

UJI *IN-SITU* KAMERA CCD ST-237 ADVANCE DAN KINERJA ASTRONOMI SISTEM FOTOMETRI BVR JOHNSON

Oleh:

Lina Aviyanti dan Judhistira Aria Utama

Jurusan Pendidikan Fisika FPMIPA
Universitas Pendidikan Indonesia

ABSTRAK

Salah satu metode karakterisasi instrumen adalah uji *in-situ*, yang menempatkan instrumen dalam kondisi kerjanya untuk mengetahui pengaruh lingkungan terhadap kinerja kamera dan hasil pencitraannya. Uji *in-situ* kamera CCD ST-237A yang dilaksanakan pada tanggal 1, 2, dan 3 November 2004, berlokasi di Laboratorium Fisika Lanjut, UPI. Pada penelitian ini, kamera CCD ST-237A yang dilengkapi filter *BVR* Johnson terpasang pada Teleskop Celestron SC CGE-1100. Hasil analisa uji *in-situ* terhadap kamera CCD ST-237A memberikan informasi kualitas kinerja yang sedikit berbeda dengan katalog. Hal ini dapat disebabkan karena *chip* kamera CCD bekerja pada lingkungan yang berbeda. Di samping itu, dibahas pula kinerja astronomi sistem fotometri CCD ST-237A untuk menentukan koefisien ekstingsi dan koefisien transformasi melalui regresi linier hasil reduksi fotometri, terhadap sepuluh bintang standar yang terang. Observasi ini dilakukan pada tanggal 8 dan 9 Oktober 2005 di Observatorium Bosscha Lembang, yang dilengkapi dengan Teleskop Celestron GAO-ITB RTS dan filter *BVR* Johnson. Hasil analisis data reduksi fotometri melalui metode regresi linear memberikan nilai koefisien ekstingsi (k_V) sebesar $0,027 \pm 0,069$, koefisien transformasi (β_V) sebesar $0,027 \pm 0,069$, dan titik nol persamaan regresi (γ_V) sebesar $-4,249 \pm 0,132$.

Kata Kunci: *Fotometri CCD (Charge-Coupled Device), Fotometri Absolut, Instrumentasi Astronomi*

PENDAHULUAN

Kamera CCD merupakan sebuah *chip* yang tersusun dari sejumlah MOS (*metal-oxide semiconductor*) yang terbuat dari substrat Silikon yang membentuk satu rangkaian terintegrasi yang dapat menyimpan elektron hasil efek fotolistrik pada sumur potensial yang dibentuk oleh medan listrik (Sterken *et al.*, 1987). Kamera CCD berfungsi sebagai detektor citra *objek* langit yang dipasangkan pada teleskop dan telah banyak digunakan di kalangan astronom dunia, baik amatir maupun profesional, serta terbukti unggul untuk pengamatan *objek* langit dibanding dengan detektor-detektor sebelumnya. Pengujian kinerja kamera CCD secara *in-situ* merupakan pengujian kinerja kamera CCD pada lingkungan

instrumen tersebut digunakan. Uji *in-situ* dilakukan dengan memberikan tingkat iluminasi yang merata pada kamera dan direkam selama beberapa waktu integrasi tertentu. Citra yang didapat akan direduksi untuk mendapatkan nilai variabel dan diolah untuk menentukan nilai parameter karakteristik kamera CCD (Abbot, 1995).

Kamera CCD ST-237A merupakan salah satu kamera CCD yang diproduksi oleh Santa Barbara Instrument Group (SBIG) dengan ukuran chip ($4,9 \times 3,7$) mm dengan *pixel array* (657×495) piksel. Kamera ini telah dimiliki oleh Laboratorium Bumi dan Antariksa Jurusan Pendidikan Fisika UPI sejak tahun 2002 melalui program JICA-IMSTEP. Uji *in-situ* terhadap kamera CCD ST-237A ditujukan untuk mengetahui kinerja kamera CCD di lingkungan jurusan Pendidikan Fisika UPI. Metode pengukuran karakteristik kamera CCD yang digunakan adalah *Photon Transfer Method* yang pertama kali dikenalkan oleh Janesick *et al.* (1987), yang merupakan metode standar untuk karakteristik kamera CCD dengan cara evaluasi statistik fotoelektron yang terdeteksi oleh kamera CCD. Metode ini lazim digunakan sebagai tes pertama tahap karakteristik kamera CCD yang baru terpasang di samping sebagai uji diagnostik untuk menentukan letak masalah pada kamera.

Hasil reduksi dan analisis citra salah satunya akan memberikan linearitas hubungan antara sinyal yang diterima dengan derau. Dengan metode *curve fitting* dapat diturunkan parameter-parameter yang menggambarkan kualitas sebuah kamera CCD. Parameter-parameter tersebut meliputi penguatan (*gain*), derau bacaan (*readout noise*), kapasitas penuh (*full well capacity*), rentang dinamika (*dynamic range*), dan *effective number of bit* (ENoB).

Informasi fisik dari *objek* langit yang diterima sebuah detektor terdapat dalam gelombang elektromagnetik yang diradiasikan oleh *objek-objek* langit tersebut. Radiasi dari bintang sebelum sampai ke detektor mengalami absorpsi dan hamburan oleh materi antar bintang dan atmosfer bumi ataupun oleh komponen optik dari kolektor cahaya. Sebuah efek yang harus dikoreksi ketika mengkalibrasi magnitudo instrumen adalah ekstingsi atmosfer atau pelemahan cahaya bintang oleh atmosfer.

Pengujian kinerja astronomi sistem fotometri CCD ST-237A yang dipasangkan pada GAO-ITB RTS (*Remote Telescope System*) dilakukan di Observatorium Bosscha. Penelitian ini ditujukan untuk menentukan koefisien ekstingsi dan koefisien transformasi dengan menggunakan sepuluh buah bintang standar yang terang. Sistem fotometri yang digunakan adalah fotometri pita lebar yaitu *BVR Johnson*. Koefisien ekstingsi atmosfer diperoleh dengan melakukan regresi linear terhadap magnitudo instrumen. Sedangkan regresi linear terhadap data berupa magnitudo instrumen yang dikoreksi ekstingsi atmosfer dan data dari katalog akan memberikan harga koefisien transformasi, sehingga diharapkan dapat memberikan gambaran lengkap mengenai karakteristik instrumen yang digunakan.

METODE

Uji *in-situ* kamera CCD ST-237A dilaksanakan di Laboratorium Fisika Lanjut UPI ($107^{\circ} 35,4'$ BT ; $6^{\circ} 51,7'$ LS). Ruang yang digunakan dalam pengambilan data dikondisikan sedemikian rupa, sehingga tidak ada sumber cahaya lain yang mempengaruhi saat proses perekaman citra, kecuali sumber cahaya yang berasal dari lampu tungsten saat pengambilan citra medan datar. Observasi terhadap bintang-bintang standar dengan menggunakan kamera CCD ST-237A yang dilengkapi filter *BVR* Johnson terpasang pada Teleskop Celestron GAO ITB dilakukan di Observatorium Bosscha, Lembang ($107^{\circ} 37'$ BT ; $6^{\circ} 49,5'$ LS). Spesifikasi Teleskop Celestron SC CGE-1100 dan kamera CCD ST-237A yang digunakan dalam perekaman citra, serta spesifikasi GAO-ITB RTS (*Remote Telescope System*) tertera pada Tabel 1.

Uji *in-situ* kamera CCD terdiri atas pengambilan citra *bias* (citra dengan waktu integrasi 0 detik) sebanyak 10 buah, sepasang citra *flat* (citra yang disinari cahaya homogen dengan variasi waktu integrasi tertentu sampai saturasi), dan citra *dark* (citra yang diambil dengan *shutter* kamera tertutup) yang diambil sebelum dan sesudah pasangan citra flat diambil dengan waktu integrasi yang sama, serta pengujian stabilitas temperatur kamera CCD. File data yang direkam oleh kamera CCD ST-237A ditampilkan dengan menggunakan perangkat lunak CCDOPS versi 5.02 dari SBIG *Astronomical Instrument*. Pengolahan data atau reduksi citra dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) produk dari NOAO (*National Optical Astronomy Observatory*).

Tabel 1. Spesifikasi Teleskop dan CCD

Teleskop Celestron SC CGE-1100	
Jenis	Schmidt – Cassegrain
Diameter	318 mm
Jarak Fokus	2800 mm
Nisbah Fokal	8,805
Skala Bayangan	73,666 “/mm
GAO-ITB RTS	
Jenis	Schmidt – Cassegrain
Diameter	203,2 mm
Jarak Fokus	2032 mm
Nisbah Fokal	10
Skala Bayangan	101,51 “/mm

CCD SBIG ST-237 Advance	
CCD	Texas Instruments TC-237
Pixel Array	657 x 495 pixel
Total pixels	325,215
Active Area	4,7 x 3,6 mm
Full-Well Capacity	30.000 e ⁻
Dark Current	1 e ⁻ /pixel/sec pada -5 ⁰ C
Shutter	Electromechanical
Konversi A/D	16 bit
Gain	0,72 e ⁻ /ADU
Read-out Noise	15 e ⁻ RMS
Suhu Kerja	- 5 ⁰ C
Regulasi Temperatur	± 0,1 ⁰ C

Sistem fotometri adalah suatu sistem yang terdiri dari detektor, filter-filter pada rentang panjang gelombang cahaya tertentu, dan teleskop yang digunakan untuk mengumpulkan fluks yang diradiasikan oleh bintang.

Citra yang digunakan dalam fotometri CCD adalah citra mentah yang telah direduksi. Pada pengamatan sistem fotometri, terdapat empat citra observasi yang dapat diolah yaitu meliputi citra bias (*bias image*), citra objek (*raw image*), citra gelap (*dark image*), citra medan datar (*flat field image*). Citra bersih diperoleh dengan melakukan reduksi terhadap citra mentah dengan bentuk formulasi berikut ini:

$$Citra\ bersih = \frac{citra\ mentah - citra\ gelap}{citra\ medan\ datar} \tag{1}$$

Besar magnitudo yang diperoleh dari hasil pengamatan dikoreksi terhadap ekstingsi atmosfer, hal tersebut dapat ditransformasikan pada magnitudo yang telah dibakukan seperti dalam katalog (M_λ), melalui persamaan berikut:

$$M_\lambda = m_{\lambda 0} + \beta_\lambda C + \gamma_\lambda \tag{2}$$

Pada penelitian ini menggunakan sistem fotometri *BVR*, dimana persamaan regresi yang digunakan dalam menentukan harga koefisien ekstingsi (k), koefisien transformasi (β), dan titik nol fotometri (γ) adalah:

$$V = v - k_v F(z) + \beta_v (B-V) + \gamma_v \tag{3}$$

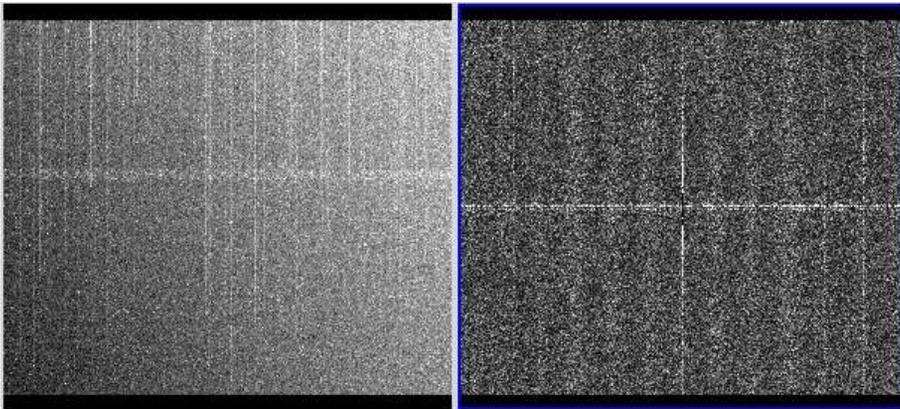
$$B-V = (b-v) - k_{bv} F(z) + \beta_{bv} (B-V) + \gamma_{bv} \tag{4}$$

$$V-R = (v-r) - k_{vr} F(z) + \beta_{vr} (V-R) + \gamma_{vr} \tag{5}$$

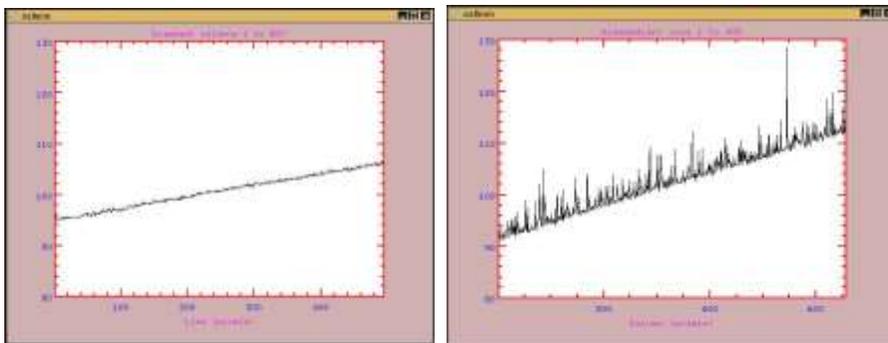
HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Citra Bias

Citra *bias* adalah citra yang direkam pada saat waktu integrasi sama dengan nol detik. Citra *bias* dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya *hot pixel* dan mengukur stabilitas suntikan *bias* dari sebuah kamera CCD. Pemeriksaan daerah sinyal yang datar tanpa adanya fluktuasi dilakukan dengan membuat nilai tengah dari ke-10 citra *bias* (*median-stacking*) dalam bentuk citra.



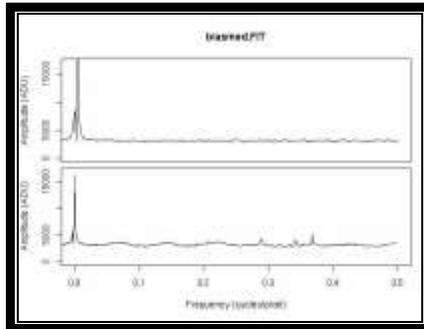
Gambar 1. Citra bias median dan spektrum amplitudo 2D dari citra bias median



Gambar 2. Kolom rata-rata dan baris rata-rata citra bias median

Nilai rata-rata citra *bias* yang stabil pada semua citra *bias* untuk masing-masing filter menunjukkan kestabilan suhu kamera CCD pada saat perekaman citra. Pada citra *bias median stacking* menampilkan adanya pola garis-garis vertikal sepanjang arah kolom. Bagian ujung kanan citra atas secara signifikan lebih terang daripada bagian ujung kiri bagian bawah, hal ini menandakan adanya akumulasi muatan pada bagian kanan atas citra

bias. Hal ini dapat dibuktikan dengan gambar plot baris rata-rata dan plot kolom rata-rata yang menunjukkan adanya gradien. Dari gambar terlihat bahwa baik plot kolom rata-rata maupun plot baris rata-rata citra *bias median-stacking* untuk masing-masing filter memiliki kecenderungan naik pada arah kolom maupun baris yang lebih tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kolom hantaran arus bergerak dari kanan ke kiri, sedangkan pada baris hantaran arus bergerak dari atas ke bawah, sehingga terdapat pengumpulan muatan pada bagian kanan atas citra *bias*.

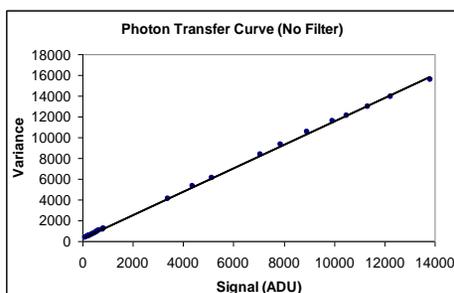


Gambar 3. Spektrum amplitudo kolom rata-rata dan baris rata-rata citra bias median

Fast Fourier Transform (FFT) dilakukan pula pada citra *bias median-stacking* untuk meninjau perilaku amplitudo derau sebagai fungsi dari frekuensi spasial. Spektrum amplitudo dua dimensi dari citra *bias median-stacking* menunjukkan pola garis-garis vertikal yang signifikan sepanjang arah kolom, hal ini menginformasikan bahwa terdapatnya puncak-puncak amplitudo dalam arah kolom yang dapat dilihat pada spektrum amplitudo baris rata-rata. Hal tersebut mengindikasikan pola interferensi yang kompleks dalam arah kolom, tetapi puncak amplitudo yang ada tidak sebanyak citra *bias* mentah. Hasil FFT yang telah dilakukan pada citra *bias median-stacking* untuk masing-masing filter memberikan puncak amplitudo yang berbeda dalam arah kolom dan baris. Perbedaan pola amplitudo pada arah kolom dan baris mengindikasikan adanya ketidakseragaman penghantaran sinyal ke seluruh piksel CCD.

2. Kurva Foton Transfer

Pembentukan kurva foton transfer diperoleh melalui pengambilan sepasang citra *flat* pada berbagai waktu integrasi dan diapit oleh dua buah citra *dark* dengan waktu integrasi yang sama. Fungsi citra *dark* sebagai pengapit adalah untuk menghilangkan efek memori pada piksel CCD setelah dilakukan perekaman citra *flat*. Kurva yang representatif adalah yang menunjukkan sifat linear sehingga mampu memberikan parameter-parameter utama dari sebuah CCD.



Gambar 4. Kurva Transfer Foton

Gradien kemiringan kurva hasil plotting data adalah $m = 1,123 \pm 0,004$ dan konstanta $c = 278,153 \pm 27,099$. Persamaan transfer foton yang digunakan adalah (Abbot, 1995):

$$\sigma_A^2 = \frac{1}{g} I_A + \frac{1}{g^2} \sigma_{ron}^2 \quad (6)$$

σ_A^2 adalah variansi sinyal, g adalah gain, I_A adalah sinyal, dan σ_{ron} adalah derau baca. Parameter karakteristik CCD yang diperoleh berdasarkan kurva transfer foton (tanpa filter) meliputi: *gain* (g) sebesar $(0,891 \pm 0,003) e^-/ADU$, *read out noise* (r) sebesar $(14,851 \pm 0,776) e^-$ rms, kapasitas penuh (*full well capacity*) sebesar $(58391,685 \pm 196,605) e^-$. *Dynamic Range* (D) merupakan kemampuan sebuah kamera CCD dalam membedakan tingkat kecerahan objek yang direkam, besarnya $(3931,835 \pm 218,686)$. Nilai *Effective Number of Bit* ($ENoB$) merupakan kemampuan yang menunjukkan nilai bit digital yang efektif dari sistem kamera CCD. Nilai ini didapat berdasarkan hubungan dengan nilai rentang dinamikanya, sehingga diperoleh 11,941 bit.

Nilai parameter kamera CCD ST-237A yang diperoleh berdasarkan kurva transfer foton untuk masing-masing filter (*BVR*) tercantum pada Tabel 2. berikut:

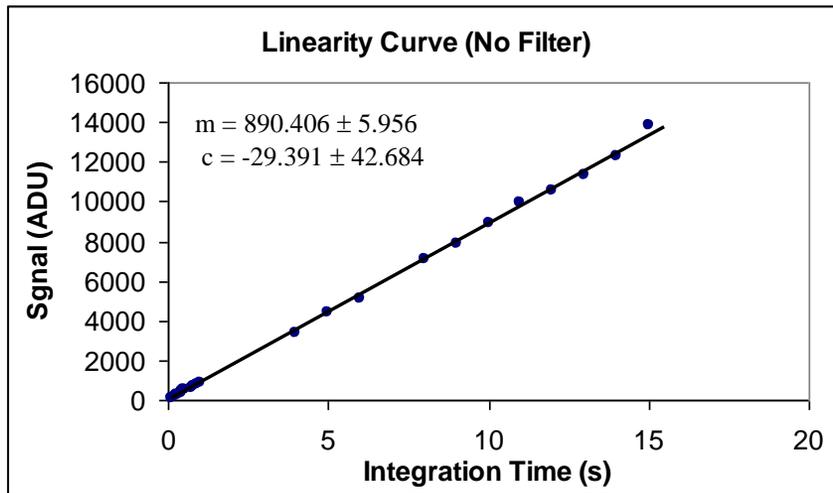
Tabel 2. Nilai parameter kamera CCD ST-237A untuk tiap filter (*BVR*)

No	Parameter	Filter B	Filter V	Filter R
1.	Gradien kurva	$1,134 \pm 0,005$	$1,117 \pm 0,005$	$1,115 \pm 0,005$
2.	Konstanta kurva	$290,296 \pm 31,541$	$344,504 \pm 35,247$	$348,436 \pm 31,111$
3.	Gain (e^-/ADU)	$0,882 \pm 0,004$	$0,895 \pm 0,004$	$0,897 \pm 0,004$
4.	Read out Noise (e^- rms)	$15,025 \pm 0,882$	$16,617 \pm 0,924$	$16,741 \pm 0,822$
5.	Full Well Capacity (e^-)	$57801,870 \pm 262,140$	$58653,825 \pm 262,140$	$58784,895 \pm 262,140$
6.	Dynamic Range	$3847,046 \pm 243,277$	$3529,748 \pm 212,050$	$3511,433 \pm 188,074$
7.	Dynamic Range (dB)	71,703	70,955	70,910
8.	ENoB (bit)	11,910	11,785	11,778

Nilai parameter yang diperoleh melalui uji *in-situ* memberikan harga yang cukup konsisten dengan katalog (tertera pada Tabel 1.), meskipun terdapat sedikit perbedaan. Hal ini dapat disebabkan karena lingkungan yang digunakan dalam uji *in-situ* berbeda.

3. Kurva Linearitas

Melalui kurva linearitas ini dapat ditentukan koreksi waktu terhadap *shutter* (rana) atau keterlambatan *shutter* untuk membuka dan menutup.



Gambar 5. Kurva linearitas (No Filter)

Hasil *fitting* garis lurus pada kurva linearitas (No Filter) memberikan nilai gradien $m = 890,406 \pm 5,956$ dan konstanta $c = -29,391 \pm 42,684$. Sedangkan hasil *fitting* garis lurus pada kurva linearitas untuk filter *BVR* tertera pada Tabel 3. berikut:

Tabel 3. Hasil *fitting* kurva linearitas filter *BVR*

No.	Parameter	Filter B	Filter V	Filter R
1.	Gradien (m)	906,718 ± 6,209	935,443 ± 2,217	1020,089 ± 3,807
2.	Konstanta (c)	-41,683 ± 43,768	-41,683 ± 43,768	-47,691 ± 24,531

Koreksi terhadap waktu tunda *shutter* atau *shutter delay* (s) diperoleh dengan menentukan waktu integrasi saat sinyal sama dengan 0 pada persamaan hasil regresi. *Shutter delay* juga dapat ditentukan dengan menghitung laju cacah dan fraksi laju cacah dari setiap citra datar. Persamaan laju cacah setiap citra:

$$C = \frac{I_o}{t + s} \quad (7)$$

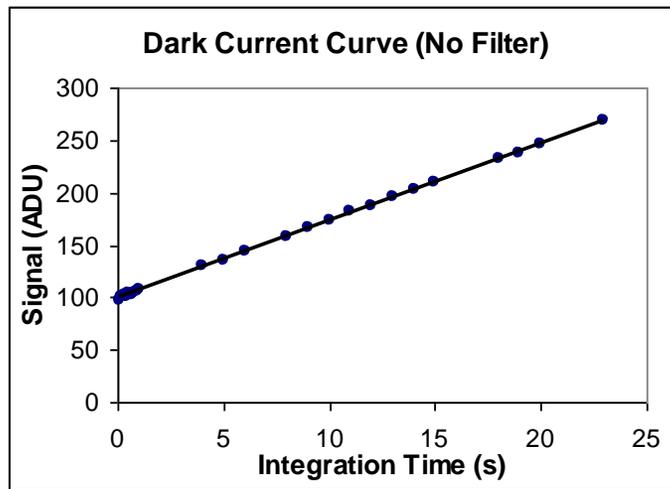
I_o adalah sinyal, t adalah waktu integrasi tercatat dan s adalah *shutter delay*. Selanjutnya dihitung fraksi laju cacah yaitu rasio antara laju cacah sebuah citra terhadap laju cacah rata-rata seluruh citra. Plot fraksi laju cacah terhadap sinyal dan lakukan *fitting* garis lurus. Langkah ini dilakukan secara iteratif dengan mengubah-ubah s . Dengan metode ini diperoleh *shutter delay* filter B 0,0253 s, *shutter* filter V 0,0041 s, *shutter* filter R 0,0185 s, dan *shutter* tanpa filter 0,0128 s, yang memberikan *fitting* terbaik dengan variansi χ^2 yang terkecil. Nilai *shutter* tersebut menunjukkan koreksi waktu *shutter* atau keterlambatan *shutter* untuk membuka dan menutup.

4. Citra Datar Nilai Rendah (Low Count Level Flat Field)

Sebanyak 10 citra flat dengan waktu integrasi yang pendek, misalnya 1 s dibuatkan nilai tengahnya untuk meminimalkan *noise* yang dapat mengganggu pemeriksaan. Citra nilai tengah inilah yang diperiksa secara visual untuk mengidentifikasi cacat *chip* kamera CCD. Dari hasil *median-stacking* citra datar cacah rendah yang telah diperiksa, didapatkan beberapa *dark pixel* (yaitu piksel dengan respon cahaya yang lebih rendah secara signifikan dibandingkan dengan piksel di sekitarnya), *trap* (yaitu *dark pixel* dengan *dark trail* pada arah vertikal), debu (*dust*), dan *column offset*.

5. Citra Gelap

Kurva citra gelap terbentuk dari hubungan antara waktu integrasi (s) sebagai sumbu absis dan *count* rata-rata (ADU) sebagai sumbu ordinat. Setelah itu dilakukan *fitting* garis lurus untuk memperoleh harga gradien (m) dan konstanta(c). Kurva ini dapat digunakan untuk menentukan harga laju arus gelap terhadap waktu dan harga *bias level*.



Gambar 6. Kurva laju arus gelap (No Filter)

Hasil *fitting* garis lurus terhadap kurva arus gelap (No Filter) memberikan nilai gradien $m = 7,399 \pm 0,026$ dan konstanta $c = 98,981 \pm 0,258$. Dari analisis regresi, parameter yang diperoleh berdasarkan kurva arus gelap yang terbentuk adalah laju arus gelap sebesar $6,593 \pm 0,045 \text{ e}^- / \text{pix} / \text{s}$, sinyal gelap saat $t = 0$ adalah $98,981 \pm 0,258$, sehingga *bias level* sebesar $88,192 \pm 0,527 \text{ e}^-$

Berdasarkan analisis regresi untuk masing-masing filter (*BVR*), maka parameter yang diperoleh dari kurva arus gelap adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai parameter kurva arus gelap untuk tiap filter (*BVR*)

No.	Parameter	Filter B	Filter V	Filter R
1.	Gradien kurva	$6,793 \pm 0,025$	$6,823 \pm 0,016$	$6,861 \pm 0,017$
2.	Konstanta kurva	$99,448 \pm 0,304$	$99,189 \pm 0,184$	$99,100 \pm 0,198$
3.	Laju arus gelap ($\text{e}^- / \text{pix} / \text{s}$)	$5,991 \pm 0,049$	$6,107 \pm 0,042$	$6,154 \pm 0,043$
4.	Bias level (e^-)	$87,713 \pm 0,666$	$88,774 \pm 0,561$	$88,893 \pm 0,574$

6. Charge Transfer Efficiency (CTE)

Charge Transfer Efficiency (CTE) ditujukan untuk mengukur tingkat keberhasilan CCD dalam memindahkan paket muatan dari satu sumur potensial ke sumur potensial yang lain. Untuk mengetahui nilai CTE, maka digunakan salah satu citra *flat* pada proses pembentukan kurva foton transfer. Citra *flat* akan diteliti nilai *count*-nya pada piksel awal dan terakhir citra. Hal ini dilakukan untuk 2 daerah yaitu pada baris dan kolom citra. Sistem yang diterapkan melalui metode EPER (*Extended Pixel Edge Response*) yang diperkenalkan oleh Janesick *et al.*

(1987) dan dibahas secara praktik oleh Abbot (1995). Perumusannya adalah sebagai berikut:

$$CTE = 1 - \frac{I_{n+1}}{I_n} \quad (8)$$

Nilai CTE ini dihitung pada arah baris dan kolom untuk seluruh citra *flat* yang telah dirata-ratakan. Harga CTE baris dan kolom rata-rata dari kamera CCD ST-237 A adalah:

$$CTE_{\text{baris}} = 0,998 \pm 0,000$$

$$CTE_{\text{kolom}} = 0,998 \pm 0,000$$

Hasil perhitungan CTE yang diperoleh pada arah baris dan kolom untuk filter *BVR* tertera pada Tabel 5. berikut:

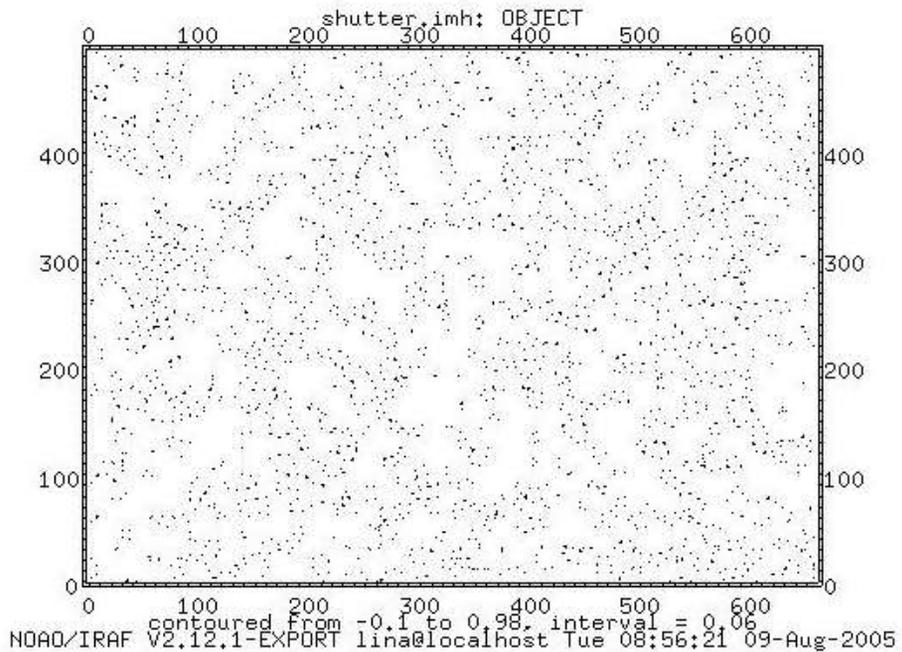
Tabel 5 Nilai CTE baris rata-rata dan kolom rata-rata tiap filter (*BVR*)

No.	CTE	Filter B	Filter V	Filter R
1.	Baris rata-rata	0,998 ± 0,000	0,999 ± 0,000	0,999 ± 0,000
2.	Kolom rata-rata	0,998 ± 0,000	0,998 ± 0,000	0,998 ± 0,000

Hasil perhitungan CTE yang diperoleh pada arah baris dan kolom memberikan nilai yang tidak terlalu berbeda. Hal ini mengindikasikan efektifitas perpindahan paket muatan pada arah kolom dan baris kamera CCD ST-237A agak uniform. Elektron yang tertinggal pada saat penghantaran paket muatan sekitar 0,15 % untuk arah baris dan 0,19 % untuk arah kolom. Hal ini dapat dimungkinkan karena adanya ketidaksempurnaan pada sumur potensial piksel *chip* kamera CCD.

7. Shutter Pattern

Pola *shutter* (rana) diperoleh dengan cara membandingkan citra *flat* dengan waktu integrasi yang singkat dengan citra *flat* yang waktu integrasinya panjang. Untuk penelitian ini dilakukan perekaman citra *flat* dengan waktu integrasi 0,1 s dan citra *flat* dengan waktu integrasi 1 s sebagai pembandingnya. Selain itu, juga diambil citra *dark* dengan waktu integrasi yang sama untuk bahan reduksi. Setelah dilakukan reduksi citra *flat* terhadap citra *dark*, maka akan dihasilkan citra *flat* yang bersih untuk diproses lebih lanjut. Penentuan *shutter pattern* mengikuti kaidah yang sudah diperkenalkan (Abbot, 1995). Kontur dari *shutter* CCD ST-237A sebagai berikut:

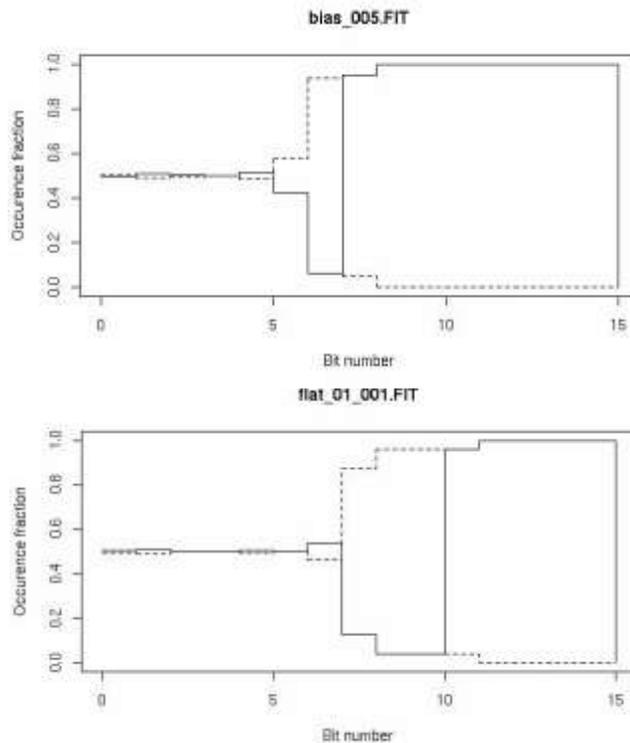


Gambar 7. Pola shutter delay (No Filter)

Pola *shutter* pada ke tiga filter (*BVR*) dan tanpa filter memberikan pola kontur yang sama dan tidak memberikan pola *shutter* yang signifikan, hal ini dikarenakan tipe *shutter* dari kamera CCD ST-237A merupakan tipe *electromechanical*.

8. Bit Bias

Fraksi kemunculan 1 dan 0 untuk setiap bilangan bit diperoleh dari sebuah citra *bias* dan citra *flat* yang tidak saturasi pada waktu intergrasi tertentu. Kemudian dari histogram yang terbentuk melalui hubungan antara seluruh bilangan bit terhadap fraksi kemunculan 1 dan 0, diperoleh analisis kecenderungan distribusi bilangan bit untuk citra *bias* dan citra *flat*.

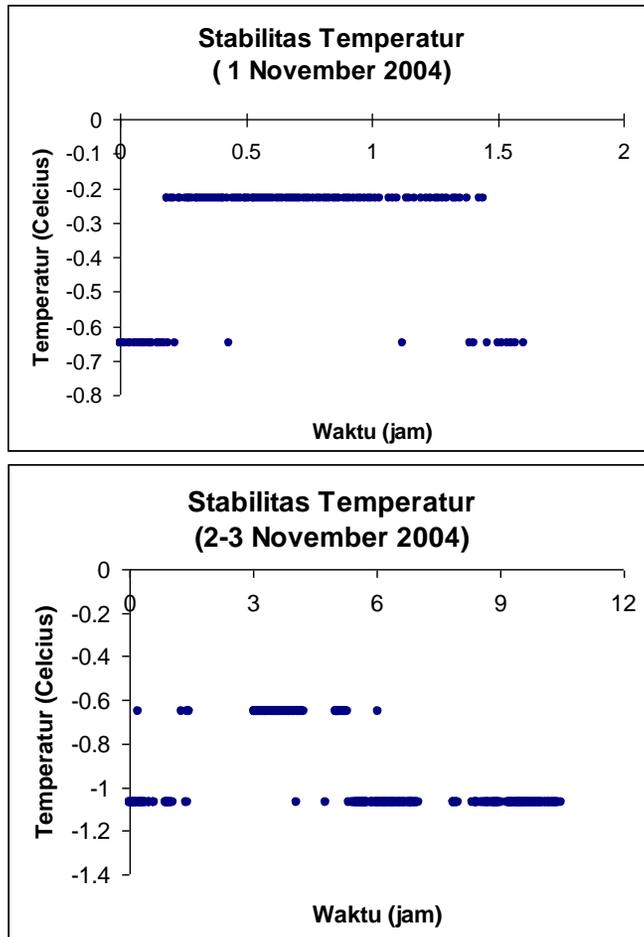


Gambar 8. Kurva kemunculan 0 dan 1 untuk setiap bilangan bit citra bias dan citra flat (No Filter)

Berdasarkan hasil pengolahan data untuk tiap bilangan bit dari masing-masing filter menunjukkan bahwa kemunculan 0 dan 1 pada bit rendah yaitu mencapai bit ke 6 relatif sama untuk citra *bias* dan citra *flat field*. Menurut Abbot (1995), apabila ADC dapat berfungsi dengan normal, maka kemunculan 0 dan 1 pada bit rendah seharusnya relatif sama.

9. Stabilitas Temperatur

Stabilitas temperatur dari kamera CCD dapat dideteksi melalui kurva hubungan antara perubahan temperatur CCD ($^{\circ}\text{C}$) terhadap waktu perekaman. Data tersebut dapat diperoleh dari *header* semua citra yang direkam dari awal sampai akhir. Kemudian dihitung selisih antara temperatur tertinggi dengan temperatur terendah (*peak-to-peak*) beserta harga deviasinya.



Gambar 9. Kurva stabilitas temperatur kamera CCD ST-237A

Berdasarkan kurva stabilitas temperature diperoleh bahwa *peak to peak* dari stabilitas temperatur adalah $\pm 0,41^{\circ}\text{C}$, sehingga memiliki deviasi sebesar $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$.

10. Sistem Fotometri CCD ST-237 Advance

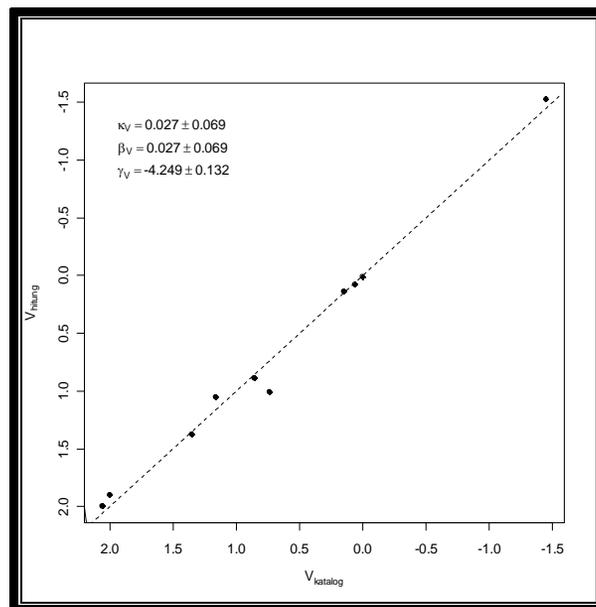
Pengamatan fotometri terhadap sepuluh bintang standar terang dengan menggunakan kamera CCD ST-237A yang dipasangkan pada GAO-ITB RTS (*Remote Telescope System*) dan dilengkapi filter *BVR* Johnson dilakukan di Observatorium Bosscha, Lembang ($107^{\circ} 37'$ BT, $6^{\circ} 49,5'$ LS). Observasi ini ditujukan untuk memperoleh data fotometri dari bintang-bintang standar. Reduksi

citra mentah CCD dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*).

Data observasi bintang standar fotometri *BVR* Johnson digunakan untuk penentuan koefisien ekstingsi dan transformasi. Untuk keperluan reduksi citra mentah menjadi citra bersih, maka dilakukan pula perekaman citra medan datar (*flat field*) dan citra dark. Citra bersih diperoleh dengan melakukan reduksi terhadap citra mentah dengan bentuk formulasi yang diberikan pada persamaan (1).

Harga koefisien ekstingsi (k), koefisien transformasi (β), dan titik nol fotometri (γ) dapat diperoleh dengan menggunakan model regresi linear (persamaan 3, 4, dan 5).

Regresi linear melalui perangkat lunak **R** untuk plot antara V yang diperoleh dari katalog terhadap V observasi memberikan nilai koefisien ekstingsi $k_v = 0,027 \pm 0,069$; koefisien transformasi $\beta_v = 0,027 \pm 0,069$; titik nol persamaan regresi $\gamma_v = -4,249 \pm 0,132$; dan galat regresi = 0,11. Regresi linear untuk plot antara (B-V) yang diperoleh dari katalog terhadap (B-V) observasi memberikan nilai koefisien ekstingsi warna $k_{bv} = 0,159 \pm 0,171$; koefisien transformasi warna $\beta_{bv} = 0,641 \pm 0,172$; titik nol persamaan regresi $\gamma_{bv} = 0,384 \pm 0,330$; dan galat regresi = 0,27. Regresi linear untuk plot antara (V-R) yang diperoleh dari katalog terhadap (V-R) observasi memberikan nilai koefisien ekstingsi warna $k_{vr} = 0,067 \pm 0,089$; koefisien transformasi warna $\beta_{vr} = 0,110 \pm 0,120$; titik nol persamaan regresi $\gamma_{vr} = 0,033 \pm 0,171$; dan galat regresi = 0,14.



Gambar 10. Plot antara V pengamatan terhadap V katalog

Posisi dari titik-titik data berada pada garis putus-putus atau memiliki simpangan terhadap garis tersebut. Garis-garis putus tersebut merupakan garis dengan kemiringan 45^0 yang merupakan letak plot titik data jika hasil transformasinya sama besar dengan nilai dari katalog dalam kata lain tidak memiliki selisih sama sekali. Bila hasil perhitungan transformasi tidak memberikan sebaran yang lebar terhadap garis putus-putus, maka dapat dikatakan persamaan transformasi yang diperoleh cukup baik.

KESIMPULAN

1. Parameter rata-rata kamera CCD ST-237 Advance yang diperoleh dari kurva foton transfer adalah sebagai berikut :

- $Gain (g) = (0,891 \pm 0,000) e^- / ADU$
- $Read\ out\ Noise (r) = (15,766 \pm 0,179) e^- / pixel$
- $Full\ Well\ Capacity (FW) = (58419,118 \pm 60,494) e^-$
- $Dynamic\ Range (D) = (3679,524 \pm 53,456)$ atau $D = 71,366\ dB$
- $Effective\ Number\ of\ Bit (ENoB) = 11,854\ bit.$

Parameter yang diperoleh melalui uji *in situ* cukup konsisten dengan katalog, walaupun kualitasnya nampak lebih rendah daripada yang dijanjikan katalog (Tabel 1.). Hal ini disebabkan karena *chip* CCD bekerja dalam temperatur yang jauh dari kemampuan maksimal pendingin, yaitu -35^0C .

2. Hasil analisis data reduksi fotometri dengan metode regresi linear menunjukkan bahwa perbedaan harga magnitudo dan warna yang diperoleh dari hasil pengamatan memiliki harga yang tidak jauh berbeda dengan nilai yang diberikan oleh katalog sistem standar. Dengan kata lain, dalam tingkat keyakinan tertentu persamaan transformasi yang telah diperoleh dapat mereproduksi harga-harga dalam katalog.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Dr. Hakim L. Malasan, Tri Laksmana, S.Si., dan Gabriel Iwan P., S.Si., atas bantuan dan saran-sarannya selama proses pengambilan data dan kepada Drs. Baju Indradjadja yang telah banyak membantu dalam hal pemrograman.

DAFTAR PUSTAKA

- Janesick, J., Elliot, T., Collins, S., Blouke, M., Freeman, J. (1987), *Scientific Charge-Coupled Devices*. **VOL 26**, No. 8. USA. Optical Engineering, 692
- Sterken, C., Manfroid, J. (1992), *Astronomical Photometry : A Guide.*, Kluwer Academic Press.
- T. M. C. Abbott, (1995), *In situ CCD Testing Article*, ESO