

ASTIGMATISMA TELESKOP 50 CM F/3,8 UNTUK OBSERVATORIUM NASIONAL TIMAU (ASTIGMATISM OF THE 50 CM F/3.8 TELESCOPE FOR TIMAU NATIONAL)

Rhorom Priyatikanto^{1,*}, Muhamad Dio Danarianto¹, Manoressy Tobias Bumbungan¹, Muhammad Bayu Saputra¹, Muhamad Zamzam Nurzaman¹, Mulya Diana Murti¹, Futikhatun Rohmah¹, Farahhati Mumtahana¹, Delina Legitawuri²

¹Pusat Sains Antariksa, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional
Jl. Dr. Djundjungan no. 133 Bandung 40173

²Program Studi Fisika, Institut Sains dan Teknologi Nasional
Jl. Moh. Kahfi II Jagakarsa, Jakarta 12640

*e-mail: rhorom.priyatikanto@lapan.go.id

Diterima 5 Desember 2018; Direvisi 8 Maret 2019; Disetujui 16 September 2019

ABSTRACT

Timau National Observatory will be a new observing facility in the south-eastern part of Indonesia, equipped with sub-meter and meter class optical telescopes. A Ritchey-Chretien telescope with 50 cm aperture and 190 cm focal length is expected as the work horse of survey program. In this paper, the level of astigmatism of the telescope is evaluated by means of geometric approach. The result shows that the astigmatism is considerably small and insignificantly affects the overall system performance. It is represented by the Zernike coefficient Z_2^2 of 200 nm, much smaller than the operational wavelength and camera pixel size.

Keywords: *optical telescope, aberration, astigmatism*

ABSTRAK

Observatorium Nasional Timau akan menjadi fasilitas observatorium di bagian tenggara Indonesia, dilengkapi dengan teleskop optik kelas submeter dan meter. Sebuah teleskop tipe Ritchey-Chretien dengan bukaan 50 cm dan panjang fokus 190 cm diharapkan menjadi kuda kerja dari program survei. Dalam makalah ini, tingkatan astigmatisme dari teleskop dievaluasi dengan menggunakan pendekatan geometris. Hasilnya menunjukkan bahwa astigmatisme cukup kecil dan tidak signifikan dalam memengaruhi kinerja sistem keseluruhan. Besarnya direpresentasikan oleh koefisien Zernike Z_2^2 yang nilainya 200 nm, jauh lebih kecil dari panjang gelombang operasional dan ukuran piksel kamera.

Kata kunci: *teleskop optik, cacat bayangan, astigmatisme*

1 PENDAHULUAN

Undang-undang Republik Indonesia No. 21 Tahun 2013 tentang Keantariksaan salah satunya memberikan amanah bahwa bangsa Indonesia harus menguasai sains antariksa yang meliputi, tetapi tidak terbatas pada, penelitian mengenai: (a) cuaca antariksa; (b) lingkungan antariksa; dan (c) astrofisika. Kegiatan penelitian keantariksaan tersebut dapat dilakukan dengan menggunakan sarana: (a) satelit; (b) stasiun antariksa; dan (c) fasilitas

observasi di ruas Bumi. Atas dasar tersebut serta diperkuat dengan kebutuhan akan adanya fasilitas observasi yang lebih maju, LAPAN bekerja sama dengan ITB, UNDANA, Pemprov NTT, dan Pemkab Kupang membangun Observatorium Nasional Timau di lereng Gunung Timau (9,5614° LS, 123,9465° BT, 1300 mdpl), Kabupaten Kupang, Nusa Tenggara Timur (Mumpuni *et al.*, 2018). Daerah ini dipilih karena memiliki karakteristik klimatologi yang mendukung pengamatan

astronomi pada jendela optik. Menurut studi yang dilakukan oleh Hidayat *et al.* (2012), daerah Kupang memiliki langit malam cerah selama sekitar 200 hari dalam setahun, salah satu yang terbaik di Indonesia.

Area seluas 30 hektar yang berada di kawasan hutan lindung dipinjam-pakai oleh LAPAN untuk keperluan pembangunan observatorium. Teleskop optik bercermin majemuk dengan diameter efektif 3,8 m (Kurita *et al.*, 2004; 2010) akan menjadi fasilitas andalan di observatorium ini. Selain itu, terdapat pula teleskop berdiameter kecil (50 cm) untuk keperluan pengamatan survei dan tindak lanjut. Teleskop ini direncanakan sebagai sistem teleskop robotik yang dapat bekerja secara otonom untuk memenuhi target pengamatan yang telah ditentukan.

Pada akhir tahun 2016, Pusat Sains Antariksa LAPAN telah mengadakan 2 buah sistem teleskop yang dapat dikendalikan dari jarak jauh dan juga secara otonom (Bumbungan *et al.*, 2018). Keduanya merupakan teleskop dengan arsitektur Ritchey-Chretien yang memiliki cermin primer dan sekunder berbentuk cekung hiperboloid dengan diameter 50 cm. Cermin sekunder teleskop tersebut berbentuk cembung hiperboloid. Sistem pertama memiliki nisbah fokus $f/3,8$ atau panjang fokus 190 cm sehingga dapat dianggap sebagai teleskop ‘cepat’ dengan medan pandang lebih lebar. Sistem kedua memiliki nisbah fokus $f/8,0$ atau panjang fokus 400 cm. Makalah kali ini akan berfokus pada sistem pertama yang diarahkan untuk misi pengamatan survei.

Teleskop dengan arsitektur Ritchey-Chretien atau juga dikenal sebagai *aplanatic Cassegrain* telah bebas dari *spherical aberration* dan koma yang biasa ditemui pada teleskop cermin, tetapi mengalami astigmatisme (Schroeder, 2000). Astigmatisme merupakan cacat optik yang menyebabkan citra objek titik (bintang) yang

berada jauh dari sumbu optik (*off-axis*) tampak lonjong atau kabur. Berbeda dengan koma, astigmatisme bersifat simetris sehingga tidak terlalu menurunkan kualitas citra yang dihasilkan.

Karena itulah, arsitektur Ritchey-Chretien banyak digunakan pada teleskop-teleskop besar dewasa ini. Meski demikian, astigmatisme membatasi lebar medan pandang efektif yang dihasilkan oleh teleskop (Schroeder, 2000). Di luar batasan tersebut, kualitas citra dianggap rendah.

Sebagai bagian dari karakterisasi sistem pengamatan yang baru diadakan, maka dilakukanlah pengukuran besaran astigmatisme yang dialami oleh teleskop 50 cm $f/3,8$ yang akan dioperasikan di Observatorium Nasional Timau. Metode dan data yang digunakan untuk keperluan ini diulas pada bagian 2, sedangkan hasil dan pembahasannya diberikan pada bagian 3. Kesimpulan dari studi ini diberikan pada bagian 4.

2 METODE DAN DATA

2.1 Metode Pengukuran Astigmatisme

Muka gelombang cahaya (*wave front*) yang mencapai bidang potret teleskop (*pupil plane*) dapat dideskripsikan dengan persamaan polinom Zernike (1934). Dalam tata koordinat polar, persamaan tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (McLeod, 1996; Lakshminarayanan dan Fleck, 2011):

$$\begin{aligned}
 W = Z_0^0 + Z_1^1 \rho \cos \varphi + Z_1^{-1} \rho \sin \varphi \\
 + Z_2^0 (2\rho^2 - 1) + Z_2^2 \rho^2 \cos 2\varphi \\
 + Z_2^{-2} \rho^2 \sin 2\varphi \\
 + Z_3^1 (3\rho^3 - 2\rho) \cos 2\varphi \\
 + Z_3^{-1} (3\rho^3 - 2\rho) \sin 2\varphi \\
 + \dots
 \end{aligned}
 \tag{2-1}$$

dengan $\rho(r)$ dan $\varphi(\theta)$ menyatakan koordinat polar pada bidang potret yang telah dinormalisasi. Koefisien Z_0^0 , Z_1^1 , dan Z_1^{-1} berturut-turut berkaitan dengan pergeseran fase dan kemiringan pada

dua arah (x -tilt dan y -tilt). Koefisien Z_2^0 berkaitan dengan besaran *defocus*, sedangkan Z_2^2 dan Z_2^{-2} berasosiasi dengan astigmatisme pada arah x dan y . Koefisien Z_3^1 dan Z_3^{-1} berkaitan dengan cacat bayangan koma, sedangkan komponen dengan orde lebih tinggi tidak dituliskan.

Pada teleskop Ritchey-Chretien dengan komponen optik yang telah terkolimasi dengan baik, koefisien Zernike yang berkaitan dengan *tilt* dan koma dapat diabaikan sementara nilai koefisien Z_2 menjadi fokus. Luna *et al.* (2007) mengusulkan metode geometri untuk mengukur besaran astigmatisme yang dialami teleskop, yakni dengan mengukur tingkat kelonjongan citra tak fokus dari sebuah bintang.

Bila dinyatakan dalam tata koordinat kartesian (x, y, z), tepian citra tak fokus dari sebuah bintang dapat direpresentasikan oleh persamaan elips sebagai berikut:

$$r^2 = \frac{x^2}{\left\{ \left[-z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 + \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \right\}^2} + \frac{y^2}{\left\{ \left[-z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 - \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \right\}^2} \quad (2-2)$$

dengan koefisien Z_2^{-2} yang simetri dengan Z_2^2 . R dan a berturut-turut menyatakan panjang fokus dan radius cermin primer teleskop. Adapun sumbu panjang dan sumbu pendek dari elips tersebut adalah

$$A = \left[-z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 + \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \quad (2-3)$$

dan

$$B = \left[-z + \frac{2R^2}{a^2} (2\sqrt{3}Z_2^0 - \sqrt{6}Z_2^2) \right] \frac{a}{R} \quad (2-4)$$

Eksentrisitas dari elips dinyatakan sebagai

$$e = \sqrt{1 - \frac{B^2}{A^2}} \quad (2-5)$$

sedangkan besaran astigmatisme dapat dihitung dengan persamaan

$$Z_2^2 = \frac{A-B}{4\sqrt{6}} \frac{a}{R} \quad (2-6)$$

Pada praktiknya, Z_2^2 dapat dihitung setidaknya dengan dua cara. Pertama, dengan menggunakan Persamaan 2-6 secara langsung. Cara kedua adalah dengan mengukur eksentrisitas citra tak fokus yang memiliki A beragam dan diambil pada jarak z berbeda. Sebagaimana didemonstrasikan oleh Luna *et al.* (2007), kurva eksentrisitas sebagai fungsi sumbu panjang atau $e(A)$ bersifat unik dan bergantung pada besar astigmatisme yang dialami sistem. Dengan memadukan Persamaan 2-5 dan Persamaan 2-6, didapatkan

$$e = \sqrt{1 - \left(1 - 4\sqrt{6} \frac{RZ_2^2}{a} \right)^2} \quad (2-7)$$

Koefisien Z_2^2 dapat ditentukan dengan mencocokkan Persamaan 2-7 dengan data e sebagai fungsi A .

2.2 Citra Altair

Sebagaimana ditunjukkan oleh Luna *et al.* (2007), citra bintang yang diambil pada beberapa jarak di luar fokus (*out focus*) adalah data utama yang diperlukan untuk pengukuran astigmatisme dan kelonjongan citra tak fokus tersebut merupakan inti dari metode geometri yang digunakan.

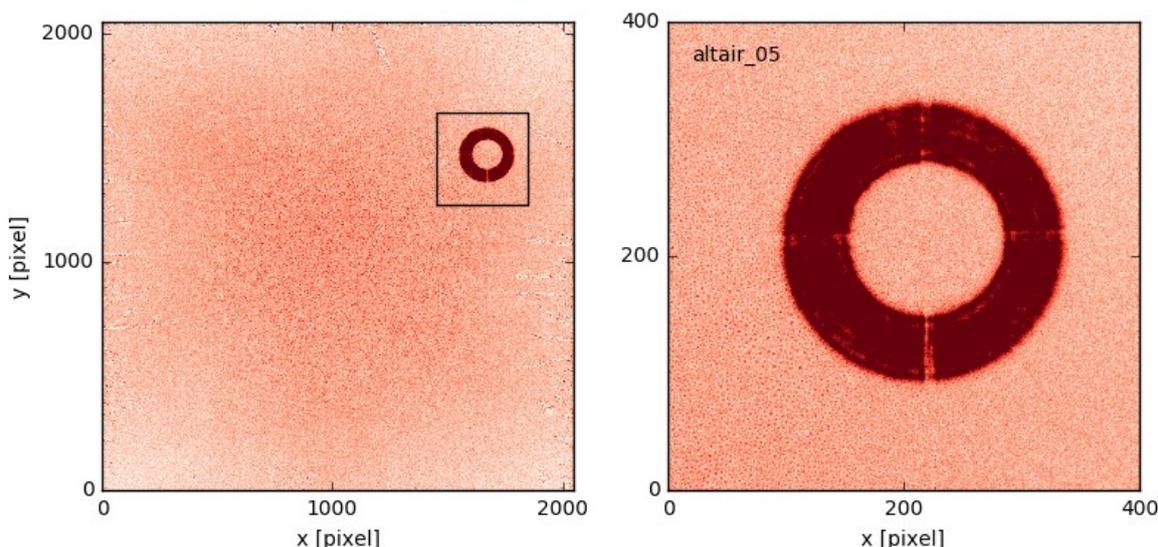
Dalam studi ini, citra tersebut diambil menggunakan kamera *Charge-Coupled Device* (CCD) tipe FLI PL4240 yang terpasang di belakang teleskop 50 cm $f/3,8$. CCD tersebut berukuran 2048×2048 piksel berbentuk persegi dengan sisi 13,5 mikron/piksel. Teleskop juga dilengkapi dengan RotoFocuser yang berfungsi untuk mengatur orientasi sudut kamera dan jaraknya dari titik fokus. Konfigurasi ini menghasilkan skala bayangan sekitar 1,47 detik busur per piksel pada bidang fokus dan medan

pandang hingga 50' × 50' (1,7 kali ukuran Bulan).

Citra yang digunakan dalam studi ini adalah citra Altair (*a Aquilae*) yang memiliki magnitudo semu visual 0,75 dipotret tanpa filter pada tanggal 18 September 2018 sekitar pukul 20.00 waktu lokal. Saat itu, Altair berada pada ketinggian sekitar 60°. Sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 2-1, Altair diposisikan sekitar 770 piksel atau 18,8 menit busur dari sumbu optik teleskop sehingga astigmatisma diharapkan dapat diukur. Citra tak fokus diambil pada jarak antara -12 mm hingga +4 mm dari bidang fokus dengan waktu paparan (*exposure time*) 0,1 detik. Dengan waktu paparan ini, hanya citra fokus Altair saja yang mengalami saturasi. Prosedur reduksi *simple autodark* dilakukan pada setiap citra sehingga citra lebih bersih dari derau dan bias. Jauh dari bidang fokus, citra bintang akan tampak seperti cincin/donat karena merepresentasikan cahaya bintang yang diterima cermin primer yang terhalang oleh cermin sekunder. Untuk setiap jarak, dilakukan

beberapa kali pemotretan dan analisis lebih lanjut dilakukan terhadap lima citra yang diperoleh. Karena kondisi cuaca yang berubah-ubah, *signal-to-noise ratio* (SNR) yang didapatkan pada tiap citra cukup bervariasi. Pada kondisi berawan, SNR bernilai lebih rendah dan citra tampak kurang kontras dibandingkan langit latar depan. Hampir semua citra yang dianalisis memiliki SNR ≥5, tetapi ada satu citra dengan SNR ≈ 2 dan algoritma yang digunakan tidak berhasil mengidentifikasi tepi elips dari citra tersebut.

Saat pengambilan citra, CCD didinginkan hingga temperatur -20 °C untuk meminimalisasi *dark noise*. Pada temperatur ini, kristal es terbentuk di bagian tepi citra, kemungkinan karena bagian sensor tidak terisolasi dengan baik sehingga uap air masuk dan mengalami kondensasi. Keberadaan citra dianggap tidak memengaruhi hasil pengukuran astigmatisma karena jejak kristal es yang terbentuk tidak mencapai daerah dekat Altair.

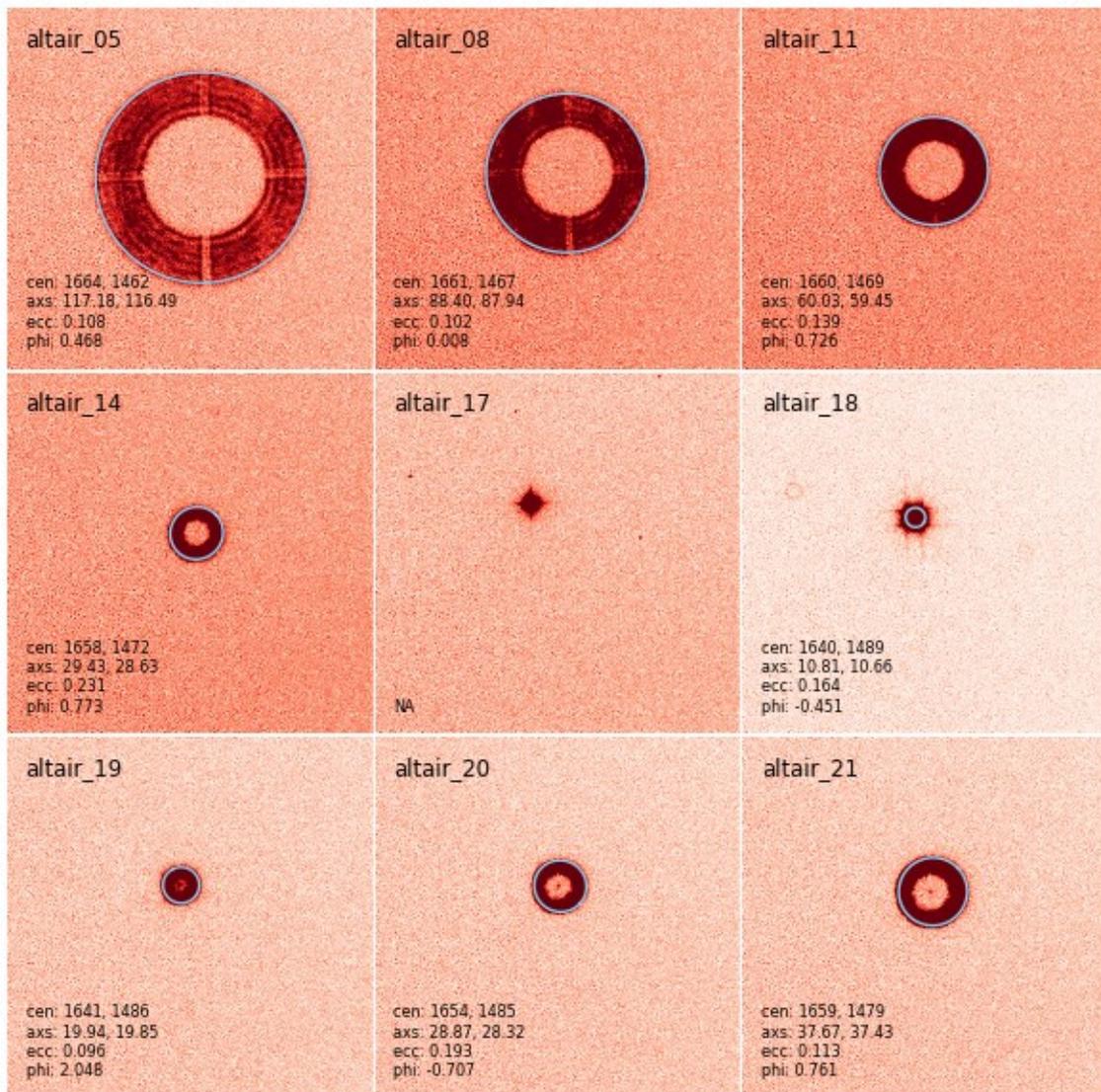


Gambar 2-1: Citra tak fokus dari Altair (kiri) yang diambil pada tanggal 18 September 2018 sekitar pukul 20.00 waktu lokal. Citra *full-frame* (kiri) mengindikasikan adanya jejak kristal es di tepi citra dan background level yang tidak rata. Untuk mempermudah analisis, citra dipotong di sekitar lokasi Altair (kanan).

2.3 Identifikasi dan Karakterisasi Elips

Sebagaimana tampak pada Gambar 2-1, citra tak fokus yang dihasilkan tampak sebagai cincin atau donat yang hampir lingkaran. Ekstraksi fitur elips dilakukan menggunakan algoritma komputer yang terdiri atas deteksi tepi (*edge detection*) menggunakan metode Canny (1986) yang termasuk dalam modul *scikit-image* berbahasa python dan penentuan parameter elips yang sesuai menggunakan metode *least square* (Fitzgibbon *et al.*, 1996). Proses pertama menghasilkan citra biner berisikan garis-garis tipis yang menandai bagian citra

dengan gradien tajam. Citra tersebut perlu dibersihkan dengan *masking* sehingga hanya satu elips yang tersisa. Proses kedua adalah pencocokan elips berbasis eigensystem yang menghasilkan koordinat pusat elips, setengah sumbu panjang ($\frac{1}{2}A$) dan setengah sumbu pendeknya ($\frac{1}{2}B$) serta sudut orientasi (ψ) dari elips tersebut. Kedua proses dilakukan pada citra yang telah dipotong pada area tertentu untuk mempercepat proses komputasi. Gambar 2-2 menunjukkan hasil identifikasi dan karakterisasi elips yang dilakukan pada citra Altair yang diambil pada berbagai jarak tak fokus.



Gambar 2-2: Identifikasi tepi cincin dari citra Altair yang dipotret pada berbagai jarak. Parameter elips yang terdiri dari koordinat pusat (cen), setengah sumbu panjang dan pendek (axs), eksentrisitas (ecc), serta orientasi sudut (phi) disertakan pada tiap panel kecuali pada citra fokus (Altair 17 tengah)

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Parameter elips yang diperoleh dari citra tak fokus Altair dirangkum dalam Tabel 3-1. Sumbu panjang dan sumbu pendek yang didapatkan merentang dari 20 hingga 230 piksel dengan ketidakpastian relatif berada di bawah 2%. Eksentrisitas citra berada pada kisaran 0,084 dan 0,250, tetapi dengan ketidakpastian relatif hingga 46%. Dengan 8 pasang nilai A dan B serta panjang fokus teleskop $R = 1900$ mm dan radius cermin primer $a = 250$ mm, nilai koefisien Z_2^2 dapat dihitung menggunakan Persamaan 2-6. Hasilnya berkisar antara 0,09 hingga 0,26 piksel atau setara dengan 99 hingga 345 nm. Rata-rata terbobot dari 8 nilai yang diperoleh adalah $Z_2^2 = 201$ nm.

Orientasi elips (rata-rata) berada pada rentang 0-90°. Parameter ini tidak memengaruhi besarnya astigmatisme, tetapi konsistensi dari parameter ini mencerminkan bahwa algoritma otomatis yang diterapkan telah

memberikan hasil yang cukup baik. Kelonjongan yang teramati tidak disebabkan oleh masalah *tracking* teleskop yang timbul karena orientasi poros gerak teleskop tidak sepenuhnya sejajar dengan poros rotasi Bumi (*polar aligned*). Hal ini juga diperiksa dengan menumpuk 5 citra fokus (Altair 18). Tidak ada indikasi *trailing* pada citra yang diambil dalam durasi yang relatif singkat (kurang dari 5 detik).

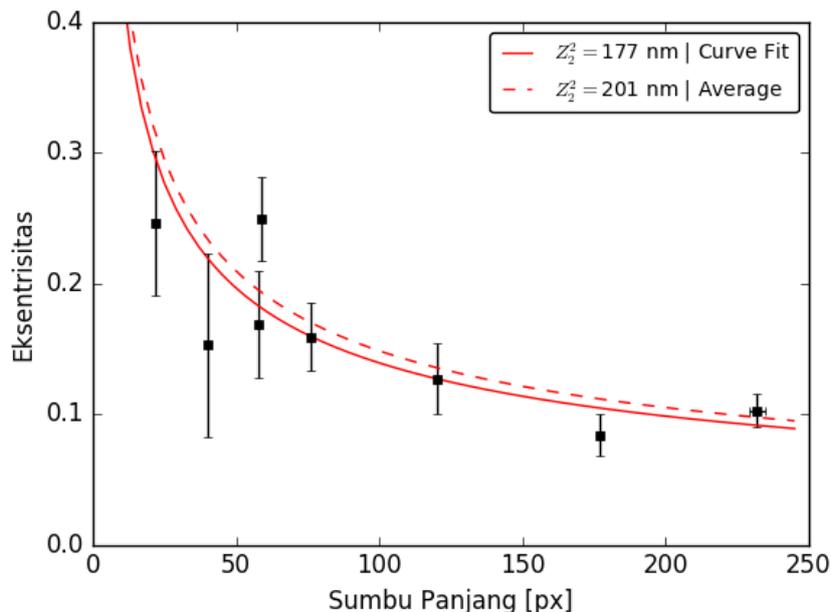
Plot eksentrisitas sebagai fungsi sumbu panjang disajikan pada Gambar 3-1. Terdapat tren penurunan eksentrisitas dengan bertambahnya sumbu panjang. Dengan menggunakan prinsip *least square*, Persamaan 2-7 dapat dicocokkan dengan data untuk mendapatkan koefisien $Z_2^2 = 177$ nm. Nilai ini tidak jauh berbeda dibandingkan nilai yang diperoleh dengan cara pertama (Persamaan 2-6) dan kurva yang merepresentasikan kedua nilai pun tampak berdekatan pada Gambar 3-1.

Tabel 3-1: PARAMETER ELIPS (A , B , e , ψ) DARI CITRA TAK FOKUS YANG DIAMBIL PADA JARAK z BERBEDA, RELATIF TERHADAP TITIK FOKUS TELESKOP. PARAMETER TERSEBUT MERUPAKAN RATA-RATA DARI LIMA KALI PENGUKURAN, SEDANGKAN NILAI DALAM KURUNG ADALAH SIMPANGAN BAKUNYA.

ID	z [mm]	A [piksel]	B [piksel]	e	ψ [°]	Z_2^2 [nm]
Altair 05	-12	231,8 (2,7)	230,6 (2,6)	0,103 (0,013)	29	226
Altair 08	-9	117,0 (0,3)	176,3 (0,5)	0,084 (0,016)	4	117
Altair 11	-6	120,0 (0,3)	119,0 (0,3)	0,127 (0,027)	55	181
Altair 14	-3	58,7 (0,4)	56,8 (0,4)	0,250 (0,032)	39	345
Altair 17	0	-	-	-	-	-
Altair 18	+1	21,7 (0,3)	21,0 (0,2)	0,246 (0,055)	38	126
Altair 19	+2	39,8 (0,1)	39,3 (0,5)	0,153 (0,070)	64	99
Altair 20	+3	57,6 (0,3)	56,7 (0,3)	0,169 (0,041)	57	160
Altair 21	+4	75,8 (0,3)	74,8 (0,1)	0,159 (0,026)	23	178

Sebenarnya, Luna *et al.* (2007) merekomendasikan untuk menggunakan Persamaan 2-6 untuk nilai A yang cukup kecil atau saat e mendekati nilai maksimum. Citra yang digunakan sebaiknya juga jauh dari *vignetting* dari sistem. Bila mengikuti saran tersebut, citra Altair 18 merupakan citra dengan eksentrisitas paling tinggi di antara yang lainnya. Besaran astigmatisme yang diperoleh berdasarkan citra ini adalah 126 nm, lebih rendah dibandingkan nilai yang didapatkan dengan pencocokan kurva, meski masih dalam kisaran 1σ . Penentuan parameter elips berdasarkan citra berukuran kecil memang lebih sulit untuk dilakukan karena tingkat akurasi dari ekstraksi parameter elips bergantung pada jumlah titik tepi citra yang diperhitungkan. Karena mekanisme gerak teleskop (*tracking*) yang belum sempurna, citra yang didapatkan sedikit bergeser dan pergeseran 1-2 piksel dapat mempengaruhi parameter elips yang diperoleh dari citra berukuran kecil.

Terlepas dari perbedaan yang muncul, nilai $Z_2^2 = 200$ nm dapat digunakan sebagai nilai acuan besarnya astigmatisme yang dialami oleh teleskop 50 cm $f/3,8$ yang menjadi objek dari studi ini. Nilai tersebut bersesuaian dengan nilai rata-rata dari 40 pengukuran serta sedikit lebih besar dibandingkan hasil pencocokan kurva yang telah disebutkan sebelumnya. Astigmatisme 200 nm tergolong kecil bila dibandingkan dengan nilai yang disebutkan dalam literatur. Luna *et al.* (2007) mendapatkan koefisien astigmatisme sebesar 600 ± 50 nm untuk teleskop 1,5 meter dari *National Observatory of Mexico* di San Pedro Martir. McLeod (1996) mendapatkan nilai 360 nm untuk *Multiple Mirror Telescope* berdiameter 6,5 meter di Mount Hopkins. Nilai koefisien yang kecil memang wajar untuk teleskop berkualitas baik dengan bukaan di bawah 1 meter. Geometri cermin primer dapat dibuat dengan sangat baik untuk mencapai kinerja optimal.



Gambar 3-1: Eksentrisitas citra yang menurun sebagai fungsi sumbu panjang cocok dengan model dengan besaran astigmatisme tertentu. Parameter $Z_2^2 = 177$ nm dan $Z_2^2 = 201$ nm didapatkan dengan *least square fitting* (garis tegas) dan perata-rataan terbobot (garis putus-putus).

Astigmatisma yang dialami tergolong kecil dan dapat dikatakan tidak signifikan dalam memengaruhi kinerja sistem. Dengan mempertimbangkan *seeing* di sekitar Gunung Timau yang sering berada di bawah 2 detikbusur (Mahasena *et al.*, 2013) atau setara dengan 1,4 piksel untuk sistem yang menjadi fokus dalam studi ini (RC 50 cm f/3,8, CCD 13,5 mikron/piksel), maka citra bintang yang terbentuk diperkirakan akan tampak lonjong dengan eksentrisitas hingga 0,8. Mengingat astigmatisma bersifat simetris, maka cacat bayangan ini tidak akan memengaruhi kinerja sistem. Titik berat (*centroid*) dari citra yang dihasilkan tetap berimpit dengan pusat elips. Namun, hal ini tetap perlu menjadi catatan, terutama ketika menggunakan algoritma otomatis untuk deteksi dan klasifikasi sumber, misalnya menggunakan *SExtractor* (Bertin dan Arnouts, 1996) yang dapat mengelompokkan sumber dengan kelonjongan tertentu sebagai objek ekstragalaktik.

Teleskop tipe Ritchey-Chretien juga dapat mengalami cacat bayangan lain yang tergolong sebagai *Seidel aberration* (Schechter dan Levinson, 2011). Koma dan *spherical aberration* telah dipangkas pada sistem ini, sedangkan astigmatisma telah dievaluasi dan tampak tidak signifikan pada teleskop 50 cm f/3,8 yang menjadi subjek. Cacat berikutnya adalah distorsi yang tidak menurunkan kualitas citra, tetapi dapat mengubah posisi objek pada bidang potret. Jenis cacat bayangan terakhir adalah kelengkungan medan (*curvature of field*) yang menyatakan variasi jarak fokus sebagai fungsi radius dari sumbu optik. Dua jenis cacat bayangan yang terakhir disebutkan perlu dievaluasi, tetapi dengan skema pengambilan data yang berbeda dibandingkan dengan apa yang dilakukan pada studi ini. Citra tak fokus dari bintang perlu dipotret pada posisi polar (ρ, φ) berbeda untuk memahami

pola yang timbul dan untuk mengukur seberapa parah cacat yang dialami.

4 KESIMPULAN

Pada studi ini, astigmatisma yang dialami teleskop tipe Ritchey-Chretien berdiameter 50 cm dan panjang fokus 190 cm telah dievaluasi berdasarkan hasil pengamatan Altair pada tanggal 18 September 2018. Dengan menggunakan metode geometris, didapatkan koefisien Zernike Z_2^2 sekitar 200 nm dengan batas atas 350 nm. Dengan mempertimbangkan *seeing* dan *sampling* dari sistem ini, astigmatisma yang dialami teleskop dianggap tidak signifikan dalam memengaruhi kinerja teleskop.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis berterima kasih kepada konsorsium Observatorium Nasional Timau yang telah bekerja keras dalam proses pembangunan observatorium, baik secara fisik maupun saintifik. RP berterima kasih kepada Neem Shadalmelik atas dukungan yang diberikan saat penulisan makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Bertin, E., dan S. Arnouts, 1996. *SExtractor: Software for Source Extraction*. Astronomy & Astrophysics Supplements, 117, 393.
- Bumbungan, M.T., R. Priyatikanto, M.D. Danarianto, M.B. Saputra, F. Rohmah, M.D. Murti, F. Mumtahana, M.Z. Nurzaman, dan N.D. Legita, 2018. *Two 0.5-m Robotic Telescopes for Timau National Observatory in Eastern Indonesia*. Journal of Physics: Conference Series, 1231, 012008.
- Canny, J., 1986. *Computational Approach to Edge Detection*. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8, 679.
- Fitzgibbon, A., M. Pilu, dan R.B. Fisher, 1996. *Direct Least Square Fitting of Ellipses*. Proceeding of the 13th International Conference on Pattern Recognition, 21, p. 253.

- Hidayat, T., P. Mahasena, B. Dermawan, T.W. Hadi, P.W. Premadi, dan D. Herdiwijaya, 2012. *Clear Sky Fraction Above Indonesia: an Analysis for Astronomical Site Selection*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427, 1903.
- Kurita, M., H. Ohmori, M. Kunda, H. Kawamura, N. Noda, T. Seki, et al., 2010. *Light-Weight Telescope Structure Optimized by Genetic Algorithm*. Proceeding of SPIE, 7733, 3.
- Kurita, M., S. Sato, K. Morishima, H. Achiwa, H. Ito, T. Nagata, N. Noda, dan N. Koiso, 2004. *Development of the Ultralight Medium-Size Telescope*. Proceeding of SPIE, 5495, 518.
- Lakshminarayanan, V., dan A. Fleck, 2011. *Zernike Polynomials: A Guide*. Journal of Modern Optics, 58, 545.
- Luna, E., L. Salas, L. Gutierrez, dan J.M. Nunez, 2007. *Geometric Method to Measure Astigmatism Aberration at Astronomical Telescopes*. Applied Optics, 46, 3439.
- Mahasena, P., E.I. Akbar, M. Yusuf, T. Hidayat, B. Dermawan, D. Herdiwijaya, C. Kunjaya, Z.L. Dupe, H.L. Sianturi, A. Warsito, J.L. Tanesib, D.H. Nugroho, M. Yusuf, E.I. Akbar, A.T. Jaelani, D. Mandey, A.T.P. Jatmiko, Sulistiyowati, dan Y. Yulianti, 2013. *Pengukuran Seeing di Sekitar Gunung Timau, Nusa Tenggara Timur*. Prosiding Seminar HAI 2013.
- McLeod, B. 1996. *Collimation of Fast Wide-Field Telescopes*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 108, 217.
- Mumpuni, E.S., L. Puspitarini, R. Priyatikanto, C.Y. Yatini, dan M. Putra, 2018. *Future Astronomy Facilities in Indonesia*. Nature Astronomy, 2, p. 930.
- Schechter, P.L., dan S. Levinson, 2011. *Generic Misalignment Aberration Patterns in Wide-Field Telescopes*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 123, 812.
- Schroeder, D., 2000. *Astronomical Optics: Second Edition*. San Diego: Academic Press.
- Zernike, F., 1934. *Diffraction Theory of the Knife-Edge Test and Its Improved Form, the Phase-Contrast Method*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 94, 377.

