

**STUDI KEDALAMAN BIDANG PADA ASTROFOTOGRAFI MELALUI
ANALISA PERGESERAN PAKU DIFRAKSI (*DIFFRACTION SPIKE*)
BAHTINOV MASK**

SKRIPSI

Oleh:

MARISHA ARUMI AL HAKIM

NIM. 220604110027



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PENGAJUAN

**STUDI KEDALAMAN BIDANG PADA ASTROFOTOGRAFI MELALUI
ANALISA PERGESERAN PAKU DIFRAKSI (*DIFFRACTION SPIKE*)
BAHTINOV MASK**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam Memperoleh Gelar Sarjana
Sains (S.Si)**

**Oleh:
Marisha Arumi Al Hakim
Nim. 220604110027**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2026**

HALAMAN PERSETUJUAN

STUDI KEDALAMAN BIDANG PADA ASTROFOTOGRAFI MELALUI ANALISA PERGESERAN PAKU DIFRAKSI (*DIFFRACTION SPIKE*) BAHTINOV MASK

SKRIPSI

Oleh:

Marisha Arumi Al Hakim

Nim. 220604110027

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada Tanggal, 25 Juni 2026

Pembimbing I



Arista Romadani, M.Sc

NIP. 19900905 201903 1 018

Pembimbing II



Dr. Umaiyatus Syarifah, MA

NIP. 19820925 200901 2 005

Mengetahui

Ketua Program Studi



Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T

NIP. 19740513 200312 1 001

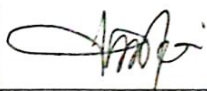
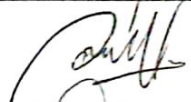
HALAMAN PENGESAHAN

STUDI KEDALAMAN BIDANG PADA ASTROFOTOGRAFI MELALUI ANALISA PERGESERAN PAKU DIFRAKSI (*DIFFRACTION SPIKE*) BAHTINOV MASK

SKRIPSI

Oleh:
MARISHA ARUMI AL HAKIM
Nim. 220604110027

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada tanggal, 25 Juni 2026

Penguji Utama	<u>Dr. Erna Hastuti, M.Si</u> NIP. 19811119 200801 2 009	
Ketua Penguji	<u>Erika Rani, M.Si</u> NIP. 19810613 200604 2 002	
Sekretaris Penguji	<u>Arista Romadani, M.Sc</u> NIP. 19900905 201903 1 018	
Anggota Penguji	<u>Dr. Umaiatus Syarifah, MA</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,
Ketua Program Studi



Farid Samsu Hapanto, S.Si., M.T
NIP. 19740513 200312 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : MARISHA ARUMI AL HAKIM

NIM : 220604110027

Jurusan : FISIKA

Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI

Judul Penelitian : STUDI KEDALAMAN BIDANG PADA
ASTROFOTOGRAFI MELALUI ANALISA PERGESERAN
PAKU DIFRAKSI (*DIFFRACTION SPIKE*) BAHTINOV
MASK)

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka. Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 5 Juni 2026
Yang Membuat Pernyataan




Marisha Arumi Al Hakim
Nim. 220604110027

MOTTO

... وَلَمْ أَكُنْ بِدُعَائِكَ رَبِّ شَقِيًّا ﴿٤﴾

“... dan aku tidak pernah kecewa dalam berdoa kepada-Mu, wahai Tuhanku”

(Q.S Maryam [19]:4)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji teruntuk Tuhan semesta alam, yang Maha Mengetahui lagi Maha Memberi Pengetahuan, teruntuk Allah SWT yang Maha Esa. Atas izin-Nya untuk belajar dan dididik sehingga menjadi manusia yang berakal dan berbudi.

Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada sang madinatul ‘ilmi, Rasulullah Muhammad SAW. Sang teladan yang membimbing umat manusia agar menjadi kaum beradab dan bernurani.

Dengan penuh harap dan cinta, karya ini dipersembahkan kepada setiap pembaca.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbil'alamiin, segala puji dan syukur kehadiran Allah SWT, atas berkah anugerah-Nya kepada penulis, sehingga tersusunlah skripsi yang berjudul "Studi Kedalaman Bidang pada Astrofotografi Melalui Analisa Simpangan Paku Difraksi (*Diffraction Spike*) Bahtinov Mask". Shalawat serta salam senantiasa tercurah limpahkan kepada Nabi Muhammad SAW, sang pembawa syafaat yang telah menyampaikan Al-Qur'an dan Hadist sebagai pedoman hidup.

Skripsi ini disusun untuk memberikan pandangan dan gambaran penelitian yang akan dilakukan oleh penulis. Tak lupa penulis mengucapkan terimakasih kepada:

1. Segenap anggota keluarga tercinta; Mama, Bapak, Kakadiin, dan Bre, untuk setiap bentuk dukungan dan kasih sayang yang dialirkan.
2. Prof. Dr. Hj. Ilfi Nur Diana, M.Si., CAHRM., CRMP., selaku Rektor Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
3. Dr. Agus Mulyono, M.Kes. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
4. Bapak Farid Samsu Hananto, S.Si., M.T, selaku Ketua Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
5. Ibu Dr. Erna Hastuti, M.Si selaku Dosen wali sekaligus Dosen penguji, untuk setiap didikan dan arahan selama perkuliahan.
6. Bapak Arista Romadani, M.Sc selaku Dosen pembimbing skripsi, atas seluruh dukungan dan perbaikan dalam pembelajaran.
7. Ibu Erika Rani, M.Si selaku dosen Fisika Teori sekaligus Dosen penguji skripsi, atas seluruh motivasi dan koreksi selama pembelajaran.
8. Ibu Dr. Umaiyatus Syarifah, MA selaku dosen pembimbing integrasi, atas setiap arahan, saran, dan diskusi seru dalam penyusunan skripsi ini.

9. Ibu Wiwis Sasmitaninghidayah, M.Si selaku dosen Optika, atas saran dan bantuannya dalam penelitian ini.
10. Seluruh dosen, laboran, dan staf administrasi Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah memberikan ilmu, pelayananan, dan membantu kelancaran penulisan skripsi ini.
11. Seluruh teman-teman penulis, khususnya; smurf teori, tim fisika haha-hihi, Warkop Beta, santri BTQ-GTA, juga seluruh mahasiswa program studi Fisika angkatan 2022 yang mendukung dan menginspirasi penulis.
12. Segenap kakak dan adik tingkat peminatan Fisika Teori UIN Malang
13. Semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung demi kesuksesan penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari tanpa bantuan, pengarahan, dan bimbingan dari berbagai pihak, proposal tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan. Semoga Allah SWT membalas kebaikan mereka dengan nikmat yang berlipat ganda baik di dunia maupun di akhirat kelak, Aamiin. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan ilmiah bagi penulis dan semua pihak yang membaca, serta memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Oleh karena itu kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan penelitian ini.

Malang, 4 Juni 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGANTAR	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
ABSTRAK	xvi
ABSTRACT	xvii
مستخلص البحث	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Batasan Masalah	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Astrofotografi	9
2.1.1 Tahapan Pemotretan	10
2.1.1.1 Previsualisasi	11
2.1.1.2 Pelaksanaan	11
2.1.1.3 Pengolahan	12
2.1.2 Parameter Pemotretan	13
2.1.2.1 Panjang Fokus (<i>Focal Length</i>)	13
2.1.2.2 Rasio Fokus (<i>F-number</i>)	15
2.1.2.3 Kecepatan Rana (<i>Shutter Speed</i>)	16
2.1.2.4 ISO	16
2.1.2.5 Format Sensor dan Ukuran Pixel	17
2.2 Rentang Fokus dan Resolusi	17
2.2.1 Lingkaran Keburaman (<i>Circle of Confusion, c</i>)	18
2.2.1.1 Kriteria Rayleigh	19
2.2.1.2 Kriteria Sensor	21
2.2.2 Kedalaman Bidang (<i>Depth of Field</i>) dan Kedalaman Ruang (<i>Depth of Focus</i>)	21
2.2.3 Metode Pemfokusan	24
2.2.3.1 Fokus Tak Hingga	25
2.2.3.2 Jarak Hiperfokal	26
2.3 Difraksi	29
2.3.1 Difraksi Celah Tunggal	30
2.3.2 Difraksi kisi	35
2.3.3 Apertur dan Transformasi Fourier	38

2.4 Bahtinov Mask	39
BAB III METODE PENELITIAN	42
3.1 Jenis Penelitian	42
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	42
3.3 Alat dan Bahan Penelitian	43
3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian	45
3.4.1 Studi Literatur	47
3.4.2 Permodelan Sistem Optis	47
3.4.3 Penurunan Persamaan Lingkar Keburaman	47
3.4.4 Penyiapan dan Pendataan Spesifikasi Perangkat	47
3.4.5 Previsualisasi	48
3.4.6 Pemotretan dan Seleksi Foto	50
3.4.7 Penomoran Objek yang Dianalisis dalam Foto	57
3.4.8 Pengukuran <i>dpraktis</i> dari Foto	57
3.4.9 Pengumpulan Data Objek yang Dianalisis	58
3.4.10 Pengukuran <i>dteoretis</i>	58
3.4.11 Analisis Hubungan d terhadap $oR - oF$	59
3.4.12 Penentuan Batas Kedalaman Bidang	59
3.4.13 Analisis Pengaruh Parameter Sistem Optik	59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	60
4.1 Model Kedalaman Fokus	60
4.2 Model Kedalaman Bidang	62
4.3 Hasil Pemotretan	64
4.4 Analisis Kedalaman Bidang pada Foto	67
4.4.1 Batas Keburaman	67
4.4.2 Analisis Hubungan d terhadap $oR - oF$	68
4.4.3 Analisis Pengaruh Sistem Optis	78
4.5 Pembahasan	82
4.6 Studi Keislaman	83
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	87
5.1 Kesimpulan	87
5.2 Saran	88
DAFTAR PUSTAKA	89
LAMPIRAN	93

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Durasi eksposur setiap foto	65
--	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema panjang fokus lensa.....	13
Gambar 2.2	Bukaan atau apertur lensa (Ray, 1939).....	15
Gambar 2.3	Pola cincin gelap-terang (frinji) akibat difraksi cahaya pada apertur bulat (Voelz, 2011)	19
Gambar 2.4	Kaitan antara proyeksi, kedalaman bidang, dan lingkaran keburaman. a) Idealnya, sebuah titik diproyeksikan sebagai titik di bidang Gambar. b) dan c) pada posisi yang tidak tepat, titik tersebut akan muncul sebagai lingkaran buram. d) Dengan mempersempit bukaan lensa, diameter lingkaran buram turut berkurang (Zandvliet, 2017).	23
Gambar 2.5	Sumber Koheren (Hecht, 2017).....	31
Gambar 2.6	Difraksi Fraunhofer untuk celah tunggal. (a) Skema difraksi, (b) pola difraksi oleh celah tunggal vertikal sebuah titik sumber cahaya (Hecht, 2017).....	32
Gambar 2.7	Apertur dengan banyak celah (Zandvliet, 2017)	35
Gambar 2.8	Bahtinov Mask (Zandvliet, 2017).....	39
Gambar 2.9	Pola difraksi Bahtinov mask (Zandvliet, 2017).....	40
Gambar 2.10	Pengukuran pergeseran paku difraksi Bahtinov mask (Champagne et al., 2011).....	41
Gambar 3.1	Lokasi Pemotretan (google earth).....	42
Gambar 3.2	Komponen dalam satu set lensa William Optic Redcat 51 (https://williamoptics.com/products/cat-51).....	43
Gambar 3.3	Konfigurasi set lensa William Optic Redcat 51 (https://williamoptics.com/products/cat-51).....	43
Gambar 3.4	Komponen dalam satu set star tracker Latte V4.....	44
Gambar 3.5	Diagram alir penelitian	46
Gambar 3.6	Tampilan pengaturan kamera dalam aplikasi Stellarium.....	48
Gambar 3.7	Tampilan pengaturan lensa dalam aplikasi Stellarium	49
Gambar 3.8	Tampilan pengaturan lokasi dalam aplikasi Stellarium	49
Gambar 3.9	Tampilan mode simulasi FOV dan pengaturan waktu dalam aplikasi Stellarium	50
Gambar 3.10	Tampilan aplikasi Latte	51
Gambar 3.11	Tampilan menu compass pada aplikasi Latte apabila arah dan kondisi kompas tepat (a) dan tidak tepat (b).....	52
Gambar 3.12	Tampilan menu level pada aplikasi Latte apabila sudut kemiringan dan hadapan tepat (a) dan tidak tepat (b)	53
Gambar 3.13	Peletakan ponsel dalam proses kalibrasi level.....	53
Gambar 3.14	Skema port kabel untuk mount RA	55
Gambar 3.15	Rangkaian perangkat pemotretan	55
Gambar 4.1	Skema arah rambat cahaya memasuki lensa. F : posisi bidang fokus dari cahaya yang merambat pada lintasan l , R : posisi fokus referensi dari cahaya yang merambat pada lintasan l' (Lendermann et al., 2018).....	61
Gambar 4.2	Hasil Pemotretan. (a) Bintang Shaula dan bintang di sekitarnya, (b) Nebula Orion dan bintang di sekitarnya, (c) Bintang	

	Alnilam dan bintang di sekitarnya, (d) Planet Jupiter dan bintang di sekitarnya.....	64
Gambar 4.3	Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Shaula.....	69
Gambar 4.4	Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Orion	71
Gambar 4.5	Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Alnilam	73
Gambar 4.6	Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Jupiter.....	74
Gambar 4.7	Grafik plot hubungan antara rasio fokus (N) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Shaula.....	80
Gambar 4.8	Grafik plot hubungan antara panjang gelombang (λ) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Shaula.	81

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1.	Tabel informasi untuk kelompok data Shaula dari katalog SIMBAD.....	94
Lampiran 2.	Tabel informasi untuk kelompok data Orion dari katalog SIMBAD.....	95
Lampiran 3.	Tabel informasi untuk kelompok data Alnilam dari katalog SIMBAD.....	97
Lampiran 4.	Tabel informasi untuk kelompok data Jupiter dari katalog SIMBAD.....	98
Lampiran 5.	Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Shaula	100
Lampiran 6.	Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Orion.....	102
Lampiran 7.	Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Alnilam	104
Lampiran 8.	Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Jupiter	106
Lampiran 9.	Spesifikasi kamera Canon EOS M (https://id.canon.id/support/6200141900).....	107
Lampiran 10.	Spesifikasi lensa William Optic RedCat 51 (https://support.williamoptics.com/products/cat-51-wifd)	107
Lampiran 11.	Dokumentasi pengambilan data (pemotretan)	108

ABSTRAK

Al Hakim, Marisha Arumi. 2026. **Studi Kedalaman Bidang pada Astrofotografi Melalui Analisa Pergeseran Paku Difraksi (*Diffraction Spike*) Bahtinov Mask**. Skripsi. Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Arista Romadani, M.Sc. (II) Dr. Umaiyyatus Syarifah, MA.

Kata kunci: Astrofotografi, Bahtinov mask, Kedalaman bidang, Lingkaran keburaman, Paku difraksi.

Konsep fokus tak hingga (*infinity focus*) dalam astrofotografi sering mengabaikan keberadaan kedalaman bidang (*depth of field/DOF*) yang dibatasi oleh rentang fokus sistem optik. Penelitian ini bertujuan merumuskan DOF pada sistem astrofotografi menggunakan *Bahtinov mask* melalui analisis pergeseran atau deviasi paku difraksi (*diffraction spike*), serta mengkaji pengaruh parameter optik terhadap batas DOF tersebut. Eksperimen dilakukan menggunakan teleskop William Optics RedCat 51 ($f = 250$ mm, $f/4.9$) dan kamera Canon EOS M untuk memotret bintang Shaula dan Alnilam, Nebula Orion, serta Jupiter. Deviasi paku difraksi diukur menggunakan perangkat lunak ImageJ, lalu dibandingkan dengan model teoretis persamaan lensa tipis. Batas DOF ditentukan melalui pendekatan lingkaran keburaman (*circle of confusion*) berbasis kriteria Rayleigh ($c = 2,44\lambda N$) dan kriteria sensor ($c = m\delta$). Hasil menunjukkan model teoretis memprediksi perubahan posisi fokus yang sangat kecil, berkisar bilangan dalam orde 10^{-15} mm. Namun, pengukuran praktis menunjukkan variasi deviasi yang lebih besar dari prediksi model. Evaluasi parameter optik menyatakan bahwa rasio fokus (N), panjang gelombang (λ), dan ukuran piksel sensor (δ) mengendalikan sensitivitas batas kedalaman bidang. Penelitian ini membuktikan bahwa DOF astrofotografi dapat dievaluasi melalui pergeseran paku difraksi sehingga memberikan alternatif pendekatan fisik yang lebih akurat daripada asumsi fokus tak hingga.

ABSTRACT

Al Hakim, Marisha Arumi. 2026. **Study of Depth of Field in Astrophotography Through Bahtinov Mask Diffraction Spike Shift Analysis.** Undergraduate Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Advisors: (I) Arista Romadani, M.Sc. (II) Dr. Umaiyyatus Syarifah, MA.

Keywords: Astrophotography, Bahtinov mask, Depth of field, Circle of confusion, Diffraction spike

The concept of infinity focus in astrophotography often overlooks the existence of depth of field (DOF), which is limited by the focal range of the optical system. This study aims to determine the DOF in an astrophotography system using a Bahtinov mask through an analysis of the shift or deviation of diffraction spikes, as well as to examine the influence of optical parameters on the limits of that DOF. Experiments were conducted using a William Optics RedCat 51 telescope ($f = 250$ mm, $f/4.9$) and a Canon EOS M camera to photograph the stars Shaula and Alnilam, the Orion Nebula, and Jupiter. Diffraction spike deviations were measured using ImageJ software and then compared with a theoretical thin-lens equation model. The DOF limit was determined using a circle of confusion (CoC) approach based on the Rayleigh criterion ($c = 2,44\lambda N$) and the sensor criterion ($c = m\delta$). The results show that the theoretical model predicts very small changes in focus position, on the order of 10^{-15} mm. However, practical measurements indicate greater variations in deviation than the model predicts. An evaluation of optical parameters indicates that the focal ratio (N), wavelength (λ), and sensor pixel size (δ) control the sensitivity of the depth of field limit. This study demonstrates that the depth of field (DOF) in astrophotography can be evaluated through the shift of the diffraction spike, thereby providing a more accurate physical approach than the assumption of infinite focus.

مستخلص البحث

الحكيم، مريشا أرومي. (٢٠٢٦). دراسة عمق المجال في التصوير الفلكي من خلال تحليل انزياح مسمار الحيود (*Diffraction Spike*) في قناع باهتينوف. بحث جامعي. قسم الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرفان: (I) أريستا رمضاني، الماجستير. (II) الدكتور أمية الشريفة، الماجستير

الكلمات المفتاحية: عمق المجال، التصوير الفلكي، شوكة الحيود، قناع باهتينوف

غالبًا ما يُتجاهل مفهوم التركيز البؤري اللاهائي (*infinity focus*) في التصوير الفلكي وجود عمق المجال (*depth of field/DOF*) الذي يحدده نطاق التركيز البؤري للنظام البصري. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد عمق المجال في نظام التصوير الفلكي باستخدام قناع باهتينوف (*Bahtinov mask*) من خلال تحليل انحراف مسمار الحيود (*diffraction spike*)، وكذلك دراسة تأثير المعلومات البصرية على حدود عمق المجال. هذا. أُجريت التجارب باستخدام تلسكوب William Optics RedCat 51 ($f = 250 \text{ mm}, f/4.9$) وكاميرا Canon EOS M لتصوير نجمي شاولا والتيلام، وسديم أورليون، وكوكب المشتري. تم قياس الانحراف مسمار الحيود باستخدام برنامج ImageJ، ثم مقارنته بالنموذج النظري لمعادلة العدسة الرقيقة. تم تحديد حدود عمق المجال (*DOF*) من خلال حجم دائرة التبهيم (*circle of confusion*) استنادًا إلى معيار رايلي ($c = 2,44\lambda N$) ومعيار المستشعر ($c = m\delta$). أظهرت النتائج أن النموذج النظري يتنبأ بتغير ضئيل جدًا في موضع البؤرة، يتراوح في حدود 10^{-15} ملم. ومع ذلك، أظهرت القياسات العملية تباينًا في الانحراف أكبر من توقعات النموذج. أشار تقييم المعلومات البصرية إلى أن نسبة البؤرة (N)، وطول الموجة (λ)، وحجم بكسل المستشعر (δ) تتحكم في حساسية حدود عمق المجال. تثبت هذه الدراسة أن عمق المجال في التصوير الفلكي يمكن تقييمه من خلال إزاحة مسمار الحيود، مما يوفر هجأ فيزيائيًا بديلًا أكثر دقة من افتراض البؤرة اللاهائية.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sangat mudah menjumpai budaya kuno di seluruh dunia yang berusaha menjelaskan berbagai fenomena alam semesta. Dipicu gejala kekaguman dan keingintahuan, berbagai upaya manusia dalam mengeksplorasi tata surya terus berevolusi dan berkembang. Mitos dan legenda bertahap tergantikan oleh deretan konsep, teori, dan data. Dan di antara berbagai upaya, pemotretan menawarkan metode pengumpulan dan penyajian data dalam bahasa visual yang universal, menghasilkan produk yang mampu menjangkau berbagai kalangan. Sebuah foto bintang boleh jadi merupakan awal mula seorang anak kecil tertarik menjelajah angkasa, dan di saat yang sama menjadi alasan seorang ilmuwan berlama-lama memodelkan sebuah persamaan.

Berbagai genre pemotretan terus bermunculan, sejalan dengan tuntutan perkembangan pengetahuan. Salah satunya astrofotografi, yang merepresentasikan disiplin ilmu dan seni dalam perekaman foton dari objek kosmik menggunakan media peka cahaya untuk kemudian disajikan sebagai citra. Praktik ini mendukung kemudahan akses dan pengarsipan informasi visual dari kompleksitas objek langit yang tidak kasat mata, sehingga menjadi salah satu pemacu laju revolusi ilmu astronomi dari masa ke masa.

Hingga saat ini, astrofotografi masih menjadi salah satu metode yang banyak digunakan sebagai upaya mengenal dan mempelajari objek astronomi. Akses observasi berbasis cahaya tampak masih relatif terjangkau oleh masyarakat umum, pendidik, maupun peneliti pemula jika dibandingkan dengan pendekatan

radiasi gelombang kosmik lainnya. Oleh karena itu, kualitas dan keakuratan foto astronomi harus diperhatikan. Dalam konteks ini, foto yang dihasilkan dan disebarluaskan idealnya memuat representasi informasi optik yang benar atau setidaknya mendekati kondisi fisik sebenarnya.

Upaya menghadirkan kebenaran informasi tidak dapat dipisahkan dari proses observasi yang cermat. Sebagaimana teori fisis dan model matematis terus dikaji dan dikembangkan, pemotretan selaku pendekatan observasional harus dilakukan dengan tepat. Observasi sebagai pondasi epistemologis berfungsi menjembatani teori dengan fakta empiris, sejalan dengan kedudukan observasi yang tercermin dalam tafsir QS. Al-Baqarah ayat 260:

وَإِذْ قَالَ إِبْرَاهِيمُ رَبِّ ارْزُقْنِي كَيْفَ أَخِي الْمَوْتَىٰ قَالَ أَوَلَمْ تُؤْمِنْ قَالَ بَلَىٰ وَلَكِنَّ لَيْطَمَنَّ قُلُوبِي قَالَ فَخُذْ أَرْبَعَةً مِّنَ

الطَّيْرِ فَصُرْهُنَّ إِلَيْكَ ثُمَّ اجْعَلْ عَلَىٰ كُلِّ جَبَلٍ مِّنْهُنَّ جُزْءًا ثُمَّ ادْعُهُنَّ يَأْتِينَكَ سَعْيًا وَاعْلَمْ أَنَّ اللَّهَ عَزِيزٌ حَكِيمٌ ﴿٢٦٠﴾

“(Ingatlah) ketika Ibrahim berkata, “Ya Tuhanku, perlihatkanlah kepadaku bagaimana Engkau menghidupkan orang-orang mati.” Dia (Allah) berfirman, “Belum percayakah engkau?” Dia (Ibrahim) menjawab, “Aku percaya, tetapi agar hatiku tenang.” Dia (Allah) berfirman, “Kalau begitu, ambillah empat ekor burung, lalu dekatkanlah kepadamu (potong-potonglah). Kemudian, letakkanlah di atas setiap bukit satu bagian dari tiap-tiap burung. Selanjutnya, panggillah mereka, niscaya mereka datang kepadamu dengan segera.” Ketahuilah bahwa Allah Maha Perkasa lagi Maha Bijaksana.” (QS. Al-Baqarah [2]:260)

Dikisahkan dalam ayat tersebut, Nabi Ibrahim a.s. memohon untuk diperlihatkan proses menghidupkan makhluk yang telah mati. Permohonan ini tidak hadir sebagai bentuk keraguan terhadap kekuasaan Allah Swt, melainkan wujud keingintahuan yang tulus. Sehingga melalui pembuktian nyata yang disaksikannya, Nabi Ibrahim a.s. mendapati ketenangan batin, penguatan keyakinan, dan keutuhan pemahaman (Jami, 2023; Nasrudin et al., 2025; Purwanto, 2015). Kejadian ini tidak ubahnya mencerminkan prinsip dasar metode ilmiah, di mana keyakinan atas suatu

teori perlu diuji dan dibuktikan melalui data yang dapat dipertanggungjawabkan (Den Dekker & Van Den Bos, 1997; Nakamura, 2006).

Salah satu parameter keandalan data fotografi terletak pada kadar resolusi dan kefokusannya. Syarat ini adalah mutlak, mengingat setiap detail citra dalam astrofotografi memuat informasi yang berharga. Secara teknis, hal ini menyebabkan kecermatan observasi menjadi semakin krusial dikarenakan tingginya sensitivitas fokus objek astronomi dibanding objek fotografi pada umumnya. Secara ideal bintang-bintang dipandang sebagai sumber cahaya titik dari bumi, dikarenakan penyempitan ukuran sudut seiring jauhnya jarak objek. Artinya, informasi visual yang direkam oleh sensor kamera merepresentasikan respons sistem optik dan bukan bentuk fisik. Sedikit pergeseran fokus dapat menyebabkan perubahan nyata pada sebaran cahaya, melebarkan citra bintang sehingga kehilangan ketajamannya. Kadar ketajaman juga berperan sebagai sistem pemetaan posisi. Variasi kadar ketajaman citra merepresentasikan variasi jarak objek di sepanjang sumbu optik. Rentang zona di mana objek terproyeksi dalam ketajaman yang dapat ditoleransi dikenal sebagai kedalaman bidang atau *depth of field* (DoF) (Den Dekker & Van Den Bos, 1997; Nakamura, 2006).

Dalam praktiknya, banyak pelaku astrofotografi menerapkan konsep fokus tak hingga (*infinity focus*) dan jarak hiperfokal (*hyperfocal distance*). Kedua konsep ini memandang objek yang berada sangat jauh dari lensa akan terproyeksi tajam pada sensor kamera, dan apabila dikaitkan dengan konsep kedalaman bidang akan mengasumsikan keterjagaan rentang ketajaman citra. Pendekatan tersebut melahirkan anggapan bahwa pemfokusan astrofotografi dapat dilakukan secara sederhana dengan menetapkan suatu posisi fokus ideal berdasarkan ketajaman

maksimum pada sebuah objek acuan, tanpa mempertimbangkan batas ketajaman objek di sekitarnya. Pola pemahaman ini mendorong perlakuan fokus sebagai kondisi absolut, padahal karakteristik optik dan kondisi pengamatan objek astronomi jauh lebih kompleks. Sehingga penerapan konsep fokus tak hingga dan jarak hiperfokal dalam astrofotografi perlu dikaji dengan lebih hati-hati.

Kajian terkait pemfokusan dan ketajaman citra dalam sistem optik berkembang melalui berbagai pendekatan. Salah satu inovasi instrumen pemfokusan dalam astrofotografi diperkenalkan oleh Pavel Bakhtinov pada tahun 2005. Alat ini berbentuk piringan dengan susunan tiga zona orientasi kisi yang menghasilkan proyeksi tiga paku difraksi (*diffraction spike*), sebuah paku difraksi melintang tegak serta dua paku difraksi diagonal yang saling menyilang. Dalam kondisi fokus sempurna, ketiga paku difraksi akan saling simetri berpotongan. Sedangkan pergeseran fokus akan menggeser titik perpotongan paku difraksi secara linear. Dikarenakan prinsip kerjanya yang sederhana, kepopuleran alat ini cepat meluas, terutama di kalangan astrofotografer mandiri yang tidak terikat afiliasi institusional.

Keandalan Bahtinov mask kemudian diuji dalam berbagai kondisi observasi. Champagne et al. (2011) mengkaji pengaruh perubahan kondisi sistem optik, termasuk variasi suhu ekstrem, dan menunjukkan bahwa pola pergeseran paku difraksi tetap stabil serta tidak mengalami perubahan signifikan akibat faktor lingkungan tersebut. Selanjutnya, Zandvliet (2017) menerapkan analisis Bahtinov mask pada teleskop berukuran besar dengan pendekatan pemrosesan citra, dan menemukan bahwa metode ini tetap efektif dalam mendeteksi pergeseran fokus lensa, meskipun terdapat variasi posisi bintang pada bidang sensor. Dilanjutkan dengan penelitian Van den Born et al. (2022), yang menunjukkan bahwa pengaruh

atmosfer menjadi signifikan pada sudut elevasi rendah sebagaimana karakteristik umum astrofotografi, sementara pada sudut pengamatan normal pola difraksi tetap terjaga. Temuan-temuan tersebut mendukung asumsi bahwa, dalam kondisi observasi yang wajar, pengaruh lingkungan terhadap pola pergeseran paku difraksi Bahtinov mask dapat diabaikan.

Di sisi lain, rekomendasi penerapan jarak hiperfokal maupun fokus tak hingga masih tumpang-tindih dalam beberapa referensi astrofotografi hingga beberapa tahun ke belakang. Pendekatan dan rekomendasi penerapan fokus tak hingga diterapkan dalam penelitian Bakin dan Keelan (2008), Oberdörster et al. (2012) serta Lin dan Chen (2020). Sedangkan penerapan fokus tak hingga, yang mengasumsikan bahwa objek seperti bintang berada pada jarak teramat jauh sehingga perbedaan posisi bayangannya tidak signifikan, dapat ditemui pada penelitian Ourique et al. (2010), buku panduan astrofotografi melalui ponsel oleh NASA (2019), juga buku panduan kalkulasi karya Jan Schulz (2014).

Perkembangan penelitian menunjukkan bahwa konsep fokus tak hingga dan jarak hiperfokal telah lama digunakan sebagai pendekatan praktis dalam fotografi dan sistem optik, sementara Bahtinov mask berkembang sebagai alat bantu pemfokusan berbasis difraksi yang sensitif terhadap perubahan fokus. Namun, ketiga pendekatan tersebut umumnya dibahas dalam kerangka yang terpisah. Temuan bahwa pergeseran fokus lensa dapat bervariasi pada bintang di posisi berbeda dalam satu bidang citra menunjukkan bahwa asumsi satu posisi fokus tunggal dan rentang ketajaman tak terbatas masih perlu ditinjau lebih lanjut. Hingga saat ini, keterkaitan antara kedalaman bidang dan sebaran keburaman akibat difraksi dalam konteks astrofotografi belum dirumuskan secara terpadu.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini berupaya mengkaji keberadaan dan batas kedalaman bidang pada citra astrofotografi melalui difraksi. Pendekatan yang digunakan bersifat observasional dan analitis, dengan memanfaatkan Bahtinov mask sebagai alat untuk memroyeksikan pergeseran fokus melalui pergeseran paku difraksi. Analisis difokuskan pada keterkaitan pergeseran relatif paku difraksi Bahtinov mask dengan keburaman citra bintang, sebagai dasar untuk merumuskan kedalaman bidang pada astrofotografi. Penelitian ini turut menelaah signifikansi pengaruh parameter sistem optik terhadap rentang kedalaman bidang yang terukur melalui lebar pergeseran paku difraksi. Diharapkan, penelitian ini tidak hanya menjembatani prinsip-prinsip teoritis dengan metode praktis, tetapi juga memberikan kontribusi bagi para astrofotografer melalui panduan sistematis dalam mencapai kualitas citra yang optimal. Sehingga demikian, penelitian ini disusun untuk mendukung keberlanjutan upaya manusia dalam mempelajari, memahami, dan mengapresiasi alam semesta.

1.2 Rumusan Masalah

Sebagai sarana pembelajaran yang amat dekat dengan keseharian, astrofotografi seharusnya menjadi salah satu pintu perkembangan pembelajaran astronomi bagi masyarakat. Sehingga wajib bagi pelaku astrofotografi untuk mengusahakan data yang informatif dan benar. Dalam penelitian ini, dikaji sebagai permasalahan:

1. Bagaimana pergeseran paku difraksi (*diffraction spike*) Bahtinov mask menginterpretasikan kedalaman bidang (*depth of field*, DoF) pada astrofotografi?

2. Bagaimana pengaruh parameter sistem optik terhadap batas kedalaman bidang (*depth of field*, DoF) yang teramati melalui pergeseran paku difraksi (*diffraction spike*) Bahtinov mask?

1.3 Tujuan Penelitian

Menindaklanjuti permasalahan yang telah dirumuskan, penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Untuk menganalisis interpretasi kedalaman bidang pada astrofotografi melalui pengukuran pergeseran paku difraksi (*diffraction spike*) Bahtinov mask.
2. Untuk menganalisis pengaruh parameter sistem optik terhadap batas kedalaman bidang (*depth of field*, DoF) yang teramati melalui pergeseran paku difraksi (*diffraction spike*) Bahtinov mask.

1.4 Batasan Masalah

Guna memastikan penelitian ini tetap fokus dan dapat dicapai sesuai dengan ruang lingkup serta tujuan yang telah ditetapkan, maka diterapkan sejumlah batasan yang meliputi:

1. Kamera yang digunakan terbatas pada ketersediaan perangkat, yaitu Canon EOS M.
2. Lensa yang digunakan merupakan tipe fokus tetap (*fixed focus lens*).
3. Model optik tidak memepertimbangkan ketebalan, tipe elemen, jumlah elemen, dan konfigurasi grup dari lensa.
4. Pemotretan dilakukan di Brakseng, Cangar, Jawa Timur, dalam periode September 2025 - April 2026.

5. Pemotretan yang dilakukan menggunakan metode pemotretan tunggal dengan pajanan panjang (*single long exposure*), dengan menyertakan Bahtinov mask pada rangkaian konfigurasi perangkat pemotretan.
6. Foto yang dianalisis memiliki kriteria bebas *trail* dan terjaga resolusinya dalam 10 kali perbesaran dalam proses pengolahan.
7. Pengaruh lingkungan yang meliputi cuaca, tingkat kecerahan langit, serta turbulensi atmosfer tidak dilibatkan dalam permodelan matematis

1.5 Manfaat Penelitian

Peneliti berharap, pelaksanaan penelitian ini mampu memberikan sejumlah kontribusi pada perkembangan keilmuan di bidang astronomi, astrofotografi, dan optika. Adapun manfaat tersebut di antaranya:

1. Secara akademis, diharapkan penelitian ini mampu memperkaya literatur terkait konsep hiperfokal pada lensa dengan menyediakan data observasional yang relevan melalui metode astrofotografi.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memopulerkan astrofotografi sebagai sarana pembelajaran astronomi praktis yang paling dekat dengan masyarakat, sekaligus mendorong lahirnya kesadaran bahwa penelitian astronomi lanjutan seperti astrofisika, astropartikel dan kosmologi dapat tergapai melalui langkah awal yang sederhana.
3. Secara teknologis, diharapkan penelitian ini dapat mendorong pengembangan teknologi sistem observasi jarak jauh (*long-range imaging*).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Kualitas dari sebuah foto sangat erat kaitannya dengan kualitas resolusi dan ketepatan fokus. Dengan mengoptimalkan kedua aspek tersebut, dapat diperoleh detail yang lebih kaya sehingga keandalan data yang dimuat meningkat. Parameter optik seperti panjang fokus, diameter bukaan lensa, dan diameter lingkaran keburaman turut menentukan batas rentang fokus dalam foto. Dalam praktik pemotretan untuk objek yang sangat jauh seperti pada astrofotografi, konsep fokus tak hingga (*infinity focus*) seringkali digunakan. Dengan asumsi posisi bayangan dari objek akan secara efektif berada di bidang tajam yang sama. Namun dalam menghadapi fakta di lapangan, pendekatan ini kerap mengalami ketidaksesuaian (Allen & Triantaphillidou, 2011; Bradt, 2004; Hastuti & Basithussyarop, 2022).

2.1 Astrofotografi

Astrofotografi didefinisikan sebagai praktik mengabadikan radiasi yang dipancarkan ataupun dipantulkan oleh objek kosmik menggunakan medium peka cahaya, dengan tujuan untuk menghasilkan representasi visual yang akurat dari objek tersebut. Secara bahasa, istilah ini merupakan gabungan kata astronomi dengan fotografi. Astronomi bermakna disiplin ilmu yang mengkaji benda dan fenomena kosmik. Sementara fotografi ialah seni, ilmu, dan praktik merekam cahaya atau radiasi elektromagnetik lainnya sehingga terabadikan sebagai Gambar (Hastuti & Basithussyarop, 2022; Junaidi, 2021; Pearce & Scagell, 1980). Dalam konteks pengumpulan informasi, astrofotografi berperan penting dalam menghimpun radiasi gelombang tampak dari luar angkasa. Bahkan hingga beberapa

dekade yang lalu, metode ini masih menjadi landasan pembelajaran terkait alam semesta. (Spurio, 2018; Woodhouse, 2024).

Sejarah astrofotografi bermula tidak lama setelah penemuan fotografi di pertengahan abad ke-19. Ditandai kontribusi ilmuwan asal Inggris, John William Draper, melalui potret permukaan berkawah dari Bulan yang diperolehnya pada tahun 1840. Dengan kemampuannya mendokumentasi fitur yang terlalu redup untuk dideteksi mata manusia, astrofotografi turut mendukung laju perkembangan berbagai bidang keilmuan seperti optika dan astrofisika (Gallaway, 2020; Gendler & GaBany, 2015; Kinslake, 1992).

Tujuan utama astrofotografi adalah untuk mengamati, mendokumentasikan, dan mengabadikan fenomena objek kosmik, sehingga diperoleh data visual yang dapat dianalisis. Meskipun demikian, foto mentah seringkali memiliki cacat seperti derau (*noise*) atau kabur (*blur*) yang mengurangi nilai informasi yang dimuat. Sehingga sangat dibutuhkan optimalisasi dan koreksi dalam setiap tahap pemotretan. Hal ini dilakukan untuk memastikan objektivitas dan integritas dari setiap foto yang dihasilkan, sehingga mampu memperluas pengetahuan dan pemahaman tentang skala dan struktur semesta (Chromey, 2010; Hastuti & Basithussyarop, 2022).

2.1.1 Tahapan Pemotretan

Sebagai salah satu genre fotografi, tahap pelaksanaan astrofotografi tidak jauh berbeda dengan pemotretan pada umumnya. Meliputi perencanaan atau previsualisasi, pelaksanaan, dan pemrosesan data. Ketiga tahapan tersebut saling berkaitan, dan penting untuk dilakukan, agar foto yang dihasilkan memenuhi standar ilmiah sekaligus estetika. Terdapat tiga tahapan yang perlu dilakukan agar

menghasilkan foto yang memenuhi standar ilmiah sekaligus estetika (Gallaway, 2020; Zia, 2019).

2.1.1.1 Previsualisasi

Perencanaan atau previsualisasi merupakan proses perancangan dan pengandaian bentuk visual melalui pikiran sebelum pemotretan ataupun observasi dilakukan. Melalui previsualisasi, pengobservasi dapat memetakan komposisi dan teknis pemotretan agar mendapatkan hasil yang diinginkan. Pada tahap ini, diperlukan riset dan pertimbangan secara menyeluruh, mulai dari aspek teknis hingga konseptual. Seperti analisis lokasi, waktu, kapasitas instrumen, metode, hingga perkiraan kondisi atmosfer dan cuaca (Bradt, 2004; Gallaway, 2020; Zia, 2019).

Previsualisasi berfungsi sebagai penghubung antara tujuan, kemampuan teknis peralatan, dan strategi observasi yang realistis. Ditegaskan dalam buku *The Manual of Photography*, bahwasanya pemahaman terhadap karakteristik sistem optik amat diperlukan untuk memprediksi data seperti apa yang mungkin untuk didapatkan. Juga dalam buku *Astrophotography for Beginners*, dinyatakan bahwa previsualisasi penting untuk dilakukan sehingga tidak hanya diperoleh efisiensi dalam pengambilan data, namun juga langkah antisipasi terhadap kondisi nyata di lapangan (Allen & Triantaphillidou, 2011; Pearce & Scagel, 1980).

2.1.1.2 Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan merupakan inti dari fotografi. Fase di mana angan dan rancangan direalisasikan di lapangan. Proses ini meliputi penyelarasan sistem optik terhadap kutub langit (*polar alignment* dan *drift alignment*), pengaturan fokus (*focusing*), dan pengendalian perangkat agar objek tetap berada dalam bidang

pandang selama eksposur (*tracking*). Dalam sistem teleskop optik, faktor seperti difraksi dan fungsi sebar titik (PSF) membatasi ketajaman citra, sehingga pengaturan fokus dan kestabilan pelacakan menjadi aspek yang krusial (Gallaway, 2020; Woodhouse, 2024; Zia, 2019).

Terdapat begitu banyak metoda pelaksanaan astrofotografi, yang dapat disesuaikan dengan racangan fotografer serta kondisi lapangan kala pengambilan data. Dengan menerapkan eksposur pendek, sensor akan menerima sedikit cahaya, sehingga dapat diperoleh detail objek di area terang, namun tidak dengan area gelap. Dengan memanjangkan durasi eksposur, jumlah cahaya yang diterima sensor akan meningkat secara linear. Menyebabkan detail di area gelap semakin nampak, namun area terang akan nampak semakin terang hingga mungkin kehilangan detailnya. Oleh karena itu, sangatlah penting untuk merancang metoda agar sesuai dengan tujuan pemotretan, agar kemudian fotografer mengetahui batasan dalam pengolahan data (Allen & Triantaphillidou, 2011; Pearce & Scagell, 1980; Zia, 2019).

2.1.1.3 Pengolahan

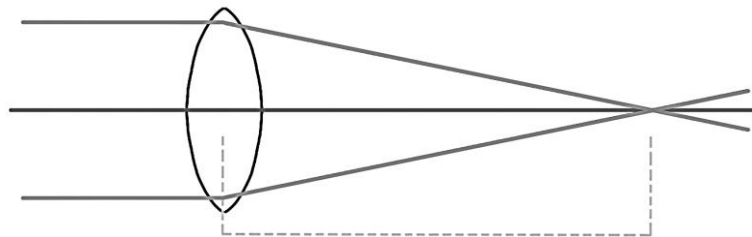
Tahap pengolahan merupakan fase terakhir pemotretan, di mana citra mentah diproses hingga siap dikonsumsi baik sebagai data ilmiah maupun artistik. Dalam artikel “*Astrophotography for Beginners*” ditegaskan bahwa fase pengolahan berperan sebagai pengubah data mentah menjadi representasi visual yang informatif dan estetis. Dalam konteks ilmiah, proses ini juga berfungsi untuk mengekstraksi nilai fotometrik dan posisi objek yang dibutuhkan dalam analisis kuantitatif (Bradt, 2004; Pearce & Scagell, 1980).

2.1.2 Parameter Pemotretan

Untuk menghasilkan foto yang sesuai dengan maksud dan tujuan, dibutuhkan ketepatan tata kelola parameter optik dari perangkat yang digunakan. Terlepas dari apapun genre fotografi yang dilaksanakan, fotografer perlu memiliki memahami bagaimana sistem pemotretan bekerja. Pemahaman ini mencakup cara kerja lensa, kamera, dan sensor serta bagaimana interaksi ketiganya. Dengan demikian, pemotretan dapat dilaksanakan dengan lebih efisien dan menghasilkan data yang lebih optimal (Allen & Triantaphillidou, 2011; Woodhouse, 2024).

2.1.2.1 Panjang Fokus (*Focal Length*)

Panjang fokus atau focal length adalah jarak sepanjang sumbu optik yang dihitung dari titik nodal belakang hingga bidang fokus ketika lensa difokuskan pada jarak tak hingga. Yang digambarkan sebagaimana Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2. 1 Skema panjang fokus lensa

Panjang fokus ditunjukkan oleh garis putus-putus, terukur dari pusat lensa hingga titik perpotongan garis kuning yang mewakili sumber cahaya di sepanjang sumbu optik yang ditandai sebagai garis biru. Aspek ini menjadi salah satu penentu utama yang mengatur skala citra dan memengaruhi tingkat sensitivitas lensa. Nilai pembesaran (*zoom*) serta luas jangkauan sudut pandang (*field of view*, *fov*) yang mampu dicapai oleh perangkat dapat diketahui dan dikalkulasi dengan mengetahui panjang fokus dari lensa yang digunakan. Panjang fokus efektif sebuah lensa ditentukan oleh karakteristik fisik dari komponen penyusunnya seperti jarak antar

elemen optik, radius kelengkungan permukaan, ketebalan, dan indeks bias material lensa (Allen & Triantaphillidou, 2011; Peric & Livada, 2021; Prakes, 2018).

Nilai panjang fokus f dapat dihitung melalui hubungan geometris o jarak objek dan o' jarak bayangan, yang tertulis dalam persamaan fokus lensa:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{o} + \frac{1}{o'} \quad (2.1)$$

Pada perangkat optik yang menerapkan sistem multi-elemen seperti teleskop atau lensa *zoom*, nilai f tidak dihitung secara langsung dari satu permukaan optik, melainkan merupakan nilai efektif dari kombinasi beberapa grup lensa yang berfungsi sebagai sebuah kesatuan (Allen & Triantaphillidou, 2011; Peric & Livada, 2021; Prakes, 2018).

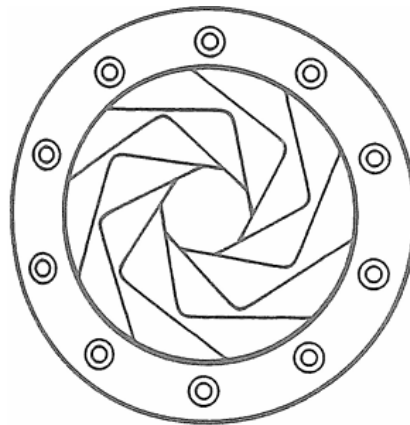
Terdapat dua jenis lensa berdasarkan karakteristik panjang fokusnya, yaitu lensa dengan panjang fokus tetap (*fixed lens* atau *prime lens*) dan lensa dengan fokus variable (*varifocal* atau *zoom lens*). Lensa *fix* memiliki panjang fokus tunggal dan jarak fokus yang tidak berubah, sehingga sistemnya sederhana dan relatif bebas distorsi. Sebaliknya, *zoom lens* memungkinkan perubahan panjang fokus secara kontinu dengan menggerakkan grup lensa internal untuk mengubah pembesaran tanpa mengubah bidang citra secara signifikan. Pada sistem pengompensasi mekanis terhadap perbesaran citra (*mechanically compensated zoom*), perpindahan grup lensa disesuaikan secara non-linear untuk menjaga posisi fokus konstan, sedangkan pada sistem pengompensasi optis terhadap perbesaran citra (*optically compensated zoom*), seluruh elemen bergerak linier namun hanya mempertahankan fokus pada posisi tertentu (Peric & Livada, 2021).

2.1.2.2 Rasio Fokus (*F-number*)

Rasio fokus (N) atau sebagai *F-number* merupakan indikator kemampuan lensa dalam mentransmisikan cahaya. Besar nilai N dapat diperoleh melalui perbandingan antara panjang fokus efektif (f) dengan diameter bukaan lensa (D) yang dapat dituliskan dalam persamaan:

$$N = \frac{f}{D} \quad (2.2)$$

Adapun diameter bukaan lensa merupakan variabel yang dapat dikendalikan nilainya, sekaligus menjadi dasar kalkulasi *F-number*. Pada kamera digital, umumnya nilai ini tertera pada layar penampil. Ditandai dengan huruf miring f dan garis miring, lalu diikuti angka. Seperti contoh tertera $f/4$, maka nilai N lensa adalah 4 (Bradt, 2004; Kinslake, 1992; Nasse, 2010).



Gambar 2. 2 Bukaan atau apertur lensa (Ray, 1939)

Melalui Persamaan (2.2), diketahui bahwasanya lensa dengan panjang fokus besar dan bukaan lensa yang lebar akan memiliki nilai N yang kecil. Semakin kecil nilai N , semakin cepat lensa mengumpulkan cahaya. Yang dengan demikian, rasio perubahan sinyal menuju derau (*noise*) dapat ditingkatkan. Sehingga dalam penerapannya, terlebih untuk waktu paparan yang relatif singkat, nilai N sangat penting untuk diperhatikan (Ashley, 2015; Champagne et al., 2011; Nasse, 2010).

2.1.2.3 Kecepatan Rana (*Shutter Speed*)

Kecepatan rana adalah durasi waktu sensor menerima cahaya dari apertur, yang menentukan total intensitas cahaya yang terekam serta memengaruhi kecerahan dan ketajaman gambar (Child, 2010). Bersama dengan apertur dan ISO, parameter ini membentuk segitiga eksposur (*exposure triangle*), di mana perubahan pada satu elemen harus diimbangi oleh penyesuaian dua lainnya untuk mempertahankan tingkat eksposur yang seimbang (Allen & Triantaphillidou, 2011). Dalam konteks astrofotografi, pengaturan waktu eksposur menjadi krusial karena berkaitan langsung dengan rasio sinyal terhadap derau (SNR) serta kemampuan sistem pelacak dalam mempertahankan kestabilan citra selama pencahayaan (Bradt, 2004).

Ashley (2015) menekankan bahwa untuk sistem ringan tanpa pemandu (*unguided mounts*), batas waktu eksposur efektif hanya 30–60 detik, tergantung jenisudukan dan karakteristik rotasi medan. Eksposur yang terlalu panjang akan menimbulkan *motion blur* atau jejak bintang, sedangkan eksposur yang terlalu singkat menurunkan jumlah foton yang diterima dan memperburuk kualitas sinyal. Oleh karena itu, astrofotografer sering menggunakan teknik penumpukan citra berpaparan pendek (*stacking of short exposures*) untuk meningkatkan rasio sinyal terhadap derau tanpa memperpanjang waktu pencahayaan tunggal (Ashley, 2015).

2.1.2.4 ISO

Nilai ISO dalam kamera menunjukkan ukuran sensitivitas film atau sensor terhadap cahaya. Merepresentasikan jumlah paparan cahaya yang harus dikumpulkan sensor untuk menghasilkan gambar sebagaimana diinginkan. Dalam sistem kamera, pengaturan ISO tidak merubah kepekaan sensor secara fisik,

melainkan memberikan penyesuaian terhadap penguatan sinyal analog dan digital. Semakin tinggi nilai ISO, semakin sedikit cahaya yang dibutuhkan untuk mendapatkan gambar, dan semakin cerah gambar yang diterima. Namun sebagaimana definisinya, penggunaan nilai ISO yang tinggi akan diikuti konsekuensi bertambahnya derau (*noise*) dan degradasi kualitas foto (Gallaway, 2020; Nakamura, 2006; Ourique et al., 2010).

2.1.2.5 Format Sensor dan Ukuran Pixel

Baik format sensor maupun ukuran pixel berperan dalam penentuan diameter lingkaran keburaman yang dapat diterima. Format sensor didefinisikan sebagai panjang diagonal dari area yang diproyeksikan lensa. Ukuran ini menjadi penentu final luas jangkauan pandang yang mampu diabadikan kamera. (Gallaway, 2020; Ourique et al., 2010). Sedangkan ukuran pixel merupakan dimensi fisik dari elemen penangkap foton dalam sensor. Dalam format sensor yang sama, variasi kerapatan susunan pixel tentu memberikan resolusi hasil yang berbeda. Umumnya ukuran pixel dinyatakan dalam satuan mikrometer (μm). Parameter ini memegang kendali dalam penentuan skala citra. Memungkinkan kepresisian pengukuran dalam praktik fotometri dari sebuah data citra (Allen & Triantaphillidou, 2011; Gallaway, 2020).

2.2 Rentang Fokus dan Resolusi

Ketepatan fokus dan resolusi merupakan variabel dasar dalam penentuan kualitas serta validitas data visual. Resolusi didefinisikan sebagai ukuran detail yang dapat direpresentasikan oleh sistem transmisi gambar, atau kemampuan sistem dalam membedakan dua objek yang saling berdekatan (Orhaug, 1969). Sedangkan fokus merupakan kondisi yang dicapai sistem optik dengan mengatur

jarak antara lensa dengan bidang proyeksi sehingga terbentuk bayangan yang paling tajam. Secara konsep, fokus dapat terjadi apabila cahaya yang diterima dan dikumpulkan oleh lensa bertemu pada satu titik di bidang yang sama, yang berarti fokus sebuah lensa hanya optimal pada satu bidang dalam satu waktu. Dengan demikian, objek yang terproyeksikan di bidang lain akan tergambar sebagai bitnik buram yang dikenal sebagai lingkaran keburaman (Chiu & Fuh, 2010; Ourique et al., 2010; Schulz, 2024).

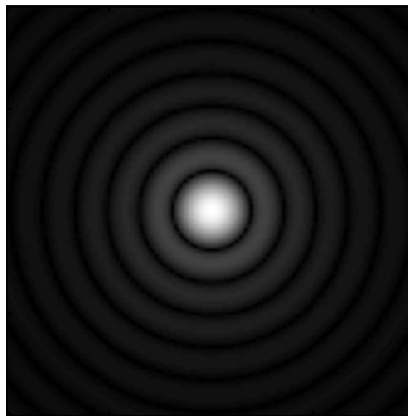
2.2.1 Lingkaran Keburaman (*Circle of Confusion, c*)

Circle of Confusion (c) atau lingkaran keburaman merupakan batas toleransi diameter lingkaran buram agar suatu titik objek masih dikategorikan sebagai fokus atau tajam dalam fotografi. Diameter c ditinjau dalam beberapa pendekatan, berdasarkan kriteria system optic atau kriteria Rayleigh dan berdasarkan kriteria sensor. Pendekatan pertama memandang ukuran minimum c ditentukan oleh sifat gelombang cahaya ketika melintasi apertur sistem optik. Sementara pendekatan kedua memandang ukuran minimum lingkaran keburaman berdasarkan kemampuan sampling sensor. Sebuah lingkaran buram masih dikategorikan tajam apabila memiliki diameter lebih kecil atau setara nilai c . Kriteria ini digunakan sebagai penentuan batas kedalaman bidang dalam pemotretan (Kinslake, 1992; Peric & Livada, 2021; Schulz, 2024).

Dalam semua aplikasi penggunaan lensa, ketajaman gambar berubah secara berkelanjutan seiring perbedaan jarak objek. Fokus yang tidak tepat akan mengurangi resolusi dan ketajaman citra, mengaburkan detail pada hasil proyeksi, sehingga menghilangkan informasi terkait objek yang dikaji. (Den Dekker & Van Den Bos, 1997; Nakamura, 2006).

Dapat diamati dari Gambar 2.4, posisi bidang proyeksi yang tidak tepat berada di titik fokus akan menyebabkan sebuah titik muncul sebagai lingkaran. Semakin jauh bidang proyeksi, yang dalam fotografi merupakan sensor kamera, dari posisi fokus maka semakin besar diameter lingkarannya. Lingkaran yang dikenal sebagai *blur* atau keburaman ini dapat diminimalkan nilainya dengan memperkecil bukaan lensa, yang apabila diterapkan akan sekaligus meningkatkan kedalaman bidang (Prakel, 2018).

2.2.1.1 Kriteria Rayleigh



Gambar 2. 3 Pola cincin gelap-terang (frinji) akibat difraksi cahaya pada apertur bulat (Voelz, 2011)

Dalam sistem optik yang terbatas difraksi (*diffraction limited*), batas keburaman terendah yang dapat dicapai sistem optik bergantung pada batas minimum kemunculan cincin gelap akibat terdifraksinya cahaya yang melintasi apertur atau bukaan. Dalam sistem pemotretan, yang dimaksud apertur yakni bukaan lensa yang berbentuk melingkar sebagaimana Gambar 2.2. (Nakamura, 2006; Peric & Livada, 2021; Ray, 1939; Voelz, 2011).

Cincin gelap pertama muncul saat fungsi intensitas bernilai nol. Kondisi ini dijelaskan oleh fungsi Bessel jenis pertama orde satu $J_1(x)$, dengan nilai akar pertama:

$$x \approx 3,8317$$

Sudut kemunculan cincin gelap pertama (θ) terhadap lintasan optik dirumuskan melalui parameter geometri gelombang $x = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta$:

$$\frac{3,8317 \cdot \lambda}{\pi D} = \sin \theta$$

$$\frac{3,8317 \cdot \lambda}{3,14 \cdot D} = \sin \theta$$

Dengan D menyatakan diameter apertur dan λ menyatakan panjang gelombang cahaya. Menggunakan pendekatan sudut kecil $\sin \theta \approx \theta$ maka:

$$1,22 \frac{\lambda}{D} = \theta$$

Radius lingkaran keburaman pada jarak fokus tertentu f diketahui dengan pendekatan sudut kecil untuk fungsi $\tan \theta$:

$$\tan \theta = \frac{r_c}{f}$$

$$f \cdot \theta = r_c$$

$$f \cdot 1,22 \frac{\lambda}{D} = r_c$$

Sehingga didapati batas diameter c :

$$f \cdot 2,44 \frac{\lambda}{D} = c$$

Yang apabila mengikuti Persamaan (2.2) maka dapat dituliskan sebagai:

$$2,44 \cdot \lambda \cdot N = c \quad (2.3)$$

Dengan N menyatakan rasio fokus lensa (Peric & Livada, 2021).

2.2.1.2 Kriteria Sensor

Menurut perspektif bidang citra, batas lingkaran keburaman ditentukan oleh kemampuan sensor dalam membedakan detail spasial. Sebuah citra dikategorikan tajam apabila diameter c tidak melampaui resolusi unit atau jarak antar piksel (*pixel pitch*) sensor. Secara teknis nilai c untuk sensor monokromatik setara ukuran piksel, sementara untuk sensor polikromatik setara dua kali ukuran ukuran piksel. Dengan mendefinisikan ukuran piksel sebagai δ dan jumlah piksel sebagai M , maka diameter c menurut kriteria sensor adalah (Nakamura, 2006; Schulz, 2024):

$$c = M \cdot \delta \quad (2.4)$$

2.2.2 Kedalaman Bidang (*Depth of Field*) dan Kedalaman Ruang (*Depth of Focus*)

Sebagaimana telah dinyatakan, lensa hanya dapat fokus pada satu bidang dalam satu waktu. Titik di luar bidang fokus lensa tidak akan diproyeksikan sebagai sebuah titik, melainkan sebagai lingkaran buram. Rentang area di mana batasan dari sebuah titik masih dianggap jelas, yang membentang dari depan hingga belakang posisi fokus tepat, dikenal sebagai kedalaman bidang (*depth of focus*, Dof). Kriteria fokus yang dapat diterima ditentukan oleh ukuran lingkaran keburaman (c). Apabila diameter sebuah lingkaran buram lebih kecil atau setidaknya setara nilai c , maka titik yang berada di posisi tersebut dikategorikan termasuk dalam batas rentang ketajaman (Prakel, 2018; Schulz, 2024).

Parameter ini erat kaitannya dengan diameter bukaan lensa (D), format sensor, serta jarak fokus. Digambarkan dalam Gambar 2.4 (d), dengan mempersempit diafragma lensa maka jangkauan area yang tampak tajam akan meluas. Meninjau ulang definisi Dof, terdapat masalah dalam penyamaan persepsi

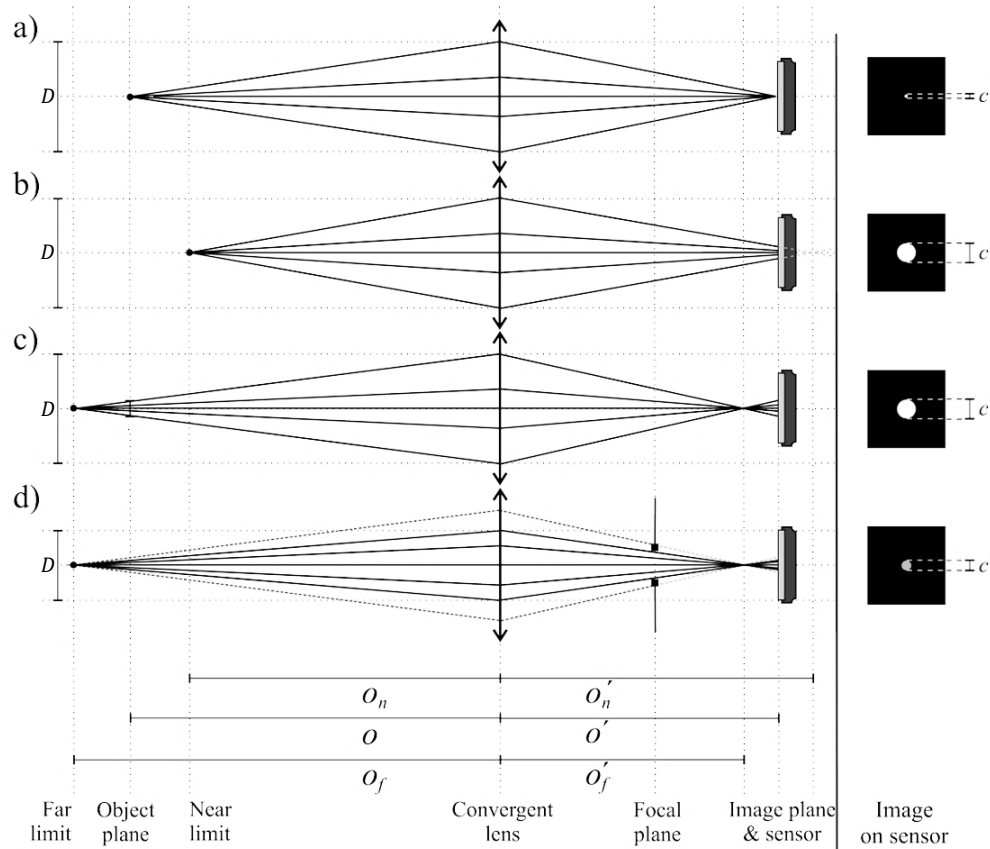
batas kedalaman bidang, sebab persepsi atau anggapan setiap individu terhadap standar ketajaman citra belum tentu seragam. Sehingga dalam sistem digital, nominal Dof dikalkulasi berdasarkan beberapa faktor seperti jarak pandang, perbesaran, format sensor, dan ukuran pixel dalam sensor (Prakel, 2018; Schulz, 2024).

Nilai rentang kedalaman bidang dapat diketahui dengan memetakan persamaan batas fokus terjauh dan terdekat, atau batas fokus di depan dan belakang bidang fokus tepat. Dengan menerapkan konsep rasio segitiga sama sisi pada skema kerucut cahaya dari Gambar 2.4, batas terjauh Dof dapat dinyatakan dalam perbandingan:

$$\frac{o' - o_f'}{o_f'} = \frac{c}{D} \quad (2.5)$$

Dan batas terdekat Dof dapat dinyatakan sebagai:

$$\frac{o' - o_n'}{o_n'} = \frac{c}{D} \quad (2.6)$$



Gambar 2. 4 Kaitan antara proyeksi, kedalaman bidang, dan lingkaran keburaman. a) Idealnya, sebuah titik diproyeksikan sebagai titik di bidang Gambar. b) dan c) pada posisi yang tidak tepat, titik tersebut akan muncul sebagai lingkaran buram. d) Dengan mempersempit bukaan lensa, diameter lingkaran buram turut berkurang (Zandvliet, 2017).

Di mana o' adalah jarak bayangan dalam kondisi fokus optimal, o_f' adalah jarak bayangan untuk objek yang lebih jauh, o_n' adalah jarak bayangan untuk objek yang lebih dekat, c adalah diameter lingkaran buram, D adalah lebar bukaan lensa, dan indeks o yang tidak diikuti aksen menandakan parameter berada di depan lensa atau mewakili posisi aktual.

Untuk mengetahui panjang fokus dari objek dengan jarak terjauh agar tetap tergolong fokus, maka dari Persamaan (2.5):

$$\begin{aligned}\frac{o' - o_f'}{o_f'} &= \frac{c}{D} \\ \frac{o'}{o_f'} - \frac{o_f'}{o_f'} &= \frac{c}{D} \\ \frac{o'}{o_f'} &= \frac{c}{D} + 1 \\ o_f' &= \frac{o'}{\frac{c}{D} + 1} \\ o_f' &= \frac{oD}{c + D}\end{aligned}$$

Subtitusikan Persamaan (2.2):

$$\begin{aligned}o_f' &= \frac{o' \left(\frac{f}{N} \right)}{c + \left(\frac{f}{N} \right)} \\ o_f' &= \frac{o' f}{f + Nc}\end{aligned}\tag{2.7}$$

Dan cara yang sama apabila diterapkan pada Persamaan (2.4), didapati:

$$o_n' = \frac{f o'}{f - Nc}\tag{2.8}$$

Yang merupakan persamaan standar dalam kalkulasi batas ketajaman yang diterapkan mayoritas lensa kamera (Schulz, 2024).

2.2.3 Metode Pemfokusan

Metode fokus tak hingga dan jarak hiperfokal kerap dipraktikkan untuk memetakan kedalaman bidang pada pemotretan objek jarak jauh. Pada kondisi fokus tak hingga, objek di jarak yang sangat jauh akan terproyeksi tajam tepat pada bidang gambar. Sementara jarak hiperfokal menyatakan jarak fokus terpendek di mana batas Dof terjauh akan mencapai jarak tak hingga. Metode tersebut

dinyatakan dapat memastikan citra tetap nampak tajam, dari posisi tertentu hingga pada jarak “tak terhingga” (Oberdörster et al., 2012; Peric & Livada, 2021).

Dalam dunia astrofotografi amatir, Hartmann mask dan Bahtinov mask adalah dua perangkat yang cukup banyak digunakan untuk mencapai fokus terbaik. Alat ini bekerja dengan mendifraksi cahaya yang masuk dan memproyeksikannya sebagai pola difraksi yang khas. Mayoritas astronom lebih familiar dengan model Hartmann yang sudah ada sejak tahun 1900. Sedangkan Bahtinov mask yang merupakan model perkembangannya, yang diperkenalkan pada tahun 2005, jarang digunakan. Kondisi ini berdampak pada minimnya perangkat lunak yang didedikasikan untuk pemanfaatan Bahtinov mask (Zandvliet, 2017).

2.2.3.1 Fokus Tak Hingga

Fokus tak hingga (*infinity focus*) menyatakan ketika berkas cahaya datang dari jarak sangat jauh, maka bayangannya akan difokuskan relatif tepat pada posisi f lensa. Dalam teori ini, semua objek yang berada pada jarak yang sangat jauh dianggap memiliki ketajaman yang seragam. Pendekatan ini berangkat dari persamaan lensa tipis sebagaimana Persamaan (2.1), yang apabila o jarak objek dari lensa jauh lebih besar dari o' jarak bayangan dari lensa, maka posisi fokus f akan sama persis dengan jarak objek (Haigh, 2019; Odenwald, 2019).

$$\begin{aligned}\frac{1}{f} &\approx \frac{1}{o'} \\ f &\approx o'\end{aligned}\tag{2.9}$$

Namun dalam praktiknya, fokus tak hingga hanya berlaku sebagai pendekatan. Sebab apabila diterapkan, berarti mengabaikan batas rentang fokus lensa. Sedangkan sebuah fokus mutlak tidak akan dapat dicapai, mengingat setiap

sistem lensa pasti memiliki batas rentang kedalaman bidang, yaitu area di sekitar bidang fokus yang bayangannya masih terproyeksi dalam batas tajam (Nasse, 2010; Zandvliet, 2017).

2.2.3.2 Jarak Hiperfokal

Konsep ini hadir sebagai solusi keterbatasan fokus tak hingga dalam memetakan kedalaman bidang citra. Pada pemotretan menggunakan lensa dengan perbesaran tinggi, jarak hiperfokal diterapkan untuk menghindari pengaturan fokus terus-menerus yang dapat mengganggu kestabilan perangkat. Jarak hiperfokal H didefinisikan sebagai jarak fokus terdekat di mana seluruh objek dari setengah jarak tersebut hingga jarak tak hingga tetap berada dalam rentang ketajaman yang dapat diterima (Champagne et al., 2011; Peric & Livada, 2021; Schulz, 2024).

Menerapkan analogi segitiga sama sisi, dapat didefinisikan persamaan untuk rasio jarak terjauh objek secara aktual sebagaimana Persamaan (2.8), yaitu

$$\begin{aligned}\frac{o_f - o}{o_f} &= \frac{c}{D} \\ o_f &= \frac{o}{1 - \frac{c}{D}}\end{aligned}\tag{2.10}$$

Meninjau Gambar (2.4). Lingkaran buram di bidang proyeksi kini didefinisikan sebagai c' yang besarnya ekuivalen dengan lingkaran keburaman c di bidang objek. Nilai c' dipengaruhi magnifikasi atau perbesaran bayangan objek oleh sistem optik yang juga memperbesar lingkaran keburaman atau c . Keduanya terhubung melalui persamaan:

$$c' = c \cdot m\tag{2.11}$$

$$c = \frac{c'}{m}\tag{2.12}$$

Dengan m besar magnifikasi atau perbesaran, merupakan rasio antara jarak objek dengan jarak bayangannya:

$$m = \frac{o'}{o} \quad (2.13)$$

Posisi bayangan (o') pada kondisi fokus optimal dapat diketahui melalui Persamaan (2.1):

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{o} + \frac{1}{o'} \\ \frac{1}{f} - \frac{1}{o} &= \frac{1}{o'} \\ \frac{o-f}{o \cdot f} &= \frac{1}{o'} \\ o' &= \frac{o \cdot f}{o-f} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Sehingga Persamaan (2.13) dapat dituliskan sebagai:

$$\begin{aligned} m &= \frac{\left(\frac{o \cdot f}{o-f} \right)}{o} \\ &= \frac{o \cdot f}{o-f} \cdot \frac{1}{o} \\ &= \frac{f}{o-f} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Persamaan (2.15) dapat disubstitusikan ke Persamaan (2.12) untuk menyelesaikan (2.10), sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} o_f &= \frac{o}{1 - \frac{c'(o-f)}{fD}} \\ &= \frac{o}{\frac{fD - c'(o-f)}{fD}} \end{aligned}$$

$$= \frac{o f D}{f D - c'(o - f)}$$

Kemudian disubstitusikan Persamaan (2.2):

$$\begin{aligned} o_f &= \frac{o f \left(\frac{f}{N}\right)}{f \left(\frac{f}{N}\right) - c'(o - f)} \\ &= \frac{o f^2}{f^2 - N c'(o - f)} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Dan melalui tahapan yang sama, diperoleh persamaan untuk batas jarak objek terdekat:

$$o_n = \frac{o f^2}{f^2 + N c'(o - f)} \quad (2.17)$$

Dengan mengambil asumsi nilai o_f sangatlah jauh menjadi jarak tidak terhingga, maka penyebut di Persamaan (2.16) harus bernilai 0. Sehingga:

$$\begin{aligned} f^2 - N c'(o - f) &= 0 \\ f^2 &= N c'(o - f) \\ \frac{f^2}{N c'} &= o - f \\ \frac{f^2}{N c'} + f &= o \end{aligned} \quad (2.18)$$

Mengikuti definisi sebelumnya, makna indeks o adalah posisi fokus optimal. Bentuk ini lebih umum diperkenalkan sebagai persamaan hiperfokal H . Apabila panjang fokus lensa jauh lebih kecil dibandingkan jarak objek yang difokuskan, maka:

$$\begin{aligned} H &= o \\ &= \frac{f^2}{N c'} + f \end{aligned}$$

$$= \frac{f^2}{N c'} \quad (2.19)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (2.19) ke Persamaan (2.17) untuk mengetahui batas jarak terdekat, didapati:

$$\begin{aligned} o_n &= \frac{\left(\frac{f^2}{N \cdot c'}\right) f^2}{f^2 + N c' \left(\frac{f^2}{N \cdot c'} - f\right)} \\ &= \frac{\frac{f^4}{N \cdot c'}}{f^2 + (f^2 - N c' f)} \\ &= \frac{\frac{f^4}{N \cdot c'}}{2f^2 - N c' f} \end{aligned}$$

Dengan pendekatan yang sama, bahwasanya jarak objek yang difokuskan jauh lebih besar dari panjang fokus lensa, diperoleh:

$$\begin{aligned} o_n &\approx \frac{\frac{f^4}{N \cdot c'}}{2f^2} \\ &\approx \frac{f^2}{2 N c'} \\ &\approx \frac{H}{2} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Sehingga, dengan memfokuskan lensa pada jarak hiperfokal, kedalaman bidang akan membentang dari setengah jarak hiperfokal hingga jarak tidak terhingga (Peric & Livada, 2021; Schulz, 2024).

2.3 Difraksi

Difraksi adalah fenomena optik, yang terjadi akibat sifat cahaya sebagai gelombang. Difraksi merupakan kecenderungan gerak gelombang untuk membelok atau menyebar setelah melewati suatu bukaan (apertur) ataupun celah. Ketika

menyebar, setiap berkas cahaya akan saling berinterferensi dan menghasilkan sebuah pola intensitas yang nampak sebagai susunan gelap terang (Adams, 2005; Hecht, 2017; Pedrotti & Pedrotti, 1992).

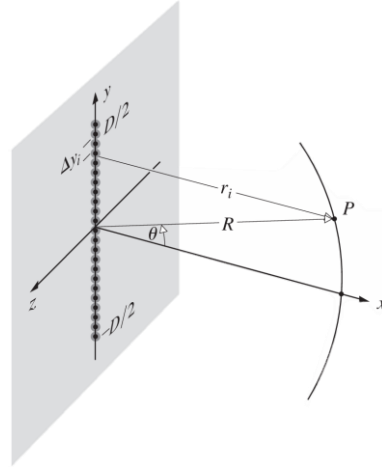
Ketika sumber cahaya dan layar pengamatan berada pada jarak yang sangat jauh dari apertur, maka gelombang yang datang dan melintas dianggap sebagai gelombang datar (*plane waves*). Difraksi cahaya yang terjadi pada medan jauh dikenal sebagai difraksi Fraunhofer. Pada kondisi ini, struktur geometris sangat berpengaruh pada bentuk pola interferensi. Proses difraksi Fraunhofer dapat dianalisis melalui prinsip Huygens-Fresnel, yang menyatakan bahwa setiap titik pada gelombang dapat menjadi sumber gelombang baru. Pola intensitas yang terbentuk merupakan hasil interferensi seluruh gelombang sekunder pada apertur. (Hecht, 2017).

2.3.1 Difraksi Celah Tunggal

Setiap *wavelet* yang membentuk muka gelombang dipandang sebagai osilator elektron yang merepresentasikan sumber sekunder untuk celah dengan lebar jauh lebih kecil dari λ panjang gelombang datang, dan disinari oleh gelombang datar (*plane wave*). Dengan meninjau Gambar (2.7), Setiap titik yang memancarkan *wavelet* dinotasikan sebagai:

$$E = \left(\frac{E_0}{r} \right) \sin(\omega t - kr) \quad (2.21)$$

Di mana E_0 adalah amplitudo sumber, r jarak dari titik sumber ke bidang pengamatan P , k bilangan gelombang, dan ω frekuensi sudut temporal. Persamaan ini secara eksplisit menyatakan nilai r berbanding terbalik terhadap amplitudo (Hecht, 2017; Zandvliet, 2017).



Gambar 2. 5 Sumber Koheren (Hecht, 2017)

Apabila terdapat N titik yang menyusun setiap bagian kecil Δy_i di sepanjang deret sumber D yang membentang di sumbu y , sedangkan sebuah deret terbagi lagi menjadi beberapa segmen M , maka kontribusi setiap medan di titik P dari segmen ke- i adalah:

$$E_i = \left(\frac{E_0}{r} \right) \sin(\omega t - kr) \left(\frac{N \Delta y_i}{D} \right) \quad (2.22)$$

Dengan syarat Δy_i bernilai sangat kecil, dan N merupakan jumlah yang sangat besar, D dapat dianggap sebagai sumber kontinu.

Kemudian didefinisikan konstanta E_L sebagai amplitudo sumber per satuan panjang dari D :

$$E_L \equiv \frac{1}{D} \lim_{N \rightarrow \infty} (E_0 N) \quad (2.23)$$

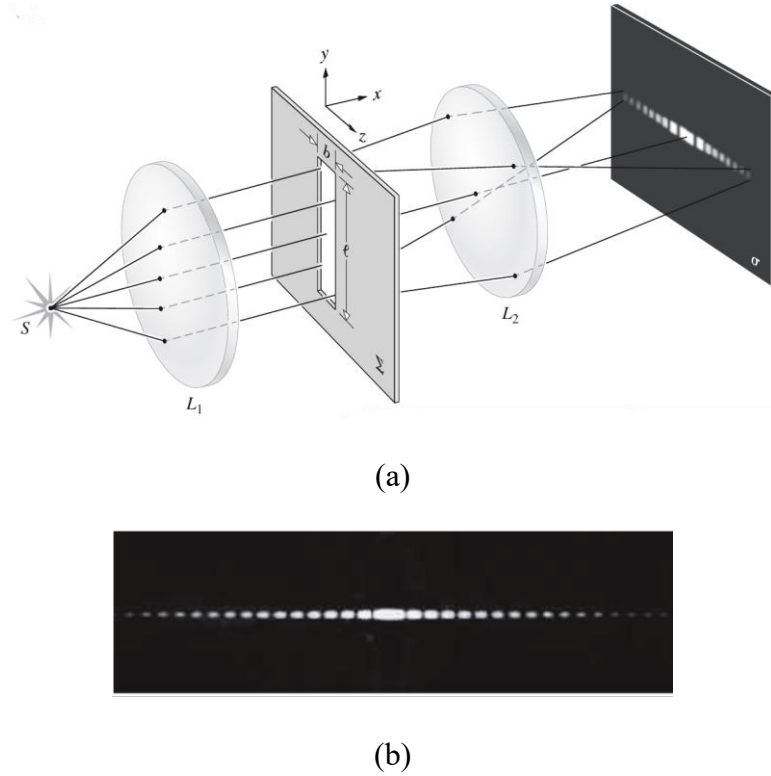
Sehingga besar medan total untuk semua segmen adalah:

$$E_i = \sum_{i=1}^M \frac{E_L}{r} \sin(\omega t - kr) \Delta y_i \quad (2.24)$$

Sebab sumber telah dianggap sebagai garis kontinu, Δy_i harus menjadi sangat kecil sehingga $M \rightarrow \infty$. Dengan demikian, penjumlahan akan berubah bentuk menjadi integral terhingga:

$$E = E_L \int_{-D/2}^{+D/2} \frac{\sin(\omega t - kr) \Delta y_i}{r} dy \quad (2.25)$$

Di mana $r = r(y)$ (Hecht, 2017; Zandvliet, 2017).



Gambar 2. 6 Difraksi Fraunhofer untuk celah tunggal. (a) Skema difraksi, (b) pola difraksi oleh celah tunggal vertikal sebuah titik sumber cahaya (Hecht, 2017)

Apabila titik P dari Gambar (2.7) berada pada jarak yang sangat jauh dari sumber, dan $R \gg D$. Dalam kasus ini, nilai $r(y)$ tidak akan jauh berbeda dari nilai tengah R , sehingga E_L/R di titik P pada dasarnya bernilai konstan. Medan di sebagian titik P terhadap sumber dy adalah:

$$dE = \frac{E_L}{R} \sin(\omega t - kr) dy \quad (2.26)$$

Dengan $(E_L/R)dy$ menyatakan amplitudo gelombang, dan didefinisikan $r(y)$ sebagai:

$$r(y) = R - y \sin\theta + \frac{y^2}{2R} \cos^2\theta + \dots \quad (2.27)$$

Di mana θ diukur dari bidang xz dan mengabaikan sumbu ketiga selama kontribusinya tidak signifikan terhadap fase, bahkan ketika $y = \pm D/2$. Hal ini berlaku untuk semua nilai θ untuk nilai R yang besar. Dengan memenuhi kondisi Fraunhofer, di mana $R \gg D$, maka suku dengan orde $y^2/(2R)$ memberikan kontribusi fase yang tidak signifikan, sehingga:

$$r(y) \approx R - y \sin\theta$$

Yang apabila disubstitusikan ke Persamaan (2.26):

$$\begin{aligned} dE &= \frac{E_L}{R} \sin(\omega t - kR + ky \sin\theta) dy \\ E &= \frac{E_L}{R} \int_{-D/2}^{+D/2} \sin(\omega t - kR + ky \sin\theta) dy \end{aligned}$$

Untuk penyederhanaan penulisan, didefinisikan $m = \omega t - kR$ dan $n = k \sin\theta$

$$\begin{aligned} &= \frac{E_L}{R} \left[-\frac{1}{n} \cos(m + ny) \right]_{y=-D/2}^{y=+D/2} \\ E &= -\frac{E_L}{nR} \left[\cos\left(m + \frac{nD}{2}\right) - \cos\left(m - \frac{nD}{2}\right) \right] \end{aligned}$$

Melalui identitas

$$\cos u - \cos v = -2 \sin\left(\frac{u+v}{2}\right) \sin\left(\frac{u-v}{2}\right)$$

Didefinisikan $u = m + \frac{nD}{2}$ dan $v = m - \frac{nD}{2}$, sehingga:

$$\begin{aligned} E &= -\frac{E_L}{nR} \left[-2 \sin\left(\frac{m + \frac{nD}{2} + m - \frac{nD}{2}}{2}\right) \right. \\ &\quad \left. \sin\left(\frac{m + \frac{nD}{2} - m + \frac{nD}{2}}{2}\right) \right] \\ &= -\frac{E_L}{nR} \left[-2 \sin(m) \sin\left(\frac{nD}{2}\right) \right] \end{aligned}$$

$$= 2 \frac{E_L}{nR} \sin(m) \sin\left(\frac{nD}{2}\right)$$

Kemudian didefinisikan $\beta = \frac{kD}{2} \sin \theta$ yang berarti

$$\beta = \frac{nD}{2}$$

$$n = \frac{2\beta}{D}$$

Sehingga diperoleh:

$$\begin{aligned} E &= 2 \frac{E_L}{nR} \sin(m) \sin(\beta) \\ &= \frac{E_L}{R} \sin(m) \frac{D \sin(\beta)}{\beta} \\ &= \frac{E_L D}{R} \left(\frac{\sin(\beta)}{\beta} \right) \sin(\omega t - kR) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Jumlah intensitas radiasi dinyatakan oleh persamaan:

$$\begin{aligned} I(\theta) &= E^2 \\ &= \frac{1}{2} \left(\frac{E_L D}{R} \right)^2 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \end{aligned}$$

Yang berarti $\sin(\omega t - kR) = \frac{1}{2}$. Sehingga melalui pendekatan Fraunhofer, besar intensitas radiasi adalah:

$$I(\theta) = I(0) \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2$$

Dengan $I(0)$ adalah intensitas di posisi maksimum utama, secara matematis menyatakan bahwa difraksi Fraunhofer dapat terjadi apabila

$$\frac{D}{\lambda R} \ll 1 \quad (2.29)$$

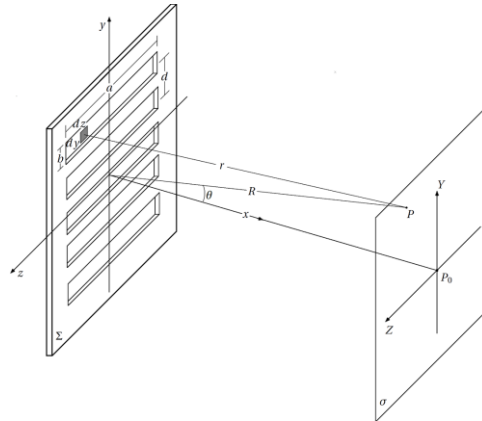
Dengan D adalah ukuran apertur. Difraksi yang dihasilkan oleh celah semacam itu, umumnya bersumber dari cahaya dengan panjang gelombang bernilai ratusan λ , dengan panjang celah beberapa sentimeter saja (Zandvliet, 2017).

2.3.2 Difraksi kisi

Ketika apertur terdiri dari banyak celah identik yang tersusun periodik, maka gelombang dari setiap celah dapat saling berinterferensi. Untuk mengetahui intensitas cahaya pada celah yang banyak, perlu dilakukan perluasan prosedur kalkulasi intensitas pada celah tunggal. Ekspresi umum untuk difraksi Fraunhofer untuk celah dengan nilai $r, R \gg$ ukuran lubang adalah:

$$\dot{E} = \frac{E_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \iint e^{ik(Yy - Zz)/R} ds \quad (2.30)$$

Di mana $ds(y, z)$ menyatakan permukaan dari apertur dalam koordinat y dan z , E_A adalah amplitudo cahaya di area ds dan diasumsikan sebagai P_0 pada Gambar (2.9) untuk sumber pada jarak jauh (Zandvliet, 2017).



Gambar 2. 7 Apertur dengan banyak celah (Zandvliet, 2017)

Dengan menjabarkan Persamaan (2.29) dan meninjau Gambar (2.9), disturbansi atau interferensi di area $P(Y, Z)$ dapat dinyatakan dalam:

$$\dot{E} = \frac{E_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \left[\int_{-b/2}^{+b/2} e^{ikYy/R} dy \int_{-a/2}^{+a/2} e^{ikZz/R} dz \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \int_{a-\frac{b}{2}}^{d+\frac{b}{2}} e^{\frac{ikYy}{R}} dy \int_{d-\frac{a}{2}}^{d+\frac{a}{2}} e^{\frac{ikZz}{R}} dz + \dots \\
& + \int_{(N-1)d-\frac{b}{2}}^{(N-1)d+\frac{b}{2}} e^{\frac{ikYy}{R}} dy \\
& \left[\int_{(N-1)d-\frac{a}{2}}^{(N-1)d+\frac{a}{2}} e^{\frac{ikZz}{R}} dz \right] \quad (2.31)
\end{aligned}$$

Di mana N adalah jumlah apertur persegi panjang, a lebar celah, b panjang celah, dan d panjang jarak antar celah. Sehingga bentuk integral menjadi:

$$\begin{aligned}
\dot{E} = & \frac{E_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \left[ab \left(\frac{\sin \frac{kbY}{2R}}{\frac{kbY}{2R}} \right) \left(\frac{\sin \frac{kaZ}{2R}}{\frac{kaZ}{2R}} \right) \right. \\
& + \left(\frac{2R e^{\frac{idkY}{R}} \sin \left(\frac{kbY}{2R} \right)}{kY} \right. \\
& \left. \left. \frac{2R e^{\frac{idkZ}{R}} \sin \left(\frac{kaZ}{2R} \right)}{kZ} \right) + \dots \right. \\
& + \left(\frac{iR \left(e^{\frac{ibkY}{R}} - 1 \right) e^{-\frac{ikY(b-2d)(-1)}{2R}}}{kY} \right. \\
& \left. \left. \frac{iR \left(e^{\frac{iakZ}{R}} - 1 \right) e^{-\frac{ikZ(a-2d)(N-1)}{2R}}}{kZ} \right) \right] \quad (2.32)
\end{aligned}$$

Dengan meninjau kembali persamaan (2.30), kontribusi dari celah ke- j dapat dihitung sebagai:

$$E_j = \frac{abE_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \cdot e^{\frac{jdkY}{R}} e^{\frac{jdkZ}{R}}$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \frac{\sin\left(\frac{kbY}{2R}\right) \sin\left(\frac{kaZ}{2R}\right)}{\frac{abk^2YZ}{4R^2}} \\
& = \frac{abE_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \cdot e^{\frac{ijkY}{R}} e^{\frac{ijkZ}{R}} \cdot \\
& \quad \frac{\sin(\beta) \sin(\alpha)}{\beta\alpha}
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Di mana $\alpha = \frac{kaZ}{2R}$ dan $\beta = \frac{kbY}{2R}$. Total disturbansi optik yang dituliskan dalam Persamaan (2.30) kini merupakan penjumlahan kontribusi dari setiap apertur:

$$\begin{aligned}
\dot{E} &= \sum_{j=0}^{N-1} E_j \\
&= \sum_{j=0}^{N-1} \left(\frac{abE_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \cdot e^{\frac{ijk}{R}(Y+Z)} \cdot \frac{\sin(\beta) \sin(\alpha)}{\beta\alpha} \right) \\
&= \frac{abE_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \cdot \frac{\sin(\beta) \sin(\alpha)}{\beta\alpha} \cdot \\
& \quad \sum_{j=0}^{N-1} e^{\frac{ijk}{R}(Y+Z)}
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Bentuk penjumlahan dalam Persamaan (2.33) dapat dituliskan kembali sebagai

$$\begin{aligned}
\sum_{j=0}^{N-1} e^{\frac{ijk}{R}(Y+Z)} &= \sum_{j=0}^{N-1} (e^{i2\gamma})^j \\
&= \frac{e^{i2\gamma N} - 1}{e^{i2\gamma} - 1} \\
&= \frac{e^{i\gamma N} (e^{i\gamma N} - e^{-i\gamma N})}{e^{i\gamma} (e^{i\gamma} - e^{-i\gamma})}
\end{aligned}$$

$$= e^{i(N-1)\gamma} \left(\frac{\sin \gamma N}{\sin \gamma} \right) \quad (2.35)$$

Dengan $\gamma = dk/2R$, dan oleh sebab itu

$$\begin{aligned} \dot{E} &= \frac{abE_A e^{i(\omega t - kR)}}{R} \cdot \frac{\sin(\beta) \sin(\alpha)}{\beta \alpha} \cdot \\ &e^{i(N-1)\gamma} \left(\frac{\sin \gamma N}{\sin \gamma} \right) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Jarak dari pusat deretan apertur menuju titik P sama dengan $\left[R - N(-1) \left(\frac{d}{2} \right) \sin \theta \right]$, sehingga fase E di titik P sesuai dengan fase gelombang yang dipancarkan dari titik tengah sumber. Dengan demikian, intensitas radiasi dinyatakan sebagai:

$$(Re\dot{E})^2 = \frac{1}{2} \dot{E} \ddot{E}$$

Yang menghasilkan:

$$I(Y, Z, N) = I_0 \left(\frac{\sin \beta}{\beta} \right)^2 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \left(\frac{\sin \gamma N}{\sin \gamma} \right)^2$$

Di mana I_0 adalah intensitas radiasi di titik maksimum utama (Zandvliet, 2017).

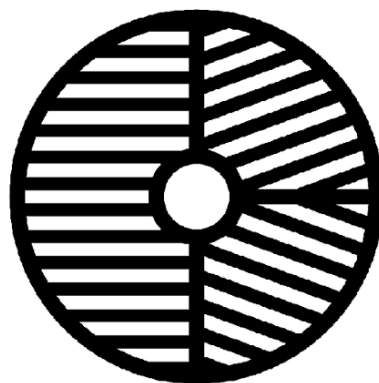
2.3.3 Apertur dan Transformasi Fourier

Transformasi Fourier diterapkan untuk memecah suatu fungsi waktu atau ruang menjadi komponen frekuensi. Difraksi Fraunhofer merupakan kasus khusus difraksi yang terjadi ketika jarak ke bidang gambar besar dibandingkan dengan diameter apertur. Distribusi medan dalam pola difraksi Fraunhofer adalah transformasi Fourier dari fungsi apertur yang mendefinisikan variasi amplitudo dan fase (Voelz, 2011; Zandvliet, 2017). Fungsi apertur mengontrol jumlah cahaya yang melewati lensa objektif. Aperturs atau diafragma, adalah mekanisme yang

memungkinkan pengendalian diameter bukaan sentral, sehingga membatasi kuantitas cahaya yang mencapai sensor. Dalam metode fokus yang memanfaatkan Transformasi Fourier, mengintegrasikan distribusi daya dalam ruang Fourier (yang bertindak seperti filter *low pass*) membuat hasilnya kurang rentan terhadap derau (*noise*) (Tan & Schulz, 2022).

2.4 Bahtinov Mask

Bahtinov mask merupakan alat bantu fokus yang diciptakan dan diperkenalkan pada tahun 2005 oleh seorang astrofotografer asal Rusia, Pavel Bakhtinov. Alat hasil coba-ralat modifikasi Hartmann mask ini umum digunakan dalam astrofotografi amatir untuk memvisualisasikan ketepatan fokus. Instrumen ini dipasang di depan bukaan lensa, dan bekerja dengan cara mendifraksi cahaya yang masuk. Berbentuk piringan tertutup dengan tiga zona kisi khas, yaitu dua zona diagonal dan satu zona tegak di tengah. Umumnya, kisi diagonal membentuk sudut positif dan negatif 20 derajat terhadap kisi tegak (William Optics, n.d.; Wunderlin, 2012; Zandvliet, 2017).

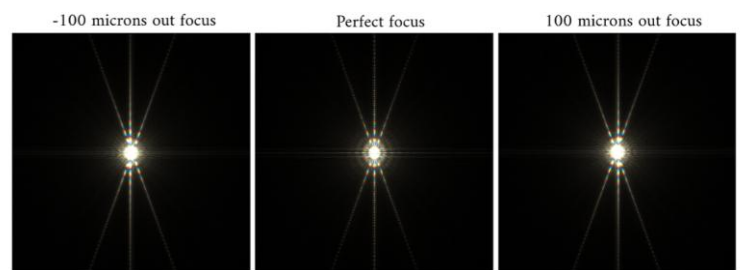


Gambar 2. 8 Bahtinov Mask (Zandvliet, 2017)

Dengan melewati alat ini, setiap titik cahaya akan menghasilkan tiga pola difraksi. Setiap zona kisi akan memecah pancaran cahaya, memproyeksikan paku difraksi (*diffraction spike*) yang tegak lurus terhadap orientasi kisi yang

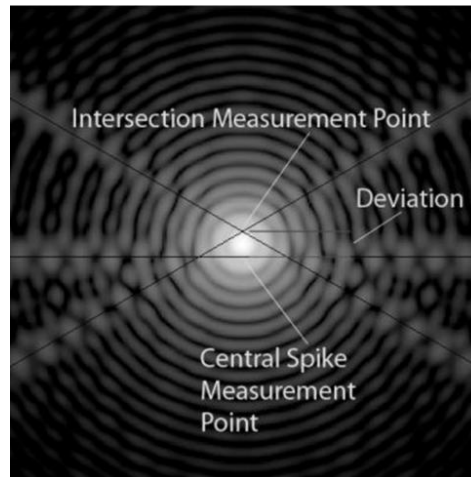
dilewatinya. Dengan model apertur sebagaimana Gambar (2.5), citra yang ditampilkan adalah kombinasi dua paku difraksi yang saling menyilang dan satu paku difraksi tengah yang lurus melintang (Champagne et al., 2011; Wunderlin, 2012).

Posisi fokus yang tepat akan menampilkan paku difraksi tengah berada tepat di titik perpotongan dua paku difraksi yang saling menyilang. Sedangkan apabila fokus sistem tidak tepat, maka paku difraksi tengah akan bergeser dari titik perpotongan.



Gambar 2. 9 Pola difraksi Bahtinov mask (Zandvliet, 2017)

Pada konteks penggunaan CCD sebagai bidang pengamatan, objek yang berada pada posisi intrafokal ataupun ektrafokal akan menggeser garis lurus ke sisi kanan atau kiri pola garis silang, tergantung pada orientasi pemasangan Bahtinov Mask. Melalui pengukuran pergeseran paku difraksi inilah, besar pergeseran fokus dapat dianalisis dan dikoreksi (Zandvliet, 2017).



Gambar 2. 10 Pengukuran pergeseran paku difraksi Bahtinov mask (Champagne et al., 2011)

Pengukuran panjang pergeseran paku difraksi dapat dilakukan dengan menganalisis posisi antar paku yang berubah seiring defokus. Dengan acuan pergeseran spasial, jarak antara titik potong paku difraksi diagonal yang saling menyilang (*intersection measurement point*) diukur tegak lurus menuju paku difraksi pusat (*central spike measurement point*) (Champagne et al., 2011).

BAB III

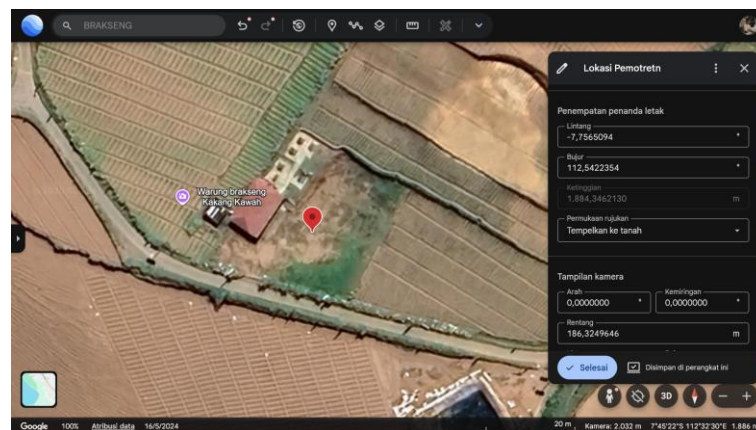
METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian analitis observasional dengan pendekatan fisika optik. Pendekatan analitis dilakukan untuk menurunkan hubungan matematis antara pergeseran paku difraksi Bahtinov mask dan rentang kedalaman bidang dalam astrofotografi. Sedangkan pendekatan observasional diterapkan untuk memperoleh data citra untuk memvalidasi analisis dan kalkulasi. Penelitian diawali dengan studi literatur dan penurunan persamaan secara teoretis, kemudian divalidasi hasilnya melalui data citra astrofotografi.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Desember 2024 hingga Mei 2026. Lokasi pemotretan bertempat di bukit Brakseng, Jawa Timur, tepatnya berada di koordinat $-7,7565^{\circ}$ Lintang Selatan, $112,5422^{\circ}$ Bujur Timur, dengan elevasi 1883,86 meter di atas permukaan laut.



Gambar 3. 1 Lokasi Pemotretan (google earth)

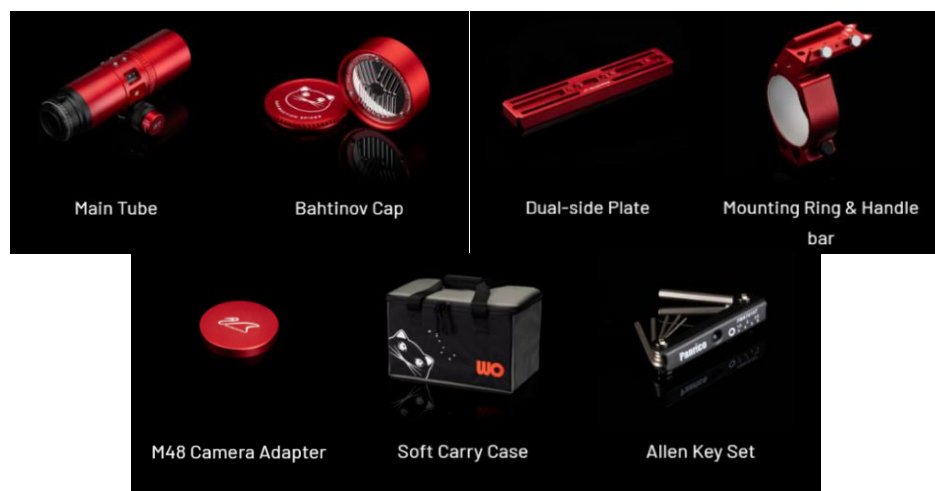
Lokasi ini dipilih karena memiliki jangkauan pandang yang luas, akses yang relatif mudah, serta kualitas kecerahan langit dengan tingkat polusi cahaya rendah. Dalam

kondisi cuaca cerah, lokasi ini tergolong dalam skala Bortle 2, di mana detail Bima Sakti atau *Milky Way* terlihat cukup menonjol dan terstruktur, serta terdapat banyak galaksi, nebula, dan klaster bintang yang samar terlihat melalui mata telanjang.

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

- a. Perangkat keras dan perangkat lunak yang digunakan untuk memperoleh dan mengolah data dalam penelitian ini diantaranya:

1. Set lensa William Optic Redcat 51



Gambar 3. 2 Komponen dalam satu set lensa William Optic Redcat 51 (<https://williamoptics.com/products/cat-51>)



Gambar 3. 3 Konfigurasi set lensa William Optic Redcat 51 (<https://williamoptics.com/products/cat-51>)

2. Kamera Canon EOS M
3. Kartu SD

4. Set *star tracker* Latte V4

Tertera dalam Gambar 3.3 dengan rincian komponen (dirunut dari kiri ke kanan): lengan penyeimbang beban (*counter weight arm*), kamera pemandu (*guider cam*) dan pembidik titik merah (*red dot*), *Dec L plate*, *RA Mount*, kabel potret, baterai, Swiss Arca *clamp*, dan *joystick* nunchuck.



Gambar 3. 4 Komponen dalam satu set *star tracker* Latte V4

5. Tripod

6. Ponsel

7. Laptop

8. Aplikasi ImageJ

9. Aplikasi Latte

10. Aplikasi Stellarium

b. Data yang digunakan terdiri dari data sekunder dan primer, meliputi:

1. Data Spesifikasi perangkat

Merupakan data sekunder yang mencakup resolusi pixel sensor kamera, panjang fokus lensa, diameter bukaan lensa. Data ini diperoleh dari laman resmi produsen serta buku panduan masing-masing perangkat, dan digunakan sebagai muatan dalam variabel permodelan lingkaran keburaman, analisis paku difraksi, serta pengolahan data hasil pemotretan.

2. Data Jarak dan Posisi Bintang

Merupakan data sekunder yang memuat informasi posisi, koordinat, dan jarak objek yang dipotret. Data ini diperoleh melalui aplikasi Stellarium serta laman katalog bintang SIMBAD.

3. Data Hasil Pemotretan

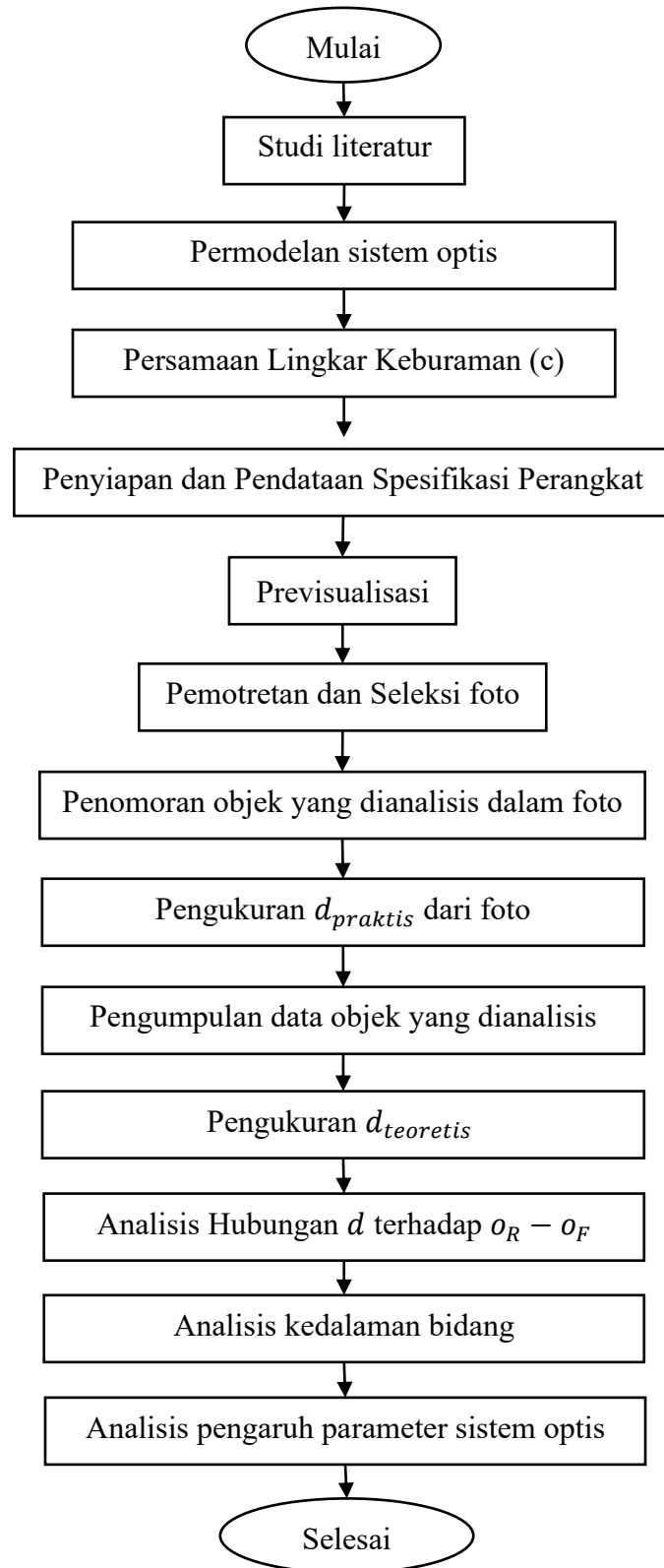
Merupakan data primer yang diperoleh langsung melalui pemotretan. Pemotretan dilakukan menggunakan serangkaian perangkat yang tertera dalam rincian alat penelitian pada poin a. Dilaksanakan pada waktu dan lokasi sebagaimana tertera pada subbab 3.2.

4. Data Hasil Pengolahan Foto

Merupakan data turunan dari pemrosesan hasil pemotretan, melalui aplikasi ImageJ. Berupa nominal distribusi pixel setiap piksel difraksi dari setiap objek dalam foto, yang digunakan untuk menganalisis ketepatan fokus citra.

3.4 Prosedur Pelaksanaan Penelitian

Tahapan penelitian ini terdiri dari studi literatur, permodelan sistem optis, penurunan persamaan persamaan lingkaran keburaman untuk mendapati batas kedalaman bidang, penyiapan dan pendataan spesifikasi perangkat pemotretan, previsualisasi, pemotretan dan seleksi foto, penomoran objek yang dianalisis dalam foto, pengukuran $d_{praktis}$, pengumpulan data objek yang dianalisis, pengukuran $d_{teoretis}$, analisis Hubungan d terhadap $\theta_R - \theta_F$, analisis kedalaman bidang, serta analisis pengaruh parameter sistem optis. Adapun alur penelitian tertera dalam diagram alir berikut:



Gambar 3. 5 Diagram alir penelitian

3.4.1 Studi Literatur

Pengkajian terhadap referensi optika, fotografi, dan astrofotografi dilakukan untuk memahami konsep difraksi Bahtinov mask, kedalaman bidang, lingkaran keburaman, serta hubungan perubahan posisi fokus terhadap pembentukan citra.

3.4.2 Permodelan Sistem Optis

Dilakukan permodelan sistem optis untuk menghubungkan antara jarak objek (o), posisi bayangan (o'), dan parameter sistem optis menggunakan pendekatan geometris untuk memperoleh hubungan antara pergeseran paku difraksi terhadap perubahan jarak objek.

3.4.3 Penurunan Persamaan Lingkaran Keburaman

Dilakukan penurunan persamaan diameter lingkaran keburaman (*circle of confusion*, c), dengan mempertimbangkan objek sebagai sumber cahaya titik. Dalam pemodelan ini, bintang diaproksimasi sebagai objek titik di jarak sangat jauh yang memancarkan berkas-berkas cahaya linear. Penurunan persamaan dilakukan dengan memanfaatkan hubungan geometris pada persamaan lensa tipis serta perbandingan rasio segitiga dari berkas cahaya yang terbentuk di depan dan belakang bidang fokus optimal. Merujuk subbab 2.2 penentuan batas nilai (c) ditinjau melalui dua kriteria, yaitu kriteria batas difraksi sistem lensa (kriteria Rayleigh) serta kriteria batas kemampuan sampling piksel pada sensor.

3.4.4 Penyiapan dan Pendataan Spesifikasi Perangkat

Perangkat pemotretan dipersiapkan dengan mengacu kebutuhan pemotretan sebagaimana tertera pada batasan masalah. Dilanjutkan dengan:

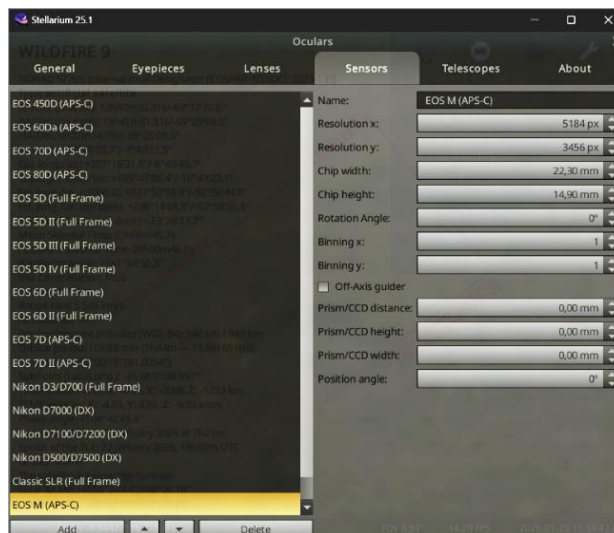
- a. Dilakukan pengecekan ketersediaan dan kondisi dari setiap peralatan yang akan digunakan untuk pemotretan

- b. Dilakukan pendataan spesifikasi perangkat pemotretan, meliputi: panjang fokus lensa (f), rasio fokus lensa (N), kapasitas pixel sensor kamera, ukuran aktual sensor kamera, dan Bahtinov mask.

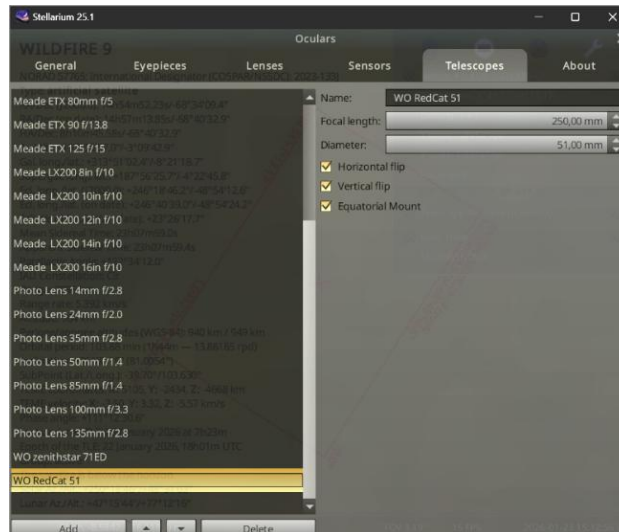
3.4.5 Previsualisasi

Dilakukan perancangan skema pemotretan pada aplikasi Stellarium, meliputi:

- a. Spesifikasi lensa dan sensor kamera dimasukkan ke pangkalan data aplikasi Stellarium, meliputi: ukuran aktual sensor, kapasitas pixel sensor, panjang fokus lensa, dan diameter bukaan lensa. Melalui data ini, simulasi luas bidang pandang (*field of view*, FOV) sistem pencitraan dapat dibangun oleh sistem aplikasi.

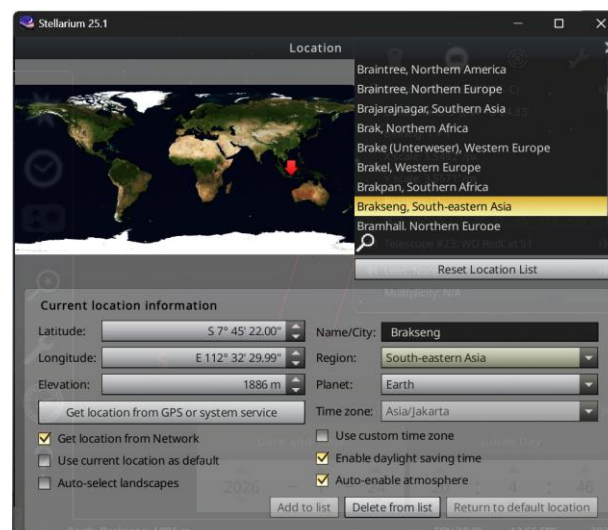


Gambar 3. 6 Tampilan pengaturan kamera dalam aplikasi Stellarium



Gambar 3. 7 Tampilan pengaturan lensa dalam aplikasi Stellarium

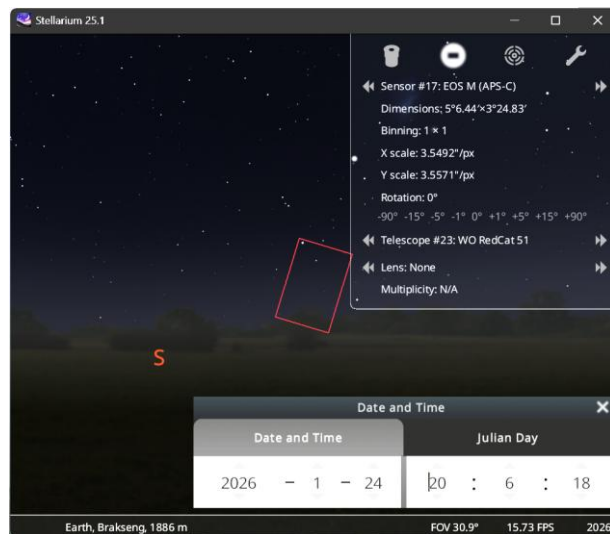
- b. Koordinat lokasi pemotretan dimasukkan dalam terminal data lokasi. Meliputi koordinat garis lintang (*latitude*), garis bujur (*longitude*), dan ketinggian atau elevasi (*elevation*). Dapat diberikan penamaan lokasi pada kolom *Name/City*. Kolom *Region* dan *Time zone* dapat terisi otomatis apabila opsi *Get location from network* dipilih. Data disimpan apabila tombol *Add to list* ditekan.



Gambar 3. 8 Tampilan pengaturan lokasi dalam aplikasi Stellarium

- c. Tanggal dan waktu disesuaikan dengan rencana hari dan jam pemotretan

- d. Mode simulasi FOV pada aplikasi Stellarium dipilih



Gambar 3. 9 Tampilan mode simulasi FOV dan pengaturan waktu dalam aplikasi Stellarium

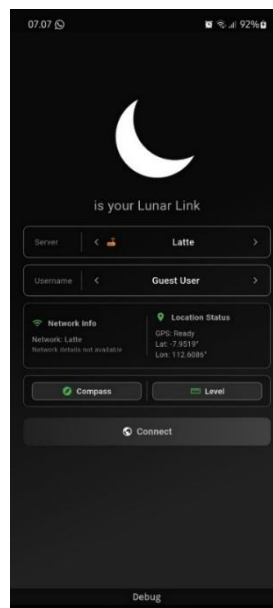
- e. Dilakukan perencanaan area yang akan dipotret. Jumlah potret yang akan diambil pada hari tersebut dioptimalkan melalui pertimbangan waktu eksposur setiap potret. Disesuaikan sehingga jumlah potret yang diperoleh sepanjang malam dapat dioptimalkan.
- f. Setiap area yang hendak dipotret dicatat arah dan waktunya. Akan cukup membantu apabila area yang hendak dipotret berada di rasi bintang tertentu.

3.4.6 Pemotretan dan Seleksi Foto

Dilakukan pengondisian dan pengaturan perangkat, sehingga potret objek langit dapat diperoleh dengan optimal. Tahapan pemotretan meliputi:

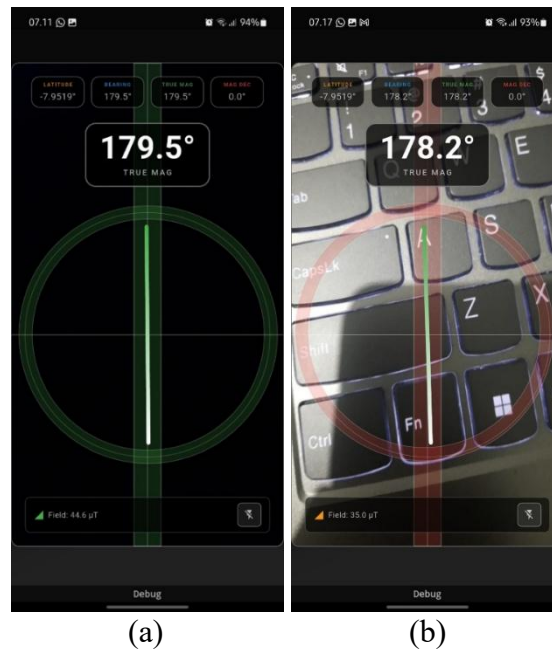
- a. Dipastikan area pemotretan memiliki permukaan tanah yang padat dan relatif datar guna menjaga kestabilan sistem penyangga perangkat selama proses pemotretan. Dipersiapkan tripod, set star tracker, set lensa, dan kamera

- b. Kaki tripod dibuka dan diposisikan pada area yang sudah dipilih, dengan satu kaki diarahkan lurus ke utara. Knob pengunci bukaan kaki tripod dikencangkan untuk menjaga kestabilan.
- c. Swiss Arca clamp dipasang ke tripod.
- d. *Mount RA (right ascension, padanan garis bujur Bumi)* dari Latte V4 dipasang ke Swiss Arca clamp.
- e. Lengan penyeimbang beban dipasang ke *Dec L plate*. Bagian panjang mengarah ke luar.
- f. *Dec L plate (mount untuk sudut deklinasi, padanan garis bujur Bumi)* dari Latte V4 dipasang ke penjepit (*clamp*) *mount RA*. Pengunci penjepit (*clamp*) dan pengunci putaran motor *mount RA* dirapatkan.
- g. Baterai dipasang di ujung lengan penyeimbang. Dalam rangkaian konfigurasi seluruh versi *star tracker* Latte, baterai juga difungsikan sebagai beban penyeimbang lensa terhadap motor *mount RA*.
- h. Aplikasi Latte diakses pada ponsel. Wifi dan GPS pada ponsel diaktifkan.



Gambar 3. 10 Tampilan aplikasi Latte

- i. Opsi *compass* dipilih untuk kalibrasi arah hadap *mount*. Ponsel diposisikan agak jauh diatas *mount* untuk menghindari medan magnet.

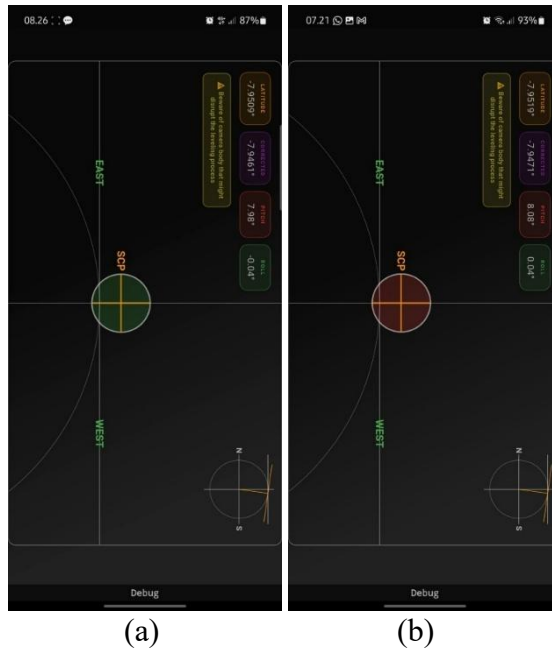


Gambar 3. 11 Tampilan menu *compass* pada aplikasi Latte apabila arah dan kondisi kompas tepat (a) dan tidak tepat (b)

Indikasi gangguan medan magnet ditunjukkan pada kolom bertuliskan *field* di bagian bawah layar. Arah hadap *mount* diselaraskan dengan penanda arah utara-selatan pada aplikasi, dilakukan dengan menyelaraskan garis hijau pada *mount* RA dengan sudut hadap ponsel. Setelah dirasa sesuai, layar dikembalikan ke menu utama.

- j. Tampilan layar diubah ke menu Level untuk kalibrasi. Ponsel diletakkan di atas *mount* RA, diperhatikan agar posisi ponsel benar-benar datar, tidak terhalang pengaman (*casing*) ataupun kamera. Diperhatikan besar sudut lintang lokasi pemotretan yang tertera di kolom *Latitude*. Sudut kemiringan *mount* di kolom *Roll* harus diselaraskan se presisi mungkin dengan sudut lintang, sedangkan sudut hadap *mount* di kolom *Pitch* harus sedekat mungkin dengan 0° atau tepat menghadap kutub Selatan.

Batas kesesuaian posisi sudut kemiringan dan hadapan ditandai dengan hijaunya lingkaran level. Setelah dirasa sesuai, layar dikembalikan ke menu utama.



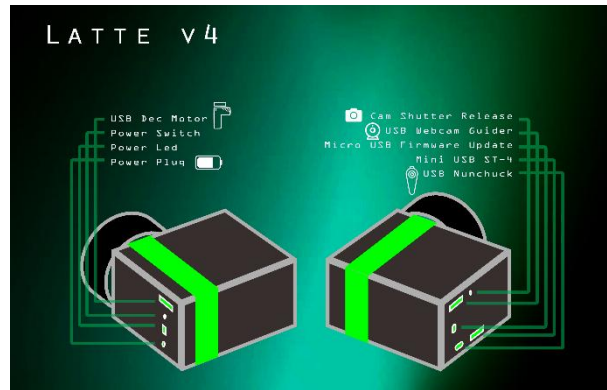
Gambar 3. 12 Tampilan menu *level* pada aplikasi Latte apabila sudut kemiringan dan hadapan tepat (a) dan tidak tepat (b)



Gambar 3. 13 Peletakan ponsel dalam proses kalibrasi level

- k. Kartu SD dimasukkan ke slot kartu memori pada kamera.
- l. Kamera dipasang ke lensa, dipastikan terpasang rapat.
- m. Lensa dipasang ke penjepit (*clamp*) pada Dec L *plate*. Pengunci clamp dan pengunci putaran motor *mount* Dec dirapatkan.

- n. *Guide cam* dipasang ke penjepit (*clamp*) lensa, dirapatkan penguncinya.
- o. Kunci motor *mount RA* sedikit diregangkan untuk kalibrasi beban.
Dec L plate diposisikan horizontal. Beban antar sumbu ditimbang dengan tangan dengan diberikan sedikit dorongan naik di masing-masing sisi hingga dirasa seimbang. Beban diseimbangkan dengan mengembalikan orientasi *Dec L plate* ke arah vertikal, kemudian menggeser posisi baterai atau menambahkan beban tambahan apabila tidak dapat menyelaraskan bobot lensa. Setelah dirasa cukup, kunci motor *mount RA* dirapatkan kembali dalam kondisi *Dec L plate* horizontal.
- p. Kunci motor *Dec L plate* sedikit diregangkan untuk kalibrasi beban.
 Bobot antara sisi depan dan belakang lensa ditimbang dengan diberikan sedikit dorongan naik di masing-masing sisi hingga dirasa seimbang. Beban diseimbangkan dengan mengembalikan orientasi *Dec L plate* menjadi vertikal, penjepit (*clamp*) pada *Dec L plate* diregangkan, lensa digeser ke depan atau belakang, penjepit (*clamp*) dirapatkan kembali. Setelah dirasa cukup, kunci motor *Dec L plate* dirapatkan kembali. Dipastikan kunci motor dan kunci penjepit (*clamp*) dari *mount RA* dan *Dec L plate* telah rapat.
- q. Dipasang sejumlah kabel dari *mount RA* menuju beberapa perangkat sebagaimana tertera dalam skema berikut:



Gambar 3. 14 Skema port kabel untuk *mount* RA

- r. Kabel daya dari baterai dan kabel motor dari *mount* RA dipasangkan ke kamera. Keseluruhan rangkaian perangkat akan nampak seperti Gambar berikut:



Gambar 3. 15 Rangkaian perangkat pemotretan

Setelah seluruh perangkat dan kabel terpasang dengan tepat dan telah terkalibrasi bebannya, dilakukan kalibrasi ulang pada *level* serta *compass* untuk memastikan ketepatan posisi perangkat.

- s. Latte V4 dan kamera diaktifkan dengan. Prosesor diatur ke mode Lin melalui *nunchuck*. Jaringan wifi pada ponsel dihubungkan dengan sinyal

wifi dari Latte V4 yang digunakan. Dipastikan tipe dan nama dari kamera dan *guidecam* yang terhubung dan ditampilkan pada aplikasi telah sesuai dengan yang digunakan.

- t. Kunci motor *mount* RA dan Dec *L plate* sedikit diregangkan. *Red dot* diaktifkan. Dilakukan kalibrasi titik merah yang tampak dari *Red dot* dengan citra yang ditampilkan kamera.
- u. Lensa diarahkan menuju objek yang hendak dipotret dengan bantuan *Red dot*. Setelah tepat, kunci motor *mount* RA dan Dec *L plate* dirapatkan kembali.
- v. Tampilan aplikasi Latte diubah ke pemantauan *guidecam*. Salah satu bintang yang terpantau *guidecam* dipilih sebagai bintang pemandu arah gerak kamera.
- w. Tampilan aplikasi Latte diubah ke pengaturan kamera. Diberikan perintah untuk pengaturan jumlah dan durasi (*shutter*) pemotretan. Tombol start dipilih untuk memulai pemotretan.
- x. Selama pemotretan, kestabilan rangkaian perangkat dipantau dalam grafik di bagian *home* aplikasi Latte. Begitu pula dengan hitungan mundur jumlah dan durasi (*shutter*) durasi.
- y. Pemotretan untuk objek lain dapat dilakukan setelah nominal *frame* (jumlah potret yang diambil) dan durasi durasi menunjukkan angka nol. Tahapan yang dilakukan dengan mengulang poin t hingga y.
- z. Setelah selesai, aplikasi Latte dapat dinonaktifkan. Kemudian daya kamera dan Latte *star tracker* dimatikan. Rangkaian perangkat dapat dibereskan dan disimpan kembali.

Adapun tahapan seleksi foto meliputi:

- a. Kartu SD diambil dari slot kartu memori dalam kamera.
- b. Laptop diaktifkan. Kartu SD dimasukkan dalam slot kartu SD pada laptop.
- c. Hasil pemotretan dianalisis satu persatu. Dipilih hasil potret yang stabil dan bebas gangguan (seperti guncangan, tutupan awan atau kabut), fokus tepat, dan pola paku difraksi terlihat jelas.
- d. Data yang memenuhi kualifikasi dipisahkan dalam folder khusus.

3.4.7 Penomoran Objek yang Dianalisis dalam Foto

Dari setiap foto yang telah diseleksi, ditentukan bintang-bintang yang dapat dianalisis pola paku difraksinya. Diberikan nomor untuk objek tersebut secara berurutan dari kiri ke kanan, kemudian dari baris atas ke bawah.

3.4.8 Pengukuran $d_{praktis}$ dari Foto

- a. Aplikasi ImageJ diakses pada laptop.
- b. Spesifikasi ukuran sensor dimasukkan dalam *database* pengukuran.
- c. Kolom centang pada opsi *analyze* dikosongkan, sebab yang dibutuhkan hanya pengukuran panjang dan sudut.
- d. Salah satu foto dibuka dengan menekan ctrl+o, lalu dipilih foto yang hendak dianalisis.
- e. Dipilih salah satu bintang. Dipilih opsi *draw line*. Ditarik garis pada paku difraksi tegak, dari ujung gelap hingga ujung gelap lain dari paku difraksi. Tombol ctrl+d ditekan agar garis tergambar permanen pada foto. Tombol ctrl+m ditekan untuk memunculkan hasil pengukuran

panjang dan sudut. Kemiringan paku tegak diukur sebagai landasan pengukuran pergeseran paku difraksi.

- f. Ditarik garis pada dua paku difraksi yang saling menyilang, dari ujung gelap hingga ujung gelap lain dari paku difraksi. Tombol ctrl+d ditekan agar garis tergambar permanen pada foto.
- g. Ditarik garis tegak lurus dari paku difraksi tegak menuju perpotongan paku difraksi yang saling menyilang. Tombol ctrl+m ditekan untuk memunculkan hasil pengukuran panjang dan sudut.
- h. Pengukuran untuk setiap pergeseran paku difraksi bintang dilakukan dengan mengulang poin g hingga i.
- i. Data disalin ke Microsoft Excell.
- j. Objek dengan $d_{praktis}$ terkecil dinyatakan sebagai acuan atau objek referensi

3.4.9 Pengumpulan Data Objek yang Dianalisis

- a. Dilakukan reka ulang *frame* pemotretan di aplikasi Stellarium. Dicatat koordinat RA dan DEC dari objek yang berada di tengah *frame*.
- b. Koordinat tersebut dituliskan ke format pencarian pada katalog SIMBAD untuk mengumpulkan informasi paralaks dan nama objek.
- c. Data disalin ke microsoft Excel.

3.4.10 Pengukuran $d_{teoretis}$

Dilakukan pengukuran $d_{teoretis}$ berdasarkan model pendekatan geometris pada sistem optis.

3.4.11 Analisis Hubungan d terhadap $o_R - o_F$

Dilakukan analisis terhadap hubungan antara pergeseran paku difraksi terhadap selisih jarak objek analisis terhadap objek acuan, dengan tahapan:

- a. Dibuat plot grafik antara jarak aktual bintang terhadap pergeseran paku difraksinya dalam hasil perhitungan teoretis.
- b. Hasil plot perhitungan teoretis dibandingkan dengan plot hasil observasi
- c. Hasil perhitungan teoretis dengan observasi dianalisis keterkaitannya, dengan meninjau kesesuaian pola perubahan panjang pergeseran paku difraksi dari setiap bintang. Divisualisasikan dalam plot grafik perbandingan perhitungan teoretis dengan hasil observasi dalam satu sistem koordinat.

3.4.12 Penentuan Batas Kedalaman Bidang

Dilakukan analisis terhadap pola perubahan d terhadap $o_R - o_F$ yang ditampilkan dari persamaan regresi. Batas fokus sistem ditentukan berdasarkan kondisi $d = c$, dengan c mencakup c_R maupun c_S .

3.4.13 Analisis Pengaruh Parameter Sistem Optik

Dilakukan evaluasi pengaruh parameter sistem optik terhadap batas fokus sistem melalui persamaan yang menunjukkan pengaruh d terhadap $o_R - o_F$ yang diperoleh dari plot grafik.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis keterkaitan antara pergeseran atau deviasi paku difraksi Bahtinov mask terhadap jarak objek pada sistem astrofotografi. Berdasarkan persamaan fokus lensa yang tertulis pada persamaan (2.1), semakin jauh jarak objek maka posisi terbentuknya bayangan semakin mendekati panjang fokus sistem lensa sehingga memenuhi Persamaan (2.9). Akibatnya pada kasus astrofotografi, selisih posisi bayangan fokus antar objek yang dipotret menyempit dan diprediksi berada pada orde yang sangat kecil.

Hipotesa tersebut berlainan dengan hasil pengamatan menunjukkan adanya variasi deviasi paku difraksi antar objek yang berada dalam satu *frame* pemotretan. Hasil pemotretan beberapa objek astronomi dengan variasi jarak yang meliputi planet serta bintang pada konstelasi Orion dan Scorpius tersebut mengindikasikan bahwa pergeseran paku difraksi seiring perbedaan jarak perlu ditinjau lebih lanjut.

4.1 Model Kedalaman Fokus

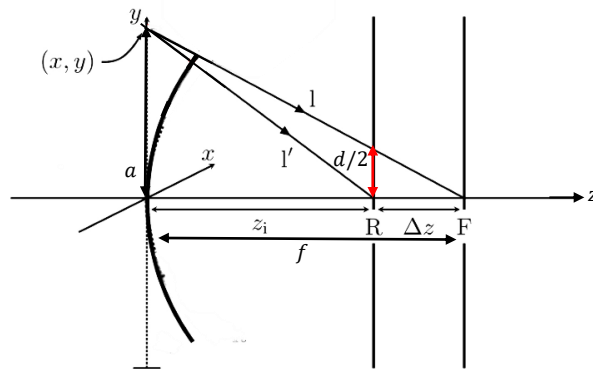
Berdasarkan persamaan lensa yang dituliskan pada Persamaan (2.1) setiap objek memiliki bidang fokus yang posisinya bergantung pada jarak objek terhadap lensa. Pada penelitian ini, satu objek dipilih sebagai acuan. Apabila terdapat perbedaan jarak pada objek, maka secara teoretis keduanya menghasilkan posisi fokus yang berbeda pula. Selisih posisi fokus tersebut dinyatakan sebagai Δz .

$$\Delta z = o'_R - o'_F \quad (4.1)$$

Untuk astrofotografi, jarak objek yang dipotret jauh lebih besar dari panjang fokus lensa ($o \gg f$) sehingga posisi bayangan o' diasumsikan berada sangat dekat dengan

f sebagaimana dituliskan pada Persamaan (2.9). Pada kondisi ini, perubahan fokus akibat perbedaan jarak objek diperkirakan sangat kecil.

Penelitian ini menerapkan pendekatan model geometris yang dikemukakan oleh Zandvliet (2017). Berdasarkan Gambar 4.1, Ketika sensor kamera atau bidang citra bergeser sejauh Δz dari suatu bidang fokus, dimisalkan dari F menuju R , maka berkas cahaya dari titik objek yang berfokus di F tidak lagi membentuk titik tajam, melainkan lingkaran buram dengan diameter d .



Gambar 4. 1 Skema arah rambat cahaya memasuki lensa. F : posisi bidang fokus dari cahaya yang merambat pada lintasan l , R : posisi fokus referensi dari cahaya yang merambat pada lintasan l' (Lendermann et al., 2018).

Merujuk skema yang diberikan oleh Lendermann (2018) pada Gambar 4.1, sistem optik saat ini diatur fokus optimal pada posisi R . Hal ini yang menunjukkan bahwa sensor kamera atau bidang fokus berada pada jarak bayangan o'_R dengan jarak objek yang difokuskan di o_R . Mengacu ke Persamaan (2.1) dan Gambar 2.4, perbedaan posisi objek o akan menyebabkan perbedaan posisi bayangan o' . Apabila jarak $o_R > o_F$, maka terbentuk $o'_R < o'_F$ sebagaimana Gambar 4.1 dan begitu pula sebaliknya. Melalui Persamaan (2.1), diketahui bahwa nilai o' dapat digunakan untuk menginisiasi nilai o .

Berdasarkan kesebangunan segitiga, kondisi tersebut dapat dituliskan sebagai

$$\frac{d}{2} = \frac{a}{f} \cdot \Delta z$$

$$d = 2 \cdot \frac{a}{f} \cdot \Delta z \quad (4.2)$$

Di mana a menyatakan jari-jari apertur dan f menyatakan panjang fokus sistem optik. Merujuk pendefinisian awal di mana diameter bukaan atau apertur sistem optik dinyatakan sebagai D , maka didapat $a = D/2$. Berdasarkan Gambar 4.1, Δz dapat didefinisikan pula sebagai:

$$\Delta z = \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a} \quad (4.3)$$

Berdasarkan definisi yang diberikan Champagne (2011) dalam artikelnya sebagaimana Gambar 2.10, laju pergeseran atau deviasi paku difraksi selaras dengan perubahan diameter lingkaran keburaman. Sehingga dapat dituliskan:

$$d = c \quad (4.4)$$

Dalam penelitian ini, nilai d digunakan sebagai representasi teoretis dari perubahan posisi paku difraksi Bahtinov mask seiring perubahan posisi bidang fokus sejauh Δz . Nilai deviasi paku difraksi teoretis yang diperoleh kemudian digunakan sebagai landasan penentuan batas kedalaman bidang sistem melalui kriteria lingkaran keburaman.

4.2 Model Kedalaman Bidang

Untuk menentukan apakah perubahan posisi fokus masih menghasilkan citra yang masih dapat dikategorikan fokus, maka besar deviasi paku difraksi bahtinov mask harus lebih kecil atau setidaknya setara batas diameter lingkaran keburaman sistem optik yang digunakan. Kondisi tersebut dapat dituliskan sebagai:

$$d \leq c \quad (4.5)$$

Dengan batas nilai c telah didefinisikan pada Persamaan (2.3) dan (2.4).

Dengan mengacu Persamaan (2.14) dan (4.1) fungsi d pada Persamaan (4.2) dapat dituliskan kembali sebagai:

$$d = 2 \cdot \frac{a}{f} \cdot \left(\left(\frac{o_R \cdot f}{o_R - f} \right) - \left(\frac{o_F \cdot f}{o_F - f} \right) \right) \quad (4.6)$$

Dengan o_R menyatakan jarak objek referensi atau objek acuan dan o menyatakan jarak objek yang dianalisis. Adapun posisi bayangan o' , baik o'_R maupun o'_F , merupakan posisi ideal terbentuknya bayangan dari suatu objek bergantung posisinya. Ketika objek acuan tidak berada pada kondisi fokus ideal atau telah mengalami defokus, maka Persamaan (4.6) dapat dituliskan sebagai:

$$d = 2 \cdot \frac{a}{f} \cdot \left(\left(\left(\frac{o_R \cdot f}{o_R - f} \right) - \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a} \right) - \left(\frac{o_F \cdot f}{o_F - f} \right) \right) \quad (4.7)$$

Di mana $\frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a}$ merupakan definisi Δz dari Persamaan (2.3). definisi tersebut digunakan sebab dalam kondisi defokus, pola paku difraksi Bahtinov dari objek tersebut akan bernilai > 0 sehingga nilai Δz dapat dikalkulasi.

Mengacu Persamaan (4.5), maka batas rentang kedalaman bidang terindikasi pada kondisi

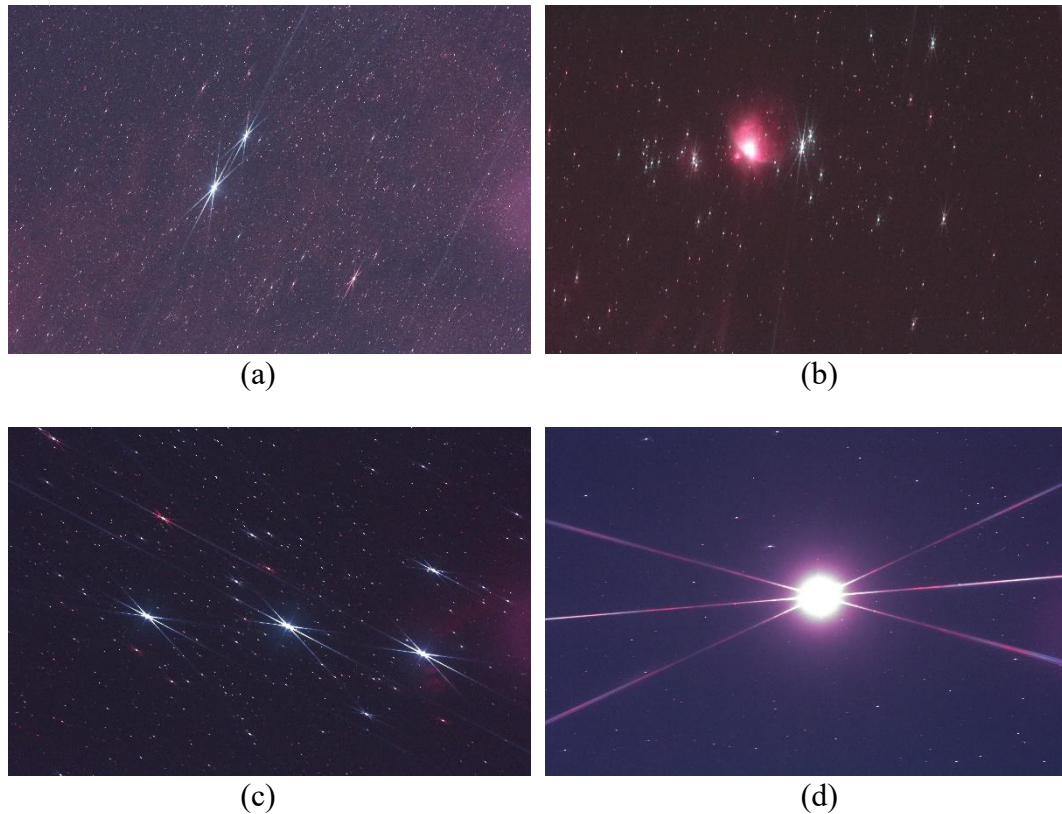
$$c \geq d$$

$$c \geq 2 \cdot \frac{a}{f} \cdot \left(\left(\left(\frac{o_R \cdot f}{o_R - f} \right) - \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a} \right) - \left(\frac{o_F \cdot f}{o_F - f} \right) \right) \quad (4.8)$$

Merujuk kembali ke Gambar 2.4, batas jarak objek agar tetap berada dalam rentang fokus bergantung pada ukuran lingkaran keburaman (c) yang terbentuk pada bayangannya, baik di depan ataupun di belakang posisi fokus optimal. Berdasarkan definisi tersebut, parameter penentu nilai c berperan krusial dalam penentuan batas kedalaman bidang. Pada kriteria Rayleigh, batas tersebut dipengaruhi oleh Panjang

gelombang (λ) dan rasio fokus fokus sistem (N). Sedangkan pada kriteria sensor ditentukan oleh ukuran piksel sensor (δ) serta konstanta m yang ditentukan oleh tipe sensor, apakah monokrom atau polikrom.

4.3 Hasil Pemotretan



Gambar 4. 2 Hasil Pemotretan. (a) Bintang Shaula dan bintang di sekitarnya, (b) Nebula Orion dan bintang di sekitarnya, (c) Bintang Alnilam dan bintang di sekitarnya, (d) Planet Jupiter dan bintang di sekitarnya.

Data penelitian diperoleh melalui pemotretan menggunakan perangkat sebagaimana dicantumkan pada subbab 3.3. Terdapat empat *frame* foto yang diperoleh, ditunjukkan pada Gambar 4.2. Setiap foto menampilkan pola paku difraksi dari objek yang terpotret. Pola ini digunakan untuk mengukur deviasi paku difraksi sebagai nilai d praktis. Setiap foto hasil pengamatan mewakili kelompok analisis data, sehingga terdapat empat kelompok data yang dianalisis secara terpisah.

Parameter pemotretan yang diterapkan pada masing-masing foto ditunjukkan dalam Tabel 4.1. Seluruh foto diperoleh dalam pemotretan tunggal (*single frame*) menggunakan metode eksposur panjang (*long exposure*) untuk mengoptimalkan jumlah objek yang terpotret dalam setiap *frame*. Durasi eksposur dan nilai ISO untuk setiap foto dinyatakan dalam tabel berikut:

Tabel 4. 1 Durasi eksposur setiap foto

Nama Foto	Durasi eksposur (sekon)	ISO
Shaula	120,2	3200
Orion	120,1	3200
Alnilam	119,5	1600
Jupiter	240,4	1600

Diberikan pengarturan durasi eksposur 120s untuk *frame* Shaula, Orion, dan Alnilam. Adapun kesalahan durasi eksposur sebesar 0,1-0,5 sekon berasal dari perangkat. Durasi eksposur yang lebih panjang diberikan pada data Jupiter untuk menanggulangi kecerahan atau magnitude visual Bintang yang terpaut jauh dengan Jupiter. Dengan menambah durasi eksposur yang tepat, pola difraksi Bahtinov Bintang yang cukup terang dapat terproyeksi dengan baik tanpa menyebabkan kecerahan berlebih (*over exposure*) pada Jupiter.

Pada setiap kelompok data, dipilih beberapa objek yang menampilkan pola paku difraksi secara jelas sehingga posisi paku difraksi dapat diidentifikasi dan diukur. Objek objek tersebut kemudian diberi nomor untuk memudahkan proses identifikasi dan analisis. Adapun penomoran objek dilakukan berurutan dari kiri ke kanan, dari atas hingga bawah foto. Dalam setiap kelompok data dipilih satu objek acuan atau referensi dengan deviasi praktis paling kecil. Objek referensi diasumsikan mewakili kondisi paling dekat menuju fokus ideal diantara seluruh

objek dalam kelompok data tersebut. Dari objek acuan tersebut selisih jarak maupun deviasi teoretis objek lain dapat ditentukan.

Untuk setiap objek juga dikumpulkan data paralaks untuk perhitungan jarak, serta kecerlangan atau magnitude visual dari katalog SIMBAD yang tertera pada Lampiran 1 hingga 4. Khusus untuk jarak Jupiter, jaraknya langsung diambil dalam satuan parsec dari stellarium, tertanda untuk jam dan hari pemotretan. Data ini dihimpun sebagai dasar kalkulasi nilai d teoretis. Pengukuran deviasi paku difraksi untuk setiap objek kemudian dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ yang disajikan dalam Lampiran 5 hingga 8. Data yang telah diperoleh selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi apakah nilai d praktis masih berada dalam rentang batas keburaman yang ditentukan oleh kriteria lensa maupun kriteria sensor dalam Persamaan (2.3) dan (2.4).

Untuk mengonversi paralaks yang diperoleh dari katalog SIMBAD menjadi satuan jarak, diberikan persamaan:

$$1 \text{ pc} = \frac{1}{1 \text{ arcsec}} \quad (4.9)$$

Dengan pc menyatakan satuan jarak astronomi parsec. Sebab satuan paralaks yang diberikan oleh katalog SIMBAD dalam satuan milliarcsecond (mas), maka konversi dilakukan dalam persamaan:

$$1 \text{ pc} = \frac{1000}{1 \text{ mas}} \quad (4.10)$$

Untuk menyamakan satuan dengan parameter lain yang berdimensi panjang dalam kalkulasi seperti panjang fokus, apertur lensa, serta ukuran sensor kamera, diberikan persamaan untuk mengonversi pc menjadi mm (Bradt, 2004; Gallaway, 2020; Meeus, 1988):

$$1 \text{ pc} = 3,08568 \times 10^{19} \text{ mm}$$

4.4 Analisis Kedalaman Bidang pada Foto

Batas ketajaman suatu sistem citra telah dibahas dalam subbab 2.2.1 terkait diameter lingkaran keburaman. Kriteria lensa serta kriteria sensor digunakan sebagai pendekatan dalam acuan dalam mengevaluasi apakah deviasi paku difraksi yang diperoleh baik secara teoreis maupun secara praktis masih berada dalam rentang fokus sistem. Dalam definisi yang dituliskan sebagai Persamaan (4.5), objek dengan nilai d lebih kecil atau setara nilai c dikategorikan berada dalam rentang fokus dan begitu pula sebaliknya.

4.4.1 Batas Keburaman

Mengacu Persamaan (4.8), nilai c memengaruhi rentang kedalaman bidang. Nilai c menentukan berapa batas jarak o_F dari o_R agar masih dapat dikategorikan tajam berdasarkan spesifikasi sistem optik yang digunakan. Apabila nilai c diperbesar, maka batas toleransi fokus ikut meluas. Menurut kriteria lensa atau kriteria Rayleigh, batas keburaman ditentukan oleh kemampuan sistem dalam membedakan dua sumber cahaya yang berdekatan. Melalui Persamaan (2.3):

$$c_R = 2,44 \cdot \lambda \cdot N$$

Sedangkan menurut kriteria sensor, kemampuan sensor dalam merekam keburaman dinyatakan dalam Persamaan (2.4):

$$c_S = M \cdot \delta$$

Dengan λ menyatakan panjang gelombang, N menyatakan rasio fokus sistem optik, m untuk konstanta sesuai tipe sensor, dan δ sebagai ukuran piksel sensor. Kita

tuliskan kembali c sebagai c_R dan c_S untuk membedakan nilai c berdasarkan masing masing kriteria.

Pada penelitian ini digunakan panjang gelombang representatif untuk gelombang tampak sebesar 550nm. Kemudian berdasarkan data spesifikasi perangkat, diketahui rasio fokus lensa William Optics RedCat 51 sebesar 4.9, konstanta sensor polikromatik adalah 2, dan ukuran piksel Canon EOS M adalah 0.00429mm. Dengan mensubstitusikan nilai tersebut pada Persamaan (2.3) dan (2.4) diperoleh

$$\begin{aligned} c_R &= 2,44 \cdot (550 \cdot 10^{-6}) \cdot (4,9) \text{ mm} \\ &= 65,8 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \end{aligned}$$

Dan

$$\begin{aligned} c_S &= 2 \cdot (42,9 \cdot 10^{-4}) \text{ mm} \\ &= 85,8 \cdot 10^{-4} \text{ mm} \end{aligned}$$

Nilai c_R dan c_S yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai batas evaluasi untuk menentukan apakah batas deviasi paku difraksi secara praktis maupun teoretis masih berada dalam rentang fokus sistem optik.

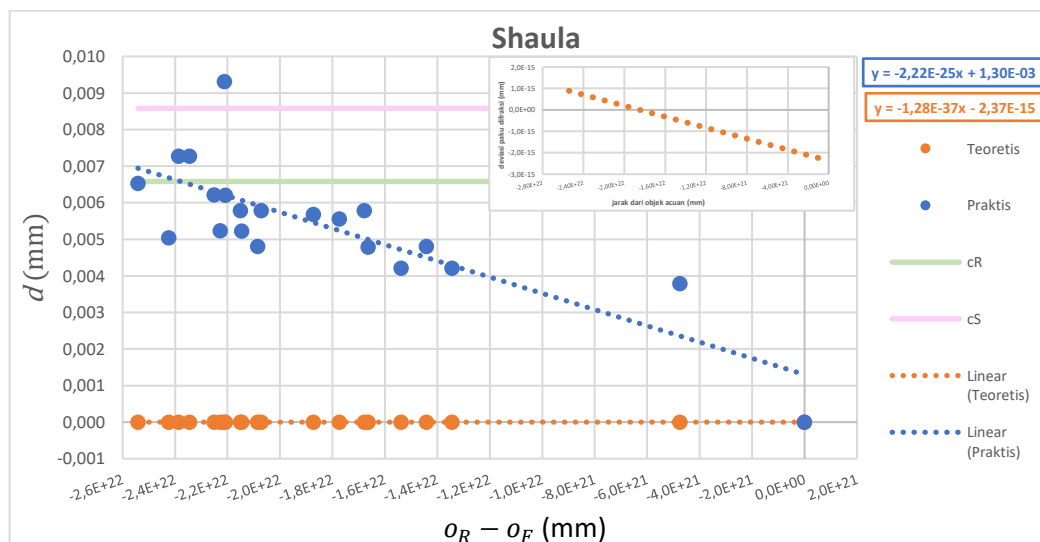
4.4.2 Analisis Hubungan d terhadap $o_R - o_F$

Hubungan antara deviasi paku difraksi dan jarak objek untuk masing-masing kelompok data ditunjukkan pada Gambar 4.3 hingga Gambar 4.6 yang secara berturut-turut terbentuk dari data pada Tabel 2.a hingga Tabel 2.d dalam lampiran. Pada setiap grafik, sumbu y menyatakan selisih jarak objek referensi terhadap objek yang dikaji ($o_R - o_F$), sedangkan sumbu x menyatakan besar deviasi paku difraksi (d). Nilai $d_{praktis}$ dan $d_{teoretis}$ ditampilkan secara bersamaan untuk

memudahkan perbandingan antara hasil observasi dan prediksi model. Melalui plot grafik ini, diperoleh persamaan regresi yang menyatakan fungsi perubahan d terhadap $o_R - o_F$ yang mengindikasikan DoF.

Seluruh grafik analisis menyajikan titik biru untuk nilai d praktis, titik oranye untuk d teoretis pendekatan geometris Zandvliet. Diberikan pula batas toleransi keburaman menurut kriteria Rayleigh ($c_R = 0,00658$ mm) sebagai garis hijau, dan batas toleransi keburaman menurut kriteria sensor ($c_S = 0,00858$ mm) sebagai garis ungu. Detail perhitungan untuk kedua kriteria ini telah diberikan pada subbab 4.4.1.

Hubungan antara jarak objek dan deviasi paku difraksi dianalisis menggunakan regresi linear terhadap data hasil pemotretan. Persamaan regresi digunakan untuk menentukan posisi objek ketika nilai $d = 0$ sebagai posisi fokus ideal. Adapun batas kedalaman bidang ditentukan ketika $d = c_R$ untuk batas ketajaman citra menurut kriteria Rayleigh, dan $d = c_S$ untuk batas ketajaman citra menurut kriteria sensor.



Gambar 4. 3 Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Shaula

Berdasarkan plot kelompok data Shaula dari Gambar 4.3, garis regresi menunjukkan tren data praktis dalam persamaan linear

$$y = -2,22 \times 10^{-25}x + 0,0013$$

Melalui substitusi nilai c_R sebagai batas deviasi atau batas nilai d , didapati

$$0,00658 = -2,22 \times 10^{-25}x + 0,0013$$

$$0,00528 = -2,22 \times 10^{-25}x$$

$$-2,378 \times 10^{22} = x$$

Dan dengan mensubstitusi nilai c_S sebagai batas nilai d , didapati

$$0,00858 = -2,22 \times 10^{-25}x + 0,0013$$

$$0,00728 = -2,22 \times 10^{-25}x$$

$$-3,279 \times 10^{22} = x$$

Sedangkan posisi fokus ideal ($d = 0$) terjadi pada

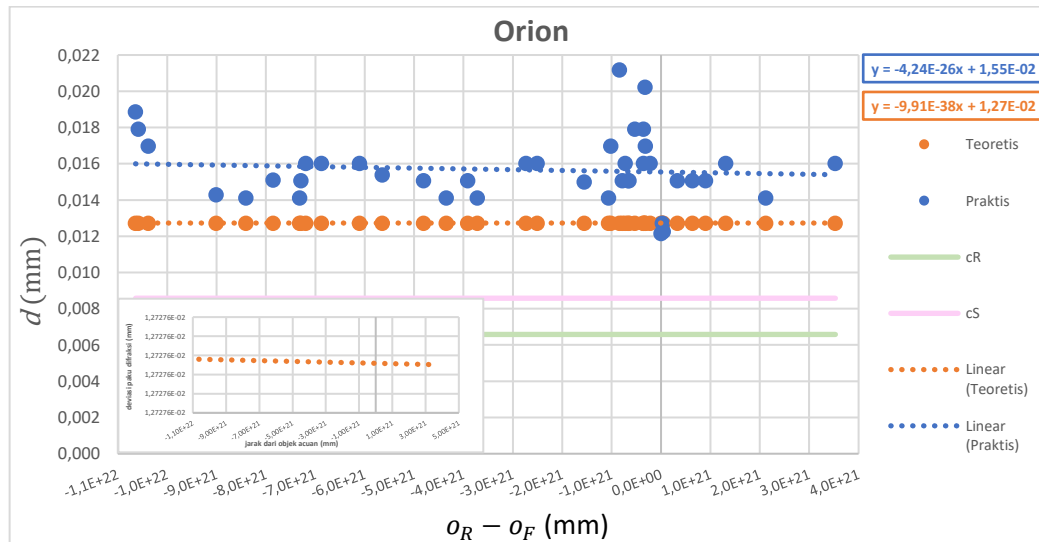
$$0 = -2,22 \times 10^{-25}x + 0,0013$$

$$\frac{-0,0013}{-2,22 \times 10^{-25}} = x$$

$$5,856 \times 10^{21} = x$$

Dengan asumsi lensa difokuskan pada objek yang berlokasi $5,856 \times 10^{21}$ mm atau 189,78 parsec lebih jauh dari objek acuan dalam data Shaula, rentang ketajaman menurut kriteria Rayleigh membentang sejauh $2,964 \times 10^{22}$ mm atau 960,57 parsec (pc). Sedangkan pada kondisi tersebut, kriteria sensor memberikan rentang ketajaman sejauh $3,865 \times 10^{22}$ mm atau 1.252,56 pc. Adapun objek acuan merupakan objek nomor 20 dalam tabel 2.a yang memiliki $o = 871,9156$ pc.

Adapun tanda minus yang muncul pada nilai x menunjukkan bahwa objek berada di depan objek acuan. Dengan kata lain, objek tersebut lebih dekat dari Bumi jika dibandingkan dengan objek acuan.



Gambar 4. 4 Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Orion

Pada plot data Orion, didapati seluruh objek berada di luar batas ketajaman, sebab seluruh objek memiliki nilai d lebih besar dari c_R maupun c_S sistem optik yang digunakan. Adapun objek acuan merupakan objek nomor 18 dalam tabel 2.b yang memiliki $o = 359,2599$ pc. Berdasarkan plot kelompok data Orion dari Gambar 4.4, garis regresi menunjukkan tren data praktis dalam persamaan linear

$$y = -4 \times 10^{-26}x + 0,0155 \quad (4.)$$

Untuk memprediksi posisi objek di mana sistem optik mencapai fokus optimal atau $d = 0$, diberikan

$$0 = -4 \times 10^{-26}x + 0,0155$$

$$\frac{0,0155}{-4 \times 10^{-26}} = x$$

$$3,88 \times 10^{23} = x$$

Hasil tersebut menunjukkan prediksi posisi fokus ideal berada jauh di belakang objek-objek dalam *frame*.

Melalui substitusi nilai c_R sebagai batas deviasi atau batas nilai d , didapati batas jarak objek agar tergolong tajam berada pada

$$0,00658 = -4 \times 10^{-26}x + 0,0155$$

$$-0,00892 = -4 \times 10^{-26}x$$

$$2,23 \times 10^{23} = x$$

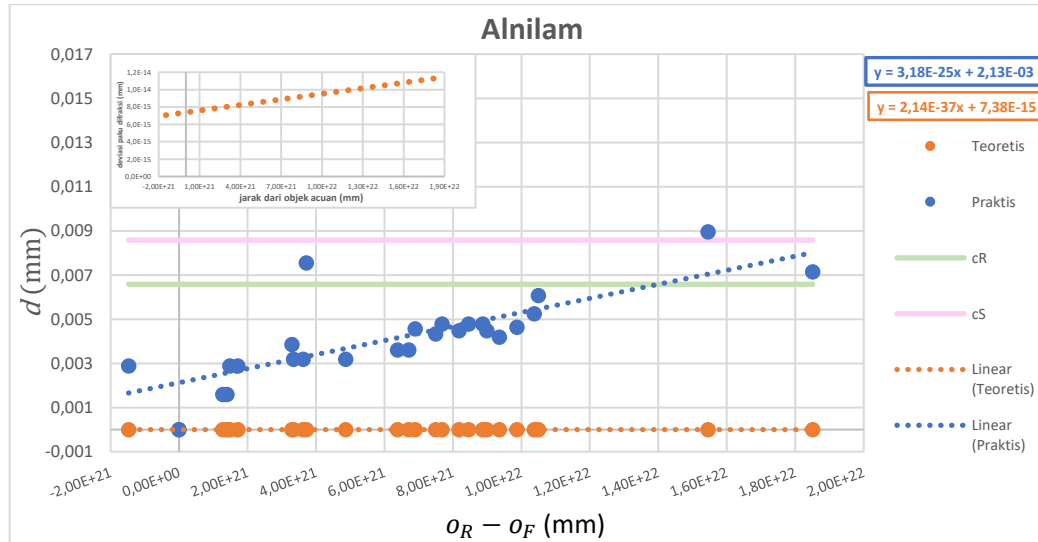
Dan dengan mensubstitusi nilai c_S , didapati

$$0,00858 = -4 \times 10^{-26}x + 0,0155$$

$$-0,00692 = -4 \times 10^{-26}x$$

$$1,73 \times 10^{23} = x$$

Dengan asumsi lensa difokuskan pada objek yang berlokasi $3,88 \times 10^{23}$ mm atau 12.574,13 pc lebih jauh dari objek acuan dalam data Orion, rentang ketajaman menurut kriteria Rayleigh membentang sejauh $1,65 \times 10^{23}$ mm atau 5.347,25 pc. Sedangkan menurut kriteria sensor rentang ketajaman membentang sejauh $2,15 \times 10^{23}$ mm atau 6.967,62 pc.



Gambar 4. 5 Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Alnilam

Berdasarkan plot kelompok data Alnilam dari Gambar 4.5, garis regresi menunjukkan tren data praktis dalam persamaan linear

$$y = 3,18 \times 10^{-25}x + 0,00213$$

Melalui substitusi nilai c_R sebagai batas nilai d , didapati batas jarak objek terjauh agar bayangan yang dihasilkan masih tergolong tajam menurut kriteria Rayleigh berada pada

$$0,00658 = 3,18 \times 10^{-25}x + 0,00213$$

$$0,00445 = 3,18 \times 10^{-25}x$$

$$1,399 \times 10^{22} = x$$

Dan dengan mensubstitusi nilai c_S sebagai batas nilai d , didapati

$$0,00858 = 3,18 \times 10^{-25}x + 0,00213$$

$$0,00645 = 3,18 \times 10^{-25}x$$

$$2,028 \times 10^{22} = x$$

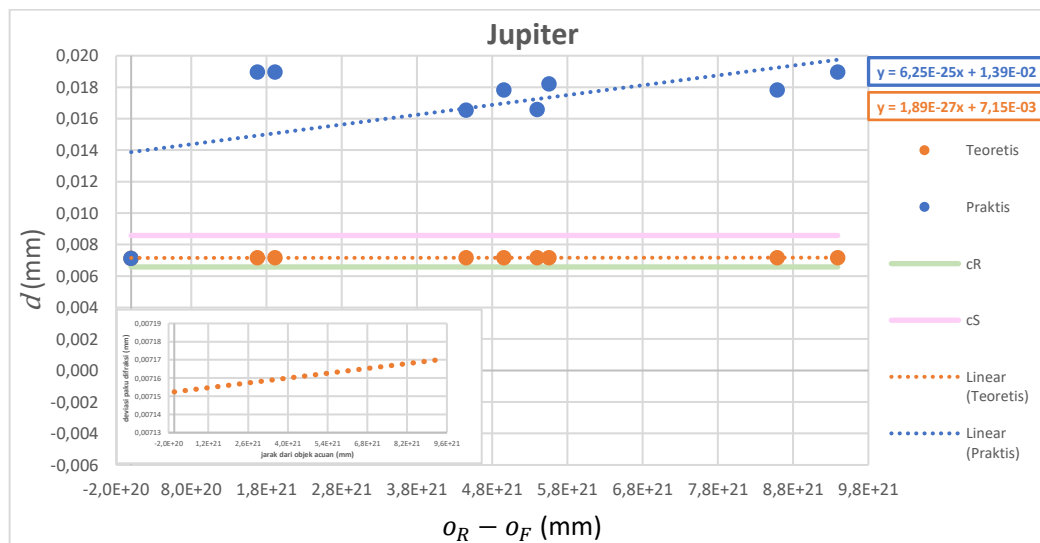
Sedangkan posisi fokus ideal ($d = 0$) terjadi pada

$$0 = 3,18 \times 10^{-25}x + 0,00213$$

$$\frac{-0,00213}{3,18 \times 10^{-25}} = x$$

$$-6,698 \times 10^{21} = x$$

Dengan asumsi lensa difokuskan pada objek yang berlokasi $6,698 \times 10^{21}$ mm atau 217,06 pc lebih dekat dari objek acuan dalam data Alnilam, rentang ketajaman menurut kriteria Rayleigh membentang sejauh $2,070 \times 10^{22}$ mm atau 670,4 pc. Sedangkan dengan kondisi tersebut, kriteria sensor memberikan rentang ketajaman sejauh $2,698 \times 10^{22}$ mm atau 874,34 pc. Adapun objek acuan merupakan objek nomor 9 dalam tabel 2.c yang memiliki $o = 105,2864$ pc.



Gambar 4. 6 Grafik hubungan deviasi paku difraksi (d) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Jupiter

Pada plot data Jupiter, didapati objek acuan atau objek dengan nilai d terkecil tidak berada dalam kondisi fokus ideal ($d > 0$). Dapat diamati pada Gambar 4.6, objek dengan nilai d terkecil telah melewati batas ketajaman menurut kriteria Rayleigh. Namun berdasarkan kriteria sensor, objek acuan masih masuk dalam kategori tajam sebab nilai $d < c_S$, ditunjukkan oleh titik dengan d terkecil

ada di bawah garis ungu. Adapun objek acuan merupakan objek nomor 7 dalam tabel 2.d yang memiliki $o = 1,98 \times 10^{-11}$ pc.

Berdasarkan persamaan regresi yang terbentuk dari data praktis, posisi fokus ideal dalam pemotretan ini diperkirakan berada pada

$$\begin{aligned} y &= 6,25 \times 10^{-25}x + 0,0139 \\ 0 &= 6,25 \times 10^{-25}x + 0,0139 \\ -0,0139 &= 6,25 \times 10^{-25}x \\ -2,224 \times 10^{22} &= x \end{aligned}$$

Melalui substitusi nilai c_R sebagai batas deviasi atau batas nilai d , didapati batas jarak objek agar tergolong tajam berada pada

$$\begin{aligned} 0,00658 &= 6,25 \times 10^{-25}x + 0,0139 \\ -0,0073 &= 6,25 \times 10^{-25}x \\ -1,168 \times 10^{22} &= x \end{aligned}$$

Dan dengan mensubstitusi nilai c_S , didapati

$$\begin{aligned} 0,00858 &= 6,25 \times 10^{-25}x + 0,0139 \\ -0,0053 &= 6,25 \times 10^{-25}x \\ -8,512 \times 10^{21} &= x \end{aligned}$$

Dengan asumsi lensa difokuskan pada objek yang berlokasi $-2,224 \times 10^{22}$ mm atau 720,24 pc lebih dekat dari objek acuan dalam data Jupiter, rentang ketajaman menurut kriteria Rayleigh membentang sejauh $1,056 \times 10^{22}$ mm atau 341,87 pc. Sedangkan dengan kondisi tersebut, kriteria sensor memberikan rentang ketajaman sejauh $1,373 \times 10^{22}$ mm atau 444,95 pc.

Nilai $d_{praktis}$ diperoleh melalui pengukuran langsung terhadap deviasi paku difraksi Bahtinov mask pada citra hasil observasi. Nilai ini merepresentasikan kondisi aktual yang mungkin dipengaruhi berbagai faktor observasi, seperti kondisi atmosfer, gangguan optik, serta ketidakpastian proses pengukuran. Adapun nilai $d_{teoretis}$ dihitung menggunakan Persamaan (4.7) berdasarkan selisih jarak objek terhadap objek referensi pada masing-masing kelompok data. Nilai ini merepresentasikan deviasi paku difraksi yang akibat perubahan posisi bidang fokus yang ditimbulkan oleh perbedaan jarak objek yang diprediksi oleh model matematis dengan pendekatan geometris sebagaimana diterapkan oleh Zandvliet (2017).

Pada kelompok data Shaula dan Alnilam, objek acuan terukur memiliki $d_{praktis}$ 0 yang mengindikasikan posisi fokus ideal. Pada kelompok Shaula, objek dalam frame memiliki rentang $d_{praktis}$ 0 sampai 0,0093 mm. sedangkan pada kelompok Alnilam objek dalam frame memiliki rentang $d_{praktis}$ 0 sampai 0,0089 mm. Berdasarkan kedua kriteria batas keburaman, terdapat beberapa objek dalam kelompok data ini yang sudah keluar dari rentang kategori tajam. Untuk kelompok Shaula, kategori Rayleigh menyatakan HD 160282A, HD 159312, HD 159340, dan * Q Sco telah dikategorikan buram. Sedangkan kategori sensor menyatakan hanya HD 160282A yang dapat dikategorikan buram. Untuk kelompok Alnilam, kategori Rayleigh menyatakan HD 37660, * eps Ori, dan * zet Ori dikategorikan buram. Sedangkan kategori sensor menyatakan hanya * eps Ori yang dapat dikategorikan buram.

Pada kelompok data Orion, didapati seluruh objek memiliki $d_{praktis}$ melebihi batas kriteria sensor maupun kriteria Rayleigh. Untuk kelompok data terakhir, didapati besar $d_{praktis}$ Jupiter masih tergolong tajam menurut kriteria

sensor sebab $d_{praktis} < c_S$, namun tidak memenuhi kriteria Rayleigh. Untuk objek lainnya, didapati $d_{praktis} < c_R$ dan $d_{praktis} < c_S$.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kelompok data Shaula dan Alnilam menghasilkan nilai $d_{teoretis}$ teoretis yang jauh lebih kecil dari batas kriteria Rayleigh maupun kriteria sensor, yaitu berada pada orde 10^{-15} hingga 10^{-16} mm. Pada kedua kelompok data ini, objek acuan memiliki fokus ideal yang ditandai dengan nilai $d_{praktis}$ adalah 0. Menurut kriteria sensor maupun kriteria Rayleigh, $d_{teoretis}$ untuk setiap data dalam kelompok ini berada dalam rentang fokus yang sama.

Pada kelompok data Orion diperoleh nilai $d_{teoretis}$ sebesar 0,012727599 mm untuk seluruh objek yang dianalisis. Pada kelompok ini, objek referensi mengalami defokus sehingga memiliki $d_{praktis}$ senilai 0,012150365. Sementara itu, pada kelompok data Jupiter diperoleh nilai $d_{teoretis}$ 0,00716 mm untuk seluruh objek latar belakang dan 0,00713 mm untuk Jupiter sebagai objek referensi. Hasil ini menunjukkan bahwa meskipun objek acuan telah dipilih berdasarkan deviasi praktis terkecil, posisi sensor pada saat pengambilan data masih mengalami sedikit defokus terhadap bidang fokus ideal. Berdasarkan kriteria sensor objek acuan pada kelompok Orion telah melampaui batas keburaman, begitu pula seluruh objek dalam kelompok data tersebut.

Kondisi berbeda pada kelompok data Jupiter. Pada kelompok ini, objek referensi yaitu Jupiter mengalami defokus sehingga memiliki $d_{praktis}$ senilai 0,007133275. Nilai tersebut, yang menjadi acuan defokus sistem selama pemotretan menyatakan bahwa nilai $d_{teoretis}$ untuk seluruh objek lain lebih besar

0,00003 mm dari objek acuan. Menurut kriteria sensor, $d_{teoretis}$ untuk setiap data dalam kelompok ini masih berada dalam rentang fokus yang sama.

Secara teoretis, model kedalaman fokus melalui pendekatan geometris sebagaimana diterapkan oleh Zandvliet memprediksi bahwa seluruh objek dalam penelitian ini seharusnya menghasilkan d yang hampir identik, ditandai sebagai titik oranye dalam seluruh grafik. Sebaliknya, hasil pengukuran praktis yang ditandai sebagai titik biru menunjukkan adanya variasi deviasi paku difraksi antar objek. Pada kelompok data Shaula dan Alnilam nilai deviasi cenderung meningkat seiring bertambahnya selisih jarak objek terhadap objek referensi, pada kelompok data Shaula lainnya hubungan tersebut tidak menunjukkan pola yang konsisten. Meskipun demikian, besarnya deviasi praktis yang terukur secara umum jauh lebih besar dibandingkan nilai yang diprediksi oleh model teoretis.

4.4.3 Analisis Pengaruh Sistem Optis

Dari seluruh persamaan regresi yang diperoleh, pola hubungan d terhadap $o_R - o_F$ dinyatakan dalam bentuk

$$y = mx + b \quad (4.11)$$

Dengan m merupakan gradien regresi. Bagian ini menyatakan sensitivitas perubahan deviasi paku difraksi terhadap perubahan jarak objek. Sementara b merupakan konstanta. Dengan memasukkan definisi sumbu $y = d$ dan sumbu $x = o_R - o_F$, maka diperoleh:

$$d = m(o_R - o_F) + b$$

Meninjau batas ketajaman objek yang menentukan batas kedalaman bidang sebagai Persamaan (4.4), maka:

$$c = m(o_R - o_F) + b$$

$$\frac{c - b}{m} = o_R - o_F$$

Bentuk ini menyatakan bahwa selisih batas jarak objek yang diamati dari objek referensi agar masih berada dalam rentang fokus bergantung pada parameter dalam persamaan c .

Disebabkan terdapat perberbedaan dalam penentuan batas ketajaman (c) yaitu c_R dan c_S , maka analisis pengaruh parameter dalam masing-masing kriteria dilakukan. Menurut kriteria Rayleigh, batas jarak fokus meningkat seiring peningkatan rasio fokus (N) dan panjang gelombang (λ). Dinyatakan sebagai:

$$\frac{c_R - b}{m} = o_R - o_F$$

$$\frac{(2,44 \cdot \lambda \cdot N) - b}{m} = o_R - o_F$$

Sedangkan menurut kriteria sensor, batas jarak fokus dipengaruhi tipe sensor (nilai M berbeda antara sensor monokrom dengan polikrom) serta ukuran sensor (δ). Dinyatakan sebagai:

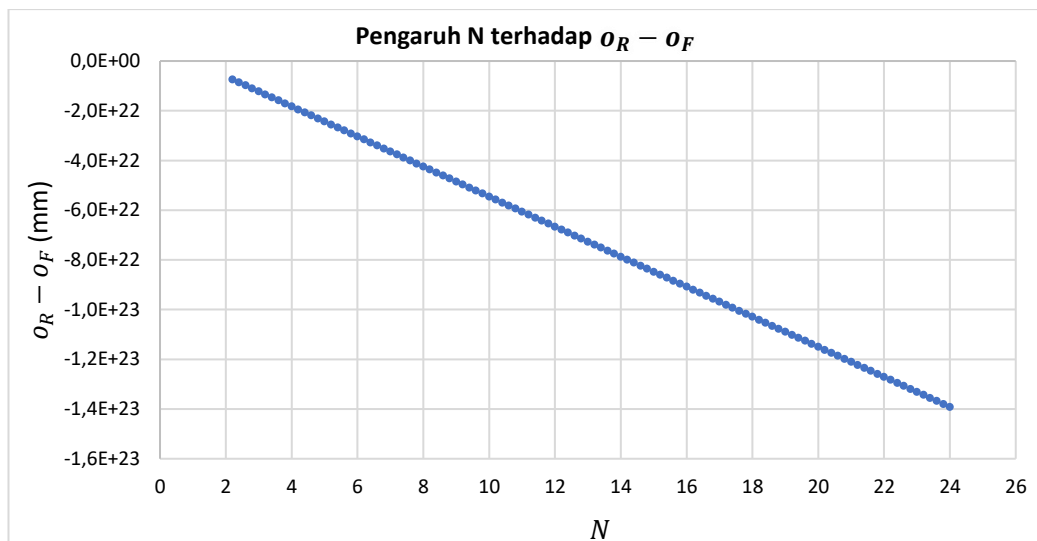
$$\frac{c_S - b}{m} = o_R - o_F$$

$$\frac{(M \cdot \delta) - b}{m} = o_R - o_F$$

Kriteria sensor menyatakan bahwa mengubah sensor polikrom memiliki rentang ketajaman yang lebih luas dibandingkan sensor monokrom. Dinyatakan oleh konstanta M yang bernilai 1 untuk sensor monokrom dan bernilai 2 untuk sensor polikrom pada persamaan c_S . Adapun memperkecil ukuran sensor juga memperkecil batas ketajaman sekaligus memungkinkan perekaman lebih banyak

detail dari gambar. Dengan ukuran piksel yang tepat, diharapkan ketelitian skala pengukuran dapat ditingkatkan. Untuk menentukan resolusi atau ukuran piksel sensor yang optimal, diperlukan kalkulasi yang tepat terhadap batas resolusi lensa yang digunakan. Mengambil contoh kasus pada data Shaula yang tertera pada Gambar 4.3, batas ketajaman dari kriteria sensor dapat diminimalkan sehingga menyetarai kriteria lensa dengan memperkecil ukuran piksel menjadi $32,9 \times 10^{-4} \text{ mm}$.

Kriteria Rayleigh menyatakan bahwa mengubah rasio fokus akan mengubah rentang ketajaman bidang secara linear, di mana nilai $o_R - o_F$ akan menyempit seiring mengecilnya nilai N . Dengan mengambil contoh pada persamaan regresi yang dihasilkan dari data Shaula, didapati pola perubahan nilai $o_R - o_F$ terhadap nilai N yang dinyatakan dalam grafik berikut:

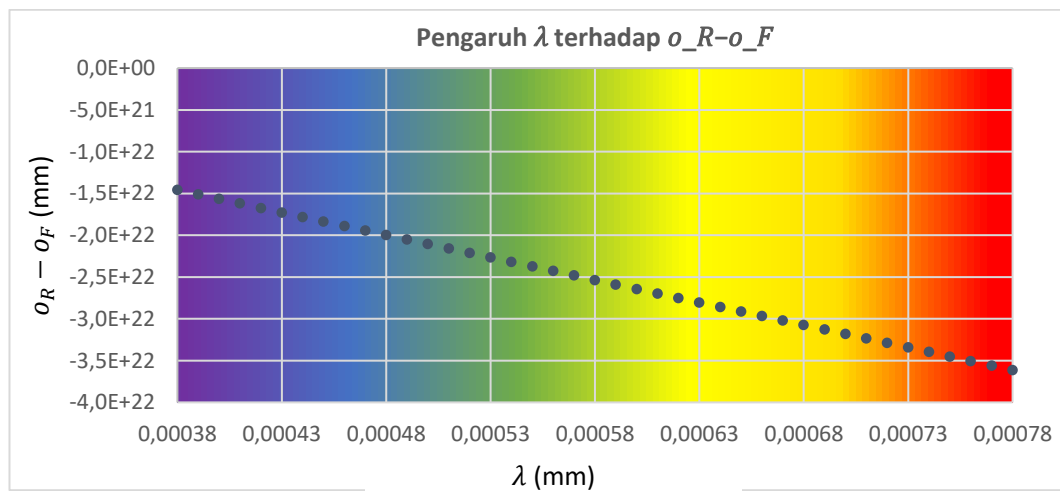


Gambar 4.7 Grafik plot hubungan antara rasio fokus (N) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Shaula.

Dari Gambar 4.7, terlihat bahwasanya peningkatan rasio fokus lensa (N) akan memperluas rentang jarak objek ($o_R - o_F$) agar tetap terlihat fokus. Adapun tanda

negatif pada grafik menyatakan bahwa jarak objek yang diamati (o_F) lebih dekat dari pengamat jika dibandingkan dengan jarak objek acuan (o_R).

Masih mengambil contoh data Shaula dengan menetapkan nilai variabel lain, didapati pengaruh panjang gelombang terhadap rentang jarak objek ($o_R - o_F$) agar tetap terlihat fokus sebagai grafik berikut:



Gambar 4. 8 Grafik plot hubungan antara panjang gelombang (λ) terhadap jarak objek dari objek acuan ($o_R - o_F$) untuk kelompok data Shaula.

Plot Gambar 4.8 menyatakan bahwa rentang jarak objek ($o_R - o_F$) agar tetap terlihat fokus meningkat linear seiring peningkatan panjang gelombang (λ). Adapun nilai λ tidak hanya terkait panjang gelombang yang diradiasikan oleh objek, namun juga sensitifitas sistem. Penggunaan filter *narrowband* yang kerap diterapkan para astrofotografer memungkinkan perubahan rentang area fokus dalam skala 10^{22} mm. Diantara filter *narrowband* yang umum digunakan yaitu filter H- α dengan spektrum 656,3 nm dan filter OIII dengan spektrum 500,7 nm. Dengan selisih rentang ($o_R - o_F$) diantara keduanya sebesar $8,38 \times 10^{21}$ mm, penggunaan filter OIII lebih disarankan agar diperoleh rentang area fokus yang lebih sempit.

4.5 Pembahasan

Hasil pengukuran pada keempat kelompok data menunjukkan bahwa terdapat perubahan nilai $d_{praktis}$ antar objek dengan perbedaan jarak. Pada kelompok data Shaula dan Alnilam, objek acuan tercatat memiliki $d_{praktis} = 0$ mm yang mengindikasikan fokus ideal, sementara objek lain dalam frame yang sama menunjukkan deviasi yang meningkat seiring bertambahnya selisih jarak terhadap objek acuan. Pola ini mengindikasikan bahwa pergeseran paku difraksi mampu menjadi indikator posisi relatif suatu objek terhadap bidang fokus sehingga mengonfirmasi keberadaan kedalaman bidang yang terbatas, bukan satu titik fokus tunggal di jarak tak hingga sebagaimana diasumsikan konsep *infinity focus*.

Namun demikian, pola perubahan nilai $d_{praktis}$ terhadap rentang jarak ($o_R - o_F$) di setiap kelompok data tidak seragam. Variasi ini ditunjukkan dengan jelas melalui perbedaan persamaan regresi masing-masing plot grafik pada Gambar 4.3 hingga 4.6. Kondisi ini menunjukkan keterbatasan penelitian di mana pergeseran paku difraksi konsisten mendeteksi adanya perbedaan posisi fokus antarobjek, tetapi besar dan arah deviasi tersebut tidak sepenuhnya dapat diprediksi hanya dari selisih jarak objek semata. Mengindikasikan adanya faktor lain yang turut berkontribusi pada saat pemotretan berlangsung.

Kesenjangan atau gap antara nilai $d_{praktis}$ dengan nilai $d_{teoretis}$ juga perlu dianalisis. Pendekatan geometris yang diterapkan Zandvliet memiliki kesenjangan skala terhadap data observasi sebesar 10^{15} hingga 10^{16} kali lipat. Nilai yang sangat besar ini menunjukkan bahwa pendekatan permodelan geometris lensa tipis yang mendasari model belum mampu merepresentasikan kompleksitas keseluruhan komponen serta muka gelombang cahaya dari sistem pemotretan.

Analisis pada subbab 4.4.3 menunjukkan bahwa hubungan antara deviasi paku difraksi Bahtinov terhadap rentang jarak yang dihasilkan dari persamaan regresi plot perubahan d terhadap $o_R - o_F$ mengikuti bentuk linear $d = m(o_R - o_F) + b$. Melalui pola tersebut, batas kedalaman objek atau DoF dapat dinyatakan sebagai $o_R - o_F = \frac{c-b}{m}$. Berdasarkan bentuk ini, kriteria Rayleigh menunjukkan bahwa memperbesar rasio fokus (N) atau panjang gelombang (λ) akan memperlebar rentang jarak objek yang masih tergolong tajam. Sementara kriteria sensor menunjukkan bahwa sensor polikrom ($M = 2$) memberi rentang ketajaman dua kali lebih luas dibandingkan sensor monokrom ($M = 1$). Ukuran piksel sensor yang lebih kecil mempersempit batas ketajaman namun berpotensi meningkatkan ketelitian pengukuran skala. Hasil ini menunjukkan bahwa batas DoF turut dipengaruhi oleh konfigurasi sistem optik dan sensor yang digunakan.

4.6 Studi Keislaman

Cahaya dalam Al-Qur'an direpresentasikan melalui tiga istilah berbeda yaitu "*nūr*", "*dhiya*", dan "*siraj*". Secara Bahasa "*nūr*" berarti terang yang memungkinkan indra penglihatan menerima kenampakan objek disekitarnya. Istilah ini disandarkan pada cahaya yang bersifat lembut, tidak panas, dan merupakan hasil pantulan dari sumber cahaya. Bagi benda yang menjadi sumber cahaya, Allah menggunakan kata "*dhiya*", dan "*siraj*". Dalam Q.S. Al-Baqarah (2):17 dan Yunus (10):5, kata "*dhiya*" merujuk pada sinar dari sumber cahaya yang turut memancarkan energi panas. Adapun kata "*siraj*" sebagaimana tercantum pada Q.S. Al-Furqan (25): 61, Al-Ahzab (33): 46, Nuh (71): 16, dan An-Naba (78): 13 digunakan untuk menyifati objek yang dapat menerangi (Hastuti & Syarifah, 2024; Kementerian Agama RI & Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), 2012). Al-

Qur'an menggunakan istilah "*dhiya*" untuk merujuk pada matahari atau bintang yang meradiasikan cahaya dan energi panas dari dirinya sendiri melalui reaksi fusi, kemudian menyifatnya dengan "*siraj*" atau pelita yang menerangi jagat raya (Amsori & Sumiati, 2024; Kementerian Agama RI & Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), 2010, 2012; Shihab, 2002). Interaksi cahaya dalam sistem optik kamera dapat dipelajari lebih lanjut melalui fenomena difraksi yang ditafsirkan sebagai cahaya di atas cahaya (*nūr 'ala nūr*) pada Q.S. An-Nur (24): 35. Secara fisis difraksi terjadi ketika cahaya melintasi lubang sempit, menyebabkan setiap titik gelombang membentuk sumber cahaya baru sesuai prinsip Huygens (Guler, 2026; Susilayati, 2016).

Hasil penelitian ini menunjukkan adanya perbedaan deviasi paku difraksi Bahtinov yang terpotret pada objek-objek langit yang diamati. Perbedaan tersebut muncul akibat perbedaan posisi fokus yang berkaitan dengan perbedaan jarak objek terhadap sistem optik. Meskipun seluruh objek yang diamati tampak berada pada satu bidang langit yang sama ketika dilihat dari Bumi, hasil analisis menunjukkan bahwa objek-objek tersebut sebenarnya menempati kedalaman ruang yang berbeda-beda. Fenomena pergeseran paku difraksi ini secara empiris membuktikan bahwa asumsi absolut mengenai satu posisi fokus tunggal di jarak tak hingga (*infinity focus*) tidak sepenuhnya akurat, karena setiap objek kosmik membawa informasi spasial uniknya masing-masing berdasarkan posisinya di dalam kedalaman ruang semesta.

Secara terpadu, variasi tren data praktis yang tersaji sebagai Gambar 4.3 hingga 4.6 menunjukkan tren linear. Di mana terdapat pola perubahan panjang pergeseran paku difraksi (d) seiring perbedaan jarak objek (o), sehingga pada batas

tertentu objek tersebut dapat dikategorikan berada diluar batas ketajaman citra. Meskipun pemodelan teoretis belum sepenuhnya berimpit secara numerik dengan hasil praktis, kesamaan pola dan kecenderungan distribusi data dari keempat kelompok data tersebut mengindikasikan adanya variasi posisi dan kedalaman bidang fokus yang nyata.

Temuan tersebut sejalan dengan representasi struktur alam semesta yang diciptakan Allah bertingkat-tingkat dan sangat luas (*thibāqan*), sebagaimana tercantum dalam Q.S. Nuh (71): 15 dan Al-Mulk (67): 3. Dilanjutkan dengan pemaknaan kata *sama'* (langit) pada Q.S. Adz-Dzariyat (51): 47 oleh tim penyusun Tafsir Al-Muntakhab sebagai segala sesuatu yang ada di atas dan menaungi. Maka, segala sesuatu yang ada di sekitar benda-benda langit seperti planet, bintang, tata surya dan galaksi juga disebut langit. Kalimat *sab'a samawat* kemudian tidak harus dimaknai bahwa tujuh langit itu berlapis-lapis, melainkan bahwa benda-benda langit itu berada pada jarak yang berbeda-beda, sehingga dapat disebut bertingkat-tingkat. Didukung pendapat Hamka dalam *Tafsir Al-Azhār*, bahwa penyebutan angka tujuh (*sab'a*) dalam bahasa Arab sering digunakan untuk menyatakan jumlah yang teramat besar (Kementerian Agama RI & Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), 2010).

Keberadaan tingkatan atau lapisan langit juga dinyatakan dalam hadist yang diriwayatkan Imam Tirmidzi (No. 3220), Abu Ya'la, dan Ath-Thabarani. Dalam riwayat hadist tersebut, dinyatakan bahwa jarak yang memisahkan bumi dengan langit pertama, serta jarak antara tiap-tiap tingkatan langit berikutnya setara dengan lima ratus tahun perjalanan. Meskipun memiliki sandaran dalam kitab-kitab tafsir klasik seperti Tafsir Ath-Thabari, narasi dengan angka tahun yang spesifik ini tidak

lepas dari evaluasi kritis para ulama. Imam Fakhruddin ar-Razi dalam *Tafsir Al-Azhār* menggolongkan riwayat ini tidak memiliki nilai ilmiah. Bagi Ar-Razi, fenomena tujuh langit lebih tepat dipahami sebagai tanda kekuasaan Allah yang tidak terbatas daripada sekadar angka matematis kaku yang sulit diterima oleh nalar penelitian pada zamannya. Namun, Hamka dalam kitab yang sama menjelaskan bahwa ukuran “lima ratus tahun perjalanan” kini dapat dipahami sebagai kecepatan cahaya yang menyatakan dimensi jarak. Pada masa lalu, manusia mengukur jarak berdasarkan durasi perjalanan fisik (seperti perjalanan kaki atau unta), namun dalam konteks astronomi, ukuran tersebut kini diterjemahkan menjadi tahun cahaya. Dengan memahami bahwa benda-benda langit seperti bintang dan galaksi terdistribusi dalam jarak yang mencapai jutaan tahun cahaya, maka "kedalaman" yang diisyaratkan hadist tersebut menemukan relevansinya dalam skala kosmik yang nyata (Hamka, 1971; Shihab, 2002a, 2002b).

Secara fisis, variasi panjang pergeseran atau deviasi (d) paku difraksi yang menjadi bukti adanya tingkatan jarak yang mengindikasikan kedalaman bidang. Hasil observasi yang diperoleh mengindikasikan perlunya pendekatan dan evaluasi teoretis maupun praktis yang lebih cermat, yang esensinya sejalan dengan Q.S Al-Baqarah ayat 260 yang telah dibahas pada latar belakang penelitian. Dengan demikian, perumusan kedalaman bidang (DoF) berbasis kriteria Rayleigh dan kriteria sensor dalam penelitian ini diharapkan dapat menjadi alternatif pendekatan fisis untuk mengkaji hubungan antara teori dengan fakta lapangan. Sekaligus membuka peluang bagi pengembangan pemodelan matematis sistem lensa yang lebih komprehensif di masa depan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan terkait pola pergeseran paku difraksi Bahtinov mask terhadap jarak objek untuk mengindikasikan kedalaman bidang pada astrofotografi, diberikan kesimpulan penelitian sebagai berikut:

1. Pengukuran dari hasil pemotretan menyatakan adanya pengaruh antara jarak objek terhadap panjang pergeseran paku difraksi Bahtinov mask. Namun, didapati gap yang signifikan antara permodelan teoretis dan hasil pengukuran praktis. Model teoretis melalui pendekatan geometris memprediksi perubahan posisi fokus dalam skala yang teramat kecil dibandingkan data praktis. Hal ini mengindikasikan permodelan tersebut belum mampu mewakili kompleksitas aspek yang mungkin memengaruhi perubahan deviasi paku difraksi dalam astrofotografi.
2. Evaluasi terhadap komponen optik menegaskan bahwa rentang kedalaman bidang (*depth of field*, DoF) pada astrofotografi dipengaruhi secara linear oleh parameter sistem optis yang digunakan. Menurut kriteria sensor, memperbesar rasio fokus (N) atau panjang gelombang (λ) dapat memperluas rentang area fokus. Menurut kriteria sensor, tipe sensor monokrom memiliki batas rentang yang lebih sempit dibandingkan polikrom. Ditunjukkan oleh konstanta M yang bernilai 1 untuk sensor monokrom dan 2 untuk sensor polikrom.

Untuk mengoptimalkan akurasi pengukuran, ukuran piksel sensor (δ) perlu disesuaikan dengan batas ketajaman lensa yang digunakan.

5.2 Saran

Pada penelitian ini masih terdapat beberapa keterbatasan. Untuk perbaikan kualitas data astrofotografi pada penelitian selanjutnya, diajukan beberapa saran antara lain:

1. Dilakukan pemotretan ulang menggunakan objek dan spesifikasi perangkat yang sama. Pengulangan ini diperlukan untuk mengkaji pengaruh faktor lingkungan seperti kelembaban, suhu, dan altitude objek terhadap pergeseran paku difraksi.
2. Untuk mengonfirmasi pengaruh setiap variabel sistem optis, penelitian selanjutnya disarankan menerapkan variasi pada rasio fokus lensa, menggunakan filter pemotretan untuk panjang gelombang tertentu, serta memvariasikan perangkat pemotretan. Untuk meminimalisir peluang pengaruh variabel lain, disarankan pemotretan dilakukan menggunakan Bahtinov mask yang sama serta dilakukan di lokasi dan waktu yang sama pula.
3. Permodelan matematis perlu ditingkatkan dengan mempertimbangkan kompleksitas aspek-aspek yang mungkin memengaruhi pergeseran paku difraksi Bahtinov mask. Meliputi aspek internal dalam sistem pemotretan maupun eksternal dari lingkungan.
4. Kalibrasi fokus ulang wajib dilakukan setiap kali terjadi pergantian target objek yang memiliki karakter panjang gelombang dominan atau magnitudo yang berbeda

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, A. E. (2005). *The Camera (The Ansel Adams photography series; Book 1)* (Vol. 1). Little, Brown and Company.
- Allen, E., & Triantaphillidou, S. (2011). *The Manual of Photography, Tenth Edition* (10th ed.). Focal Press.
- Amsori, & Sumiati. (2024). PENCIPTAAN LANGIT DALAM PANDANGAN AL QUR'AN DAN SAINS. *MASLAHAH Journal of Islamic Studies*, 3(1), 1–14.
- Ashley, J. (2015). Very Short Exposure Astrophotography. In *Astrophotography on the Go* (pp. 73–88). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09831-9_4
- Bradt, H. (2004). *Astronomy Methods: A Physical Approach to Astronomical Observations*. Cambridge University Press.
- Champagne, J. A., Burge, J. H., & Crowther, B. G. (2011). Thermo-opto-mechanical analysis of a cubesat lens mount. *Optomechanics 2011: Innovations and Solutions*, 8125, 812510. <https://doi.org/10.1117/12.893199>
- Chiu, L.-C., & Fuh, C.-S. (2010). An Efficient Auto Focus Method for Digital Still Camera Based on Focus Value Curve Prediction Model. *JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING*, 26, 1261–1272. <https://www.researchgate.net/publication/220587099>
- Chromey, F. R. (2010). *To Measure the Sky: An Introduction to Observational Astronomy*. Cambridge University Press.
- Den Dekker, A. J., & Van Den Bos, A. (1997). Resolution: a survey. *Optical Society of America*, 14(3), 547–557. <https://doi.org/https://doi.org/10.1364/JOSAA.14.000547>
- Gallaway, M. (2020). *An Introduction to Observational Astrophysics* (2nd Edition). Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-43551-6>
- Gendler, R., & GaBany, R. J. (2015). The Birth and Evolution of Astrophotography. In *Breakthrough!* (pp. 1–13). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20973-9_1
- Guler, A. (2026). Light, Ontology, and Analogy: A Non-Concordist Reading of Qur'an 24:35 in Dialogue with Philosophy and Physics. *Philosophies*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/philosophies11010015>

- Haigh, D. (2019). Referencing the infinity focus of achromatic telescope objectives. *Physics Education*, 54, 54(5), Art. 5. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1088/1361-6552/ab2b0d>
- Hamka. (1971). *Tafsir Al-Azhar* (Vol. 10). Pustaka Nasional.
- Hastuti, & Basithussyarop, M. (2022). PROBLEMATIKA ASTROFOTOGRAFI DALAM RUKYATUL HILAL. *Elfalaky*, 6(1), 111–136. <https://doi.org/https://doi.org/10.24252/ifk.v6i1.33620>
- Hastuti, E., & Syarifah, U. (2024). *PENDAHULUAN FISIKA ZAT PADAT Kajian Integrasi Islam dan Sains*. PT. Literasi Nusantara Abadi Grup.
- Hecht, Eugene. (2017). *Optics* (5th edition). Pearson Education.
- Jami, F. S. (2023, August 29). *Tafsir QS. Al-Baqarah Ayat 260: Berpikir Kritis ala Nabi Ibrahim*. <https://ikhbar.com/tadris/tafsir-qs-al-baqarah-ayat-260-berpikir-kritis-ala-nabi-ibrahim/>
- Junaidi, A. (2021). *ASTROFOTOGRAFI Adopsi dan Implementasinya dalam Rukyatulhilar di Indonesia* (I). Q-Media.
- Kementerian Agama RI, & Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). (2010). *PENCIPTAAN JAGAT RAYA Dalam Perspektif Al-Qur'an dan Sains* (1st ed.). Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an.
- Kementerian Agama RI, & Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). (2012). *MANFAAT BENDA-BENDA LANGIT dalam Perspektif Al-Qur'an dan Sains* (1st ed.). Lajnah Pentashihan Mushaf Al-Qur'an.
- Kinslake, R. (1992). *Optics in Photography*. SPIE Optical Engineering Press. <https://www.spiedigitallibrary.org/terms-of-use>
- Lendermann, M., Tan, J. S. Q., Koh, J. M., & Cheong, K. H. (2018). *Computational Imaging Prediction of Starburst-Effect Diffraction Spikes Supplementary Information*.
- Meeus, Jean. (1988). *Astronomical formulae for calculators*. Willmann-Bell.
- Nakamura, J. (Ed.). (2006). *Image Sensors and Signal Processing for Digital Still Cameras*. Taylor & Francis.
- Nasrudin, E., Kosasih, A., Abdussalam, A., Haera, M., Muhammad, D., & Alfaiza, T. (2025). Menelaah Pandangan Para Mufasir terkait Kisah Nabi Ibrahim dalam QS. Al-Baqarah ayat 260 dan Implikasinya bagi Pendidik serta Peserta Didik. *JOURNAL OF QUR'ÂN AND HADĪTH STUDIES*, 14(1), 216–231. <https://doi.org/10.15408/quhas.v14i1.45385>

- Nasse, H. H. (2010). *Depth of Field and Bokeh*. <https://lenspire.zeiss.com/photo/app/uploads/2022/02/technical-article-depth-of-field-and-bokeh.pdf>
- Oberdörster, A., Brückner, A., Wippermann, F., Bräuer, A., & Lensch, H. P. A. (2012). Digital focusing and refocusing with thin multi-aperture cameras. *Digital Photography VIII*, 8299, 829907. <https://doi.org/10.1117/12.906318>
- Odenwald, S. (2019). *A Guide to Smartphone Astrophotography*. NASA.
- Orhaug, T. (1969). On the Resolution of Imaging Systems. *Optica Acta*, 16(1), 75–84. <https://doi.org/10.1080/713818155>
- Ourique, P. A., Giovannini, O., & Catelli, F. (2010). Photographing stars with a digital camera. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 32(1), 1–8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1806-11172010000100002>
- Pearce, G. S., & Scagell, R. (1980). Astrophotography for Beginners: I. *Journal of the British Astronomical Association*, 90(2), 148–158. <https://britastro.org/journal/journal-of-the-british-astronomical-association-vol-90-iss-2>
- Pedrotti, F. L., & Pedrotti, L. S. (1992). *Introduction to Optics (2nd Edition)* (2nd Edition). Prentice-Hall Inc.
- Peric, D., & Livada, B. (2021). Hyper Focal Distance Application for Long Range Surveillance Camera Zoom Lens Focusing Settings. *8th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN) 2021*. <https://www.researchgate.net/publication/354961043>
- Prakel, David. (2018). *The visual dictionary of photography*. AVA Publishing SA.
- Purwanto, A. (2015). *AYAT-AYAT SEMESTA Sisi-Sisi Al-Qur'an yang Terlupakan* (II). Mizan digital Publishing.
- Ray, S. F. (1939). *Applied Photography Optics* (3rd ed.). Focal Press.
- Schulz, J. (2024). *Handbook of Calculations and Algorithms for the environmental sciences*. https://www.researchgate.net/profile/Jan-Schulz-6/post/What_is_the_relation_between_Depth_of_Field_and_Resolution_in_microscopy/attachment/66606c1e5063cd21261621cf/AS%3A11431281249771827%401717595163213/download/2024-01-31_-_Algorithms.pdf
- Shihab, M. Q. (2002a). *TAFSIR AL-MISBAH: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Qur'an* (Vol. 13). Lentera Hati.

- Shihab, M. Q. (2002b). *TAFSIR AL-MISBAH: Pesan, Kesan, dan Keserasian Al-Qur'an* (Vol. 14). Lentera Hati.
- Spurio, M. (2018). *Probes of Multimessenger Astrophysics Charged Cosmic Rays, Neutrinos, γ -Rays and Gravitational Waves Second Edition Astronomy and Astrophysics Library*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-96854-4>
- Susilayati, M. (2016). Difraksi pada Laser: Tafsir dari “Cahaya di atas cahaya”? Muslimah Susilayati. *SHAHIH Journal of Islamicate Multidiciplinary*, 1(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.22515/shahih.v1i2.332>
- Tan, C. Y., & Schulz, B. (2022). A Fourier method for the determination of focus for telescopes with stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511(2). <https://doi.org/10.1093/mnras/stac189>
- Voelz, D. George. (2011). *Computational fourier optics : a MATLAB tutorial*. SPIE Press.
- William Optics. (n.d.). *Diffraction Spikes Bahtinov Focusing Mask*. Retrieved September 9, 2025, from https://williamoptics.com/products/diffraction-spikes-bahtinov-focusing-mask?srsltid=AfmBOoqrsq-MFqlpgUuXEWXtTaFMctII6F4qdr1fXWQ-RAxgqrc_FNq&variant=44942898036953
- Woodhouse, C. (2024). The Astrophotography Manual: A Practical Approach to Deep-Sky Imaging, Third edition. In *The Astrophotography Manual: A Practical Approach to Deep-Sky Imaging, Third edition* (Third Edition). A Focal Press Book. <https://doi.org/10.4324/9781003463108>
- Wunderlin, J. (2012). The Bahtinov Focusing Mask. *ASTRONOMY TECHNOLOGY TODAY*, 6, 47–49. <https://astronomytechnologytoday.com/2012/05/29/volume-6-issue-3/>
- Zandvliet, M. (2017). *The Bahtinov Mask, a Focusing Technique for the MeerLICHT Telescope and the Commissioning at Sutherland, South Africa*. UNIVERSITY OF GRONINGEN.
- Zia, R. (2019). Visualisation for Digital Multi-Shot Photography. *Proceedings of EVA London 2019 (EVA 2019)*, 330–335. <https://doi.org/10.14236/ewic/eva2019.62>

LAMPIRAN

Lampiran 1. Tabel informasi untuk kelompok data Shaula dari katalog SIMBAD

C,D,S,-SIMBAD4 rel 1,8-2026,04,20CEST12:24:02

region(circle, 17 33 36,5 -37 06 13, 150m) & Vmag < 8

Number of objects : 35

N	identifier	coord1 (ICRS,J2000/2000)		plx	Mag V	Mag R	Mag G	Mag B
		RA	DEC					
1*	lam Sco	17 33 36,52012	-37 06 13,7648	5,7100	1,63			1,490
2*	ups Sco	17 30 45,8371228	-37 17 44,928511	5,6600	2,65			2,480
3*	Q Sco	17 36 32,8551435432	-38 38 06,891848556	20,6922	4,27		3,923714	5,357
4HD	160668	17 42 51,0974316864	-36 56 44,024727984	5,3297	5,52		4,918717	7,073
5HD	157097	17 22 54,7490787120	-37 13 14,839562316	8,9463	5,91		5,621790	6,999
6HD	158105	17 28 56,0893272024	-36 46 41,809637784	4,9851	5,99		5,653204	7,097
7HD	159633	17 37 26,9188791048	-38 03 58,915673100	1,1469	6,27		5,877388	7,520
8[SC96]	GC 109	17 35 36,0	-37 24 00		6,32			
9[SC96]	Mis 549	17 35 36,0	-37 24 00		6,32			
10HD	157038	17 22 39,2179927464	-37 48 16,699933296	0,4259	6,44	5,70	6,031171	7,200
11HD	159312	17 35 43,0769582448	-37 26 23,535249540	8,9116	6,46		6,471678	6,493
12HD	157902	17 27 41,3866750584	-37 11 08,210363208	3,3623	6,68		6,292885	7,900
13HD	159194	17 35 06,2775971616	-38 47 58,095633300	6,6572	6,76		6,401494	7,990
14HD	158156A	17 29 25,616853	-38 31 00,95813		6,81			6,880
15HD	159704A	17 37 51,207225	-37 51 41,00966		6,89			7,670
16HD	158409	17 30 47,9639227	-37 26 13,112616	7,0100	6,91		7,357389	7,000
17HD	159340	17 36 00,6422031240	-38 06 08,071984656	10,1119	6,94		6,894050	7,210
18HD	159937	17 39 05,6679363168	-37 46 34,484946924	5,0946	7,10		6,841494	8,090
19HD	158468A	17 31 19,682	-39 01 04,92		7,38	8,23		7,890
20HD	160147	17 40 09,7252429560	-39 12 17,931675168	2,5711	7,45		7,422260	7,420
21HD	157957	17 28 03,4907293344	-36 52 55,493005080	1,3925	7,55		7,506723	7,610
22HD	158156B	17 29 25,657107	-38 31 01,03127		7,55			7,720
23HD	157707	17 26 29,4816605496	-37 06 43,978865292	2,2912	7,57		6,796293	9,240
24HD	159091	17 34 14,1818553072	-35 44 01,433702364	2,4701	7,63		7,570157	7,750
25HD	157708	17 26 34,5607788360	-38 19 44,044927140	3,0472	7,64		7,169642	9,000
26HD	159632	17 37 30,3237	-37 46 55,000		7,67			7,980
27HD	160592	17 42 21,8906660592	-35 29 58,580698704	6,3857	7,71		7,691310	7,800
28HD	159341	17 35 57,2991283584	-38 28 21,882501480	2,6772	7,73		7,176886	9,230
29V*	V1080 Sco	17 22 41,9330242101	-38 12 08,360911984		7,76		7,801227	7,890
30HD	160282A	17 40 36,4872604966	-35 38 53,428622403	6,4445	7,79		7,684085	8,280

31HD 157928	17 27 47,5699749528 -36 31 32,715769404	3,7715	7,80	7,364546	9,070
32HD 158530	17 31 34,3835968776 -38 38 49,825551912	3,0059	7,86	7,822006	7,850
33HD 159279	17 35 30,2761305312 -37 50 52,320333336	11,5538	7,89	7,798470	8,350
34HD 157830	17 27 21,9537733872 -38 03 41,228627868	#####	7,90	7,703790	8,600
35HD 158469	17 31 19,7571326640 -39 09 55,118534652	#####	7,94	7,807178	8,480

=====

Lampiran 2. Tabel informasi untuk kelompok data Orion dari katalog SIMBAD

C,D,S, - SIMBAD4 rel 1,8 - 2026,04,21CEST07:51:17

region(circle, 05 36 35.693 - 06 03 53.102, 150m) & Vmag < 8

Number of objects : 72

N	identifier	coord1 (ICRS,J2000/2000)		plx	Mag V	Mag R	Mag G	Mag B
		RA	DEC					
1NGC 1980		05 35 15,5	-05 55 46	2,5860	2,50			
2* iot Ori		05 35 25,9861932063	-05 54 35,598684624	1,9969	2,77		2,74084	2,530
3NGC 1981		05 35 24,4	-04 29 58	2,5387	4,20			
4* c Ori		05 35 23,1646530684	-04 50 18,059784995	6,5163	4,59	4,67	4,48509	4,400
5* ups Ori		05 31 55,8599595648	-07 18 05,535884975	2,4567	4,63	4,75	4,54622	4,360
6HD 36960		05 35 02,6823091513	-06 00 07,308349203	2,6166	4,72		4,71649	4,500
7* d Ori		05 38 53,0831846256	-07 12 46,187179740	22,9587	4,80	4,65	4,73998	4,930
8* tet01 Ori C		05 35 16,4662967280	-05 23 22,921811880	2,5014	5,13	4,91	4,96096	5,150
9* 45 Ori		05 35 39,4841556384	-04 51 21,839576760	8,7664	5,23		5,17467	5,483
10HD 36959		05 35 01,0070120496	-06 00 33,366713364	2,7919	5,53		5,67861	5,330
11HD 37209A		05 36 35,6933463600	-06 03 53,102455123	2,5777	5,75		5,72303	5,535
12HD 37481		05 38 37,9735682376	-06 34 26,246963640	2,7414	5,96		5,91789	5,730
13HD 38089		05 42 53,9141430	-06 47 46,206245	20,02	5,97		5,84670	6,386
14HD 37303		05 37 27,3575332104	-05 56 18,204499212	2,7353	6,02		5,99295	5,817
15HD 37356		05 37 53,3851682160	-04 48 50,525298828	2,1972	6,18	6,11	6,15851	6,140
16HD 36430		05 31 20,8933113744	-06 42 30,168166680	2,5173	6,21		6,18829	6,041
17HD 36285		05 30 20,7537108216	-07 26 05,338118076	2,8252	6,31		6,29671	6,130
18HD 37016A		05 35 22,318004	-04 25 27,54890		6,35			6,210
19HD 37040		05 35 31,0791596	-04 21 50,577378	2,7700	6,38			6,240
20* tet02 Ori B		05 35 26,4007537560	-05 25 00,793767576	2,3870	6,38	6,29	6,30193	6,290
21* tet02 Ori A		05 35 22,9012398264	-05 24 57,832632108	2,9728	6,39	6,30	5,00181	6,300
22HD 37040A		05 35 31,0756116265	-04 21 50,563049764	2,5686	6,45		6,44943	6,310
23HD 36814		05 34 02,4722062656	-07 01 25,503438216	7,5767	6,45		6,15010	7,570

24HD 37150	05 36 15,0278258688	-05 38 52,514534220	2,6585	6,51	6,51993	6,340
25HD 37017	05 35 21,8667428568	-04 29 39,024375324	2,7835	6,56	6,61 6,56920	6,430
26* tet01 Ori D	05 35 17,2574479992	-05 23 16,570738104	2,2820	6,70	6,40 6,58316	6,790
27HD 36920	05 34 48,0065238216	-07 12 01,398728556	3,7601	6,70	6,38321	7,880
28V* V1045 Ori	05 34 53,9637586032	-04 06 37,494251928	3,8518	6,71	6,69707	6,569
29HD 36151	05 29 25,4061496128	-07 15 39,191153256	3,2899	6,71	6,66411	6,580
30* tet01 Ori A	05 35 15,8254015008	-05 23 14,334699480	2,6427	6,73	6,42 6,62754	6,75
31HD 38312	05 44 33,2012135520	-06 51 51,338754792	7,6164	6,76	6,75731	6,944
32HD 36843	05 34 24,0814900944	-04 48 15,616389600	6,6956	6,82	6,7898	6,99
33HD 37061	05 35 31,3649044920	-05 16 02,582064192	2,4059	6,83	6,73589	7,09
34HD 37410	05 38 15,2938875840	-04 06 29,638644120	10,5763	6,86	6,86176	6,972
35HD 36958	05 35 04,7875827888	-04 43 54,626071800	2,7552	6,90	7,31018	7,22
36* iot Ori B	05 35 26,4561867264	-05 54 44,447086188	2,7870	7,00	7,20684	7,1
37HD 37492	05 38 39,7196275848	-08 28 15,648981960	3,3795	7,09	8,11 7,07662	7,02
38HD 37334	05 37 36,7544597184	-04 56 02,901880536	2,6675	7,15	7,11016	6,991
39HD 37129	05 36 06,2580409656	-04 25 32,781782028	2,6363	7,17	7,22 7,13743	7,02
40HD 37025	05 35 15,7459930968	-06 01 57,889342812	2,6524	7,17	7,17 7,13099	7,04
41V* S Ori	05 29 00,8923286472	-04 41 32,762469480	2,3912	7,20	7,32737	10,44
42HD 37777	05 40 57,6817366584	-03 50 35,338293348	2,5820	7,29	6,79569	8,724
43HD 37058	05 35 33,3539646576	-04 50 15,181113696	2,6181	7,30	7,30488	7,18
44HD 38292	05 44 31,6679717448	-04 41 44,752175628	2,9028	7,34	7,32646	7,42
45HD 37115A	05 35 54,0815906477	-05 37 42,231677914	2,6595	7,34	7,3701	7,22
46V* V1179 Ori	05 36 06,2338022808	-07 23 47,317093944	4,3346	7,38	7,3744	7,31
47HD 37747	05 40 32,6206419216	-07 39 33,849210060	5,3013	7,43	7,12578	8,62
48HD 37000	05 35 11,0124999792	-05 55 36,881125896	2,6184	7,46	7,42167	7,33
49HD 36106	05 29 06,8507663640	-05 26 41,455979268	2,4576	7,50	7,01127	8,93
50HD 36017	05 28 33,2244950304	-04 41 49,299017856	4,4392	7,51	7,45991	7,74
51* c Ori B	05 35 23,111969	-04 50 19,28466		7,52	7,80449	7,41
52HD 36342	05 30 52,9263830832	-04 15 16,890166152	6,1084	7,55	7,53082	7,66
53HD 36936	05 34 59,0052704976	-04 21 15,320553408	2,7086	7,55	7,54078	7,44
54HD 37526	05 39 02,4016862760	-05 11 40,072253172	2,9763	7,55	7,57875	7,49
55HD 36865A	05 34 32,4289425281	-04 29 14,703778816	2,8411	7,59	7,61765	7,49
56HD 36271	05 30 16,2462010056	-05 59 16,204689204	3,2769	7,60	7,3695	8,52
57HD 36864	05 34 40,8993376272	-03 40 45,500937240	4,0732	7,62	7,28775	8,79
58HD 37889	05 41 22,4053707864	-06 56 06,711748584	2,2514	7,63	7,60821	7,52
59HD 37444	05 38 27,0192282120	-05 02 40,854588936	4,9133	7,64	7,58919	7,93
60HD 36629	05 32 57,0824474232	-04 33 59,339585016	2,3310	7,65	7,53 7,61035	7,67
61HD 36541	05 32 07,0296834048	-06 42 29,904667020	2,8282	7,66	7,64873	7,56
62HD 37358	05 37 37,1728524240	-08 12 01,396202652	3,3566	7,70	7,67327	7,89
63HD 36487	05 31 41,4430036992	-07 02 55,128840396	2,6383	7,75	7,7708	7,67

C,D,S, - SIMBAD4 rel 1,8 - 2026,04,21CEST04:37:17

region(circle, 05 36 12,8 -01 12 06,9, 150m) & Vmag < 7,1

Number of objects : 41

N	identifrier	coord1 (ICRS,J2000/2000)		plx	Mag V	Mag R	Mag G	Mag B
		RA	DEC					
1*	eps Ori	05 36 12,81335	-01 12 06,9089	1,6500	1,69	1,76		1,510
2*	zet Ori	05 40 45,52666	-01 56 33,2649	4,4300	1,77	1,85		1,560
3*	zet Ori A	05 40 45,527143	-01 56 33,26036		1,90			1,790
4*	del Ori	05 32 00,40009	-00 17 56,7424	4,7100	2,41	2,32	2,24877	2,020
5*	zet Ori B	05 40 45,571207	-01 56 35,58704		3,73			3,550
6*	sig Ori	05 38 44,7653828520	-02 36 00,283179888	3,0400	3,79	3,87	3,79017	3,580
7*	31 Ori	05 29 43,9820095248	-01 05 32,058334392	6,5170	4,71		4,05264	6,280
8	HD 37756	05 40 50,7155671106	-01 07 43,635084978	2,6349	4,95		4,89509	4,740
9	HD 36591	05 32 41,3510096736	-01 35 30,595447356	2,3510	5,34		5,30375	5,150
10	V* VV Ori	05 33 31,4464933704	-01 09 21,859452468	2,2654	5,34	5,39	5,30962	5,160
11	HD 36780	05 34 04,0475348112	-01 28 12,872573256	6,2074	5,90		5,30662	7,436
12	HD 37788	05 41 05,5958352240	+00 20 15,915863220	#####	5,91		5,85023	6,212
13	HD 36558	05 32 37,9835527896	+00 00 42,929405064	3,2037	6,16		5,50718	7,730
14	HD 36779	05 34 03,8907558912	-01 02 08,616145200	2,7006	6,22		6,20672	6,050
15	HD 37744	05 40 37,2968503824	-02 49 30,852237396	2,5199	6,22		6,17724	6,020
16	HD 36840	05 34 29,2858199280	-00 00 44,447199012	3,8001	6,25		6,00103	7,237
17	V* V1197 Ori	05 43 09,3188981064	-01 36 47,707171272	4,6809	6,31		5,73339	7,786
18	HD 37055	05 35 35,9043020952	-03 15 10,219423968	3,0994	6,41		6,39373	6,290
19	HD 36646	05 33 07,34558	-01 43 02,4952	3,1700	6,46			6,370

20* sig Ori E	05 38 47,2050040320 -02 35 40,521424812	2,3077	6,46	6,84	6,64753	6,380
21HD 36150	05 29 41,6085839352 -00 48 09,168350364	9,4979	6,50		6,45648	6,740
22HD 35971	05 28 25,7521614432 +00 01 13,227366720	4,4891	6,63		6,64299	6,589
23HD 37904A	05 41 40,339618 -02 53 47,34360		6,65			6,890
24HD 36827	05 34 14,9079137208 -02 52 53,994081000	2,8213	6,67		6,65020	6,516
25[SC93b] 223	05 28 36,0 -02 39 00		6,67			
26* sig Ori D	05 38 45,6253355112 -02 35 58,894678824	2,4744	6,69		6,77171	6,510
27HD 36646A	05 33 07,3452027192 -01 43 02,497731816	2,3965	6,69		6,73980	6,580
28V* V1375 Ori	05 31 43,6724331744 -03 12 59,301019008	2,4470	6,71		6,25241	8,030
29HD 36710	05 33 37,7172216576 -03 27 47,413734048	2,5879	6,71		6,21796	8,210
30HD 37397	05 38 13,7363029896 -01 10 09,037308756	2,8704	6,83		6,81174	6,675
31* del02 Ori	05 32 00,4064140728 -00 17 04,347484800	2,6245	6,83		6,82788	6,670
32HD 38002	05 42 32,9184921048 -00 00 57,944531808	3,5195	6,85		6,60435	7,820
33HD 36139	05 29 37,5553379568 -00 01 16,525128828	6,8081	6,87		6,87312	6,931
34HD 37593	05 39 37,9893692736 +00 50 01,860314784	4,1437	6,91		6,55356	8,130
35V* V901 Ori	05 40 56,3704617744 -01 30 25,856677224	2,5463	6,96		6,95827	6,820
36HD 36954	05 35 12,7873461000 -00 44 07,310794920	3,3383	6,98		6,94789	6,847
37HD 36882	05 34 48,1906635624 -00 57 13,094830476	5,2920	7,01		6,65283	8,1
38HD 37660	05 40 03,9865634472 -01 25 31,725476904	1,4181	7,03		6,77041	7,57
39HD 37687	05 40 19,7244660720 -03 25 37,491283092	2,2441	7,05		6,96897	7,052
40HD 36811	05 34 09,7403451960 -01 54 06,662865492	6,6365	7,08	6,95	7,03899	7,26
41HD 37321	05 37 34,80316 -01 25 19,6841	1,5600	7,09	7,09		7,01
=====						
* p Ori	05 24 28,8969780456 -00 53 28,805349264	17,3865	5,07		4,79537	6,032

Lampiran 4. Tabel informasi untuk kelompok data Jupiter dari katalog SIMBAD

C,D,S, - SIMBAD4 rel 1,8 - 2026,04,21CEST11:52:00

region(circle, 05 00 55,2 +22 03 44,6, 150m) & Vmag <7,2

Number of objects : 11

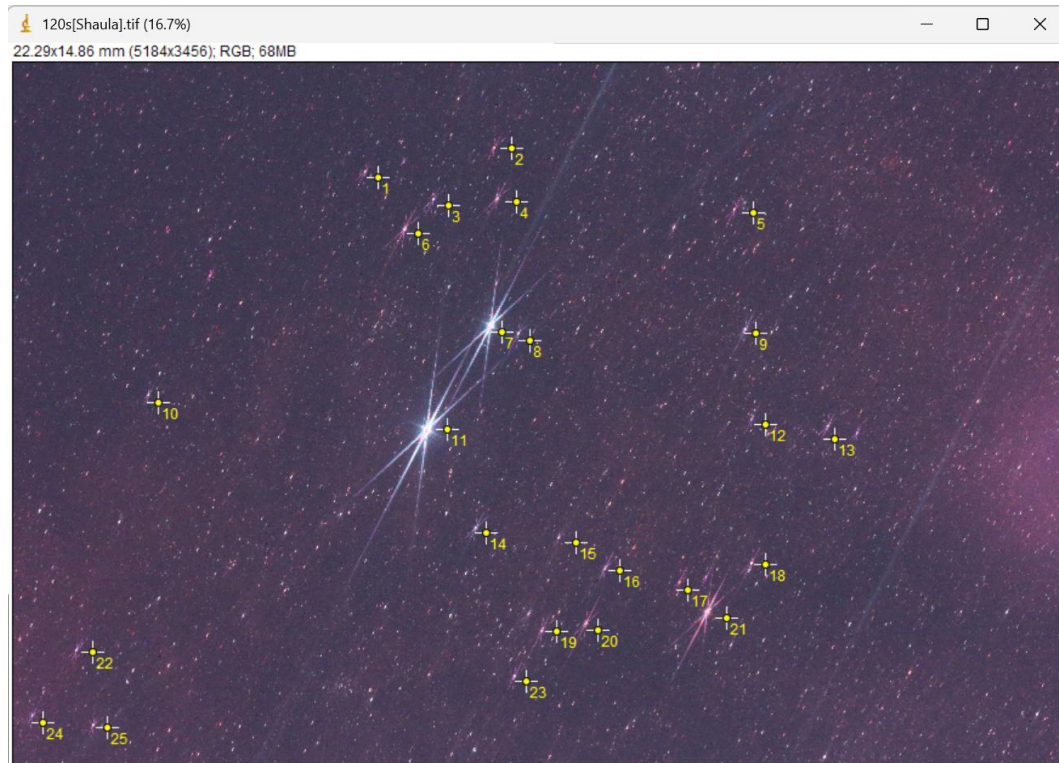
N	identifier	coord1 (ICRS,J2000/2000)		plx	Mag V	Mag R	Mag G	Mag B
		RA	DEC					
1*	iot Tau	05 03 05,7465241272	+21 35 23,860305924	18,3851	4,62		4,58300	4,797
2*	l Tau	05 07 48,3996326640	+20 25 06,155206608	16,1208	5,28		5,27097	5,380
3*	99 Tau	04 57 48,6456469296	+23 56 54,846669516	5,5522	5,81		5,42690	6,903
4*	105 Tau	05 07 55,4349577176	+21 42 17,349368184	3,2854	5,92		5,72303	6,080
5	HD 32482	05 04 21,5888331312	+21 16 40,547900640	5,7141	6,19		5,76976	7,534

6HD 31039	04 53 34,0965850680	+23 18 56,409761160	6,9311	6,55	6,26006	7,590
7HD 32641	05 05 37,7168256761	+23 03 39,769557559	3,5928	6,73	6,89154	6,800
8HD 32642A	05 05 32,1006557699	+19 48 24,203063163	6,2277	7,00	7,00787	7,250
9HD 32811	05 06 40,9294475832	+22 30 38,717060400	3,0444	7,14	7,07064	7,280
10HD 31363	04 56 06,6360279696	+22 34 35,618538936	6,1427	7,17	6,79241	8,390
11HD 32575	05 05 12,0298915296	+23 47 56,193007380	5,4130	7,18	6,90089	8,270

=====

Jupiter	05 00 55,2	+22 03 44,6	-2,66
---------	------------	-------------	-------

Lampiran 5. Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Shaula



No	d praktis [mm]	Nama objek	Parallax	jarak (o) (parsec)	jarak (o) (mm)	$O_R - O_F$ [mm]	$\left(\left(\frac{O_R \cdot f}{O_R - f} \right) - \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a} \right) - \left(\frac{O_F \cdot f}{O_F - f} \right)$ [mm]	d teoretis [mm]
1	0.005679629	HD 157928	3.7715	265,1465	8.18E+21	-1.87E+22	0,00E+00	0,0000000000000000
2	0.004206603	HD 157707	2.2912	436,4525	1.35E+22	-1.34E+22	-2,84E-14	-0,00000000000000875
3	0.003786420	HD 157957	1.3925	718,1329	2.22E+22	-4.75E+21	2,84E-14	0,00000000000000875
4	0.005553095	HD 157902	3.3623	297,4155	9.18E+21	-1.77E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
5	0.005786420	HD 157708	3.0472	328,1701	1.01E+22	-1.68E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
6	0.005786420	HD 158105	4.9851	200,5978	6.19E+21	-2.07E+22	2,84E-14	0,00000000000000875
7	0.005226684	* ups Sco	5.6600	176,6784	5.45E+21	-2.15E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
8	0.006210555	HD 158409	7.0100	142,6534	4.40E+21	-2.25E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
9	0.004184614	HD 158156A					0,00E+00	0,00000000000000000
10	0.004807546	HD 159091	2.4701	404,8419	1.25E+22	-1.44E+22	2,84E-14	0,00000000000000875
11	0.005786420	* lam Sco	5.7100	175,1313	5.40E+21	-2.15E+22	2,84E-14	0,00000000000000875
12	0.004786420	HD 158530	3.0059	332,6791	1.03E+22	-1.66E+22	2,84E-14	0,00000000000000875
13	0.005074887	HD 158468A					-2,84E-14	-0,00000000000000875
14	0.007272407	HD 159312	8.9116	112,2133	3.46E+21	-2.34E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
15	0.005040798	HD 159279	11.5538	86,5516	2.67E+21	-2.42E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
16	0.007272407	HD 159340	10.1119	98,8934	3.05E+21	-2.39E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
17	0.004206603	HD 159341	2.6772	373,5246	1.15E+22	-1.54E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
18	0.00523007	HD 159194	6.6572	150,2133	4.64E+21	-2.23E+22	0,00E+00	0,00000000000000000
19	0.004807546	HD 159704A					0,00E+00	0,00000000000000000
20	0.000000000	HD 159633	1.1469	871,9156	2.69E+22	0.00E+00	0,00E+00	0,00000000000000000
21	0.006529413	* Q Sco	20.6922	48,3274	1.49E+21	-2.54E+22	0,00E+00	0,00000000000000000

22	0.009314621	HD 160282A	6.4445	155,1711	4.79E+21	-2.21E+22	0,00E+00	0,000000000000000000
23	0.004807546	HD 159937	5.0946	196,2863	6.06E+21	-2.08E+22	-2,84E-14	-0,0000000000000000875
24	0.006205031	HD 160592	6.3857	156,5999	4.83E+21	-2.21E+22	2,84E-14	0,0000000000000000875
25	0.005102358	HD 160575					0,00E+00	0,000000000000000000

Pada data Shaula, objek acuan adalah nomor 20 dengan $d_{praktis} = 0.000000000$ mm. Sehingga nilai o_R yang digunakan dalam kalkulasi data Shaula adalah nilai o di kolom nomor 20.

Lampiran 6. Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Orion



No	d praktis [mm]	Nama objek	Parallax	jarak (o) (parsec)	jarak (o) (mm)	$O_r - O$ [mm]	$\left(\left(\frac{O_R \cdot f}{O_R - f} \right) - \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a} \right) - \left(\frac{O_F \cdot f}{O_F - f} \right)$ [mm]	d teoretis [mm]
1	0.016019957	HD 36271	3.2769	305,1665	9.42E+21	-2.51E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
2	0.015069783	HD 36430	2.5173	397,2510	1.23E+22	3.34E+20	4,13E-02	0.01272759899999260
3	0.015069783	* ups Ori	2.4567	407,0501	1.26E+22	6.37E+20	4,13E-02	0.01272759900000130
4	0.016019957	HD 36342	6.1084	163,7090	5.05E+21	-6.87E+21	4,13E-02	0.012727599000001010
5	0.016970131	HD 36541	2.8282	353,5818	1.09E+22	-1.01E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
6	0.016019957	HD 36629	2.3310	429,0004	1.32E+22	1.31E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
7	0.015103034	HD 36814	7.5767	131,9836	4.07E+21	-7.85E+21	4,13E-02	0.012727599000001010
8	0.014119609	HD 36920	3.7601	265,9504	8.21E+21	-3.72E+21	4,13E-02	0.012727599000001010
9	0.015070000	HD 36885	6.6539	150,2878	4.64E+21	-7.29E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
10	0.012150365	HD 36710	2.5879	386,4137	1.19E+22	0.00E+00	4,13E-02	0.01272759900000130
11	0.014119609	HD 36864	4.0732	245,5072	7.58E+21	-4.35E+21	4,13E-02	0.01272759899999260
12	0.015069783	V* V1045 Ori	3.8518	259,6189	8.01E+21	-3.91E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
13	0.014119609	HD 36865A	2.8411	351,9763	1.09E+22	-1.06E+21	4,13E-02	0.012727599000001010
14	0.017920000	HD 36883A	2.6678	374,8407	1.16E+22	-3.57E+20	4,13E-02	0.01272759900000130
15	0.017920000	HD 36936	2.7086	369,1944	1.14E+22	-5.31E+20	4,13E-02	0.01272759900000130
16	0.015070000	HD 37040	2.7700	361,0108	1.11E+22	-7.84E+20	4,13E-02	0.012727599000001010
17	0.019500000	HD 37016A					4,13E-02	
18	0.021179414	HD 37017	2.7835	359,2599	1.11E+22	-8.38E+20	4,13E-02	0.01272759899999260
19	0.016020000	HD 37129	2.6363	379,3195	1.17E+22	-2.19E+20	4,13E-02	0.012727599000001010
20	0.014120000	HD 36843	6.6956	149,3518	4.61E+21	-7.32E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
21	0.016019957	HD 36958	2.7552	362,9501	1.12E+22	-7.24E+20	4,13E-02	0.012727599000001010
22	0.016019957	* c Ori	6.5163	153,4613	4.74E+21	-7.19E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
23	0.014119609	* 45 Ori	8.7664	114,0719	3.52E+21	-8.40E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
24	0.015070000	HD 37061	2.4059	415,6449	1.28E+22	9.02E+20	4,13E-02	0.012727599000001010
25	0.020229240	HD 37115A	2.6595	376,0105	1.16E+22	-3.21E+20	4,13E-02	0.01272759900000130
26	0.016970000	HD 37150	2.6585	376,1520	1.16E+22	-3.17E+20	4,13E-02	0.012727599000001010
27	0.016020000	* iot Ori	1.9969	500,7762	1.55E+22	3.53E+21	4,13E-02	0.01272759900000130

28	0.012260000	HD 37209A	2.5777	387,9427	1.20E+22	4.72E+19	4,13E-02	0.01272759900000130
29	0.015069783	HD 37303	2.7353	365,5906	1.13E+22	-6.43E+20	4,13E-02	0.012727599000001010
30	0.015070000	V* V1179 Ori	4.3346	230,7018	7.12E+21	-4.81E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
31	0.016019957	HD 37358	3.3566	297,9205	9.19E+21	-2.73E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
32	0.014293104	HD 37410	10.5763	94,5510	2.92E+21	-9.01E+21	4,13E-02	0.012727599000001010
33	0.014119609	HD 37356	2.1972	455,1247	1.40E+22	2.12E+21	4,13E-02	0.012727599000001010
34	0.016019957	HD 37334	2.6675	374,8828	1.16E+22	-3.56E+20	4,13E-02	0.01272759899999260
35	0.015391651	HD 37444	4.9133	203,5292	6.28E+21	-5.64E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
36	0.015000127	HD 37526	2.9763	335,9876	1.04E+22	-1.56E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
37	0.015069783	HD 37481	2.7414	364,7771	1.13E+22	-6.68E+20	4,13E-02	0.01272759899999260
38	0.017920306	* d Ori	22.9587	43,5565	1.34E+21	-1.06E+22	4,13E-02	0.01272759900000130
39	0.018870480	HD 37594	23.9992	41,6681	1.29E+21	-1.06E+22	4,13E-02	0.012727599000001010
40	0.016019957	HD 37747	5.3013	188,6330	5.82E+21	-6.10E+21	4,13E-02	0.01272759900000130
41	0.012727599	HD 37777	2.5820	387,2967	1.20E+22	2.72E+19	4,13E-02	0.012727599000001010
42	0.016970131	HD 38089	20.0200	49,9500	1.54E+21	-1.04E+22	4,13E-02	0.01272759900000130

Pada data Orion, objek acuan adalah nomor 10 dengan $d_{praktis} = 0.012150365$

mm. Sehingga nilai o_R yang digunakan dalam kalkulasi data Shaula adalah nilai o

di kolom nomor 10.

Lampiran 7. Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Alnilam

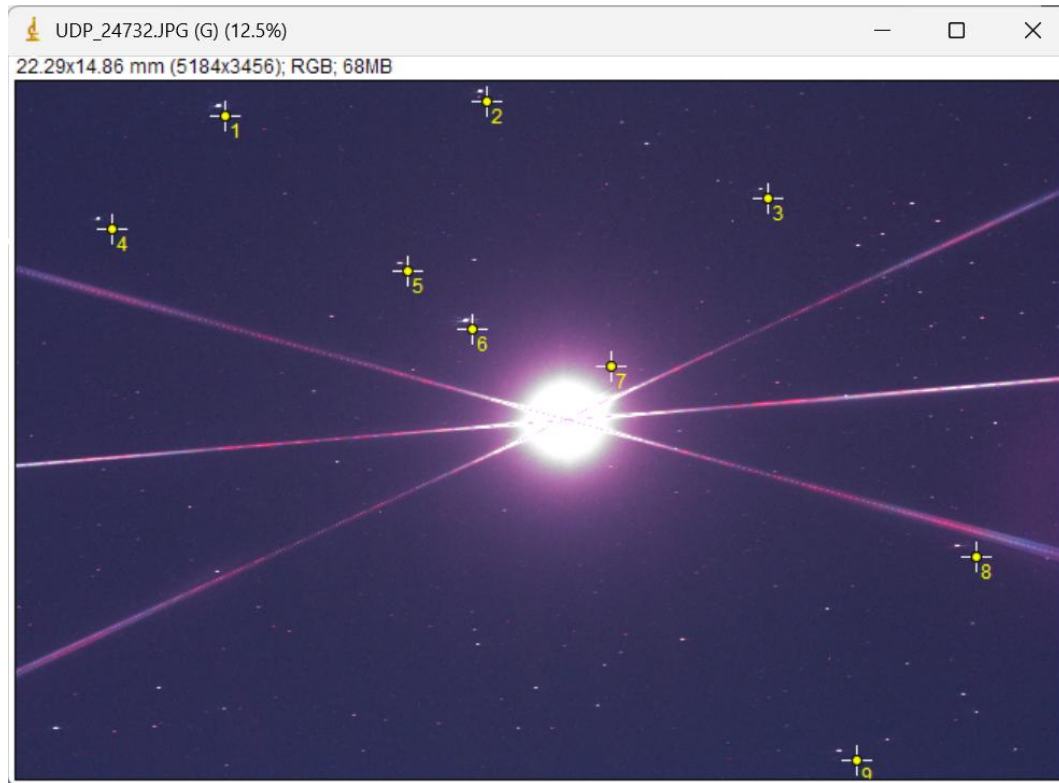


No	d praktis [mm]	Nama objek	Parallax	jarak (o) (parsec)	jarak (o) (mm)	$O_r - O$ [mm]	$\left(\left(\frac{O_R \cdot f}{O_F \cdot f} \right) - \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a} \right) - \left(\frac{O_F \cdot f}{O_F \cdot f} \right)$ [mm]	d teoretis [mm]
1	0.002885154	* p Ori	17.3865	57,5159	1.77E+21	-1.47E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
2	0.004778349	HD 36827	2.8213	354,4465	1.09E+22	7.69E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
3	0.003606442	HD 37055	3.0994	322,6431	9.96E+21	6.71E+21	0,00E+00	0.00000000000000000
4	0.004184959	V* V1375 Ori	2.4470	408,6637	1.26E+22	9.36E+21	5,68E-14	0.00000000000001751
5	0.002885154	* 31 Ori	6.5170	153,4448	4.74E+21	1.49E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
6	0.004628141	HD 36591	2.3510	425,3509	1.31E+22	9.88E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
7	0.001592783	HD 36811	6.6365	150,6818	4.65E+21	1.40E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
8	0.006070717	HD 37687	2.2441	445,6129	1.38E+22	1.05E+22	2,84E-14	0.00000000000000875
9	0.000000000	HD 36150	9.4979	105,2864	3.25E+21	0.00E+00	2,84E-14	0.00000000000000875
10	0.002885154	HD 36780	6.2074	161,0980	4.97E+21	1.72E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
11	0.004553038	* sig Ori	3.0400	328,9474	1.02E+22	6.90E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
12	0.004477935	HD 37744	2.5199	396,8411	1.22E+22	9.00E+21	0,00E+00	0.00000000000000000
13	0.006070717	HD 37904A						
14	0.001592783	HD 36139	6.8081	146,8839	4.53E+21	1.28E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
15	0.005236774	V* VV Ori	2.2654	441,4231	1.36E+22	1.04E+22	2,84E-14	0.00000000000000875
16	0.003185566	HD 35971	4.4891	222,7618	6.87E+21	3.63E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
17	0.004477935	HD 36779	2.7006	370,2881	1.14E+22	8.18E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
18	0.003846871	* del Ori	4.7100	212,3142	6.55E+21	3.30E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
19	0.008955869	* eps Ori	1.6500	606,0606	1.87E+22	1.55E+22	2,84E-14	0.00000000000000875
20	0.007550845	* zet Ori	4.4300	225,7336	6.97E+21	3.72E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
21	0.003598880	HD 36558	3.2037	312,1391	9.63E+21	6.38E+21	2,84E-14	0.00000000000000875

22	0.004327730	HD 37397	2.8704	348,3835	1.08E+22	7.50E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
23	0.003185566	HD 36840	3.8001	263,1510	8.12E+21	4.87E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
24	0.003335269	HD 36898						
25	0.007132572	HD 37660	1.4181	705,1689	2.18E+22	1.85E+22	2,84E-14	0.00000000000000875
26	0.004778349	V* V901 Ori	2.5463	392,7267	1.21E+22	8.87E+21	2,84E-14	0.00000000000000875
27	0.004778349	HD 37756	2.6349	379,5210	1.17E+22	8.46E+21	0,00E+00	0.00000000000000000
28	0.003185566	V* V1197 Ori	4.6809	213,6341	6.59E+21	3.34E+21	2,84E-14	0.00000000000000875

Pada data Alnilam, objek acuan adalah nomor 9 dengan $d_{praktis} = 0.000000000$ mm. Sehingga nilai o_R yang digunakan dalam kalkulasi data Shaula adalah nilai o di kolom nomor 9.

Lampiran 8. Pengukuran Deviasi untuk kelompok data Jupiter



No	$d_{praktis}$ [mm]	Nama objek	Parallax (mas)	Jarak (o) (parsec)	Jarak (o) (mm)	$o_R - o$ [mm]	$\left(\left(\frac{o_R \cdot f}{o_R - f} \right) - \frac{d}{2} \cdot \frac{f}{a} \right) - \left(\frac{o_F \cdot f}{o_F - f} \right)$ [mm]	$d_{teoretis}$ [mm]
1	0.018977347	* I Tau	16.1208	62,0317	1.91E+21	1.91E+21	2,326E-02	0.00716473507278499
2	0.018977347	* 105 Tau	3.2854	304,3769	9.39E+21	9.39E+21	2,326E-02	0.00716473507278499
3	0.017833188	HD 32641	3.5928	278,3344	8.59E+21	8.59E+21	2,326E-02	0.00716473507278499
4	0.017833188	HD 32642A	6.2277	160,5729	4.96E+21	4.96E+21	2,326E-02	0.00716473507278499
5	0.016588409	HD 32482	5.7141	175,0057	5.40E+21	5.40E+21	2,326E-02	0.00716473507278499
6	0.018977347	* iot Tau	18.3851	54,3919	1.68E+21	1.68E+21	2,326E-02	0.00716473507278499
7	0.007133275	Jupiter		1.98E+11	6.12E+08	0.00E+00	2,316E-02	0.00713327499999582
8	0.018214574	* 99 Tau	5.5522	180,1088	5.56E+21	5.56E+21	2,326E-02	0.00716473507278499
9	0.016554869	HD 31039	6.9311	144,2772	4.45E+21	4.45E+21	2,326E-02	0.00716473507278499

Pada data Jupiter, objek acuan adalah nomor 7 dengan $d_{praktis} = 0.007133275$ mm. Sehingga nilai o_R yang digunakan dalam kalkulasi data Shaula adalah nilai o di kolom nomor 7.

Lampiran 9. Spesifikasi kamera Canon EOS M (<https://id.canon.id/support/6200141900>)

 Delighting You Always			 Delighting You Always		
Dukungan / Pencarian / Unduh			Dukungan / Pencarian / Unduh		
EOS M Specifications			Hubungi Kami >		
Type	Type	Digital single non-reflex AF/AE camera	Recording System	Recording format	Design rule for Camera File System (DCF) 2.0
	Recording media	SD memory card, SDHC memory card, SDXC memory card * Compatible with UHS-I		Image type	JPEG, RAW (14-bit Canon original) RAW+JPEG Large simultaneous recording possible
	Image sensor size	Approx. 22.3 x 14.9 mm		Recorded pixels	L (Large) : Approx. 17.90 megapixels (5184 x 3456) M (Medium) : Approx. 8.00 megapixels (3456 x 2304) S1 (Small 1) : Approx. 4.50 megapixels (2592 x 1728) S2 (Small 2) : Approx. 2.50 megapixels (1920 x 1280) S3 (Small 3) : Approx. 350,000 pixels (720 x 480) RAW : Approx. 17.90 megapixels (5184 x 3456)
	Compatible lenses	Canon EF-M, EF*, and EF-S* lenses * Mount Adapter EF-EOS M required. (35 mm-equivalent focal length is approx. 1.6 times the lens focal length)			
	Lens mount	Canon EF-M mount			
Image Sensor	Type	CMOS sensor	Image Processing During Shooting	Picture Style	Auto, Standard, Portrait, Landscape, Neutral, Faithful, Monochrome, User Def. 1 - 3
	Effective pixels	Approx. 18.00 megapixels			
	Aspect ratio	3:2			

Lampiran 10. Spesifikasi lensa William Optic RedCat 51 (<https://support.williamoptics.com/products/cat-51-wifd>)

Lens Type	4 Elements Petzval Design
Focal Length	250 mm
Diameter	51 mm
Focal Ratio	f/4.9
Image Circle	48 mm
Focuser	WIFD R&P Focuser
Focuser Travel Length	0-23 mm (Ruler to 30mm)
Adapter Included	Tilt Adjuster Rotator M54 → M48 Adapter
Optional Flatteners	No Flatteners Required
Camera Format	Full Frame APS-C M4/3
Total Weight	2.38 kg / 5.25 lbs
OTA Weight	1.77 kg / 3.9 lbs
Tube Length	298 mm

Lampiran 11. Dokumentasi pengambilan data (pemotretan)

