubungan antara konfigurasi parameter algoritma MWCF dan peluang manuver terdeteksi, model MLRs cukup memadai untuk sebagian kategori. Secara umum, ambang batas ( $n$ ) memiliki hubungan linear negatif (dalam persamaan linear, koefisiennya negatif) dengan peluang manuver terdeteksi. Panjang segmen ( $win$ ) juga memiliki hubungan serupa dengan peluang manuver terdeteksi, tetapi hanya berlaku pada data inklinasi.

Karena hubungan ini belum begitu tampak, dilakukan perombakan dalam model MLRs. Jika sebelumnya variabel respons yang merupakan parameter performa deteksi berupa peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi, kini variabel tersebut diubah menjadi jumlah deteksi benar, jumlah deteksi salah, dan manuver terlewatkan. Perombakan ini termasuk rasional karena kedua variabel respon yang lama merupakan turunan dari variabel respons yang baru.

Dalam analisis yang baru, dilakukan kembali analisis terhadap hasil-hasil deteksi manuver dari seluruh variasi konfigurasi parameter algoritma MWCF untuk seluruh parameter orbit dan untuk seluruh sampel satelit. Hasil yang didapatkan cukup menarik



Tabel 1. Performa deteksi manuver dengan metode MWCF dengan beragam parameter *win-order-n*.

Parameter		Deteksi Benar (%)	Manuver Terdeteksi (%)
Orbit	MWCF		
Topex (22076)			
a	7-1-1	3,24	25,00
	15-1-3	22,50	18,18
i	5-1-1	2,67	27,27
	7-3-1	3,91	27,27
e	15-1-3	6,67	6,82
	15-5-1	3,21	27,27
	5-1-1	3,38	27,27
	5-3-3	13,89	9,09
	5-5-1	3,81	27,27
	7-1-1	3,68	27,27
	7-3-1	3,72	27,27
Envisat (27386)			
a	7-1-3	65,38	7,87
	15-5-1	39,18	15,17
i	7-3-1	34,02	20,79
	7-5-1	32,91	20,79
e	15-1-3	60,00	5,62
	5-5-3	50,00	9,55
	15-5-1	34,51	21,35
Cryosat 2 (36508)			
a	5-1-1	59,61	62,77
	5-5-3	84,95	36,50
i	7-1-1	52,73	62,77
	7-1-1	22,76	35,77
e	7-5-3	30,19	12,41
	5-1-1	29,07	30,66
	7-3-1	25,68	27,01
	7-5-1	25,98	26,28
	7-5-3	43,55	13,14
	15-1-3	26,92	5,84
Saral (39086)			
a	5-5-3	100,00	6,67
	15-5-1	78,57	16,67
	15-5-2	100,00	6,67
	7-1-2	100,00	10,00
i	7-5-2	54,55	10,00
	15-5-1	6,37	16,67
e	5-5-1	40,00	15,00
Sentinel 3-A (41335)			
a	5-5-3	26,92	46,51
	15-5-1	19,19	51,16
i	7-1-3	33,33	44,19
	15-3-2	20,37	46,51
e	7-3-1	20,00	41,86
	15-1-1	7,32	48,84

Tabel 1. (Lanjutan).

Parameter		Deteksi Benar (%)	Manuver Terdeteksi (%)
Orbit	MWCF		
Jason-3 (41240)			
a	5-1-2	70,37	37,93
	7-1-1	54,55	41,38
i	15-3-1	41,18	41,38
	5-1-1	10,85	34,48
	5-3-1	8,37	34,48
	7-3-1	12,28	34,48
	7-3-2	9,82	34,48
e	15-1-2	28,26	34,48
	15-1-3	39,13	27,59
	15-1-1	13,33	6,90
	15-5-1	34,51	21,35
Sentinel 3-B (43437)			
a	7-1-3	90,91	21,62
	7-3-1	77,42	32,43
i	15-1-1	60,87	32,43
	5-1-3	68,75	18,92
	5-3-2	80,00	18,92
	5-5-1	78,57	18,92
	5-5-2	71,43	18,92
	5-5-3	83,33	18,92
	7-1-3	66,67	18,92
	7-3-1	64,71	18,92
	7-3-2	72,73	18,92
	7-5-1	61,11	18,92
e	7-5-2	69,57	18,92
	7-5-3	52,94	18,92
	15-1-1	46,67	18,92
	15-1-2	41,18	18,92
	15-1-3	100,00	16,22
	15-3-1	48,00	18,92
	15-3-2	55,00	18,92
	5-1-3	88,89	13,51
	7-1-1	24,36	32,43

dan secara skematis ditampilkan dalam Tabel 5. Secara umum, panjang segmen jendela (*win*) mempunyai hubungan linear negatif dengan jumlah deteksi benar dan jumlah deteksi salah, kecuali untuk deteksi pada data eksentrisitas yang menunjukkan hubungan linear positif antara panjang segmen dan jumlah deteksi salah. Hal ini dapat dijelaskan dengan semakin panjang segmen jendela, semakin sedikit langkah jendela yang bergeser (jumlah *trailing* dan *leading filter*), sehingga semakin sedikit deteksi. Karena deteksi berdasarkan data eksentrisitas performanya terbukur, anomali

Tabel 2. Karakteristik manuver dilihat dari parameter sumbu semi mayor (*a*).

No. Satelit	Parameter MWCF	a (m)
22076	7-1-1	1,0
	15-1-3	3,2
27386	7-1-3	17,6
	15-5-1	7,3
36508	5-1-1	5,4
	5-5-3	20,5
	7-1-1	5,9
39086	5-5-3	74,4
	15-5-1	48,3
39086	15-5-2	28,0
41240	7-1-2	55,9
	5-1-2	1,7
41335	7-1-1	0,9
	15-3-1	1,0
	5-5-3	5,3
43437	15-5-1	2,1
	7-1-3	599,4
	7-3-1	208,4
	15-1-1	272,7

Tabel 3. Karakteristik manuver dilihat dari parameter eksentrisitas (*e*).

No. Satelit	Parameter MWCF	e
22076	5-1-1	6,95E-10
	5-3-3	3,11E-11
	5-5-1	1,04E-11
	7-1-1	6,69E-09
	7-3-1	8,84E-09
27386	5-5-3	3,46E-10
	15-5-1	5,93E-09
36508	5-1-1	5,52E-09
	7-3-1	6,90E-09
36508	7-5-1	6,90E-09
	7-5-3	2,07E-11
	15-1-3	2,78E-11
39086	5-5-1	2,58E-10
41240	15-1-1	3,76E-09
41335	7-3-1	1,71E-10
	15-1-1	9,41E-08
43437	5-1-3	6,45E-10
	7-1-1	2,19E-11

Tabel 4. Karakteristik manuver dilihat dari parameter inklinasi (*i*).

No. Satelit	Parameter MWCF	i (°)
22076	5-1-1	2,5
	7-3-1	3,0
	15-1-3	12,0
	15-5-1	3,3
	7-3-1	2,2
	7-5-1	2,2
	15-1-3	11,3
	7-1-1	0,8
	7-5-3	2,1
	7-5-2	0,0
36508	15-5-1	0,0
	5-1-1	1,1
	5-3-1	2,0
	7-3-1	1,4
	7-3-2	2,8
	15-1-2	1,9
	15-1-3	2,9
	7-1-3	10,9
	15-3-2	8,4
	5-1-3	14,9
41335	5-3-2	11,8
	5-5-1	5,9
	5-5-2	11,8
43437	5-5-3	17,7
	7-1-3	16,7
	7-3-1	5,5
	7-3-2	11,0
	7-5-1	5,5
	7-5-2	11,0
	7-5-3	16,4
	15-1-1	7,2
	15-1-2	14,5
	15-1-3	21,7
15-3-1	6,5	
15-3-2	13,0	

itu dapat dikesampingkan.

Pada panjang segmen jendela, ditemukan pula bahwa parameter tersebut mempunyai hubungan linear positif dengan jumlah manuver terlewatkan. Namun, hal ini hanya ditemukan dalam sebuah kasus, sehingga tidak diperoleh suatu simpulan.

Tabel 5. Hubungan antara parameter algoritma MWCF dan performa deteksi manuver berdasarkan analisis MLRs.

Parameter Orbit	Parameter Algoritma MWCF	Performa Deteksi Manuver		
		# Deteksi Benar	# Deteksi Salah	# Manuver Terlewat
a	win	linear negatif	linear negatif	<b>linear positif</b>
	order	<b>linear positif</b>	<b>linear positif</b>	-
	n	linear negatif	linear negatif	<b>linear positif</b>
i	win	linear negatif	linear negatif	-
	order	<b>linear positif</b>	<b>linear positif</b>	-
	n	linear negatif	linear negatif	<b>linear positif</b>
e	win	linear negatif	<b>linear positif</b>	-
	order	-	-	-
	n	linear negatif	linear negatif	<b>linear positif</b>

Sebaliknya, secara umum, orde polinom (*order*) mempunyai hubungan linear positif dengan jumlah deteksi benar dan jumlah deteksi salah, kecuali untuk deteksi berdasarkan data eksentrisitas karena model MLRs yang tidak cocok atau variabelnya tidak signifikan. Penjelasan terhadap hal ini adalah adanya kemungkinan *overfitting* pada orde polinom yang tinggi sehingga hasil *fitting* akan terlalu bergantung pada data dan menghasilkan dispersi yang lebih besar.

Terakhir adalah pengaruh ambang batas (*n*) terhadap performa deteksi. Secara umum, ambang batas mempunyai hubungan linear negatif dengan jumlah deteksi benar dan jumlah deteksi salah, serta hubungan linear positif dengan jumlah manuver terlewatkan. Hal ini terjadi karena semakin besar ambang batas, semakin sedikit jumlah anomali yang terdeteksi.

#### 4. Kesimpulan

Metode MWCF telah digunakan untuk mendeteksi manuver orbit dari berbagai parameter orbit dari beberapa satelit. Total terdapat 567 variasi konfigurasi parameter algoritma MWCF yang diterapkan dalam deteksi manuver dan diperoleh beberapa hasil deteksi dengan performa optimal.

Ternyata selain variasi konfigurasi tersebut, parameter orbit yang dipilih sebagai landasan data deteksi dan jenis satelit berpengaruh pada performa deteksi manuver. Untuk mendeteksi manuver, data sumbu semi mayor merupakan pilihan terbaik karena rata-rata peluang deteksi benar dan rata-rata peluang manuver terdeteksinya paling besar, yakni 60,4% dan 30,2%.

Penggunaan sumbu semi mayor sebagai parameter tunggal dinilai cukup dalam deteksi manuver dan bahkan justifikasi satelit operasional (Li & Chen, 2018).

Sementara itu, hasil deteksi manuver terbaik diperoleh dari data satelit Sentinel 3-A, Sentinel 3-B, dan Cryosat 2. Satelit Sentinel 3-A mempunyai peluang manuver terdeteksi terbesar, tetapi lebih sering mendeteksi anomali yang bukan manuver, sedangkan satelit Sentinel 3-B kebalikannya, yaitu mempunyai peluang deteksi benar terbesar, tetapi lebih sering melewatkan manuver. Di antara kedua ekstrem tersebut, terdapat satelit Cryosat 2 yang memiliki peluang deteksi benar dan peluang manuver terdeteksi cukup besar.

Dari hasil deteksi manuver tersebut, diperoleh beberapa karakteristik parameter orbit saat terjadi manuver. Namun, karakteristik tersebut akan semakin baik apabila performa deteksi semakin baik.

Secara *apriori*, diduga terdapat efek konfigurasi parameter algoritma MWCF terhadap performa deteksi yang berlaku secara umum. Ternyata model MLRs cukup cocok untuk hubungan ini, tetapi dengan performa deteksi yang dirombak ke bentuk awalnya. Secara umum, panjang segmen jendela yang semakin panjang dapat menurunkan jumlah deteksi, baik benar maupun salah. Sementara itu, orde polinom yang semakin tinggi justru meningkatkan jumlah deteksi. Selain itu, semakin tinggi ambang batas yang digunakan, menurunkan hasil deteksi, tetapi meningkatkan jumlah manuver terlewatkan.

Keterbatasan metode ini adalah dalam seleksi pencilan awal yang menyebabkan penggunaan data yang tidak efisien. Selain itu, performa deteksi yang diperoleh juga masih belum sempurna, sehingga informasi karakteristik parameter orbit pada saat terjadi manuver bisa jadi tidak akurat. Diperlukan modifikasi untuk hasil deteksi yang lebih baik. Salah satunya adalah dengan memperoleh konfigurasi parameter algoritma MWCF yang menghasilkan performa terbaik, berdasarkan pengetahuan tentang hubungan kedua parameter tersebut. Kecepatan proses deteksi manuver juga dapat ditingkatkan dengan komputasi paralel (Clark & Lee, 2020).

### Ucapan Terima Kasih

Sebagian dari pekerjaan ini didukung oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) melalui program *internship* 2020. Kami mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada Dr. Rhorom Priyatikanto atas bimbingan dan dorongan selama pengerjaan proyek ini, serta tenaga ahli lainnya di LAPAN. Kami ucapkan pula terima kasih kepada NORAD dan ILRS yang telah menyediakan sumber data dalam studi ini.

### Pernyataan Kontribusi

M.F.A. Nor merupakan kontributor utama yang merancang penelitian, melakukan pengolahan data dan analisis, serta menulis sebagian besar makalah. A.D. Pangestu membantu analisis dan penulisan makalah.

Makalah ini telah melalui proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Johan Muhamad selaku editor.

### Rujukan

Chen, L., Bai, X.-Z., Liang, Y.-G., and Li, K.-B. (2017). Orbital Anomaly and Space Events Analysis, 247-297. In Chen, L., Bai, X.-Z., Liang, Y.-G., and

Li, K.-B. *Orbital Data Applications for Space Objects: Conjunction Assessment and Situation Analysis*. Springer, Singapore.

Clark, R. & Lee, R. (2020). Parallel processing for orbital maneuver detection. *Advances in Space Research*, 66, 444-449.

Kelecy, T., Hall, D., Hamada, K., Stocker, D. (2007). Satellite Maneuver Detection Using Two-line Elements Data, *Proceeding of the AMOS Conference*, Januari 2007.

Lemmens, S. & Krag, H. (2014). Two-Line-Elements-Based Maneuver Detection Methods for Satellites in Low Earth Orbit. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 37(3), 860-868.

Li, T., & Chen, L. (2018). Historical-orbital-data-based method for monitoring the operational status of satellites in low Earth orbit. *Acta Astronautica*, 151, 88-94.

Li, T., Li, K., Chen, L. (2018). New manoeuvre detection method based on historical orbital data for low Earth orbit satellites. *Advances in Space Research*, 62(3), 554-567.

Li, T. & Chen, L. (2019). Space event detection method based on cluster analysis of satellite historical orbital data. *Acta Astronautica*, 160, 414-420.

Patera, R. (2008). Space Event Detection Method. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 45(3), 554-559.

Vallado, D. & Cefola, P. (2012). Two-line element sets - Practice and use, *Proceeding of the International Astronautical Congress*, 5812-5825, Januari 2012.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., Ye, K. (2012). *Probability & statistics for engineers and scientists, 9th Edition*. Pearson Education, Upper Saddle River.

# A Prototype of True Dawn Observation Automation System (Prototipe Sistem Otomatisasi Observasi Fajar)

M. Basthoni

Walisongo State Islamic University, Semarang

---

## Riwayat naskah

Diterima: 02-11-2020  
Direvisi: 14-12-2020  
Disetujui: 15-12-2020

## Korespondensi:

M. Basthoni  
m.basthoni@gmail.com

## ABSTRAK

Dibutuhkan data pengamatan fajar yang memadai baik secara kualitas maupun kuantitas untuk mengoreksi atau memverifikasi kebenaran kriteria awal waktu subuh yang ditetapkan oleh Kemenag yang satu dekade terakhir ini diragukan kebenarannya oleh beberapa pihak. Namun, suhu dan kondisi lapangan yang kurang bersahabat menjadi tantangan tersendiri dalam pengamatan fajar. Dalam tulisan ini dideskripsikan pengembangan Sistem Otomatisasi Observasi Fajar (SOOF) yang meliputi kebutuhan *hardware*, *software* beserta instalasinya dan pengujian kinerja sistem di tiga lokasi yaitu Karimunjawa (-5,7S, 110,48T, 1 mdpl), Banyuwangi (-7,97S, 114,42T, 1 mdpl) dan Semarang (-6,97S, 110,29T, 15 mdpl). Sekilas tentang data yang dihasilkan juga disajikan dalam tulisan ini yang meliputi variabilitas karena cahaya Bulan dan polusi cahaya terhadap pendeteksian terbit fajar. Hasil uji coba menunjukkan bahwa secara umum sistem berjalan dengan baik, tetapi perlu *upgrade* modul GPS dan *Real Time Clock* sehingga sistem bisa bekerja dengan lebih baik. Sementara itu, analisis terhadap data yang direkam oleh sistem tersebut menunjukkan bahwa cahaya Bulan memiliki pengaruh yang cukup kuat terhadap waktu deteksi terbit fajar di lokasi dengan polusi cahaya rendah (Banyuwangi dan Karimunjawa), yaitu terpaut rata-rata sekitar 3,4° (13,6 menit) dibandingkan ketika saat tidak ada cahaya Bulan. Sementara itu, cahaya Bulan di daerah dengan polusi cahaya tinggi (Semarang) tidak memiliki pengaruh yang signifikan, yaitu terpaut rata-rata sekitar 0,25° (1 menit). Kajian ini juga mengusulkan bahwa fajar sidik terdeteksi pada saat posisi Matahari rata-rata  $-20 \pm 0,2$  derajat di bawah ufuk.

**Kata kunci:** prototipe, sistem otomatisasi, pengamatan fajar

## ABSTRACT

It requires adequate true dawn observation data both in quality and quantity to correct or verify the accuracy of the early true dawn criteria set by the Ministry of Religious Affairs of the Republic of Indonesia, which in the last decade had been doubted by several parties. However, temperature and unfavorable field conditions present challenges in observing the true dawn. This paper describes the development of the True Dawn Observation Automation System which includes hardware and software requirements, system installation, and performance testing in three locations: Karimunjawa (-5.78S, 110.48E, 1 m above sea level, Banyuwangi (-7.97S, 114.42E, 1 masl) and Semarang (-6.97S, 110.29E, 15 masl). An analysis of the data is also presented in this paper which includes the variability due to moonlight and light pollution on true dawn detection. The test results show that the system is running well but it needs an upgraded GPS and Real-Time Clock module so the system can work better. Meanwhile, analysis of the data recorded by the system shows that moonlight has a strong effect on true dawn detection in locations with low light pollution (Banyuwangi and Karimunjawa), an average difference of around 3.4° (13.6 minutes) compared to when moonlight was absent. Meanwhile, in areas with high light pollution (Semarang), it does not have a significant effect, an average difference of around 0.25° (1 minute). This study also proposes that true dawn is detected when the Sun's position averages  $-20 \pm 0.2$  degrees below the horizon.

**Keywords:** prototype, automated system, true dawn observations

## 1. Introduction

Determination of Muslim prayer times is discussed in Islamic studies, namely *fiqh* which is the view of Islamic jurists, namely *fuqaha*. It is based on the Koran and Hadith which relates to Muslim prayer obligations and the specified times. *Fuqaha* have agreed that the *subuh* prayer time begins when the true dawn rises (Sabiq, 1987).

Allah in al-Baqarah [2]: 187 describes the characteristics of dawn with a thin white thread as a sign of the start of fasting which is also a sign of the start of the *subuh* prayer time. Furthermore, the Prophet also explained that there are two types of dawn: (1) the dawn that vertically upwards like a wolf's tail which forbids eating and allows *subuh* prayers; and (2) the dawn that spreads over the horizon which permits the eating of *sahur* and prohibits *subuh* prayers (Narrated by Al-Bayhaqy; al-Bayhaqy, 1991).

Based on this, the term "true dawn" is used as a sign of entering the time of fasting and *subuh* prayers, and the opposite is the "false dawn" which appears before true dawn. In another word, the "true dawn" is a dawn that bodes an influx of dawn. It is named "true dawn" because dawn is the dawn of the "right" or the "true" dawn or the dawn "sodik" in Arabic. The rising of the true dawn begins with the emergence of white light that spreads along the eastern horizon then gradually brightening the sky.

Based on the Bortle scale<sup>1</sup>, the appearance of zodiacal light is an indicator that the brightness of the night sky is very dark which has a value of more than 21 mpsas. Meanwhile, based on the above hadith (as well as several other hadiths) the dawn *kadzib* or the false dawn was quite easy to observe in the era of the Prophet. Thus, it can be said that the true dawn is the

dawn detected in areas where the brightness of the night sky is more than 21 mpsas.

The term "true dawn" is also used by some scholars. Semeida & Hassan (2018) and Hassan *et al.* (2014) said that the true dawn is the beginning of twilight and the false dawn (pseudo dawn) as zodiacal light. Saksono & Fulazzaky (2020) also uses the term "true dawn" in determining the start of the *subuh* prayer time.

The Ministry of Religion of the Republic of Indonesia stipulates that the beginning of true dawn in Indonesia begins 80 minutes before sunrise or when the Sun is 20 degrees below the horizon. Lately, the truth of the criteria set by the Ministry of Religion of the Republic of Indonesia has begun to be doubted by several parties because it is only based on historical data on the opinion of ulama (Butar-Butar, 2018) and not based on adequate observations (Bahali *et al.*, 2018; Herdiwijaya, 2016).

To correct or verify the validity of these criteria is not enough based on observations of true dawn light in one or two locations only but long-term observations are needed in Indonesia by taking into account the variation and nature of each region. Based on these observational data, it will be known that the nature of true dawn light in Indonesia could be different from the theoretical true dawn that had been developed so far because the atmospheric conditions at the equator are higher than the other regions (Djamaluddin, n.d.-b).

True dawn research so far is still a snapshot observation and no long-term research has been carried out in several different locations. Each researcher tends to move independently in collecting research data in locations with limited area and time. With only a few data from that location, each of them concludes the results of their research. The conclusions of each researcher are often different from one another because the data is indeed taken at different locations and field conditions.

Herdiwijaya (2020), after analyzing the data for several days of observations at Bosscha Observatory, Cimahi, Bandung, Yogyakarta, and Kupang in the range of 2011 to 2018, proposed that the dawn rises in Indonesia when the Sun was at  $-18.5^\circ$  with 1-sigma of error of sun's depression angle obtained by assuming the darkest night sky brightness at 22.5 mpsas. Arumaningtyas *et al.* (2012) in their research in Bandung and

---

<sup>1</sup> John E. Bortle in his writing Gauging Light Pollution: The Bortle Dark-Sky Scale made measurements of several regions in the world based on the brightness of the night sky to 9 (nine) scales which was then called the Bortle scale. Bortle refers to the brightness limit that can be seen by the naked eye or naked-eye limiting magnitude (NELM) with the values of 8.0–4.0 or equal to 22.0~18.0 mag/arcsec<sup>2</sup>. The higher the value shown will indicate the smallest level of light pollution or enter a scale of 1 (excellent dark-sky site) and so on up to scale 9 (inner-city sky) which shows the highest level of light pollution. (Bortle, n.d.)

Jombang for 10 days concluded that the dawn was detected about 40 minutes before the Sun rises or when the Sun was at  $-10^\circ$ . In another location, Noor & Hamdani (2018) made observations on Tayu Pati Beach with the conclusion that dawn was detected when the Sun was at  $-17^\circ$ . Meanwhile, Saksono & Fulazzaky (2020) concluded that dawn was detected when the Sun was at  $-14^\circ \pm 0.6$  in Depok. Rohmah (2016) in his research for several days in Juwiring, Pati, Yogyakarta (Central Java), Kaibon (East Java), and Bandung (West Java) concluded that they were almost similar to Herdiwijaya's findings of around  $-18.5^\circ$ .

The findings of these studies are certainly not enough to correct or verify the validity of the  $-20^\circ$  criteria set by the Indonesian Ministry of Religious Affairs. Long-term observations in several regions in Indonesia are important to be done to find out the patterns of dawn occurrence in each location so that finally with a representative amount of data one can draw better conclusions.

However, observing the light of dawn requires greater effort than observing at other prayer times. Unfriendly temperatures and field conditions are often found in observations to get the best data in the best location away from urban light pollution. For example, the author's experience with the Lembaga Falakiah Nahdlatul Ulama (LFNU) Gresik during the dawn observations on Bawean Island Gresik (+150 km north of Java) for one week in July 2019, 'only' obtained one of the best data. Another experience when observing dawn on Karimunjawa Island Jepara (+100 km north of Java) for several days in May and October 2019 was disturbed by cloudy conditions during the observation. Based on this we need a system that facilitates observers in observing the light of dawn.

The development of a night sky brightness monitoring system that utilizes the Sky Quality Meter (SQM) has been carried out in other studies. Hanel (2018) developed SQMDroid, an Android application that integrates reading of SQM-LU data from an Android phone. Dogan *et al.* (2016) designed the Rotational Sky Quality Meter (R-SQM) to measure changes in the quality of the night sky around the Eastern Anatolia Observatory area of Turkey at varying angles in data recording. Raspberry Pi used a system that controls R-SQM to record data automatically.

Zamorano *et al.* (2017) designed the Telescope Encoder, Sky Sensor, and Wifi (TESS-W) for observing the brightness of the night sky under the Star4All Universidad Complutense Madrid project. In the TESS-W system, a custom PCB (Printed Circuit Board) is used as the main control and TSL237 photodiode sensor which is the same sensor used by Unihedron SQM.

Until now the use of SQM produced by Unihedron still dominates in observing the brightness of the night sky because it has good measurement accuracy and stability (Schnitt *et al.*, 2013). Falchi *et al.* (2016), for example, built a map of the sky brightness in the world manually using the Unihedron SQM which is directly linked in his observations. Based on this, in this paper, a true dawn observation system will be developed which automatically records the true dawn data whose results are automatically uploaded to cloud storage and can be accessed by the public for the next analysis process.

## 2. Methods

This paper will develop the celestial instrument for observing the dawn light. This study begins with the assembly of hardware needed, the installation of some software, and testing systems for observations of dawn in several locations (Table 1).

In general, the true dawn observation automation system is designed in Figure 1. Hardware requirements and system workflow are described in the following. The SQM used in this system is the SQM-LU-DL/SQM-LU version as the main sensor in recording the brightness of true dawn light. The SQM is connected to Raspberry pi Zero (as the main control) via a mini USB port or a standard USB port if we use Raspberry pi 2/3/4. This system is also designed to record true dawn images. The camera module is connected to the Raspberry pi through the camera module slot or via a USB port if we use an astronomical camera like the ZWO ASI series. A 5V 3A power adaptor is used as a power supply for Raspberry pi and USB 4G Wifi. After a true dawn light brightness data is recorded by SQM and a true dawn image recorded by the camera, the data is uploaded by Raspberry pi to Google Drive so that it can be accessed by the user for further analysis.

Data downloaded from the system are reduced by selecting data with clear weather and then categorized into several lunar

Table 1. Locations for testing the true dawn observation automation system.

Location	Coordinate	Elevation (m)	Time
Semarang	-6.97S, 110.29E	15	25/09/2020 – 25/10/2020
Karimunjawa	-5.78S, 110.48E	1	01/09/2020 – 28/10/2020
Banyuwangi	-7.97S, 114.42E	1	24/08/2020 – 25/10/2020



Figure 1. Flow chart of the true dawn observation system.

phases. In the next step, the selected data are analyzed by the gradient method per minute to determine the turning point of the curve which is an indication of true dawn obtained from the data with the formula:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \tag{1}$$

where  $m$  is gradient,  $y_1$  and  $y_2$  are the average magnitude per minute at minute  $n$  and  $n + 1$  respectively, while  $x_1$  and  $x_2$  are the average of sun depression angle at minute  $n$  and  $n + 1$ .

Furthermore, the formula is applied in Python with the criteria to determine early dawn rises to be tried in the range of 0.01 – 0.05 magnitude/minute gradient values. If the gradient is found to match the specified criteria and the data gradient thereafter is consistently greater than the criterion, then the beginning of the gradient of which the value is greater than the criterion is indicated as the dawn.

This paper will also present the effect of moonlight to determine the rising of true dawn in several observation locations as listed in Table 1.

## 2.1. Software Requirement

Software used in the system are:

- a. *Raspbian Operating System*  
Raspbian is a free Debian-based Linux operating system that has been optimized for Raspberry Pi hardware, including the Python programming language installed<sup>2</sup>.
- b. *Python Sky Quality Meter (PySQM)*  
PySQM is a Python language-based software designed by Nievas & Zamorano (2014) for reading, storing, and plotting data from SQM-LU and SQM-LE. This software will connect to SQM and perform several tests to connect to SQM to ensure it is ready for retrieval of sky brightness data. This program will automatically save data in two formats: .dat file and curve plotting image<sup>3</sup>.
- c. *Raspistill and Mencoder*  
*Raspistill* is a CLI (command-line interface) based program that functions to capture images by the camera module, while *Mencoder* is a complementary code of MPlayer application that can encode audio files, images, and videos into a video that is compatible with MPlayer applications and several other video player applications<sup>4</sup>.
- d. *AllSky*  
*AllSky* is a Raspberry Pi operated Wireless Allsky Camera<sup>5</sup>. We use this software when we use the Raspberry Pi HQ camera or ZWO ASI series in this system.
- e. *RClone*

<sup>2</sup> <https://www.raspberrypi.org/software/operating-systems>

<sup>3</sup> <https://guaix.fis.ucm.es/PySQM>

<sup>4</sup> <https://help.ubuntu.com/community/MEncoder>

<sup>5</sup> <https://github.com/thomasiacquin/allsky>



*RClone* (Rsync for Cloud Storage) is a CLI-based program that functions to synchronize files and local directories to and from some online storage (cloud storage), for example, Google Drive, Box, and so on<sup>6</sup>.

## 2.2. System Installation

There are six steps to install the system: (1) installation of the Raspbian operating system on an SD Card; (2) the configuration of the Raspbian operating system wifi so that it can be connected with USB 4G Wifi for the installation and configuration of the required software; (3) installation of *Remote.It* program to maintain the system remotely; (4) installation of the *PySQM* program in the Raspbian operating system; (5) installation of the *raspistill* and *mencoder* or *AllSky* program; and (6) installation of the *RClone* program. More details are described below.

The installation process of the Raspbian operating system is the following steps:

- a. Download the Raspbian image from The Raspberry Foundation website<sup>7</sup>;
- b. Flash the image to SD Card with one of the imager programs (*balenaEtcher*, *Win32DiskImager*, *imgFlasher*, or others).

Before installing other programs, we need to configure the WiFi network from Raspbian because the installation process for the next programs is done remotely via a WiFi network emitted by USB 4G Wifi. For this purpose, two files need to be made in the SD Card root directory which has been installed by Raspbian. The two files are empty files with the name *ssh* which functions to activate the *ssh* (secure shell connection) feature on the Raspbian OS. The second file is the *wpa\_supplicant.conf* file with the following contents:

```
country=ID
ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant
GROUP=netdev
update_config=1

network={
ssid="NETWORK-NAME"
psk="NETWORK-PASSWORD"
key_mgmt=WPA-PSK
}
```

<sup>6</sup> <https://rclone.org>

<sup>7</sup> <https://www.raspberrypi.org/downloads>

Where *ssid* data is replaced with the name of the wifi network used and the *psk* is filled with the wifi network password (Michael, n.d.).

The maintenance process or installation of any software to the system can be done remotely by installing *Remote.It* program with the following command (*Remote.It*, n.d.):

```
$>sudo apt update
$>sudo apt install remoteit
```

After the network configuration has been done, the Raspbian system can be accessed via the *ssh* with applications such as *Bitvise SSH Client*. Via *ssh* connection, the *PySQM* program can be downloaded with the command:

```
$> wget http://guaix.fis.ucm.es/sites/default/files/luminica_files/PySQM.tar.gz
```

and extract it with the command:

```
$> tar -xvzf PySQM.tar.gz
```

Before the execution of the *PySQM* program, it is necessary to adjust the data in the configuration file located in the *pysqm/config.py* file. Data that needs to be adjusted include (1) name and coordinates of the observation location; (2) the name of the SQM identification; (3) the connection port used by SQM with the Raspbian system; (4) location of observation data storage folder; and (5) axis boundaries for plotting curves from observational data (Lázaro, 2020; Nievas & Zamorano, 2014).

Up to this point, when the system is running, it automatically records the dawn light data detected by SQM. To complete the observation data, an application is needed to capture the image of dawn light so that it can be used as a comparison data for the SQM data. In this case, the application used is a *mencoder* and *raspistill* application that has a successive installation process as follows (Shaw, n.d.):

```
$>sudo apt-get install mencoder
```

The *raspistill* application does not need to be installed because it is already included in the Raspbian operating system. The camera module can be activated in the system via the command:

```
$>raspi-config
```

If we use Raspberry Pi HQ camera or ZWO ASI series in this system we need to install the *AllSky* program via the command:

```
$>sudo apt-get install git
$>git clone --recursive
  https://github.com/thomasjacquin/allsky.git
$>cd allsky
$>sudo ./install.sh
```

Observation data that is automatically recorded by PySQM, *raspistill*, *mencoder*, and *AllSky* will be stored on the local drive. To facilitate access to the data, the data will be uploaded automatically to cloud storage by the *RCIone* application with the following installation steps:

```
$>curl https://rclone.org/ install.sh |
sudo bash
```

The *RCIone* and Google Drive configuration process continues with the following commands and configurations:

```
$>rclone config

n/s/q> n          # choose n (new)
name>gdrive      # fill with free
                  # caption, for
                  # example, Gdrive
Storage>         # Select the number that
                  # matches the Google
                  # Drive number
client_id>       # can be left empty
client_secret>   # can be left empty
scope>           # select scope, for
                  # example 1
root_folder_id> # can be left empty
service_account_file>
                  /home/bas/myfile.jsn
                  n # This is where
                  the JSON file goes!
y/n>             # choose y for automatic
                  configuration
```

Furthermore, the PySQM program, *mencoder*, *raspistill*, *AllSky*, and *RCIone* are set up so that it will run automatically when the system boots and automatically records data at the desired time. For this purpose, an additional configuration is needed in the *rc.local* file (Dexter Industries, n.d.; The Raspberry Pi Foundation, n.d.).

### 3. Result and Discussion

The first step in testing the system started with the assembly of the system hardware as shown in Figure 1 and position-



Figure 2. System installation at Banyuwangi.

ing the system in a location where the eastern horizon is unobstructed as shown in Figure 2. The second step is to access the system via the *ssh* connection with the *Bitwise SSH Client*. After the *hostname* and *port* (provided by Remote.It) had been entered, now we are connecting to the system and then the user is asked to enter a username and password which by default are *pi* and *raspberry*, respectively.

The next step is to check that PySQM is running properly in the background with the command:

```
$>ps -aux | grep "pysqm"
```

Then, PySQM runs correctly in the background with the process ID (PID)1104.

The next step to run the PySQM program is not necessarily done because it is set to run automatically when the system boots, as well as the *mencoder*, *raspistill*, *AllSky*, and *RCIone* programs.

The results of reading the data generate photo data, *.dat* files, and SQM data plotting curves (Figures 3 and 4) and the data is automatically uploaded to the Google Drive account.

Data analysis using the gradient method shows that the Karimunjawa and Banyuwangi areas are categorized as dark areas or category 1 (excellent dark-sky) on the Bortle scale with a Night Sky Brightness (NSB) value of more than 21 mpsas while Semarang is a bright area or category 8 (city sky) with an NSB value less than 18 mpsas. Also, moonlight has a strong influence on the detection of true dawn in dark areas and less in bright areas.

Table 2. Comparison of average measurements at three locations in the several Moon phases and clear weather. NSB columns are the average night sky brightness while the Twilight columns summarize the Sun’s depression angle during which true dawn lights are observed.

Location	New Moon & First Quarter		Full Moon		Last Quarter	
	NSB	Twilight	NSB	Twilight	NSB	Twilight
Karimunjawa	22.6 ± 0.9	-20.0 ± 0.1	19.5 ± 0.6	-15.8 ± 1.3	20.3 ± 0.2	-17.5 ± 0.6
Banyuwangi	21.4 ± 0.2	-19.9 ± 0.2	19.2 ± 0.8	-16.7 ± 0.9	20.0 ± 0.1	-17.5 ± 0.7
Semarang	17.1 ± 0.2	-13.7 ± 0.7	17.1 ± 0.2	-14.4 ± 0.6	17.1 ± 0.1	-14.0 ± 1.0



Figure 3. One of the true dawn images recorded.

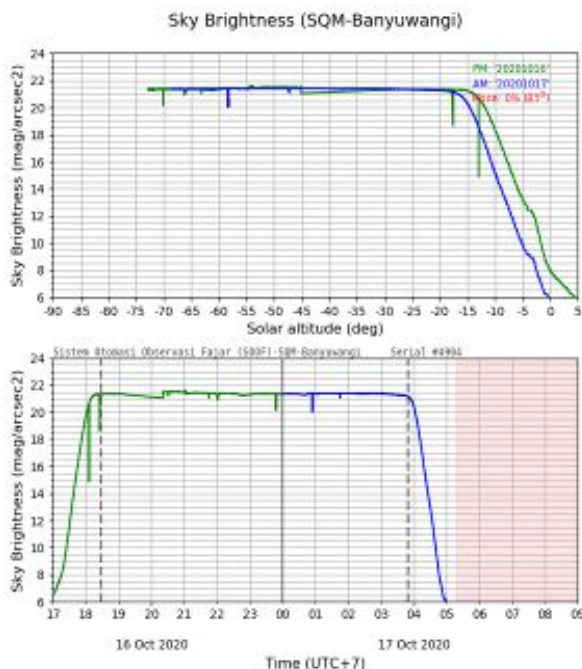


Figure 4. The sky brightness plot produced from a .dat file recorded by the system.

Table 2 shows that in dark areas (Karimunjawa and Banyuwangi) and no moonlight disturbance (new moon and first quarter), the true dawn light is detected when

the Sun is  $-20.0 \pm 0.1$  degrees in Karimunjawa and  $-19.9 \pm 0.2$  degrees in Banyuwangi. Meanwhile, in the full Moon phase, dawn was detected at  $-15.8 \pm 1.3$  degrees in Karimunjawa and  $-16.7 \pm 0.9$  degrees in Banyuwangi or a difference of around 4.2 degrees (16.8 minutes) and around 3.2 degrees (12.8 minutes). Meanwhile, in the last quarter phase, dawn was detected at  $-17.5 \pm 0.6$  degrees and  $-17.5 \pm 0.7$  degrees or a difference of around 3.9 degrees (15.6 minutes) in Banyuwangi and Karimunjawa.

Meanwhile, in bright areas (Semarang) when there is no moonlight, the dawn light is detected when the Sun is located at  $-13.7 \pm 0.7$  degrees. Meanwhile, in the full Moon phase and the last quarter phase, the dawn was detected at  $-14.4 \pm 0.6$  degrees and  $-14.0 \pm 1.0$  degrees, or a difference of around 0.7 degrees (2.8 minutes) and around 0.3 degrees (1.2 minutes).

The results in this paper also show that the suggestion of Saksono (n.d.) which stated that moonlight does not have a significant effect on the true dawn is correct when observations are made in locations with high light pollution. However, the results are different if the observations are made in areas with low light pollution or dark areas, such as Karimunjawa and Banyuwangi.

Based on the Bortle scale and the explanation of the Hadith above, the results in Karimunjawa and Banyuwangi (in clear weather and when there is no disturbance of moonlight and the night sky brightness is more than 21 mpsas) can be accepted as true dawn, when the position of the Sun in average is about  $-20 \pm 0.2$  degrees below the horizon.

The observations in Karimunjawa and Banyuwangi confirm the findings of previous studies which stated that true dawn is

detected in Labuan Bajo when the Sun is located -20 degrees below the horizon (Djamaluddin, n.d.-b), but it is different from the findings of Noor (2019) who observed in 5 locations (Imah Noong Lembang, Tayu Pati, Branta Madura, Pengkol Pasuruan and e-Maya Observatory Subang) and found that the deepest solar depression angle was -21.81 degrees with 1-sigma of error at Tayu site.

There is still a lot of data needed to correct or verify the criteria for the Ministry of Religion. However, the results in this paper can be used as a reference for future research and it can be one of the references and evidence that the system built in this study can work well. Further trials are still needed in several other locations so that sufficient representative data is obtained for further analysis to obtain better conclusions.

#### 4. Conclusion

Based on the testing of this system in Semarang, Banyuwangi, and Karimunjawa for several days, the true dawn observation automation system can work well. Data recorded by the system is automatically uploaded to the cloud storage so that it can then be accessed by other users for further analysis.

Moonlight in dark areas has a strong effect on the detection of the rising of true dawn or causes the true dawn to rise later than when there is no moonlight in an average of around 3.4 degrees (13.7 minutes). Whereas in bright areas there is no significant effect or an average difference of around 0.25 degrees (1 minute). This study also proposes that true dawn is detected when the Sun's position averages  $-20 \pm 0.2$  degrees below the horizon.

There are some limitations in this system that need to be developed for the perfection and improvement of the system. It would be better if the system was integrated with a GPS module that automatically reads the observation position and stores it in the system configuration file. Besides, the installation of the Real-Time Clock module is also quite important to anticipate the failure of time synchronization performed by the NTP server used in this system.

#### Acknowledgements

The author is grateful to Abdul Muid Zahid who has helped install the system at

Banyuwangi and the reviewers who have provided constructive input on this paper.

This article had been through blind reviews moderated by Dr. Johan Muhamad as the section editor.

#### References

- Al-Bayhaqy, A. bin al-H. bin A. (1991). *as-Sunan al-Kubro*. Dar al-Kutub al-'Ilmiyah.
- Arumaningtyas, E.P., Raharto, M., & Herdiwijaya, D. (2012). Morning twilight measured at Bandung and Jombang. *AIP Conference Proceedings*, 1454(1), 29-31. DOI: 10.1063/1.4730680
- Bahali, K., Samian, A.L., Muslim, N., & Hamid, N.S.A. (2018). Measuring the Sun Depression Angle of Dawn with a DSLR Camera. *Sains Malaysiana*, 47(11), 2877-2885. DOI: 10.17576/jsm-2018-4711-31
- Bortle, J.E. (n.d.). *Gauging Light Pollution: The Bortle Dark-Sky Scale*. Retrieved 8 March 2020, from <https://www.skyandtelescope.com/astro-nomy-resources/light-pollution-and-astro-nomy-the-bortle-dark-sky-scale/>
- Butar-Butar, A.J.R. (2018). *Fajar & Syafak dalam Kesarjanaan Astronomi Muslim dan Ulama Nusantara*. LKiS.
- Dexter Industries. (n.d.). *Run a Program On Your Raspberry Pi At Startup*. Retrieved 5 March 2020, from <https://www.dexterindustries.com/howto/run-a-program-on-your-raspberry-pi-at-startup/>
- Djamaluddin, T. (n.d.-a). *Benarkah Waktu Subuh di Indonesia Terlalu Cepat?* Retrieved 5 December 2019, from <https://tdjamaluddin.wordpress.com/2017/09/13/benarkah-waktu-subuh-di-indonesia-terlalu-cepat/>
- Djamaluddin, T. (n.d.-b). *Penentuan Waktu Shubuh: Pengamatan dan Pengukuran Fajar di Labuan Bajo*. Retrieved 1 October 2020, from <https://tdjamaluddin.wordpress.com/2018/04/30/penentuan-waktu-shubuh-pengamatan-dan-pengukuran-fajar-di-labuan-bajo/>
- Dogan, E., Ozbaldan, E.E., Shameoni, N.M., & Yesilyaprak, C. (2016). Automatic Rotational Sky Quality Meter (R-SQM) Design and Software for Astronomical Observatories. *Revista Mexicana Astronomia y Astrofisica (Serie de Conferencias)*, 48, 31–32.

- Falchi, F., Cinzano, P., Duriscoe, D., Kyba, C. C. M., Elvidge, C. D., Baugh, K., Portnov, B. A., Rybnikova, N. A., & Furgoni, R. (2016). The new world atlas of artificial night sky brightness. *Science Advances*, 2(6), e1600377. DOI: 10.1126/sciadv.1600377
- Hanel, A. & T. (2018). *SQMDroid - A universal SQM measurement device*. [http://unihedron.com/projects/darksky/cd/SQM-LU/SQMDroid/Poster\\_ALAN2-2.1.pdf](http://unihedron.com/projects/darksky/cd/SQM-LU/SQMDroid/Poster_ALAN2-2.1.pdf)
- Hassan, A.H., Abdel-Hadi, Y.A., Issa, I.A., & Hassanin, N.Y. (2014). Naked eye observations for morning twilight at different sites in Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 3(1), 23–26. DOI: 10.1016/j.nrjag.2014.02.002
- Herdiwijaya, D. (2016). Sky brightness and twilight measurements at Jogjakarta city, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 771(1), 012033. DOI: 10.1088/1742-6596/771/1/012033
- Herdiwijaya, D. (2020). On the beginning of the morning twilight based on sky brightness measurements. *Journal of Physics: Conference Series*, 1523(1), 012007. DOI: 10.1088/1742-6596/1523/1/012007
- Lázaro, R.D. (n.d.). *OBSOLETE Unattended Sky Quality Meter Station*. Retrieved 14 January 2020, from [http://rdlazaro.info/20-COMPU/80-RASPBERRY\\_PI/32-unattended\\_SQM\\_OLD.html](http://rdlazaro.info/20-COMPU/80-RASPBERRY_PI/32-unattended_SQM_OLD.html)
- Michael. (n.d.). *How To Setup Raspberry Pi Zero W Headless WiFi*. Retrieved 20 February 2020, from <https://core-electronics.com.au/tutorials/raspberry-pi-zero-w-headless-wifi-setup.html>
- Nievas, M. & Zamorano, J. (2014). *PySQM the UCM open source software to read, plot and store data from SQM photometers*. [http://eprints.ucm.es/25900/1/LICA\\_PySQM\\_v2.pdf](http://eprints.ucm.es/25900/1/LICA_PySQM_v2.pdf)
- Noor, L.A.H. (2019). *Analisis Perubahan Kecerahan Langit Waktu Fajar dengan Sky Quality Meter* [Institut Teknologi Bandung]. <https://repo.science.itb.ac.id/3597/>
- Noor, L.A.H. & Hamdani, F.F.R.S. (2018). The dawn sky brightness observations in the preliminary shubuh prayer time determination. *Qudus International Journal of Islamic Studies*, 6(1), 25–37. DOI: 10.21043/qijis.v1i1.2870
- Remote.it. (n.d.). *Installing remoteit on a Raspberry Pi running Raspbian or Raspberry Pi OS*. Retrieved 1 October 2020, from <https://support.remote.it/hc/en-us/articles/360045375151-Raspberry-Pi-Quick-Start-remote-itPi-SD-Card-image>
- Rohmah, N. (2016). The Effect of atmospheric humidity level to the determination of Islamic Fajr/morning prayer time and twilight appearance. *Journal of Physics: Conference Series*, 771(1), 012048. DOI: 10.1088/1742-6596/771/1/012048
- Sabiq, S. (1987). *Fiqh al-Sunnah*. Dar al-Kitab al-'Araby.
- Saksono, T. (n.d.). *Fajar Di Hari Dengan Polusi Cahaya Tertinggi*. Retrieved 10 October 2020, from <https://www.saksono.org/2020/08/fajar-di-hari-dengan-polusi-cahaya.html>
- Saksono, T. & Fulazzaky, M.A. (2020). Predicting the accurate period of true dawn using a third-degree polynomial model. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 9(1), 238–244. DOI: 10.1080/20909977.2020.1738106
- Schnitt, S., Ruhtz, T., Fischer, J., Hölker, F., & Kyba, C. (2013). Temperature Stability of the Sky Quality Meter. *Sensors*, 13(9), 12166–12174. DOI: 10.3390/s130912166
- Semeida, M.A. & Hassan, A.H. (2018). Pseudo dawn and true dawn observations by naked eye in Egypt. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(3), 286–290. DOI: 10.1016/j.bjbas.2018.03.005
- Shaw, A. (n.d.). *Working with the Raspberry Pi camera module*. Retrieved 5 March 2020, from <https://www.raspberry-pi-geek.com/Archive/2013/02/Working-with-the-Raspberry-Pi-camera-module>
- The Raspberry Pi Foundation. (n.d.). *rc-local*. Retrieved 5 March 2020, from <https://www.raspberrypi.org/documentation/linux/usage/rc-local.md>
- Universidad Complutense de Madrid. (n.d.). *PySQM*. Retrieved 10 February 2020, from <https://guaix.fis.ucm.es/PySQM>
- Zamorano, J., García, C., Tapia, C., Sánchez de Miguel, A., Pascual, S., & Gallego, J. (2017). STARS4ALL Night Sky Brightness Photometer. *International*

*Journal of Sustainable Lighting, 18(35),*  
49–54. DOI: 10.26607/ijsl.v18i0.21

# Optimasi Data Radar Hujan dan Perluasan Jangkauannya Menggunakan Jaringan Radar (Data Optimization of Rain Radar and Its Coverage Expansion Using Radar Network)

Tiin Sinatra<sup>1</sup>, Ginaldi Ari Nugroho<sup>2</sup>, Asif Awaludin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional, Bandung

## Riwayat naskah

Diterima: 27-11-2019

Direvisi: 25-09-2020

Disetujui: 22-10-2020

## Korespondensi:

A. Awaludin

asif.awaludin@lapan.go.id

## ABSTRAK

Dalam penelitian ini dibangun jaringan dua buah radar hujan SANTANU milik Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer (PSTA) LAPAN yang dipasang di Bandung (SANTANU 1) dan Sumedang (SANTANU 2). Tujuannya adalah untuk meningkatkan cakupan pantauan menjadi lebih luas sehingga dapat saling melengkapi data melalui dua tahapan, yaitu optimasi data kedua radar dan pembuatan citra mosaik. Tahapan pertama, yaitu optimasi data dilakukan terhadap data hasil pendeteksian masing-masing radar SANTANU, khususnya terhadap pengaruh atenuasi sinyal oleh hujan. Hasil optimasi divalidasi menggunakan citra *transportable radar*. Dari analisis bentuk objek hujan pada irisan citra kedua radar, diperoleh  $R^2$  sebesar 0,87 yang menunjukkan bahwa hasil perbandingan luas objek dari kedua SANTANU cukup baik. Optimasi data terhadap atenuasi dengan menggunakan metode koreksi atenuasi untuk radar cuaca regional (KA) dan path-integrated attenuation (PIA) menunjukkan bahwa peningkatkan nilai reflektivitas dengan KA 10 kali lebih besar dibandingkan dengan PIA. Bentuk objek yang terdeteksi oleh SANTANU menyerupai bentuk objek yang terdeteksi oleh *transportable radar* untuk reflektivitas lebih besar dari 30 dBZ. Tahapan kedua adalah integrasi kedua citra radar untuk menghasilkan citra mosaik yang kemudian divalidasi menggunakan *transportable radar*. Pembuatan citra mosaik dilakukan dengan tiga metode, yaitu *image stitching*, perata-rataan, dan skema Cressman. Citra mosaik terbaik dari kedua SANTANU (terkoreksi atenuasi) diperoleh dari metode skema Cressman yang memperlihatkan area irisan yang lebih menyatu serta mampu mempertahankan fitur-fitur objek. Namun, waktu pemrosesan mosaik dengan skema Cressman memerlukan waktu 17 menit, lebih lama dibandingkan dengan metode *image stitching*. Waktu pemrosesan bergantung pada faktor jumlah grid data dan memori hardware proses data. Validasi hasil mosaik dengan data referensi (*transportable radar*) yang dilakukan dengan menerapkan metode *structural similarity* (SSIM) memperlihatkan nilai rata-rata 0,32. Optimasi hasil mosaik dengan *speckle removal* mampu meningkatkan nilai SSIM hingga 59%.

**Kata kunci:** deteksi manuver, *moving windows curve fitting*, *two-line element*

## ABSTRACT

This research developed a network of two SANTANU rain radars of the Center for Atmospheric Science and Technology LAPAN installed in Bandung (SANTANU 1) and Sumedang (SANTANU 2). The objectives are to obtain wider coverage so that data can complement each other through two stages, namely radar data optimization and mosaic image creation. The first step is conducted by optimization of each radar data particularly due to rain attenuation. The results are validated using the transportable radar image. The shape analysis on a rain object detected in the slice of both radar images indicates 0.87 of  $R^2$  which shows the width of both

objects has a good similarity. Data optimization due to rain attenuation using attenuation correction for regional weather radar (KA) and path-integrated attenuation (PIA) indicate that the reflectivity improvement by KA is 10 times better than PIA. The object detected by SANTANU rain radar is similar to the transportable radar for reflectivity larger than 30 dBZ. The next step is an integration of both rain radar images to create a mosaic image and then validation using the transportable radar data. The production of the mosaic image is tried out using three methods: image stitching, averaging, and the Cressman scheme. The best result is presented by the Cressman scheme which shows a more integrated slice area and maintains the features of the object. However, the processing time of this scheme is 17 minutes which is longer than the image stitching method. The processing time depends on the number of grid data and hardware memory. Validation of the mosaic result by using transportable radar data by implementing the structural similarity index (SSIM) method yields an average value of 0.32. The improvement of SSIM value is obtained if speckle removal is applied by recording 59% of enhancement.

**Keywords:** rain radar, radar network, attenuation, mosaic

---

## 1. Pendahuluan

PSTA telah mengembangkan radar hujan dengan memanfaatkan radar navigasi untuk memantau hujan sejak tahun 2012. Kegiatan ini terus dilakukan hingga pada tahun 2016 dikembangkan sistem pemantauan hujan berbasis radar *X-band* yang dikenal dengan nama SANTANU. Radar ini memiliki cakupan deteksi yang lebih rendah dibandingkan dengan radar cuaca sehingga radar ini bersifat komplementer untuk menjangkau area yang tidak dijangkau radar cuaca yang ada. Penggunaan radar *X-band* menjadi tren dalam jaringan radar cuaca sebagai alternatif ataupun pelengkap terhadap radar *C* dan *S-band* karena kemampuannya memberikan resolusi lebih baik dibandingkan radar *C* dan *S-band* (Lengfeld *et al.*, 2014; Trabal *et al.*, 2013).

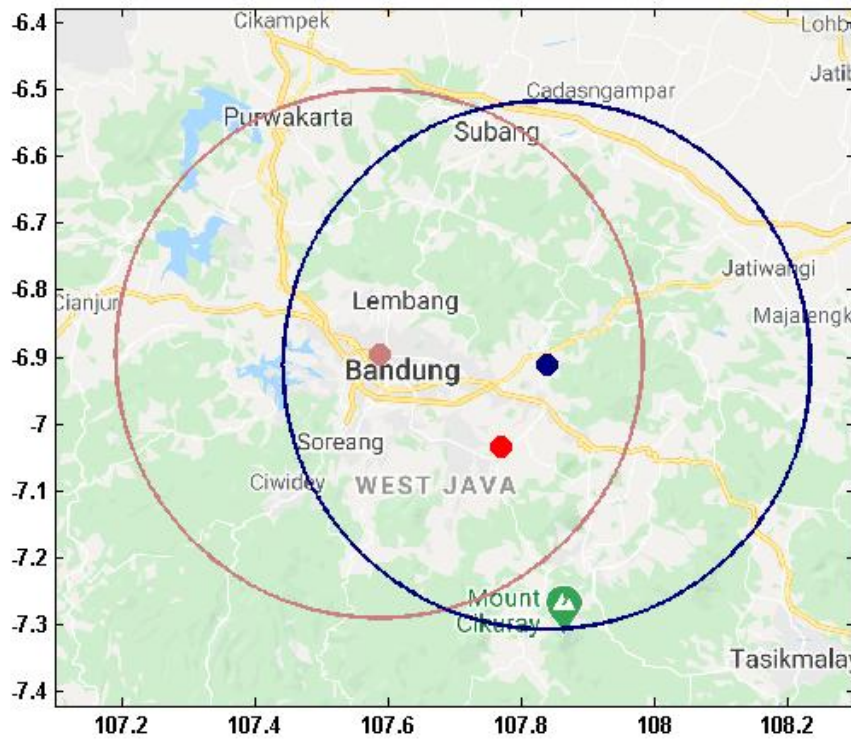
Di samping itu, perlu juga dilakukan usaha untuk meningkatkan jangkauan radar hujan ini. Salah satu metodenya adalah dengan mengembangkan jaringan radar hujan. Saat ini PSTA memiliki lima radar SANTANU, dua di antaranya dipasang di PSTA (SANTANU 1) dan di Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Sumedang (SANTANU 2), ditunjukkan oleh Gambar 1, yang dibangun dalam rangka mengembangkan jaringan radar. Secara umum, spesifikasi SANTANU 1 dan 2 relatif sama. Salah satu hal utama yang membedakannya adalah daya puncak.

SANTANU 1 memiliki daya puncak 4 kW, sedangkan SANTANU 2 memiliki daya puncak 6 kW (Sinatra & Nugroho, 2017).

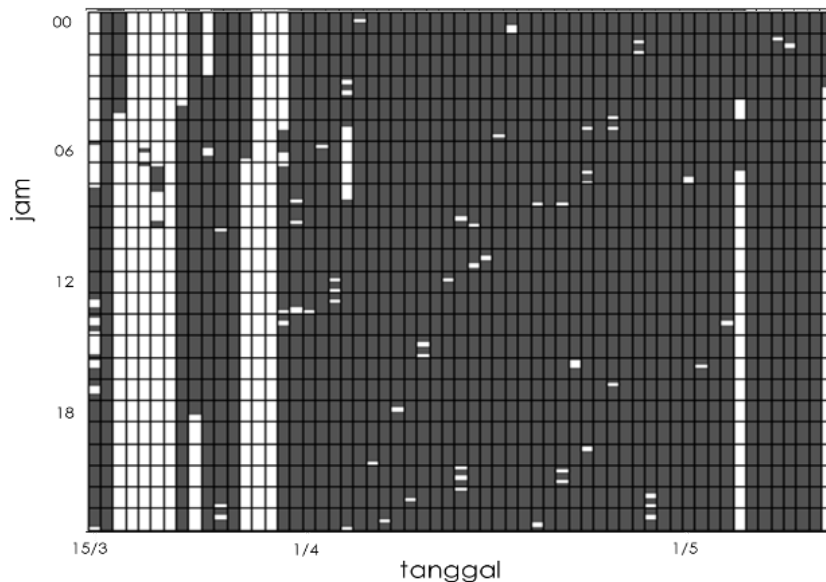
Jaringan radar dapat memberikan informasi jauh lebih baik dibandingkan dengan satu radar. Di samping memperluas cakupan pantauan, jaringan radar juga dapat saling melengkapi data pada wilayah yang berisikan. Misalnya, jika radar pertama tidak dapat mendeteksi terjadinya hujan akibat terhalang bangunan, radar kedua dapat mendeteksinya karena tidak terhalang apapun (Lengfeld *et al.*, 2014). Hal ini menunjukkan bahwa adanya jaringan radar sangat bermanfaat untuk memberikan informasi yang lebih baik. Di samping itu, jaringan radar juga dapat digunakan untuk saling kalibrasi dan koreksi data hasil dari pengamatan tiap radar, khususnya terhadap pengaruh atenuasi sinyal radar, dengan mempertimbangkan faktor geografis di area cakupan radar (Pedersen *et al.*, 2007).

Beberapa penelitian tentang pengembangan jaringan radar cuaca *X-band* telah dilakukan. Salah satunya adalah jaringan 3 buah radar cuaca *X-band* regional di Italia yang menggunakan metode komposit untuk menghasilkan citra mosaik jaringan radar. Namun, radar ini menggunakan antena *circular pencil beam* dengan *beamwidth* 3,2° dengan sudut elevasi 5° sehingga dapat meminimalkan munculnya clutter (Antonini *et al.*, 2017). Hal ini berbeda dengan tipe antena radar hujan SANTANU





Gambar 1. Titik coklat adalah lokasi SANTANU 1 di PSTA LAPAN Bandung dengan cakupan sinyalnya ditandai oleh lingkaran coklat. Titik biru adalah lokasi SANTANU 2 di BPAA LAPAN Sumedang dengan cakupan sinyalnya ditandai oleh lingkaran biru. Posisi *transportable radar* di titik berwarna merah.



Gambar 2. Hasil inventarisasi data radar cuaca LAPAN.

yang menggunakan *slotted waveguide array* yang mempunyai *beamwidth* vertikal sebesar  $22^\circ$  dengan sudut elevasi  $0^\circ$  sehingga memunculkan banyak *clutter* permukaan.

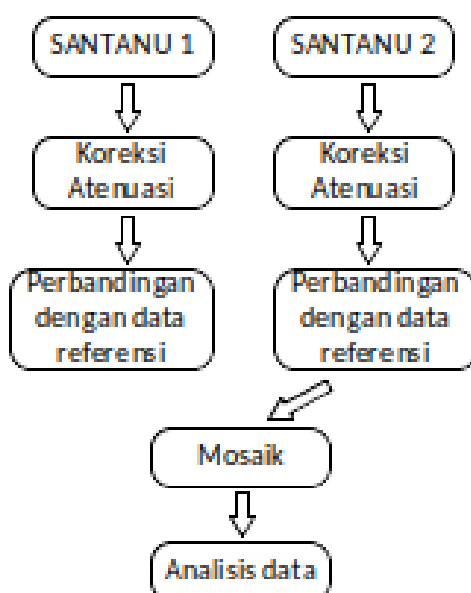
Untuk membentuk jaringan radar ini, optimasi data dari masing-masing radar dan

proses integrasi citra dari masing-masing radar menjadi sangat penting. Optimasi data terkait dengan koreksi data terhadap beberapa hal yang mempengaruhi kualitas sinyal radar. Salah satu hal yang sangat berpengaruh adalah atenuasi sinyal radar

X-band yang cukup besar oleh hujan dan awan. Metode yang biasa diterapkan untuk koreksi atenuasi adalah metode koreksi pada radar cuaca area lokal dan metode *path integrated attenuation* (PIA). Sementara itu, ada beberapa metode yang dapat digunakan untuk proses integrasi, antara lain metode Cressman, perata-rataan, dan image stitching. Adapun fokus objek citra radar yang berusaha diintegrasikan pada penelitian ini adalah objek pada daerah irisan kedua radar.

## 2. Data dan Metodologi

Data utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah data radar hujan X-band SANTANU 1 dan 2. Selain itu, kegiatan ini menggunakan data pendukung dari radar cuaca *transportable* yang juga beroperasi pada frekuensi X-band. Kampanye dengan menggunakan *transportable radar* LAPAN pada 13 Maret - 12 Mei 2017 ditempatkan di koordinat 107,7691° BB dan -7,0351° LS (titik merah pada Gambar 1). Adapun data radar yang terinventarisasi selama kurang lebih 2 bulan kampanye ditunjukkan pada Gambar 2. Warna abu-abu menunjukkan data radar yang tersedia, sedangkan warna putih menunjukkan data radar kosong. Kekosongan data pada awal-awal kampanye di bulan Maret terjadi akibat adanya *software error* (HWProxy error) dan gangguan listrik.



Gambar 3. Tahapan untuk optimalisasi data dan pembuatan citra mosaik jaringan radar.

Metode yang digunakan dalam riset ini terdiri dari dua tahapan utama, yaitu optimasi data kedua radar dan pembuatan citra mosaik. Kedua tahapan tersebut diperinci seperti ditunjukkan dalam Gambar 3. Data reflektivitas yang diperoleh dari masing-masing radar dioptimasi terlebih dahulu, kemudian hasilnya dibandingkan dengan data referensi. Selanjutnya, dilakukan proses penggabungan dari dua data radar, yaitu mosaik, dilanjutkan dengan analisis data mosaik.

Adapun untuk optimasi data, terdapat beberapa metode koreksi redaman hujan yang diuji dalam penelitian ini. Metode pertama adalah koreksi atenuasi (KA) untuk radar cuaca area lokal (Pedersen *et al.*, 2010) pada satu pemindaian menggunakan Persamaan (1).

$$Z_r = Z_{g,r} \left[ 1 + \frac{\alpha \sum_{i=0}^{r-1} Z_i}{C_1 n_{sampel}} \right] \quad (1)$$

dengan  $Z_r$  adalah reflektivitas yang telah disesuaikan pada jarak  $r$ ,  $Z_{g,r}$  adalah reflektivitas tak terkoreksi pada jarak  $r$ , adalah jumlah sampel dalam satu pindaian, dan  $\alpha$  dan  $C_1$  adalah konstanta empiris.

Metode kedua adalah metode *path integrated attenuation* (PIA) yang merupakan fungsi jarak untuk panjang gelombang yang sudah diketahui (Delrieu *et al.*, 2017; Lengfeld *et al.*, 2017) dan sering diterapkan pada radar cuaca Doppler area luas menggunakan Persamaan (2).

$$PIA(r) = 2 \int_0^r \left[ \frac{Z_{am}(s)}{\alpha} \right]^{\frac{1}{\beta}} ds \quad (2)$$

dengan  $Z_{am}(s)$  adalah reflektivitas yang terukur,  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah koefisien yang bergantung pada frekuensi radar, dan  $ds$  adalah jarak (km).

Reflektivitas yang telah dikoreksi kemudian dibandingkan dengan menggunakan data referensi, yaitu radar cuaca X-band *transportable* yang sudah tervalidasi. Langkah selanjutnya adalah mosaik data radar. Banyak referensi mengenai metode yang digunakan, salah satunya adalah dengan skema Cressman

(Zhang et al., 2005) menggunakan Persamaan (3).

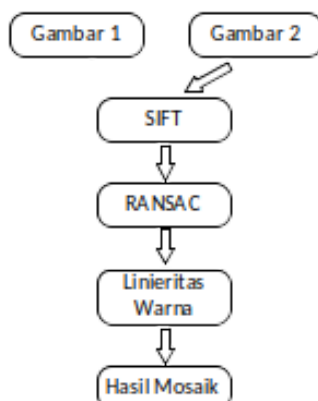
$$f_i^m = \frac{\sum_{j=1}^{nrad} w_{ij} f_{ij}^a}{\sum_{j=1}^{nrad} w_{ij}} \quad (3)$$

dengan  $f_{ij}^a$  adalah nilai pada grid ke- $i$  dari radar ke- $j$ ,  $f_i^m$  adalah reflektivitas mosaik pada titik *grid*, dan  $w_{ij}$  adalah bobot untuk nilai  $f_{ij}^a$ .

$$w_{ij} = \frac{R_1^2 - d_{ij}^2}{R_1^2 + d_{ij}^2} \quad (4)$$

Metode lain yang bisa dilakukan untuk mosaik citra adalah dengan *image processing (image stitching)* yang biasa digunakan pada pemrosesan *Very High Resolution (VHR) satellite stereo-pair imagery* (Daliakopoulos et al., 2019) dan citra *synthetic aperture radar (SAR)* (Dellinger et al., 2019). Tahapan yang dilakukan dengan *image stitching* ditunjukkan oleh Gambar 4.

*Scale Invariant Feature Transform (SIFT)* adalah algoritma yang digunakan untuk ekstraksi fitur tertentu dari suatu gambar/citra yang dapat digunakan untuk melihat kecocokan di antara sudut pandang yang berbeda dari suatu objek atau suatu pemandangan (Dellinger et al., 2019). *Random Sample Consensus (RANSAC)* adalah metode pemodelan *fitting* untuk mencari matriks homografi yang menyatakan keterkaitan antara dua gambar/citra pada bidang permukaan serta domain waktu yang sama (Dellinger et al., 2019). Penjelasan umumnya, metode ini melakukan pencarian titik-titik yang sama yang menjadi 'kunci' utama untuk menggabungkan dua gambar.



Gambar 4. Tahapan dari *image stitching*.

Setelah proses mosaik dilakukan, hal yang perlu dilakukan adalah melakukan perbandingan data SANTANU dengan data referensi, yaitu hasil pengamatan dari *transportable radar* dengan menggunakan *metode structural similarity (SSIM)* (Wang et al., 2004). Metode ini menghitung kesamaan gambar dengan memperhitungkan unsur iluminasi, kontras, dan struktur.

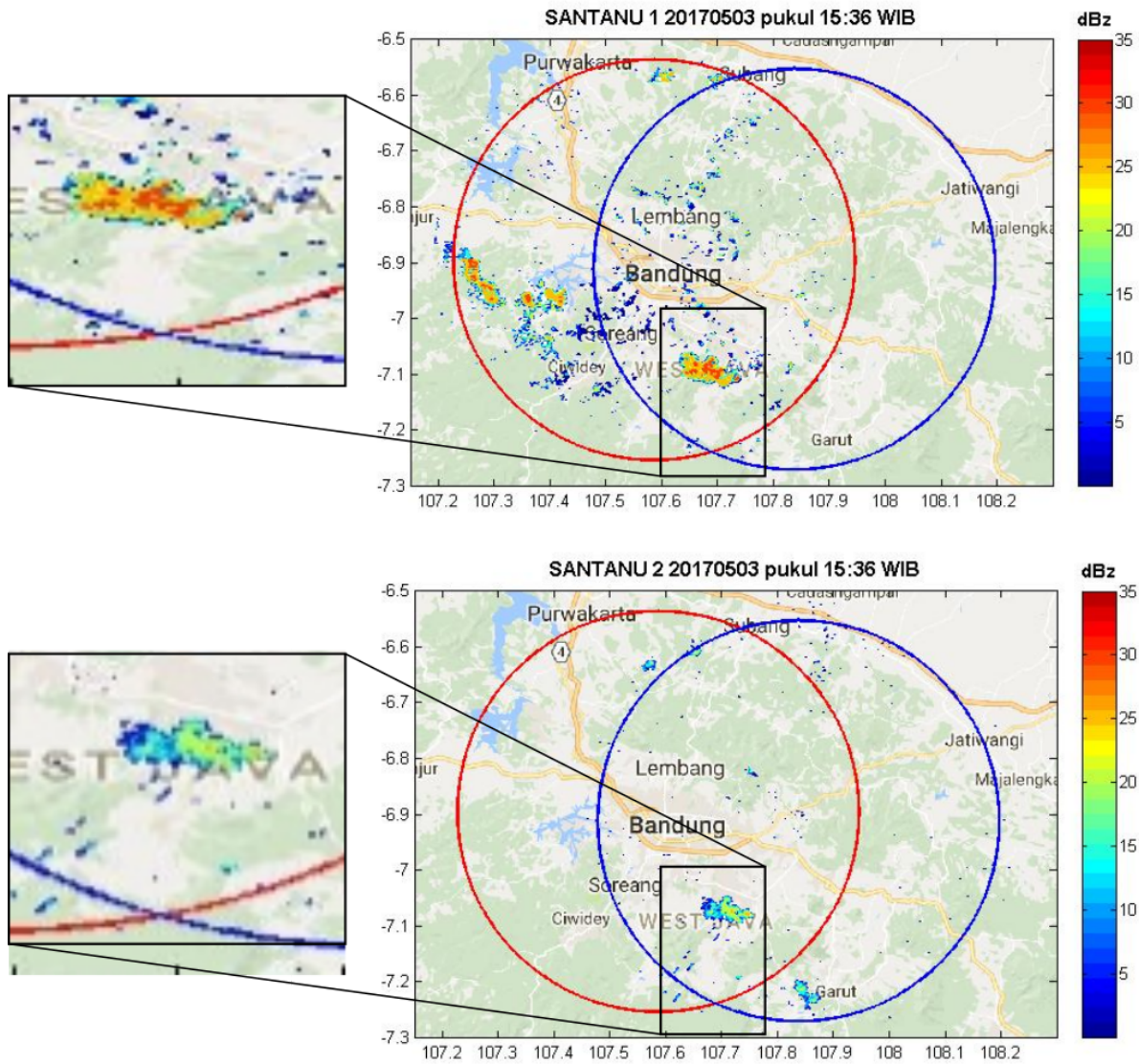
### 3. Hasil dan Pembahasan

Pada hasil inventarisasi data SANTANU 1 dan 2, dilakukan perbandingan antara kedua radar terhadap kejadian hujan yang terjadi pada bulan Maret-Mei 2017. Salah satu hasilnya terlihat pada Gambar 5 saat terjadi hujan pada 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB.

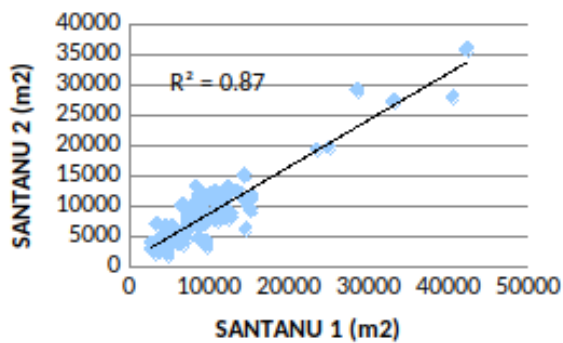
Secara umum, bentuk objek yang terdeteksi cukup mirip. Hal yang perlu diperhatikan adalah adanya sedikit perbedaan lokasi dari objek. Selain itu, reflektivitas hasil pantauan SANTANU 1 lebih besar dibandingkan SANTANU 2. Hal ini kemungkinan terjadi karena power SANTANU 2 lebih besar dibandingkan SANTANU 1 sehingga memiliki rentang reflektivitas yang lebih lebar. Pada beberapa kejadian (gambar tidak ditampilkan), objek yang terdeteksi SANTANU 1 di sekitar Lembang tidak terdeteksi oleh SANTANU 2. Hal ini terjadi karena objek terlalu jauh sehingga gelombang radar mengalami atenuasi.

Hal berikutnya yang dikerjakan adalah perbandingan luasan objek beberapa kejadian hujan yang terdeteksi pada daerah irisan SANTANU 1 dan 2 selama Maret–Mei 2017 menggunakan metode *shape analysis*. Hasilnya diplot-kan seperti yang terlihat pada Gambar 6. Dari analisis bentuk objek diperoleh  $R_2 = 0,87$  yang menunjukkan bahwa hasil perbandingan bentuk dan luas objek dari kedua SANTANU cukup baik.

Selanjutnya adalah optimasi data dengan menggunakan metode koreksi atenuasi (KA) dan *path-integrated attenuation (PIA)*, masing-masing dengan menerapkan Persamaan (1) dan Persamaan (2). Hasil optimasi dari kedua metode ini kemudian dibandingkan untuk mencari metode yang tepat dengan cara membandingkan distribusi nilai reflektivitas



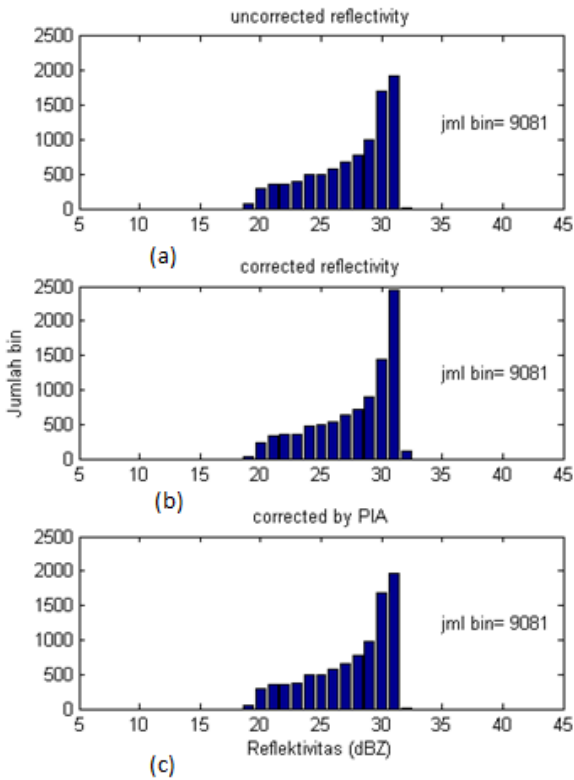
Gambar 5. Perbandingan pantauan SANTANU 1 (atas) dan SANTANU 2 (bawah) pada tanggal 3 Mei 2017.



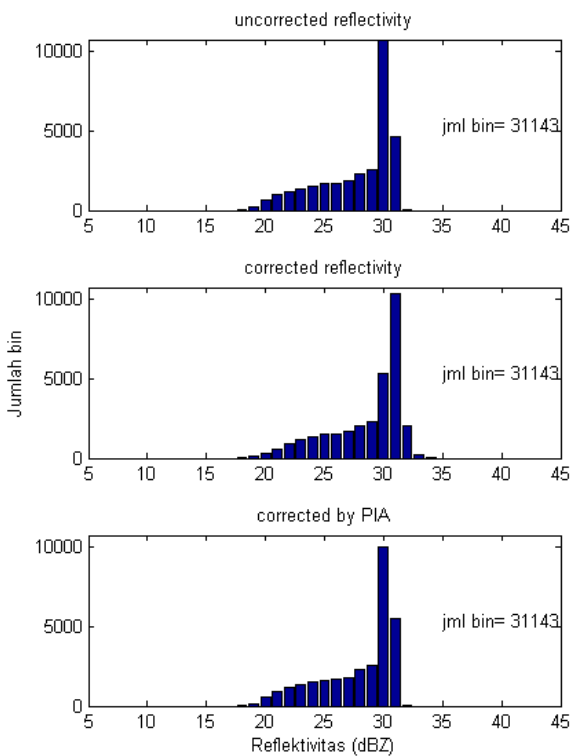
Gambar 6. Perbandingan luas objek hasil deteksi SANTANU 1 dan SANTANU 2 pada beberapa kejadian hujan selama Maret–Mei 2017.

objek hujan sebelum dan sesudah optimasi. Salah satu hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 7 dan Gambar 8.

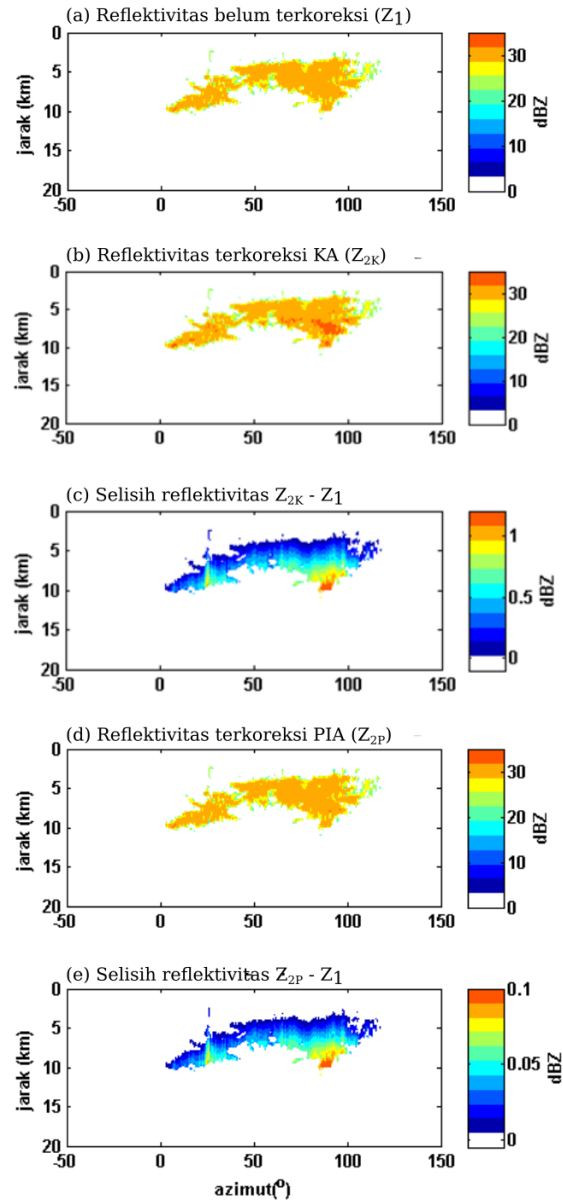
Gambar 7 menunjukkan histogram distribusi nilai reflektivitas satu objek. Tampak bahwa distribusi reflektivitas hasil optimasi PIA hampir sama dengan distribusi reflektivitas sebelum dioptimasi. Sementara itu, dengan KA terdapat perbedaan bentuk distribusi. Optimasi dengan metode KA meningkatkan nilai reflektivitas >30 dBZ. Kasus lain adalah objek pada tanggal 19 April 2017 yang diperlihatkan Gambar 8, menunjukkan dengan lebih jelas perbedaan distribusi reflektivitas antara sebelum dan sesudah diterapkannya KA. Dari kedua gambar ini menunjukkan bahwa peningkatan



Gambar 7. Distribusi reflektivitas pada objek hujan 17 Maret 2017 pukul 11.24 WIB (a) tanpa dikoreksi, (b) koreksi dengan KA, (c) koreksi dengan PIA.



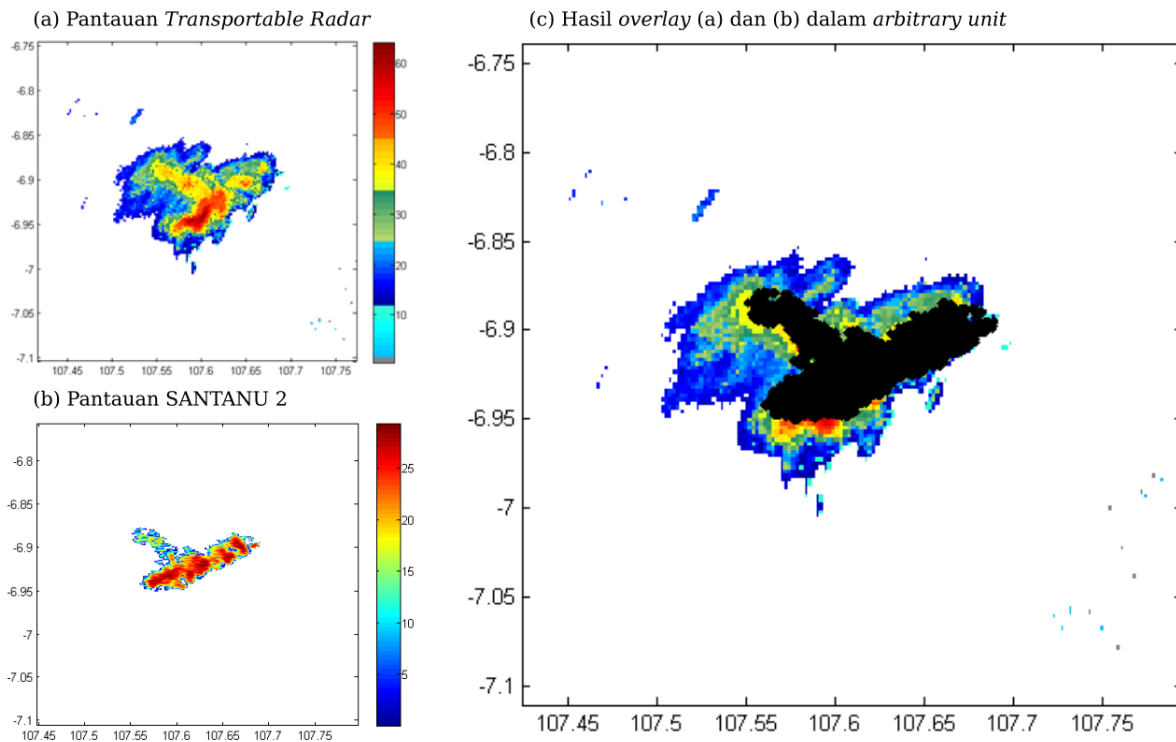
Gambar 8. Distribusi reflektivitas pada objek hujan 19 April 2017 pukul 14.06 WIB.



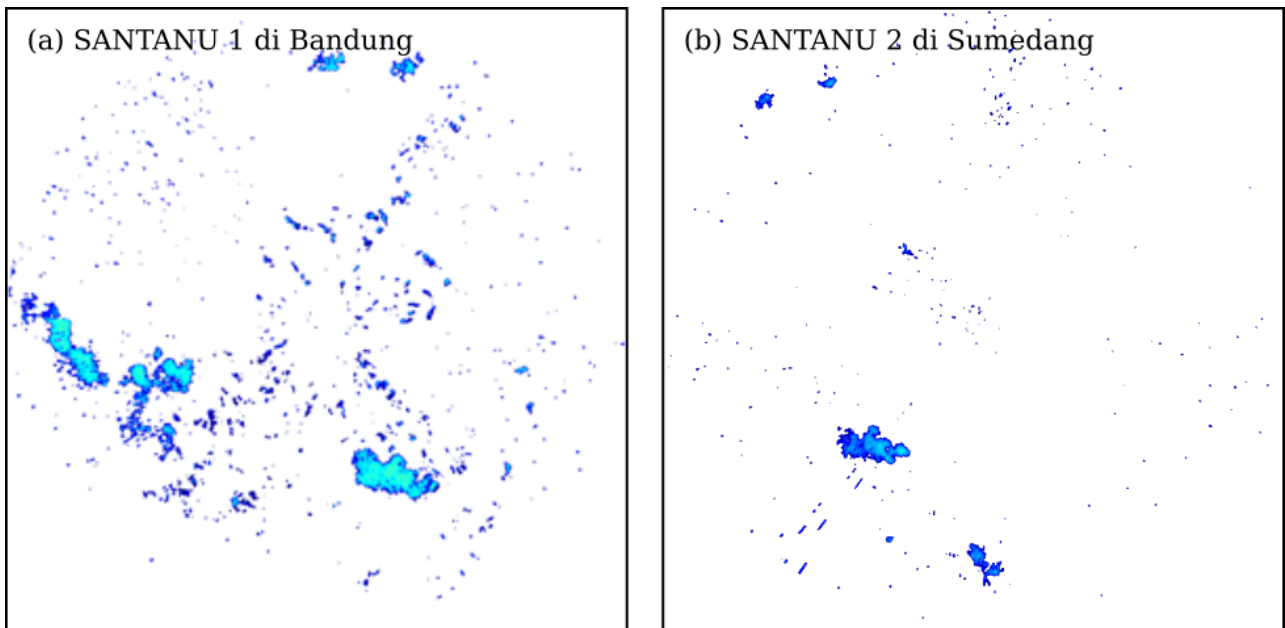
Gambar 9. Kondisi spasial reflektivitas pada objek hujan 17 Maret 2017 pukul 11.36 WIB (a) sebelum koreksi ( $Z_1$ ), (b) setelah koreksi KA, (c) selisih reflektivitas setelah koreksi KA, (d) setelah koreksi PIA, (e) selisih reflektivitas setelah koreksi PIA.

nilai reflektivitas dengan KA lebih besar dibandingkan dengan PIA.

Kondisi spasial sebelum dan sesudah diterapkannya optimasi nilai reflektivitas ditunjukkan oleh Gambar 9. Terlihat bahwa pada jarak yang semakin jauh dari radar, KA dapat meningkatkan nilai reflektivitas lebih baik dibandingkan dengan PIA. Peningkatan reflektivitas KA maksimum sekitar 1 dBZ (Gambar 9 (c)), lebih besar 10 kali dibandingkan dengan PIA (Gambar 9 (e)).



Gambar 10: Perbandingan hasil deteksi radar tanggal 17 Maret 2017 Pukul 11.30 WIB, (a) hasil deteksi *transportable radar*, (b) hasil deteksi SANTANU 2, (c) Hasil *overlay* kedua citra dengan warna hitam adalah hasil SANTANU 2.



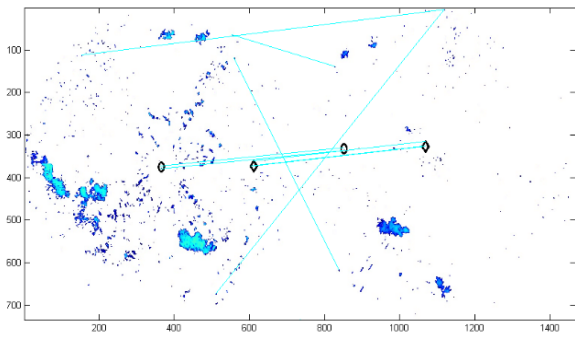
Gambar 11. *Raw image* hasil deteksi SANTANU pada tanggal 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB di Bandung (a) dan Sumedang (b). Posisi radar ada di titik tengah citra.

Dari hasil-hasil yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa optimasi dengan KA lebih baik dibandingkan dengan PIA. Oleh karena itu, untuk analisis selanjutnya, metode KA yang diterapkan.

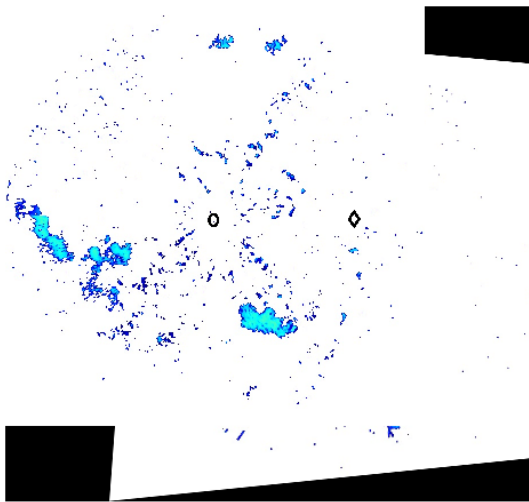
Langkah selanjutnya adalah melakukan perbandingan hasil pantauan SANTANU

dengan data referensi hasil pantauan *transportable radar*. Adapun hasilnya diperlihatkan pada Gambar 10. Bentuk objek yang terdeteksi oleh SANTANU 2 menyerupai bentuk objek yang terdeteksi oleh *transportable radar* untuk reflektivitas di atas 30 dBZ. Hal ini menunjukkan bahwa

hasil deteksi SANTANU mengikuti hasil deteksi *transportable radar* yang terlihat dari



Gambar 12: Proses *image stitching* untuk citra kedua radar tanggal 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB.



Gambar 13. Hasil akhir *image stitching* untuk kasus 3 Mei 2017 pukul 15.36 WIB.

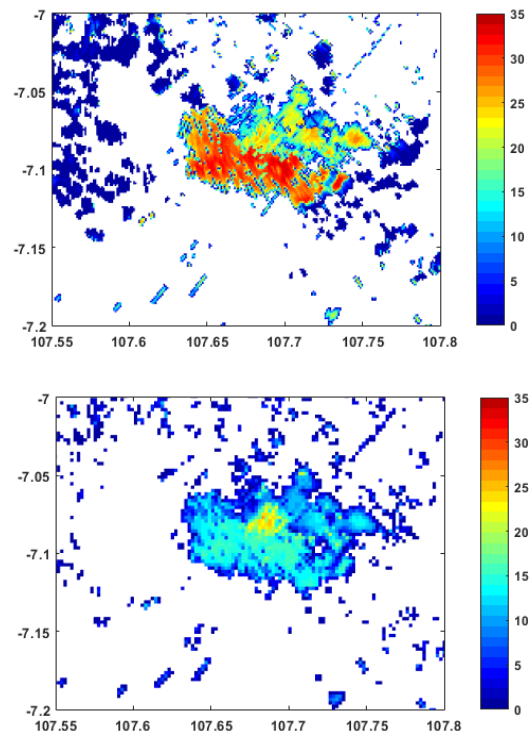
hasil *overlay* pantauan SANTANU terhadap objek pantauan *transportable radar*.

Selanjutnya adalah melakukan proses mosaik dengan mencoba tiga metode, yaitu *image stitching*, perata-rataan, dan skema Cressman. Untuk mosaik dengan *image stitching* digunakan *raw image* hasil deteksi masing-masing SANTANU. Gambar 11 merupakan *raw image* pada tanggal 3 Mei 2017 yang akan digunakan untuk diterapkan *image stitching* dengan SIFT.

Inti dari *image stitching* ini adalah mencari titik-titik yang sama yang menjadi kunci untuk menggabungkan dua gambar menjadi satu kesatuan. Jika menerapkan metode SIFT pada gambar yang diperlihatkan Gambar 11, maka hasil akhirnya adalah hanya Gambar 11 (a) atau

Gambar 11 (b) saja (saling menindih). Dengan menambahkan posisi radar pada kedua gambar, *image stitching* kembali diterapkan. Dalam prosesnya, diperoleh titik-titik yang berkorelasi yang diperlihatkan Gambar 12. Hasil akhir mosaik ditunjukkan oleh Gambar 13. Hasil ini kurang baik karena mengurangi fitur dari SANTANU 2 pada daerah irisannya. Daerah irisan hanya berasal dari deteksi SANTANU 1. Metode SIFT akan menghasilkan citra mosaik yang tidak bagus bila terdapat *speckle noise* yang mengakibatkan kesalahan deteksi dan menjadikan ketidakmiripan kedua citra radar semakin besar (Dellinger *et al.*, 2019). Oleh karena itu, metode ini tidak diterapkan untuk mosaik.

Selanjutnya, diterapkan perata-rataan untuk wilayah yang berkolokasi dan hasilnya ditunjukkan Gambar 14 (a). Data yang digunakan adalah data setelah dilakukan koreksi atenuasi. Hasil yang diperoleh menunjukkan gambar yang tidak menyatu. Kedua gambar terlihat seperti dua gambar yang saling berdekatan, tetapi tidak terpadu dengan baik. Hasil ini juga banyak dipengaruhi oleh *speckle noise*. Sementara



Gambar 14. Hasil mosaik dengan perata-rataan (atas) dan skema Cressman (bawah).

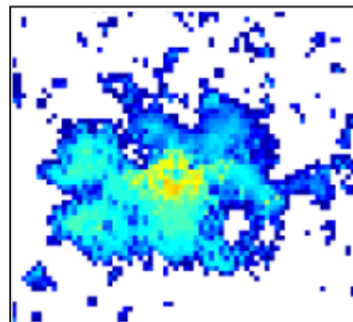
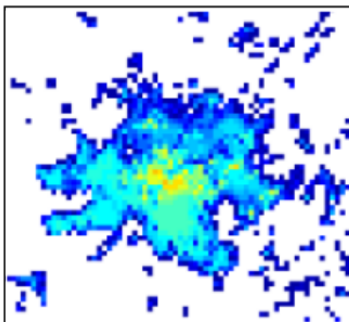
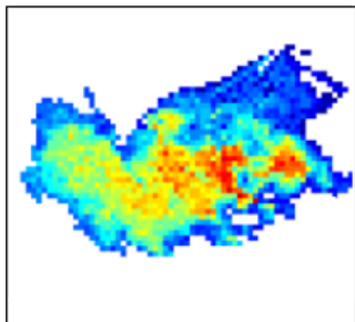
**Hasil Transportable Radar**

**Hasil Mosaik SANTANU**

(a) 5 Mei 2017, 15:30 WIB

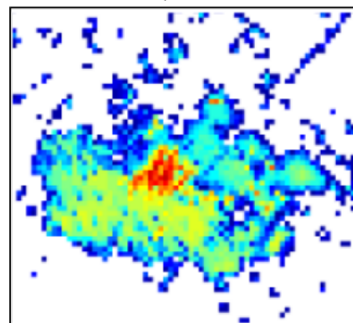
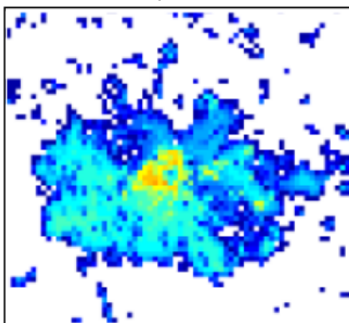
(b) 5 Mei 2017, 15:30 WIB  
SSIM = 0,3342

(c) 5 Mei 2017, 15:32 WIB  
SSIM = 0,3235



(d) 5 Mei 2017, 15:34 WIB  
SSIM = 0,3262

(e) 5 Mei 2017, 15:36 WIB  
SSIM = 0,3294



Gambar 15. Nilai SSIM hasil perbandingan objek deteksi hasil mosaik SANTANU pada beberapa waktu dengan *transportable radar* (sebelum *speckle removal*).

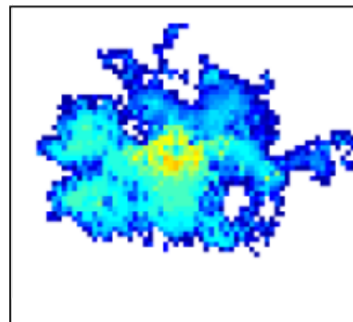
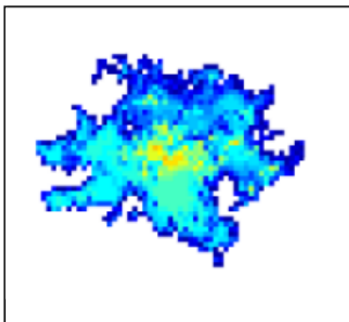
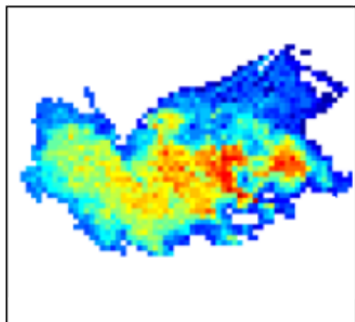
**Hasil Transportable Radar**

**Hasil Mosaik SANTANU**

(a) 5 Mei 2017, 15:30 WIB

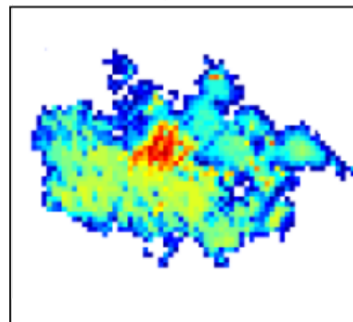
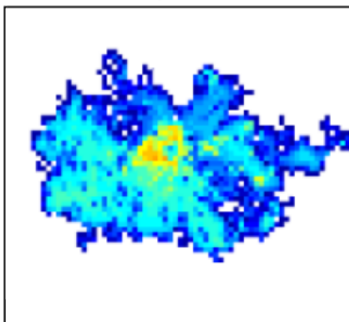
(b) 5 Mei 2017, 15:30 WIB  
SSIM = 0,5161

(c) 5 Mei 2017, 15:32 WIB  
SSIM = 0,4790



(d) 5 Mei 2017, 15:34 WIB  
SSIM = 0,4898

(e) 5 Mei 2017, 15:36 WIB  
SSIM = 0,4960



Gambar 16. Nilai SSIM hasil perbandingan objek deteksi hasil mosaik SANTANU pada beberapa waktu dengan *transportable radar* (setelah *speckle removal*).



itu, pada penggunaan metode Cressman dengan nilai *grid* 240 m × 240 m, hasil mosaik terlihat menyatu dengan baik seperti ditunjukkan dalam Gambar 14 (b) sehingga skema Cressman diterapkan untuk proses mosaik jaringan radar SANTANU.

Komparasi bentuk objek hasil mosaik dengan data *transportable radar* dilakukan dengan menerapkan SSIM. Salah satu hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 15. Resolusi temporal data *transportable radar* adalah 10 menit dan SANTANU 2 menit. Satu data dari *transportable radar* dibandingkan dengan beberapa objek hasil mosaik.

Nilai SSIM menunjukkan nilai rata-rata 0,32 (maksimum 1). Nilai kecil ini kemungkinan disebabkan oleh speckle yang banyak terdapat dalam mosaik. Oleh karena itu, perbandingan kembali dilakukan untuk objek tanpa speckle. Hasilnya adalah nilai SSIM meningkat seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 16. Perbandingan juga dilakukan terhadap objek hujan lainnya yang berada pada daerah irisan (gambar tidak ditampilkan). Dari perbandingan SSIM ini secara umum bentuk objek cukup baik.

#### 4. Kesimpulan

Pembuatan citra mosaik jaringan dua buah radar hujan SANTANU telah dilakukan dengan hasil citra mosaik terkoreksi atenuasi yang dibuat menggunakan metode Cressman memperlihatkan area irisan yang lebih menyatu serta mampu mempertahankan fitur-fitur objek dibandingkan dengan dua metode lainnya (images stitching dan metode rata-rata). Namun, waktu pemrosesan mosaik dengan skema Cressman memerlukan waktu ±17 menit, lebih lama dibandingkan dengan metode rata-rata dan *image stitching*. Waktu pemrosesan bergantung pada faktor jumlah grid data dan memori hardware proses data. Perlu dilakukan peningkatan dan perbaikan pada algoritma (*coding*) untuk menerapkan metode ini sehingga waktu yang diperlukan menjadi lebih singkat.

Validasi hasil mosaik dengan data referensi (*transportable radar*) yang dilakukan dengan menerapkan SSIM (kualitas citra berdasarkan struktur, iluminasi,

dan kontras) memperlihatkan nilai rata-rata 0,32. Optimasi hasil mosaik dengan speckle removal mampu meningkatkan nilai SSIM hingga 59%. Validasi hasil mosaik dengan data referensi AWS perlu dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat, tetapi hal ini memerlukan data dengan skala temporal yang cukup panjang.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Sains dan Teknologi Atmosfer LAPAN yang telah mendukung penelitian ini dalam bentuk dana penelitian *inhouse* 2017 dan fasilitas *transportable radar*. Terima kasih juga kami ucapkan kepada para teknisi yang ikut membantu dalam operasional radar.

#### Pernyataan Kontribusi

Seluruh penulis adalah kontributor utama. TS berperan melakukan eksperimen, mengumpulkan data, mengolah data, mengembangkan metode mosaik, dan menulis laporan. GAN berperan mengkoordinir eksperimen, mengontrol kualitas data, melakukan verifikasi dan perbaikan metode mosaik, serta perbaikan laporan. AA melakukan evaluasi dan perbaikan hasil analisis, menyusun alur makalah, dan menulis makalah. Seluruh penulis membaca dan menyetujui isi makalah.

Makalah ini telah melalui proses *blind review* yang dimoderasi oleh Dr. Noersomadi selaku editor.

#### Rujukan

- Lengfeld, K., Clemens, M., Münster, H., & Ament, F. (2014). Performance of High-Resolution X-band Weather Radar Networks the PATTERN Example. *Atmos. Meas. Tech.*, 7, 4151-4166.
- Trabal, J.M., Colom-Ustariz, J., Cruz-Pol, S., Pablos-Vega, G.A., & Mc Laughlin, D.J. (2013). Remote Sensing of Weather Hazards Using a Low Cost and Minimal Infrastructure Off-The-Grid Weather Radar Network. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 72-82.
- Sinatra, T. & Nugroho, G.A. (2017). Analisis Deteksi Hujan Berbasis Jaringan Radar X-Band di Bandung dan sekitarnya. Dalam *Dinamika Dan Teknologi*

- Atmosfer Benua Maritim Indonesia* (72-82).
- Pedersen, L., Jensen, N.E., & Madsen, H. (2007). Network Architecture for Small X-band Weather Radars: Test Bed for Automatic Inter-calibration and Nowcasting. *The 33rd Conference on Radar Meteorology, Cairns, Australia, 6-10 August*, 12B.2, 1-7.
- Antonini A., Melani S., Corongiu M., Romanelli, S., & Mazza, A. (2017). On the Implementation of a Regional X-Band Weather Radar Network. *Atmosphere*, 8, 25 (20pp).
- Pedersen, L., Jensen, N.E., & Madsen, H. (2010). Calibration of Local Area Weather Radar—Identifying Significant Factors Affecting the Calibration. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 2315-2329.
- Delrieu, G., Andrieu, H., & Creutin, J.D. (2012). Quantification of Path-Integrated Attenuation for X- and C-Band Weather Radar Systems Operating in Mediterranean Heavy Rainfall. *Journal Of Applied Meteorology*, 39 (6), 840-850.
- Lengfeld, K., Clemens, M., Merker, C., Münster, H., & Ament, F. (2016). A Simple Method for Attenuation Correction in Local X-Band Radar Measurements Using C-Band Radar Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33, 2315-2329.
- Zhang, J., Howard, K., Gourley, J.J. (2005). Constructing Three-Dimensional Multiple-Radar Reflectivity Mosaics: Examples of Convective Storms and Stratiform Rain Echoes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 22, 30-42.
- Daliakopoulos, I.N. & Tsanis, I.K. (2019). A SIFT-Based DEM Extraction Approach Using GEOEYE-1 Satellite Stereo Pairs. *Sensors*, 19, 1123 (18pp).
- Dellinger, F. Delon, J., Gousseau Y., Michel, J., & Tupin, F. (2019). A SIFT-Based DEM Extraction Approach Using GEOEYE-1 Satellite Stereo Pairs. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2012*, 3478-3481.
- Wang, Z., Bovik, A.C., Sheikh, H.R., & Simoncelli, E.P. (2004). Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13 (4), 600-612.