

Fotometri Gugus dengan Metode *Aperture Photometry*

Oleh

Judhistira Aria Utama

Laboratorium Bumi dan Antariksa

Jurusan Pendidikan Fisika

Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Pendidikan Indonesia

Abstrak

Dalam tulisan ini dibahas pekerjaan fotometri astronomi yang bertujuan untuk menentukan secara akurat magnitudo semu dan warna suatu objek yang dapat disajikan secara internasional. Objek yang digunakan adalah gugus bintang terbuka baku fotometri, yaitu gugus M67. Pekerjaan didasarkan pada citra digital yang diperoleh pada panjang gelombang B dan V. Dengan metode fotometri bukaan (*aperture photometry*) dan persamaan transformasi magnitudo dan warna, akan dibangun sistem persamaan linear yang dipecahkan dengan teknik regresi linear multivariat untuk menentukan koefisien *keoreksi titik nol*, *koefisien ekstingsi atmosfer*, dan *koefisien transformasi warna*. Ketiga koefisien yang diperoleh digunakan dalam proses transformasi magnitudo dan warna instrumen menjadi magnitudo dan warna baku untuk bintang-bintang bukan standar di dalam gugus bersangkutan.

Pendahuluan

Fotometri merupakan cabang sains yang berkenaan dengan pengukuran energi foton. Dari sini, yang dimaksud dengan fotometri astronomi adalah peneraan akurat radiasi elektromagnet objek langit pada panjang gelombang tertentu (monokromatik).

Persoalan

Dari pemotretan astronomis melalui teleskop, dapat diperoleh citra objek langit. Misalkan objek tersebut adalah gugus bintang terbuka, dalam pekerjaan ini adalah gugus M67. Yang ingin diketahui adalah bagaimana menentukan skala terang dan warna objek-objek dalam gugus tersebut yang dapat berlaku baku (disajikan dalam katalog astronomi)?

Untuk itu perlu dibangun sistem magnitudo, yaitu sistem penskalaan terang objek langit melalui penggunaan kolektor, analisator, detektor, dan objek-objek standar yang nantinya dikarakterisasi oleh sebuah kurva respon. Citra digital M67 dalam panjang gelombang B dan V yang digunakan dalam pekerjaan ini menerapkan sistem magnitudo UBVRI dari Johnson-Morgan.

Pengolahan Data

Dari citra digital gugus dapat ditentukan magnitudo semu dan warna instrumen bintang-bintang standar di dalam gugus tersebut melalui penggunaan metode fotometri bukaan. Metode ini mudah diterapkan sekaligus berpresisi tinggi, terutama bila medan tidak terlalu rapat. Prinsip dari metode ini adalah mendefinisikan suatu cincin/lingkaran digital dengan radius yang dapat diatur untuk mengukur magnitudo suatu sumber cahaya titik. Cincin tersebut diletakkan sedemikian rupa sehingga mengurung objek guna mendapatkan informasi intensitas sinyal bintang dan sinyal langit sekaligus dalam satuan ADU (*Analog Digital Unit*). Untuk mendapatkan sinyal bintangnya sendiri, perlu dilakukan pengukuran serupa di daerah langit yang tidak terdapat bintang-bintang. Guna menghindari ketidakseragaman sinyal langit, penempatan cincin ke dua ini diusahakan dekat dengan bintang asal. Selisih intensitas dari pengukuran dengan dua buah cincin digital di atas akan memberikan nilai intensitas bintangnya.

Dapat pula digunakan tiga buah cincin digital sekaligus dengan radius yang berbeda-beda. Cincin terdalam memberikan nilai intensitas bintang, sementara cincin terluar untuk intensitas langit. Cincin yang terletak di tengah (cincin ke dua), berperan sebagai pembatas wilayah untuk meyakinkan tidak adanya sinyal dari objek yang akan "mengotori" estimasi sinyal langit atau sebaliknya. Magnitudo diperoleh dari hubungannya dengan intensitas, melalui persamaan:

$$m = -2,5 \times \log I$$

Bila konstanta magnitudo belum didefinisikan, yang diperoleh di atas adalah nilai yang menyatakan magnitudo relatif.

Langkah demi langkah pekerjaan fotometri gugus ini dijelaskan sebagai berikut:

- 1) Mendapatkan *chart* pembanding yang menyertakan bintang-bintang standar dalam gugus M67 pada medan langit yang serupa dengan citra yang diperoleh. Untuk bintang-bintang standar tersebut telah diketahui magnitudo semu dan warna bakunya untuk beragam analisator.
- 2) Menentukan magnitudo semu dan warna instrumen untuk bintang-bintang standar yang terdapat dalam citra dengan metode fotometri bukaan berbantuan perangkat lunak pengolah citra *IRIS*. Dalam pekerjaan ini digunakan citra dalam panjang gelombang B dan V.
- 3) Menyusun persamaan transformasi magnitudo semu dan transformasi warna instrumen menjadi magnitudo semu dan warna baku sebagai berikut:

$$V - v = \alpha_v - k_v' X - k_v'' (b - v) X + \beta_v (B - V) \quad \text{(pers. transformasi magnitudo)}$$

yang dapat disederhanakan menjadi

$$y = a + b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3$$

dengan

$$y = V - v, \quad a = \alpha_v, \quad b_1 = -k'_v, \quad z_1 = X, \quad b_2 = -k''_v, \quad z_2 = (b - v)X, \quad b_3 = \beta_v, \quad \text{dan} \\ z_3 = (B - V)$$

$$B - V = \alpha_{b-v} - \delta k'_{b-v} X - \delta k''_{b-v} (b - v)X + \delta (b - v) \quad \text{(pers. transformasi warna)}$$

yang dapat disederhanakan menjadi

$$y = a + b_1 z_1 + b_2 z_2 + b_3 z_3$$

dengan

$$y = (B - V), \quad a = \alpha_{b-v}, \quad b_1 = -\delta k'_{b-v}, \quad z_1 = X, \quad b_2 = -\delta k''_{b-v}, \quad z_2 = (b - v)X, \\ b_3 = \delta, \quad \text{dan} \quad z_3 = (b - v)$$

Dalam persamaan di atas huruf kapital menyatakan nilai-nilai dalam katalog, sementara huruf kecil sebagai nilai-nilai instrumen. X menyatakan massa udara pada saat pengamatan dilakukan dalam panjang gelombang B dan V . Selbihnya adalah variabel yang akan ditentukan nilainya.

- 4) Menerapkan persamaan transformasi di atas pada sejumlah bintang standar ($N \geq 8$ bintang) yang terdapat di citra digital, kemudian menggunakan teknik regresi linear multivariat untuk dapat menyusun matriks normal. Matriks normal disusun dari sistem persamaan linear berikut:

$$\begin{aligned} aN + b_1 \sum_{i=1}^N z_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^N z_{2i} + b_3 \sum_{i=1}^N z_{3i} &= \sum_{i=1}^N y_i \\ a \sum_{i=1}^N z_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^N z_{1i}^2 + b_2 \sum_{i=1}^N z_{1i} z_{2i} + b_3 \sum_{i=1}^N z_{1i} z_{3i} &= \sum_{i=1}^N z_{1i} y_i \\ a \sum_{i=1}^N z_{2i} + b_1 \sum_{i=1}^N z_{1i} z_{2i} + b_2 \sum_{i=1}^N z_{2i}^2 + b_3 \sum_{i=1}^N z_{2i} z_{3i} &= \sum_{i=1}^N z_{2i} y_i \\ a \sum_{i=1}^N z_{3i} + b_1 \sum_{i=1}^N z_{1i} z_{3i} + b_2 \sum_{i=1}^N z_{2i} z_{3i} + b_3 \sum_{i=1}^N z_{3i}^2 &= \sum_{i=1}^N z_{3i} y_i \end{aligned}$$

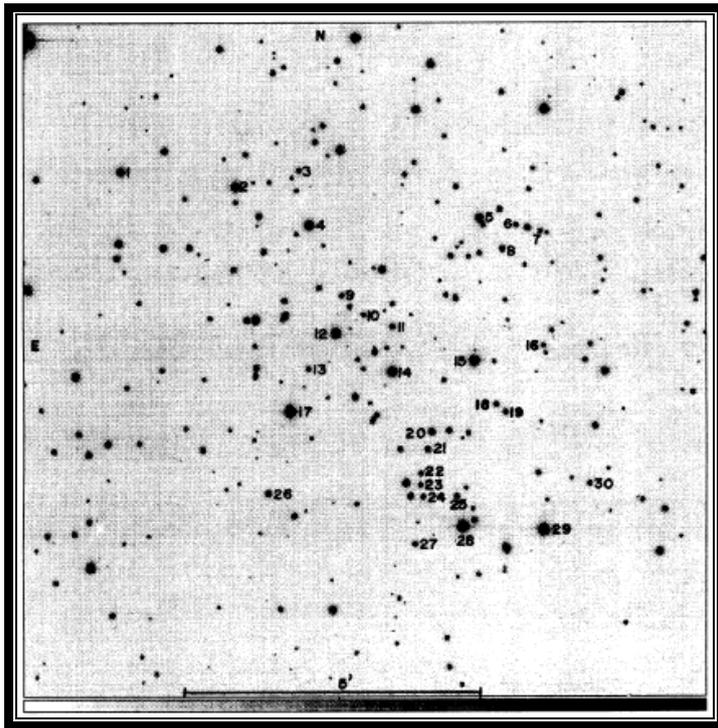
Nilai-nilai a , b_1 , b_2 , dan b_3 yang diperoleh merupakan solusi dari sistem persamaan linear tersebut yang masing-masing menyatakan *koreksi titik nol*, *koefisien ekstingsi atmosfer orde 1* dan *orde 2*, serta *koefisien transformasi warna*.

Data Observasi

Dari observasi yang telah dilakukan, diperoleh data sebagai berikut:

- Pengamatan dengan *filter V*:
Tanggal: 27 Januari 2000
Waktu pengamatan: 13.13.42 UT
- Pengamatan dengan *filter B*:
Tanggal: 27 Januari 2000
Waktu pengamatan: 14.51.55 UT
- Lokasi *Gunma Astronomical Observatory* (GAO): $\phi = +36^{\circ} 35' 37''$, $\lambda = +138^{\circ} 58' 35''$
- Teleskop: $f/D = 12$, diameter = 65 cm

Dalam pekerjaan ini digunakan *chart* M67 yang berisi 30 buah bintang standar dari Montgomery *et al.* (1993). Disesuaikan dengan citra digital yang diperoleh, dipilih 9 buah bintang standar yang terekam dalam citra digital untuk kedua panjang gelombang, B dan V.



Gambar 1

Chart pembanding yang berisi bintang-bintang standar (bernomor). Dalam citra plat di samping, utara berada di atas dan timur di sebelah kiri.

MMJ#	Fig ID	α (1960.0)	δ (1950.0)	V	B-V	U-B	V-I
6505	1	8 48 58.23	12 02 41.3	11.328	1.072	0.910	—
6504	2	8 48 50.20	12 02 28.4	10.968	0.288	0.214	0.318
5871	3	8 48 45.73	12 02 47.9	13.316	0.494	-0.016	0.640
6503	4	8 48 44.87	12 01 50.7	10.553	1.121	1.014	1.090
6489	5	8 48 32.90	12 02 03.4	11.184	1.077	0.939	1.080
5559	6	8 48 30.30	12 01 57.2	13.403	0.575	0.098	0.683
5534	7	8 48 28.54	12 01 51.4	13.669	0.562	0.079	0.694
5573	8	8 48 31.22	12 01 31.3	12.812	0.563	0.091	0.680
5813	9	8 48 42.43	12 00 37.8	13.499	0.569	0.060	0.700
5781	10	8 48 40.86	12 00 18.2	13.259	0.396	0.036	0.697
5739	11	8 48 38.82	12 00 06.7	12.711	0.565	0.004	0.678
6487	12	8 48 42.75	11 59 58.0	10.512	0.584	0.044	0.627
5844	13	8 48 44.62	11 59 19.8	13.830	0.636	0.084	0.803
6485	14	8 48 38.71	11 59 19.0	10.479	1.104	1.003	1.070
6486	15	8 48 33.00	11 59 33.1	10.305	1.264	1.320	1.221
5522	16	8 48 28.12	11 59 51.5	13.903	0.578	0.064	0.688
6499	17	8 48 45.83	11 58 34.5	9.685	1.357	1.464	1.330
5571	18	8 48 31.36	11 58 48.4	12.658	0.507	0.057	0.599
5562	19	8 48 30.68	11 58 40.9	12.821	0.566	0.081	0.655
5667	20	8 48 35.84	11 58 17.5	12.125	0.459	0.021	0.556
5675	21	8 48 36.06	11 57 58.9	12.770	0.559	0.036	0.661
5688	22	8 48 36.52	11 57 33.0	12.895	0.454	0.007	0.568
6483	23	8 48 37.50	11 57 23.4	13.186	0.577	0.068	0.682
5679	24	8 48 36.28	11 57 09.6	13.154	0.574	0.049	0.675
5624	25	8 48 33.94	11 57 11.2	12.728	0.564	0.065	0.685
5895	26	8 48 47.20	11 57 08.4	12.649	0.577	0.029	0.700
5695	27	8 48 36.76	11 56 19.7	13.097	0.609	0.080	0.709
6482	28	8 48 31.96	11 56 40.8	9.711	1.373	1.539	1.352
6481	29	8 48 27.72	11 56 38.8	10.027	-0.086	-0.385	-0.068
5464	30	8 48 24.56	11 57 28.2	13.424	0.576	0.038	0.689

Tabel 1
Tabel dari Montgomery *et al.* yang berisi data magnitudo semu dan warna baku bintang-bintang standar yang terdapat dalam *chart* pembandingan.

Pengukuran dan Perhitungan

Setelah memperoleh *chart* pembandingan untuk medan langit yang bersesuaian dengan citra digital yang dimiliki, dimulailah pengukuran magnitudo semu dan warna instrumen menggunakan metode fotometri bukaan (*langkah 1 dan 2*). Hasil pengukuran ditabelkan di bawah ini.

No.Bintang	v	B	b-v	X	
				v	b
11	12.473	12.283	-0.190	1.229	1.127
12	10.231	10.069	-0.162		
13	13.580	13.450	-0.130		
14	10.230	10.519	0.289		
15	10.081	10.495	0.414		
17	9.830	9.925	0.095		
20	11.868	11.612	-0.256		
21	12.519	12.341	-0.178		
29	9.931	9.439	-0.492		

Tabel 2

Tabulasi magnitudo semu dan warna instrumen yang diperoleh dengan metode fotometri bukaan dengan konstanta bernilai +23.50. Massa udara dihitung terhadap pusat rangka citra dalam **gambar 1** ($\alpha = 08^h 48^m 37.44^s$, $\delta = 11^d 58^m 17.50^s$).
 Nilai $v_rerata = 11.194$, $v_stdev = 1.418$, $b_rerata = 11.126$, $b_stdev = 1.352$.

Matriks normal yang dihasilkan dari empat buah persamaan linear, berturut-turut untuk persamaan transformasi magnitudo dan warna, disajikan di bawah ini.

$$\begin{bmatrix} 9 & 11.065 & -0.750 & 6.442 \\ 11.065 & 13.603 & -0.922 & 7.920 \\ -0.750 & -0.922 & 1.032 & 0.629 \\ 6.442 & 7.920 & 0.629 & 6.253 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.701 \\ 2.091 \\ -0.160 \\ 1.069 \end{bmatrix} \quad \text{dan}$$

$$\begin{bmatrix} 9 & 10.602 & -0.719 & -0.610 \\ 10.602 & 12.489 & -0.846 & -0.719 \\ -0.719 & -0.846 & 0.947 & 0.804 \\ -0.610 & -0.719 & 0.804 & 0.682 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.442 \\ 7.589 \\ 0.603 \\ 0.512 \end{bmatrix}$$

Hasil

Kedua matriks yang diperoleh adalah matriks tak-singular (memiliki determinan), sehingga pemecahannya dapat dilakukan secara analitik, baik menggunakan *aturan Cramer* maupun perkalian *invers matriks*. Solusi kedua set matriks normal di atas ditabelkan berikut ini.

	<i>A</i>	<i>b</i> ₁	<i>b</i> ₂	<i>b</i> ₃
Magnitudo	0.0371	0.4721	0.6149	-0.5270
Warna	0.9516	-0.1150	0.6282	0.7401

Tabel 3

Solusi SPL yang merupakan koefisien-koefisien persamaan transformasi magnitudo semu dan warna.

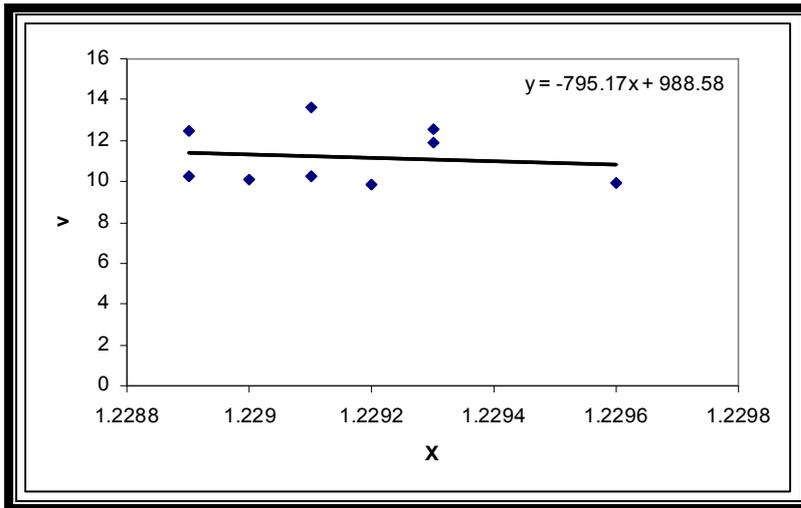
Dengan telah diperolehnya ketiga koefisien, persamaan transformasi magnitudo semu dan warna instrumen menjadi magnitudo semu dan warna baku secara berurutan dapat dituliskan sebagai:

$$V - v = 0.0371 + 0.4721 * X + 0.6149 * (b - v) * X - 0.5270 * (B - V)$$

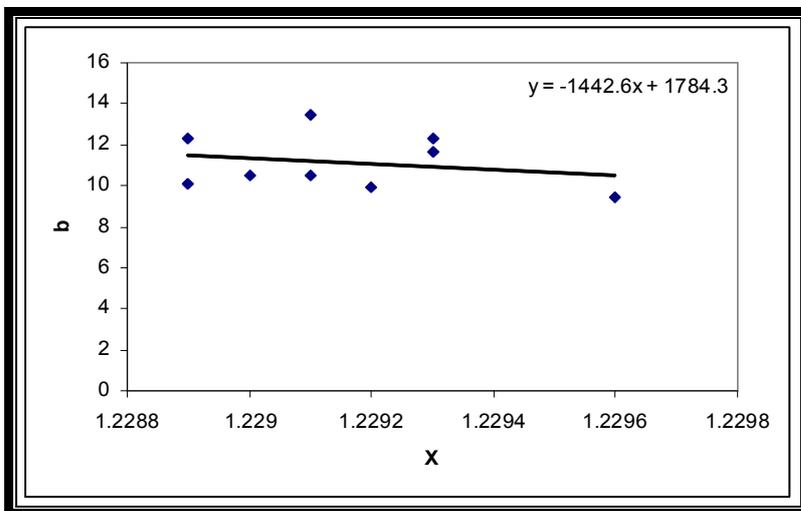
dan

$$B - V = 0.9516 - 0.1150 * X + 0.6282 * (b - v) * X + 0.7401 * (b - v)$$

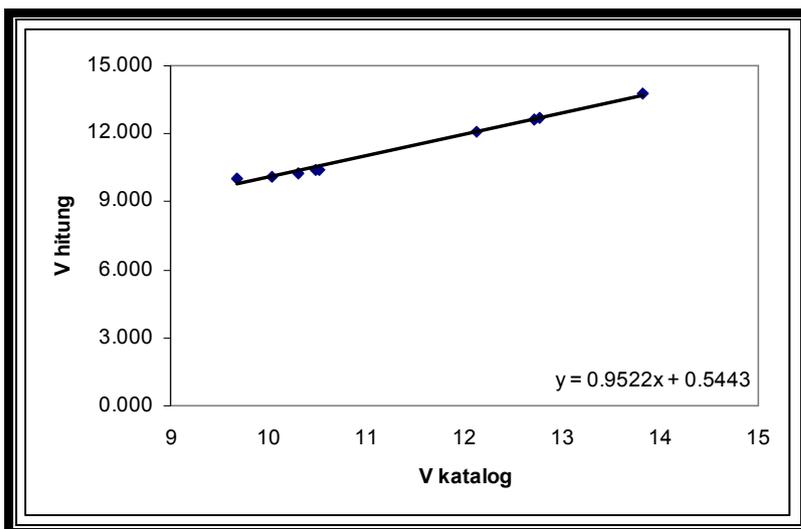
Dengan kedua persamaan transformasi di atas selanjutnya dapat ditentukan magnitudo semu baku dan warna baku sembarang bintang bukan standar dalam gugus terbuka M67. Untuk menguji apakah kedua persamaan transformasi di atas benar-benar mereproduksi harga-harga dalam katalog, dapat dilakukan dengan membandingkan magnitudo dan warna hasil perhitungan dengan nilai-nilai parameter yang diperoleh di atas terhadap magnitudo dan warna baku.



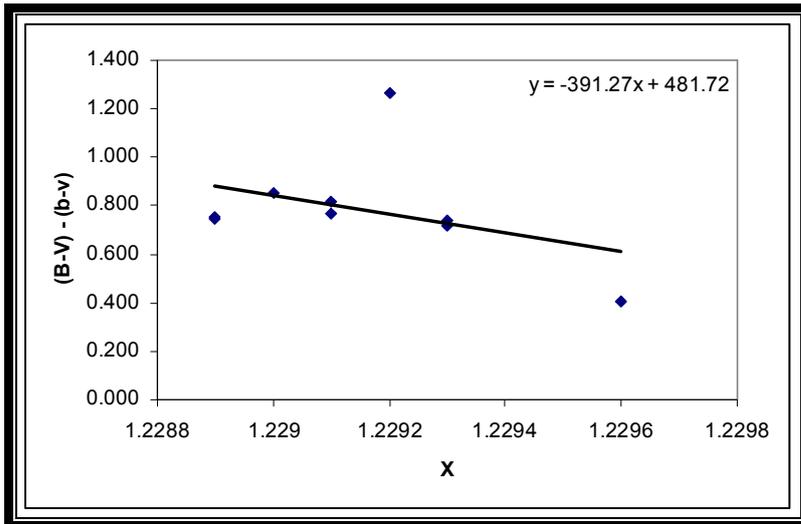
Gambar 2
Plot magnitudo instrumen dengan filter v terhadap massa udara.



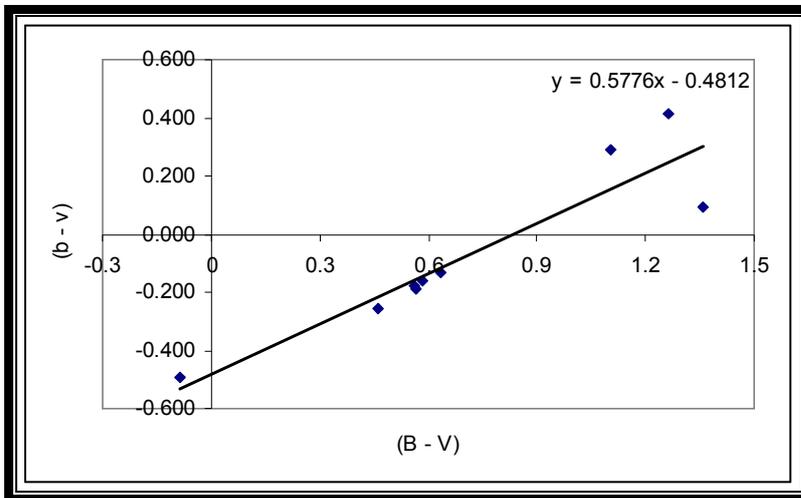
Gambar 3
Plot magnitudo instrumen dengan filter b terhadap massa udara.



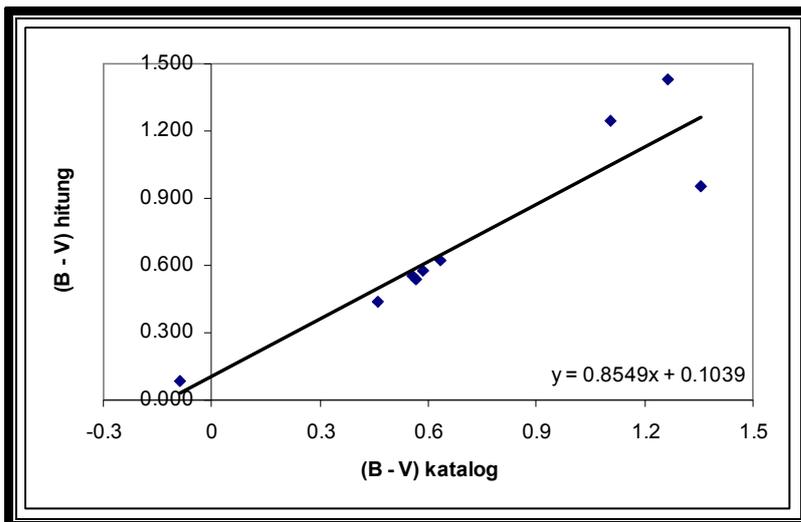
Gambar 4
Plot magnitudo hasil perhitungan terhadap magnitudo baku.



Gambar 5
Plot selisih warna baku & warna instrumen terhadap massa udara.



Gambar 6
Plot warna instrumen terhadap warna baku.



Gambar 7
Plot warna hasil perhitungan terhadap warna baku.

No.Bintang	V katalog	V hitung	(B-V) katalog	(B-V) hitung
11	12.473	12.665	0.565	0.535
12	10.231	10.422	0.584	0.576
13	13.580	13.770	0.636	0.624
14	10.230	10.410	1.104	1.244
15	10.081	10.258	1.264	1.429
17	9.830	10.615	1.357	0.957
20	11.868	12.061	0.459	0.437
21	12.519	12.711	0.559	0.553
29	9.931	10.130	-0.086	0.088

Tabel 4

Tabulasi magnitudo semu dan warna hasil perhitungan.

Nilai $\langle v \rangle_{hitung_rerata} = 11.449$, $\langle v \rangle_{hitung_stdev} = 1.361$,
 $\langle B - V \rangle_{hitung_rerata} = 0.716$, $\langle B - V \rangle_{hitung_stdev} = 0.419$.

Kesimpulan

Perhitungan yang dilakukan dalam pekerjaan ini menunjukkan hasil yang relatif baik, hal mana ditunjukkan oleh dekatnya nilai data hasil perhitungan terhadap nilai yang diacu dalam katalog. Sebaran data pada *plot* magnitudo hasil perhitungan terhadap magnitudo baku (**gambar 4**) menunjukkan linearitas yang baik, kecenderungan yang juga ditunjukkan pada *plot* warna hasil perhitungan terhadap warna baku (**gambar 7**). Karenanya, kita dapat berkeyakinan bahwa kedua persamaan transformasi yang diperoleh dapat mereproduksi harga-harga dalam katalog.

Metode fotometri bukaan merupakan metode yang sederhana namun cukup handal dalam pekerjaan fotometri absolut yang berkenaan dengan penentuan magnitudo dan warna bintang, utamanya untuk medan yang tidak terlalu rapat. Sementara bila medan cukup rapat, penggunaan cincin atau lingkaran digital yang hanya melingkupi satu bintang target akan sulit dicapai. Untuk itu perlu digunakan metode lain, yang dikenal sebagai metode *Point Spread Function* (PSF) yang bertujuan untuk memperoleh fungsi profil citra bintang yang dapat berlaku secara umum.

Referensi

- Montgomery *et al.*, 1993. *CCD Photometry of The Old Open Cluster M67*, The Astronomical Journal, 106.
Prasetyono, G.I., 2002. *Pemodelan Profil Citra Bintang dengan Point Spread Function Empiris*, Tugas Akhir Kesarjanaan, hlm 17.