

JURNAL SAINS DIRGANTARA

Journal of Aerospace Sciences

Vol. 1 No. 1 Desember 2003

ISSN 1412 - 808X

**KLASIFIKASI SPEKTRUM BINTANG DIGITAL BERBANTUAN
KOMPUTER KINERJA RENDAH : I.
BINTANG DERET UTAMA**

Hakim L. Malasan dan Djoni N. Dawanas

**THE CHARACTERISTICS OF INDIAN OCEAN DIPOLE MODE
PRELIMINARY STUDY OF THE MONSOON VARIABILITY IN THE
WESTERN PART OF INDONESIA REGION**

Eddy Hermawan

**TEKNIK PRAKIRAAN DAN SISTEM PERINGATAN DINI
CURAH HUJAN DAN BANJIR**

Hidayat Pawitan

**PREDIKSI PELURUHAN ORBIT SATELIT BUMI
ORBIT RENDAH**

L. Manurung



Diterbitkan oleh Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)
Jakarta - Indonesia

J. Si. Dirgant

VOL. 1

NO. 1

HAL. 1-61

JAKARTA, DESEMBER 2003

ISSN 1412 - 808X

KLASIFIKASI SPEKTRUM BINTANG DIGITAL BERBANTUAN KOMPUTER KINERJA RENDAH: I. BINTANG DERET UTAMA

Hakim L. Malasan dan Djoni N. Dawanas

*Observatorium Bosscha, Departemen Astronomi,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Institut Teknologi Bandung
E-mail: hakim@as.itb.ac.id*

ABSTRACT

We make use of a stellar spectral synthesis program based on a modern stellar atmosphere model (Kurucz 1992) to generate and simulate observed spectra. Theoretical atmospheric structures are developed under local thermodynamic equilibrium assumption, with fully line blanketed and with modern atomic and molecular data bases. The spectral synthesis program is supported by an extensive compilation of atomic and molecular within the range of wavelength 3900 Å through 4500 Å. Using this scheme, we compute and compile 69 synthetic spectra of spectral classes 0 through M and luminosity classes of main-sequence and giant. The original synthetic spectra filtered by a convolution procedure with Gaussian function which full-width half-maximum represents the instrumental profile are then used as the reference spectra in the classification. 57 digital spectra of main-sequence class and solar metallicity observed by Jacoby et al (1984) have been used as the classification object spectra. The spectra are acquired through a spectrograph with resolution of 4.5 Å and digitally sampled at 1.4 Å. We adopt three main classification schemes, namely the analysis of statistical moments, method of χ^2 minimization and metric-distance method. From the analysis of statistical moments, we establish a classification template which is independent of spectral resolution. This study reveals that the moments skewness, mean and variance have good prospect for automated classification. The χ^2 minimization results in good accuracy (2 sub-spectral type). The correlation coefficient of ≈ 0.9 has been found between the resulted spectral classes of this study with those of the traditional ones. Most of the classified objects (86%) lies within 1σ of the normal distribution. On the other side, the metric-distance method yields in more inferior accuracy classifications. It is felt that this lower accuracy is due to the selection of weight factors which is not optimum. With the development of atmospheric models and digital observing instruments we pointed out that the automated scheme of stellar spectral classification becomes demanded.

ABSTRAK

Program sintesis spektrum bintang berlandaskan kepada model atmosfer bintang modern (Kurucz, 1992) dipergunakan untuk membangun dan mensimulasikan spektrum pengamatan. Struktur atmosfer teoritis dibangun berdasarkan asumsi kondisi kesetimbangan termodinamika lokal (Local Thermodynamic Equilibrium), *fully line blanketed*, dan dengan basis data atom serta opasitas modern. Program sintesis spektrum didukung oleh kompilasi lengkap data garis spektral atomik dan molekuler untuk rentang panjang gelombang 3900 Å

hingga 4500 Å. Dengan skema ini dilakukan komputasi dan kompilasi 69 spektrum sintetik untuk kelas spektrum O hingga M serta kelas luminositas deret-utama dan raksasa. Spektrum sintesis yang ditapis dengan prosedur konvolusi dengan fungsi Gaussian yang lebar paronya merepresentasikan profil instrumen pengamatan dapat dipergunakan sebagai spektrum referensi dalam klasifikasi. Sejumlah 57 spektrum digital bintang deret-utama dengan metalisitas matahari hasil pengamatan Jacoby et al. (1984) dipergunakan sebagai spektrum obyek klasifikasi otomatis melalui 3 skema utama: analisis momen statistika spektrum, metode minimalisasi χ^2 dan metode jarak metrik. Spektrum digital ini diperoleh dengan spektrograf resolusi 4.5 Å dan pencuplikan 1,4 Å. Dari analisis momen statistika spektrum dapat ditetapkan suatu template klasifikasi yang independen terhadap resolusi spektrum. Studi ini mengungkapkan bahwa momen-momen statistika skewness, nilai menengah, serta variansi memiliki prospek baik dalam pengklasifikasian otomatis. Metode minimalisasi χ^2 yang dipergunakan menunjukkan kecermatan klasifikasi yang cukup tinggi, yakni 2 sub-kelas spektrum, dengan gradien korelasi $\approx 0,9$ terhadap klasifikasi tradisional. Hampir seluruh obyek (86%) yang diklasifikasikan berada dalam daerah 1σ distribusi normal. Dilain pihak metode jarak-metrik yang dipergunakan menunjukkan hasil yang lebih inferior dan ketidakcermatan ini disebabkan pemilihan faktor pembobotan yang tidak optimum. Dengan semakin berkembangnya model atmosfer serta instrumen pengamatan digital, maka skema klasifikasi otomatis spektrum bintang akan semakin diperlukan.

1 PENDAHULUAN

Morgan, Keenan, dan Kellman (1943) beserta Johnson dan Morgan (1953) merupakan astronom pertama yang mengembangkan teknik taksonomi bintang yang selanjutnya dikenal dengan nama klasifikasi Morgan-Keenan (Klasifikasi MK). Basis observasi terpenting dari teknik taksonomi ini adalah eksistensi garis-garis spektral dalam spektrum optik bintang pada rentang panjang gelombang 3500 hingga 5000 Å. Di lain pihak dari sisi teoritis, persamaan Boltzman dan Saha dalam mekanika statistik merupakan dasar penjelasan, dengan perbedaan kuat garis spektral relatif elemen atomik dalam suatu spektrum merupakan karakteristik tingkat eksitasi elektron atomik serta keadaan ionisasi elemen. Berbagai atlas maupun katalog spektrum bintang standar klasifikasi MK telah dipublikasikan, lihat misal Yamashita et al. (1979). Kunci klasifikasi adalah sejumlah bintang standar yang mendefinisikan kelas spektrum. Setiap upaya klasifikasi spektrum dilakukan dengan merujuk kepada bintang standar ini. Parameter tipe spektral dan subtipe nya (O, B, A, F, G, K dan M) diberikan berdasarkan pada kuat berbagai garis spektrum yang merupakan indikator temperatur efektif bintang, sedangkan parameter kelas luminositas (I, II, III, IV, dan V) merupakan petunjuk percepatan gravitasi di permukaan bintang.

Sistem klasifikasi MK yang uraian rincinya dapat dilihat pada teks umum astrofisika bintang (misal Jaschek & Jaschek, 1990) adalah satu-satunya sistem yang secara luas dipergunakan dalam astronomi. Sejalan dengan perkembangan metodologi, teknik klasifikasi ini terbukti sangat ampuh dalam mengungkap detail dari evolusi bintang dan struktur galaksi (Jacoby et al. ,1984, Silva & Cornell, 1992).

Perkembangan instrumen observasi memungkinkan untuk memperoleh sejumlah besar spektrum obyek langit. Selain itu, apabila dahulu modus perekaman masih bersifat analog (misalnya fotografi) maka saat ini astronom menyaksikan penggunaan detektor digital seperti CCD (*Charge Coupled Devices*), *Reticon Array*, *Vidicon* dan lainnya yang meluas. Dengan sendirinya modus penyimpanan data mengarah kepada penyimpanan elektronik dalam bentuk digital. Tingginya efisiensi kuantum detektor digital serta kelebihan yang dimiliki sistem pendukungnya memberikan pengaruh besar dalam pengembangan pustaka digital spektrum optik bintang.

Artikel ini dimotivasi oleh pengamatan dan penilaian peneliti terhadap teknik konvensional klasifikasi sejumlah besar spektrum bintang dalam berbagai kelas bertautan yang jika masih dilakukan dengan cara visual dan manual akan membutuhkan upaya besar manusia serta tidak lepas dari faktor-faktor subyektif. Karena itu diperlukan teknik-teknik berbasis komputer yang obyektif dalam menggantikan sebagian pekerjaan seperti ini. Teknik-teknik klasifikasi otomatis telah dijajaki semenjak 1970-an, dan peran komputer mulai dirasakan menjadi esensial pada tahun 1980-an (Schmidt-Kaler, 1982). Secara umum studi tentang hal ini didasarkan pada tiga pendekatan utama, yakni

- a. Evaluasi kuantitatif kesesuaian spektrum disertai pengukuran statistika terhadap kualitas evaluasi. Studi ini diawali oleh Zekl (1982), Kurtz (1984), dan Penprase (1994). Evaluasi dengan cara ini tergolong mudah diimplementasikan dengan komputer kelas kecil. Varian metode ini memanfaatkan momen statistika citra seperti yang digunakan oleh Dodd & Legget (1993).
- b. Pengenalan pola melalui metode statistika multivariate. Metode ini mempergunakan teknik *Principal Component Analysis* untuk mereduksi dimensi masalah diikuti oleh teknik *Cluster Analysis* untuk menemukan pengelompokan obyek dalam ruang parameter. Telaah ini awalnya dilakukan oleh Whitney (1983) dan diikuti oleh Heck et al. (1986) dalam mengklasifikasikan bintang berdasarkan spektrum ultraviolet-nya. Penerapan teknik ini dalam mendiskriminasikan kelas luminositas raksasa dan katai dalam lingkungan kelas spektrum K baru-baru ini dilakukan oleh Ibata & Irwin (1997).
- c. Pengembangan teknik jaringan syaraf buatan dalam mensimulasikan upaya klasifikasi visual. Kendati tergolong paling akhir dan mutakhir teknik ini membutuhkan perangkat keras yang memadai dalam mengakomodasi sejumlah besar kriteria. Akibatnya kebutuhan memory besar menjadi sangat penting. Teknik ini dipergunakan oleh Klusch & Napivotzki (1993) diikuti dengan studi mendalam oleh von Hippel et al. (1994). Suatu studi perbandingan dilakukan oleh Gulati et. al. (1994) yang menyimpulkan bahwa pendekatan teknik jaringan buatan memiliki ketelitian yang sederajat dengan teknik evaluasi kesesuaian spektrum. Belakangan klasifikasi otomatis terhadap spektrum ultraviolet dengan teknik ini dikembangkan oleh Vieira & Ponz (1995), sedangkan kemajuan yang menarik telah diperlihatkan oleh Weaver & Torres-Dodgen (1997). Mereka berhasil mengembangkan penerapan teknik ini untuk melakukan klasifikasi akurat 2 dimensi. Review komprehensif diberikan dalam suatu disertasi Doktorat oleh Bailer-Jones (1996).

Walaupun demikian seluruh studi yang dipaparkan di atas sangat bersandar pada spektrum acuan yang diperoleh dari pustaka spektrum digital yang dibentuk dari pengamatan. Penelitian yang memanfaatkan kemajuan basis data model atmosfer serta sintesis spektrum bintang belum dilakukan sejauh ini. Penggunaan spektrum sintetik sebagai spektrum acuan memiliki keuntungan ganda, yakni (a) Keleluasaan dalam mensimulasikan spektrum untuk berbagai parameter instrumen spektrograf dan (b) Pengujian secara tak langsung terhadap validitas basis data model atmosfer yang selama ini telah ada.

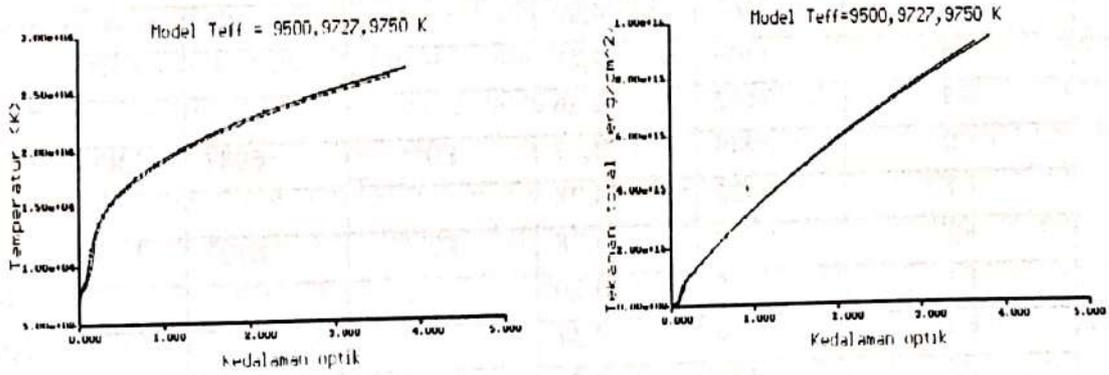
Dalam studi ini peneliti mencoba mengembangkan suatu metode klasifikasi otomatis spektrum bintang. Dengan memanfaatkan model atmosfer bintang yang diproduksi oleh Kurucz (1992) peneliti melakukan sintesis spektrum dengan mempergunakan metode Gray dan Corbally (1994). Dengan kapasitas perangkat keras yang minim akan dilakukan penajakan terhadap kualitas hasil dan rentang keberlakuannya. Dengan mempergunakan spektrum digital Jacoby et. al., (1984) dan Silva & Cornell (1992) peneliti menyajikan tiga skema klasifikasi spektrum otomatis bintang-bintang dengan rentang kelas spektrum dari O hingga M. Skema pertama adalah menelaah parameter momen statistika spektrum acuan yang akan dipergunakan untuk membangun *template* klasifikasi. Skema klasifikasi kedua adalah metode minimalisasi χ^2 klasik yang didasarkan pada acuan spektrum sintesis. Selanjutnya dilakukan suatu perbandingan spektrum bintang obyek klasifikasi dengan acuan untuk ditentukan *fit* terbaik berdasarkan kendala statistika. Pada skema ketiga suatu metode jarak-metrik yang dikembangkan oleh LaSala (1994) dipergunakan sebagai perbandingan.

2 MODEL ATMOSFER DAN SINTESIS SPEKTRUM BINTANG

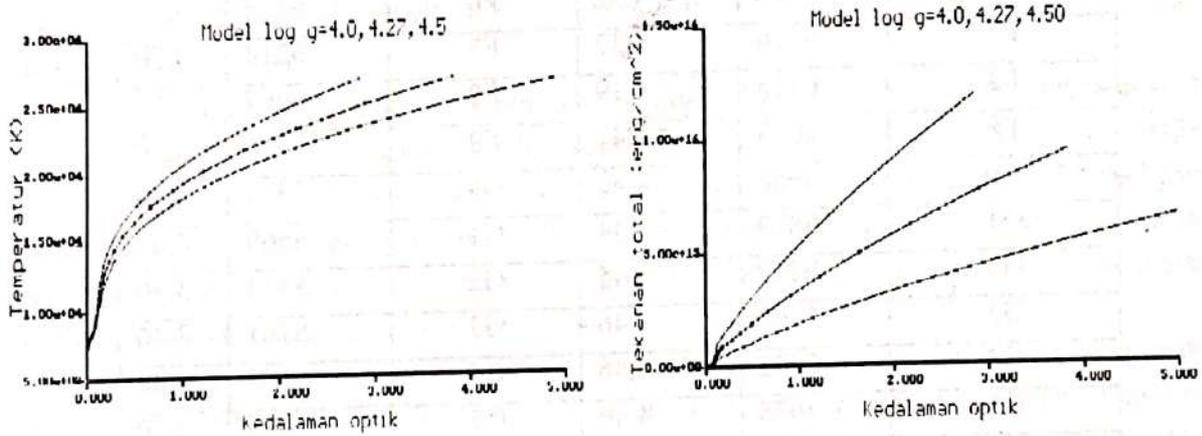
Langkah pertama dalam studi ini adalah pembentukan suatu basis data model atmosfer bintang modern yang diperoleh dari komputasi oleh Kurucz (1992). Model atmosfer modern ini merupakan model yang *fully blanketed* dalam arti mengikutsertakan seluruh efek metalisitas dalam atmosfer bintang yang berperan menyerap distribusi energi pada panjang gelombang ultraviolet.

Model atmosfer dibangun dengan asumsi kesetimbangan lokal termodinamika (*Local Thermodynamic Equilibrium* selanjutnya disingkat LTE) dan keluarannya meliputi tabulasi temperatur dan tekanan sebagai fungsi 64 lapis kedalaman optis (*optical depths*). Keadaan Non-LTE yang dirasakan akan signifikan pada kasus-kasus ekstrim atmosfer, seperti bintang maharaksasa atau bintang katai putih dalam makalah ini tidak ditinjau. Atmosfer bintang dicirikan oleh 4 parameter dasar, yakni temperatur efektif (T_{eff}), percepatan gravitasi permukaan (g), kecepatan mikroturbulensi (V_{turb}) dan metalisitas ($[Fe/H]$). Grid model atmosfer disusun atas selang teratur temperatur efektif dan nilai logaritma percepatan gravitasi. Untuk memperoleh model atmosfer bintang dengan parameter-parameter tertentu diperlukan suatu teknik interpolasi. Sebagai ilustrasi interpolasi ini, Gambar 2-1 memperlihatkan proses interpolasi untuk memperoleh model atmosfer bintang kelas spektrum A0 V dengan parameter fisis $T_{\text{eff}}=9727$ K, $\log g=4.27$ dengan metalisitas matahari. Tampak bahwa struktur fisis atmosfer sangat sensitif terhadap perubahan $\log g$. Konsekuensinya bahwa kelas luminositas merupakan parameter penting yang mendiskriminasikan atmosfer bintang.

a.



b.



Gambar 2-1 : Model atmosfer bintang dengan parameter $T_{\text{eff}} = 9727 \text{ K}$, $\log g = 4,27$. Model ini diperoleh dari interpolasi linier 2-dimensi grid model atmosfer dengan pasangan parameter $(T_{\text{eff}}, \log g)$: $(9500\text{K};4,00)$, $(9500\text{K};4,50)$ dan $(9750\text{K};4,00)$, $(9750\text{K};4,50)$. Ilustrasi di atas memperlihatkan efek perubahan T_{eff} (a) dan $\log g$ (b). Hasil interpolasi direpresentasikan oleh kurva yang disuperposisikan dengan simbol dot.

Tabel 2-1 : GRID PARAMETER DASAR BINTANG STANDAR KLASIFIKASI SPEKTRUM

Spektrum	T_{eff}	$\log g$	Spektrum	T_{eff}	$\log g$
<i>Deret Utama</i>			<i>Raksasa</i>		
O5	40000	4,50			
O8	38980	4,00			
B0	35914	4,00			
B2	25043	4,10			
B5	16093	4,22			
B8	12632	4,20			
A0	9727	4,27			
A2	8820	4,28			
A5	7880	4,25			

A6	7627	4,25			
A7	7483	4,25			
A8	7305	4,25			
A9	7112	4,26			
F0	6949	4,27	F0	6941	3,80
F1	6826	4,28			
F2	6727	4,28	F2	6727	3,80
F3	6628	4,29			
F4	6540	4,31			
F5	6445	4,32	F5	6449	3,50
F6	6445	4,32	F6	6336	3,50
F7	6226	4,37	F7	6213	3,50
F8	6115	4,39	F8	6067	3,50
F9	6017	4,41	F9	5910	3,50
G0	5948	4,42	G0	5743	3,40
G1	5870	4,44	G1	5569	3,40
G2	5819	4,45	G2	5413	3,40
G3	5767	4,46	G3	5261	3,40
G4	5723	4,46	G4	5173	3,40
G5	5678	4,46	G5	5091	3,30
G6	5626	4,48	G6	5033	3,30
G7	5560	4,48	G7	4996	3,30
G8	5484	4,50	G8	4952	3,30
G9	5386	4,52	G9	4897	3,30
K0	5273	4,53	K0	4622	2,79
K1	5156	4,55	K1	4668	2,79
K2	5047	4,57	K2	4540	2,79
K3	4925	4,58	K3	4389	2,79
K4	4791	4,60	K4	4113	2,79
K5	4557	4,60	K5	3915	2,79
K7	4258	4,59			
M0	4045	4,58	M0	3726	1,70
M1	3936	4,59	M1	3695	1,70
M2	3862	4,58	M2	3612	1,70

Parameter dasar bintang secara klasik dapat diperoleh dari tabulasi oleh Allen (1973). Untuk bintang khususnya, parameter akurat dan mutakhir yang merepresentasikan kelas spektrum standar dikompilasikan oleh Schmidt-Kaler (1982) dan Gray (1992). Peneliti

menseleksi dan membangun tabel parameter dasar bintang standar klasifikasi meliputi kelas luminositas deret utama dan raksasa yang diperlihatkan pada Tabel 2-1.

Keluaran komputasi berupa sejumlah 43 model atmosfer bintang deret utama dan 26 model atmosfer bintang raksasa yang dianggap representatif bagi klasifikasi kelas spektrum bintang. Kelangkaan parameter dasar bintang dengan kelas luminositas lainnya membatasi lingkup telaah penelitian ini. Perlu dicatat di sini bahwa model atmosfer Kurucz (1982) tidak konvergen untuk kombinasi parameter $T_{\text{eff}}=4000$ K dan $\log g=4,0$. Karena itu dipilih $\log g=4,50$. Model atmosfer untuk $T_{\text{eff}}=38980$ K dan $\log g=4,0$ tidak begitu realistis akibat adanya ketidakstabilan numerik dalam komputasi percepatan radiatif. Di sisi lain, pada rejim temperatur rendah model-model dengan $T_{\text{eff}} < 4000$ K, $\log g=4,00-5,00$ tidak begitu realistis kendati komputasinya konvergen. Hal ini disebabkan model atmosfer tidak memperhitungkan kekedapan H_2O (air).

Berdasarkan tabulasi model atmosfer ini peneliti merancang dan menggunakan suatu program sintesis spektrum, yakni simulasi spektrum bintang berdasarkan pada asumsi kondisi LTE. Metode yang digunakan dalam sintesis spektrum adalah pembentukan garis spektrum dengan memecahkan berbagai perangkat persamaan kesetimbangan, antara lain persamaan Saha dan persamaan Boltzman, serta komputasi pelebaran garis berdasarkan gerak dan agitasi termal atomik (Gray & Corbally, 1994).

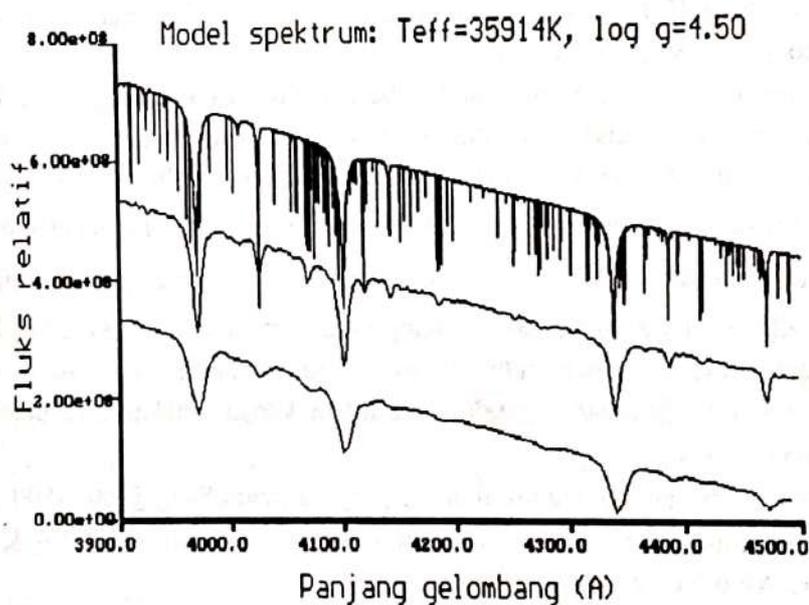
Kesempurnaan spektrum sintetik bergantung pada kelengkapan data elementer atomik yang meliputi: Opasitas kontinum (continuum opacities) dengan sumber: Hidrogen (transisi bebas-bebas dan bebas-terikat), helium (transisi terikat-bebas dan bebas-bebas), He II (transisi terikat-bebas dan bebas-bebas), H^- (transisi bebas-terikat dan bebas-bebas), opasitas H_2^+ ; sebaran Rayleigh untuk hidrogen, H_2 , He I dan elektron; opasitas temperatur rendah (C I, Mg I, Al I, Fe I dan Si I), opasitas temperatur menengah (N I, O I, Mg II, Ca II dan Si II). Garis-garis spektrum helium netral dihitung untuk profil garis He I 4026, 4471, 4922 dan 5016 Å, dan untuk garis-garis metalik didasarkan kepada mekanisme pelebaran alamiah, vander Waals dan Stark.

Daftar garis spektral (untuk rentang panjang gelombang 3900–4500 Å) dikompilasi dari berbagai sumber literatur khususnya atlas spektrum Procyon (Griffin & Griffin, 1979) dan Matahari (Moore et al., 1966).

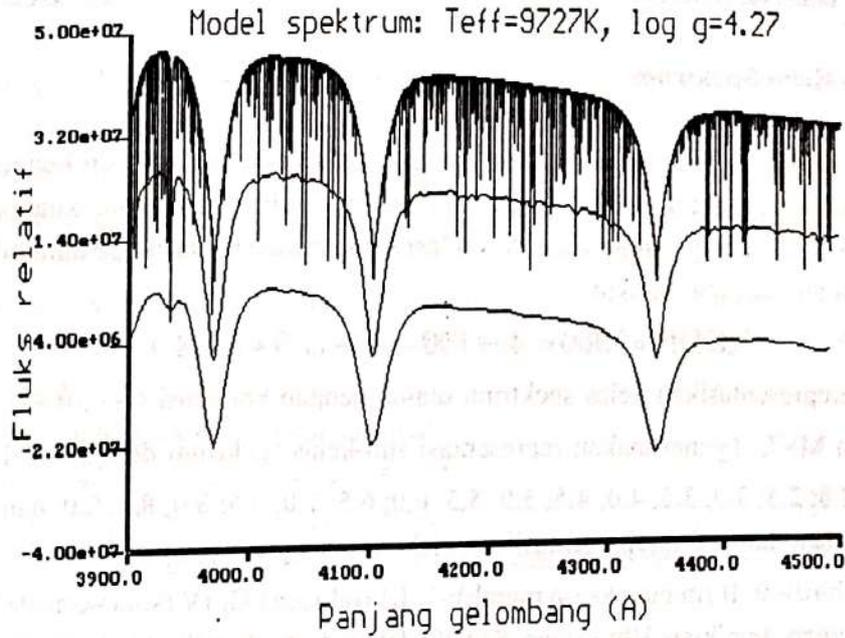
Model atmosfer yang telah dikompilasi merupakan masukan dalam proses perancangan program sintesis spektrum bintang, dan untuk mengimplementasikan simulasi ini diperlukan kompilasi basis data atomik dan parameter fisis yang bertautan. Sebanyak 100 garis spektral dalam rentang spektrum 3900 hingga 4500 Å disusun dalam suatu basis data guna membangun spektrum sintetik. Komputasi dalam rangka membangun spektrum sintesis dilakukan dalam modus fluks terintegrasi dengan parameter kecepatan turbulensi atmosfer ($v_{\text{turbulence}}$) = 1,0 km/detik (Kelas spektrum G,K,M), 1,5 km/detik (Kelas spektrum F5 hingga F9) dan 2,0 km/detik (Kelas spektrum O5 hingga F4). Spektrum sintesis dibangun

dengan step komputasi 0,02 Å. Diperlukan waktu sekitar 15 menit CPU pada komputer personal Pentium 100 Mhz untuk menyelesaikan komputasi.

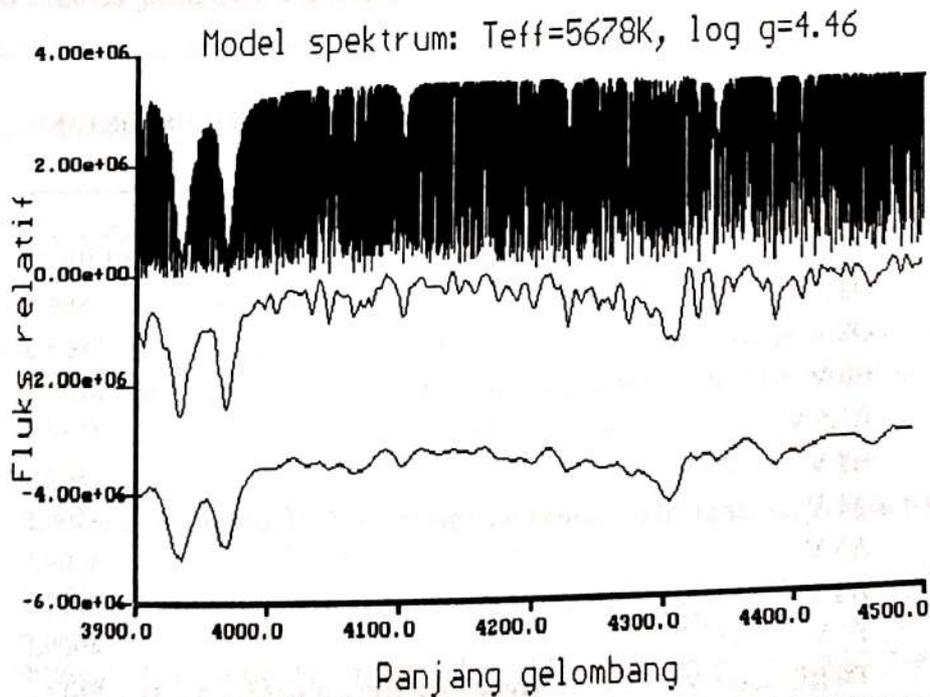
Untuk membandingkan spektrum teoritis hasil sintesis dengan pengamatan diperlukan suatu proses penapisan (filtering) spektrum dengan sebuah fungsi yang merepresentasikan profil instrumen, yakni spektrograf. Model matematika yang dipilih adalah fungsi Gaussian dengan lebar paro (Full Width Half-Maximum) yang merepresentasikan resolusi instrumen (Gray, 1992). Teknik numerik yang digunakan adalah konvolusi spektrum sintesis dengan profil Gaussian (Press et al., 1992). Hasil konvolusi ini merupakan suatu spektrum yang telah dilicinkan (smoothed) sesuai dengan resolusi instrumen dan siap untuk dibandingkan dengan spektrum pengamatan. Spektrum sintetis orisinal, yang ditapis dengan resolusi spektrograf 4,5 Å dan 11 Å diperlihatkan pada Gambar 2-2 untuk model spektrum dengan $T_{\text{eff}}=35914$ K, $\log g=4,5$, yang merepresentasikan kelas spektrum B0 V. Gambar 2-3 memperlihatkan proses yang sama untuk model dengan $T_{\text{eff}}=9727$ K, $\log g=4,27$ mewakili kelas spektrum A0 V dan Gambar 2-4 untuk model dengan $T_{\text{eff}}=5678$ K, $\log g=4,46$ yang lazim bagi kelas spektrum G5 V.



Gambar 2-2 : Sintesis spektrum untuk model dengan parameter $T_{\text{eff}} = 35914$ K, $\log g = 4,5$, khas untuk kelas spektrum B0 V (atas). Spektrum orisinal yang dikonvolusikan dengan fungsi Gaussian lebar paro 4,5 Å (tengah), dan yang dikonvolusikan dengan fungsi Gaussian lebar paro 11 Å (bawah).



Gambar 2-3: Sama seperti Gambar 2-2 untuk model dengan parameter $T_{\text{eff}} = 9727\text{ K}$, $\log g = 4.27$. khas untuk kelas spektrum A0 V.



Gambar 2-4: Sama seperti Gambar 2-2 untuk model dengan parameter $T_{\text{eff}} = 5678\text{ K}$, $\log g = 4.46$. khas untuk kelas spektrum G5 V.

Sejumlah 43 spektrum sintetik bintang deret utama dan bintang raksasa sesuai dengan grid pada Tabel 2-1 dibangun. Seluruh spektrum sintetik ditapis dengan resolusi $0,45\text{ \AA}$.

3 REDUKSI DAN ANALISIS

3.1 Kodifikasi Kelas Spektrum

Kelas spektrum bintang merupakan campuran tipe data ordinal dan kuantitatif yang dalam penggunaannya untuk analisis harus diubah menjadi bentuk data kuantitatif utuh. Gulati et. Al., (1992) mengusulkan suatu formulasi standar transformasi tipe data ini ke dalam tipe data kuantitatif, sebagai berikut

$$\text{KODE} = 1000 \times A_1 + 100 \times A_2 + (1.5 + 2 \times A_3)$$

dengan A_1 merepresentasikan kelas spektrum utama dengan konvensi O=1, B=2, A=3, F=4, G=5, K=6 dan M=7. A_2 merupakan representasi sub-kelas spektrum dengan nilai-nilai: 0,0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 7,5; 8,0; 8,5; 9,0, dan 9,5. Kelas luminositas dalam hal ini direpresentasikan oleh A_3 dengan konvensi kelas luminositas I (maharaksasa biru)=0, II (maharaksasa merah)=1, III (raksasa)=2, IV (subraksasa)=3, V (deret utama)=4. Dengan demikian 100 satuan KODE dalam formulasi di atas berkaitan dengan 1 sub-kelas spektrum.

Formulasi Gulati et. al., (1992) tersebut selanjutnya dipergunakan untuk mengkuantifikasikan kelas spektrum referensi yang dibentuk melalui sintesis spektrum. Tabel 3-1 memberikan sebagian konversi kelas spektrum ke dalam KODE kelas spektrum bintang berdasarkan skema di atas.

Tabel 3-1 : BEBERAPA CONTOH KELAS DAN KODE SPEKTRUM BINTANG

Kelas spektrum	KODE
O5 V	$1000 \times 1 + 100 \times 5 + (1,5 + 2 \times 4) = 1509,5$
O5.5 V	1559,5
O8 V	1809,5
B0 V	2009,5
B1.5 V	2159,5
B8 V	2809,5
A1 V	3109,5
A5 V	3509,5
A8 V	3809,5
F0 V	4009,5
F0 III	$1000 \times 4 + 100 \times 0 + (1,5 + 2 \times 3) = 4007,7$
G3 V	5309,5
G4 III	5407,5
KO V	6009,5
M 2 V	7209,5

3.2 Data Masukan

Sebagai obyek uji klasifikasi, peneliti mempergunakan pustaka spektrum Jacoby et al. (1984) yang merupakan kompilasi 161 spektrum digital bintang dan didistribusikan oleh ADS (Astronomical Data Service) NASA, USA. Spektrum digital ini meliputi rentang panjang gelombang 3510–7427 Å dengan cakupan berbagai individu bintang kelas spektrum O hingga M serta kelas luminositas I hingga V. Spektrograf yang dipergunakan untuk membangun pustaka spektrum digital ini memiliki resolusi 4,5 Å dengan format data digital adalah 1 sampel per 1,4 Å. Dari sejumlah spektrum ini, dipilih 57 spektrum bintang dengan kriteria sebagai berikut

- Memiliki metalisitas sama dengan matahari
- Kelas spektrum deret utama dan raksasa
- Tidak merupakan komponen bintang ganda
- Tidak merupakan bintang variabel atau bintang dengan komposisi kimiawi aneh (peculiar stars)

Perlu dicatat di sini bahwa sebagian dari daerah spektrum digital tidak dipergunakan dalam analisis, mengingat spektrum sintesis sebagai pembanding hanya mencakup rentang panjang gelombang 3900 Å hingga 4900 Å. Ke-57 spektrum digital yang memenuhi kriteria seleksi di atas ternyata seluruhnya terdiri dari bintang dengan kelas luminositas deret utama. Oleh karena itu dalam analisis selanjutnya sejumlah 43 spektrum sintetik yang dibangun dari model atmosfer bintang deret utama secara eksklusif akan dipergunakan.

3.2 Skema Klasifikasi

3.2.1 Momen citra statistik

Jika spektrum yang direpresentasikan oleh pasangan data $(x, I(x))$ dengan $x=1$ hingga jumlah piksel maksimum (alternatif lain yakni x merupakan panjang gelombang) dan $I(x)$ menyatakan fluks spektrum pada x tertentu, maka momen statistika spektrum tersebut meliputi:

- Fluks total citra, M_0 , yakni $\sum_x I(x)$, merupakan ukuran yang bertautan dengan magnitudo semu bintang.

- Nilai menengah fluks spektrum yang diboboti, M_1 , yakni $\frac{\sum_x I(x)x}{\sum_x I(x)}$, merupakan ukuran indeks warna bintang.

c. Variansi fluks yang diboboti, M_2 , yakni $\frac{\sum I(x)x^2}{\sum I(x)} - M_1^2$. Kuantitas ini merupakan indikasi kuat total garis dalam suatu spektrum.

d. *Skewness* fluks yang diboboti, B_1 , diberikan oleh formula

$$B_1 = \frac{M_3}{M_2^{3/2}} \text{ di mana } M_3 = \frac{\sum I(x)x^3}{\sum I(x)} - 3 \left(\frac{\sum I(x)x}{\sum I(x)} \right) \left(\frac{\sum I(x)x^2}{\sum I(x)} \right) + 2 \left(\frac{\sum I(x)x}{\sum I(x)} \right)^3$$

dan merupakan informasi variasi kekuatan kontinu dalam spektrum.

e. Kurtosis fluks yang diboboti (B_2), dihitung dengan

$$B_2 = \frac{M_4}{M_2^2} \text{ di mana}$$

$$M_4 = \frac{\sum I(x)x^4}{\sum I(x)} - 4 \left(\frac{\sum I(x)x^3}{\sum I(x)} \right) \left(\frac{\sum I(x)x}{\sum I(x)} \right) + 6 \left(\frac{\sum I(x)x^2}{\sum I(x)} \right) \left(\frac{\sum I(x)x}{\sum I(x)} \right)^2 - 3 \left(\frac{\sum I(x)x}{\sum I(x)} \right)^4$$

Kuantitas ini merupakan indikator kedataran spektrum.

Untuk melihat relasi antara momen citra dan kelas spektrum, peneliti mengevaluasi signifikansi perbedaan sampel dalam setiap kelas spektrum melalui suatu pengujian T (Student T-test) (Press et al., 1992, Bevington, 1969) sebagai berikut.

a. Simpangan baku s_d , dari selisih antara nilai rata-rata dua sampel obyek perbandingan, dihitung dengan hubungan

$$s_d = s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \text{ di mana } n_1 \text{ dan } n_2 \text{ adalah jumlah spektrum dalam setiap}$$

$$\text{sampel dan } s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Dalam hal ini s_1 dan s_2 adalah simpangan baku dari nilai rata-rata kedua sampel.

b. Hipotesis yang akan diuji adalah bahwa sampel dibentuk dari populasi yang berbeda. Parameter yang dihitung adalah

$$T = \left| \frac{m_1 - m_2}{s_d} \right|, \text{ di mana } m_1 \text{ dan } m_2 \text{ adalah nilai rata-rata sampel.}$$

Apabila $T > 1,96$ maka uji diterima pada tingkat kepercayaan 95% dan untuk meyakinkan dapat dihitung nilai fungsi probabilitas distribusi melalui formula,

$$A(t|\nu) = 1 - I_{\frac{\nu}{\nu+t^2}}\left(\frac{\nu}{2}, \frac{1}{2}\right), \text{ di mana } I_{\frac{\nu}{\nu+t^2}}\left(\frac{\nu}{2}, \frac{1}{2}\right) \text{ adalah fungsi beta tak lengkap.}$$

Dua sampel berbeda secara signifikan apabila $A(t|\nu) > 0,95$.

3.2.2. Minimalisasi χ^2 .

Tinjau fluks spektrum sintetis sebagai acuan yang diberikan oleh $S_i(\lambda_i)$ di mana $i=1$ hingga n untuk n titik panjang gelombang. Di pihak lain, fluks spektrum obyek yang akan diklasifikasikan didefinisikan sebagai $T_i(\lambda_i)$. Parameter χ^2 tereduksi didefinisikan sebagai berikut (Bevington, 1969).

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - T_i)^2}{p}$$

Formula di atas berlaku untuk pembobotan tunggal, dan p adalah derajat kebebasan. Setiap spektrum obyek dibandingkan dengan 43 spektrum acuan, dan komputasi menghasilkan keluaran 43 nilai χ^2 . Kelas spektrum acuan yang bertautan dengan nilai minimum dari χ^2 ditetapkan sebagai kelas spektrum obyek klasifikasi. Prosedur ini dilakukan terhadap seluruh spektrum digital obyek.

Skema minimalisasi melibatkan interpolasi dan penggeseran panjang gelombang, mengingat adanya perbedaan titik nol dan penambahan panjang gelombang antara spektrum obyek dan spektrum sintetis.

3.2.3 Jarak-Metrik

Dalam metode ini, setiap spektrum digital dianggap sebagai vektor dengan elemen n , di mana n adalah jumlah resolusi elemen atau piksel. Spektrum acuan S menyatakan titik tetap dalam ruang parameter. Jarak metrik, d_{XS} antara spektrum obyek X dan acuan S diberikan oleh LaSala, 1994 sebagai berikut.

$$d_{XS} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \alpha^2 (X_i - S_i)^2}$$

di mana α adalah faktor pembobotan. Bila $\alpha^2=1$ akan diperoleh metrik Euclidean biasa. Faktor ini secara bebas dapat ditentukan pada ciri tertentu dalam spektrum sehingga dapat berwujud fungsi tangga, yakni (Penprase, 1994).

$\alpha^2 = 1$, pada ciri spektral tertentu
 = 0, pada daerah lain dalam spektrum

Seperti halnya dalam metode minimalisasi χ^2 , setiap spektrum obyek dihitung jarak metriknya relatif terhadap spektrum acuan. Satu langkah penting sebelum implementasi adalah transformasi skala fluks ke dalam skala homogen. Langkah ini direalisasikan dengan menormalisasikan seluruh skala fluks spektrum acuan maupun obyek. Untuk suatu spektrum obyek jarak-metrik dihitung terhadap seluruh spektrum acuan. Komputasi menghasilkan 43 nilai d_{XS} . Nilai terkecil dari jarak metrik ditetapkan sebagai kelas spektrum obyek klasifikasi. Skema ini juga melibatkan proses interpolasi dan pergeseran sistematis panjang gelombang antara sampel obyek dan acuan.

4. HASIL DAN EVALUASI STATISTIKA

4.1. Momen Statistika Citra

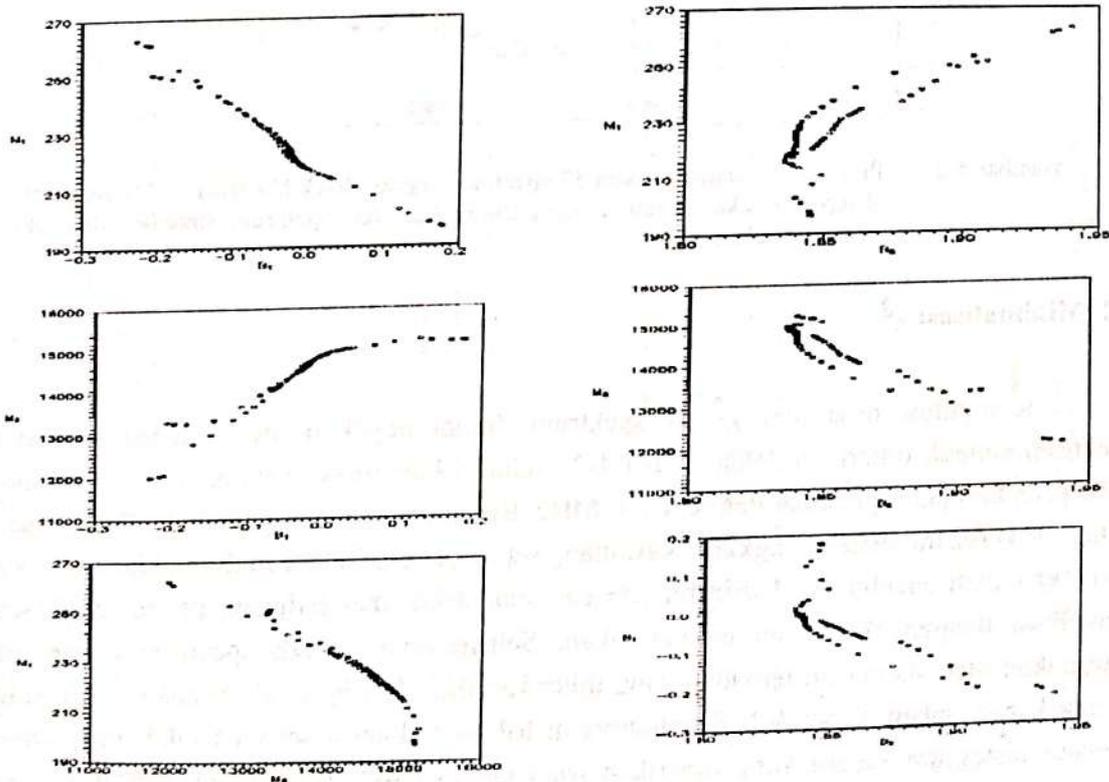
Peneliti menghitung momen statistika citra untuk 43 spektrum sintesis guna menyiapkan suatu *template* momen statistika baku. Seluruh spektrum yang dipergunakan adalah yang telah dikonvolusikan dengan fungsi Gaussian dengan lebar paro 4,5 Å. Eksperimen untuk spektrum yang ditapis dengan fungsi Gaussian dengan lebar paro 11 Å menghasilkan relasi yang serupa, sehingga dapat diharapkan bahwa *template* yang terbentuk akan universal sifatnya. Dalam melakukan pengujian, sampel kelas spektrum O dan B digabung menjadi satu, mengingat grid model atmosfer untuk kelas O jumlahnya tidak mencukupi untuk mendefinisikan satu sampel utuh. Hal yang sama juga berlaku untuk kelas spektrum K dan M. Hasil pengujian sampel disajikan dalam bentuk tabel silang dan diberikan pada Tabel 4-1 di bawah ini. Simbol (•) pada Tabel 4-1 berarti tidak ada perbedaan signifikan antara sampel dan sebaliknya perbedaan antara sampel ditandai dengan simbol (x). Dari studi Dodd dan Legett (1993) *skewness* merupakan indikator kelas spektrum yang baik dan karena itu peneliti menyelidiki perilaku ini dalam konteks momen tersebut.

Tabel 4-1 : SIGNIFIKANSI STATISTIK DARI PERBEDAAN DALAM *SKEWNESS* DAN *KURTOSIS* CITRA KELAS SPEKTRUM

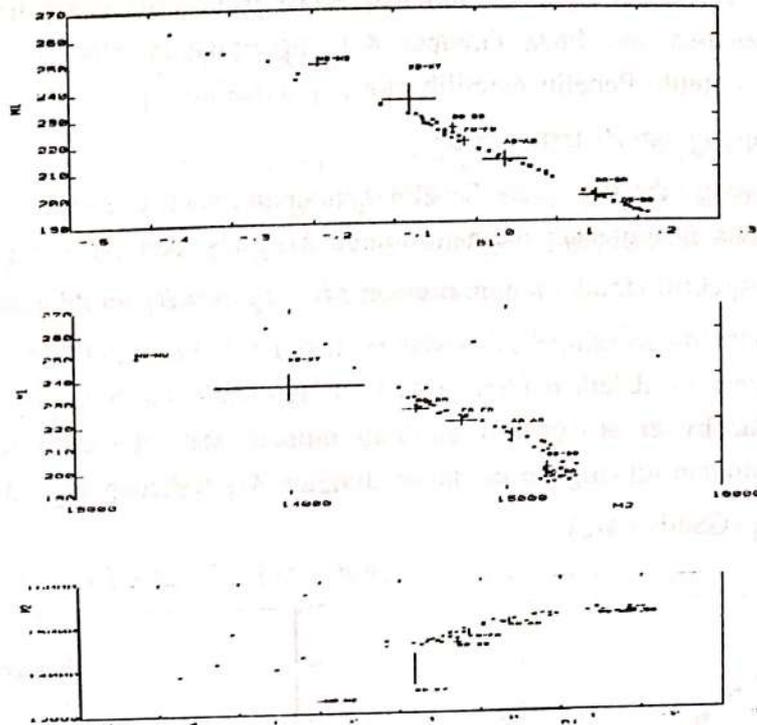
(a) Skewness						(b) Kurtosis					
	OB	A	F	G	KM		OB	A	F	G	KM
A	x					A	•				
F	x	•				F	x	•			
G	x	•	x			G	x	•	x		
KM	•	•	x	x		KM	x	x	x	x	•

Penelaahan lain dapat dilakukan terhadap relasi grafis yang dapat dibentuk di antara momen-momen statistika ini. Pada Gambar 4-1 diperlihatkan plot silang antarmomen statistika spektrum sintetik. Peneliti memilih plot M_1 terhadap B_1 dan B_2 , M_2 terhadap B_1 dan B_2 , M_1 terhadap M_2 dan B_1 terhadap B_2 .

Dari hasil yang diberikan pada Tabel 4-1 maupun dalam Gambar 4-1, dapat ditarik suatu konklusi bahwa penggunaan momen-momen M_1 , M_2 , dan B_1 sebagai representatif klasifikasi lebih prospektif. Untuk momen-momen M_1 , M_2 , dan B_1 ini dihitung nilai rata-rata dan rentang nilai momen dari sampel kelas spektrum sintetik (Tabel 2-1). Momen-momen ini berperan sebagai *template* dalam diagram relasi momen statistika. Selanjutnya terhadap 57 spektrum digital Jacoby et al., (1984) dihitung momen statistika citra spektrum. Hasil perhitungan ini kemudian dituangkan ke dalam diagram M_1 terhadap M_2 , M_1 terhadap B_1 dan M_2 terhadap B_1 (Gambar 4-2).



Gambar 4-1: Representasi grafis hubungan antarmomen citra statistik spektrum bintang sintetik. Secara berurutan diperlihatkan plot M_1 terhadap B_1 dan M_1 terhadap B_2 (atas), M_2 terhadap B_1 dan M_2 terhadap B_2 (tengah) dan plot M_1 terhadap M_2 dan B_1 terhadap B_2 (bawah).



Gambar 4-2 : Plot momen statistika citra 57 spektrum digital obyek klasifikasi. Dalam grafik disuperposisikan *template* yang diturunkan dari spektrum sintetik (lihat teks untuk penjelasan).

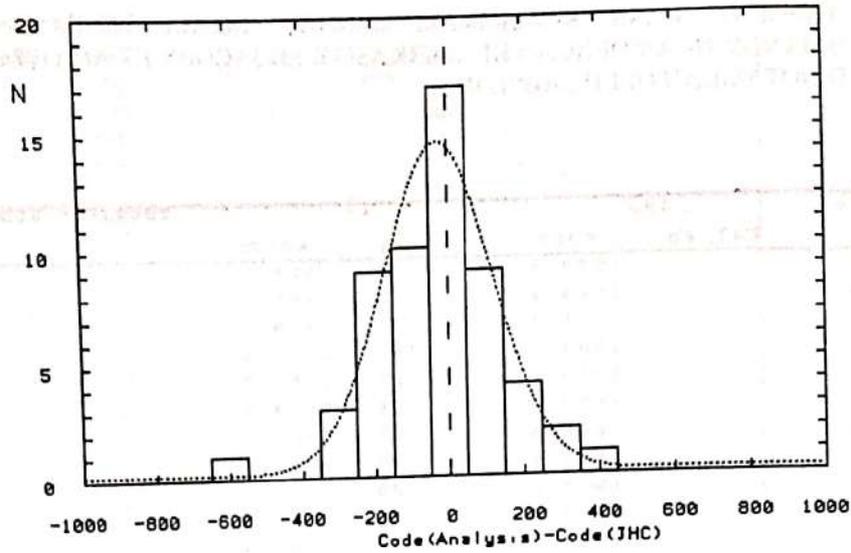
4.2 Minimalisasi χ^2

Komputasi nilai-nilai χ^2 57 spektrum digital obyek dihitung dengan acuan 43 spektrum sintetik diberikan dalam Tabel 4-2. Seluruh komputasi memakan waktu 40 menit CPU pada komputer personal Pentium 100 MHz. Berdasarkan katalog Jaschek (1978), Jacoby et al (1984) secara visual mengklasifikasi ulang setiap obyek. Dalam studi ini, klasifikasi yang dilakukan oleh Jacoby et al diambil sebagai nilai baku, dan terhadap penentuan tersebut klasifikasi dengan skema ini dibandingkan. Selisih nilai KODE spektrum obyek yang diturunkan oleh skema ini terhadap yang diberikan oleh Jacoby et al. disajikan pada kolom paling kanan dalam Tabel 4-2. Selanjutnya distribusi frekuensi selisih KODE ini diselidiki melalui histogram seperti yang diberikan pada Gambar 4-3. Dari *fitting* distribusi normal (Gaussian) diperoleh dispersi sebesar $205,90 \pm 11,85$ unit KODE. Untuk melihat hubungan klasifikasi Jacoby et al dan klasifikasi penelitian ini pada Gambar 4-4 di plot kedua besaran tersebut. Regresi linier dengan tinjauan galat pada kedua parameter, diperoleh kemiringan $0,963 \pm 0,025$ dan titik potong $90,332 \pm 79,254$ (seluruhnya dinyatakan dalam unit KODE).

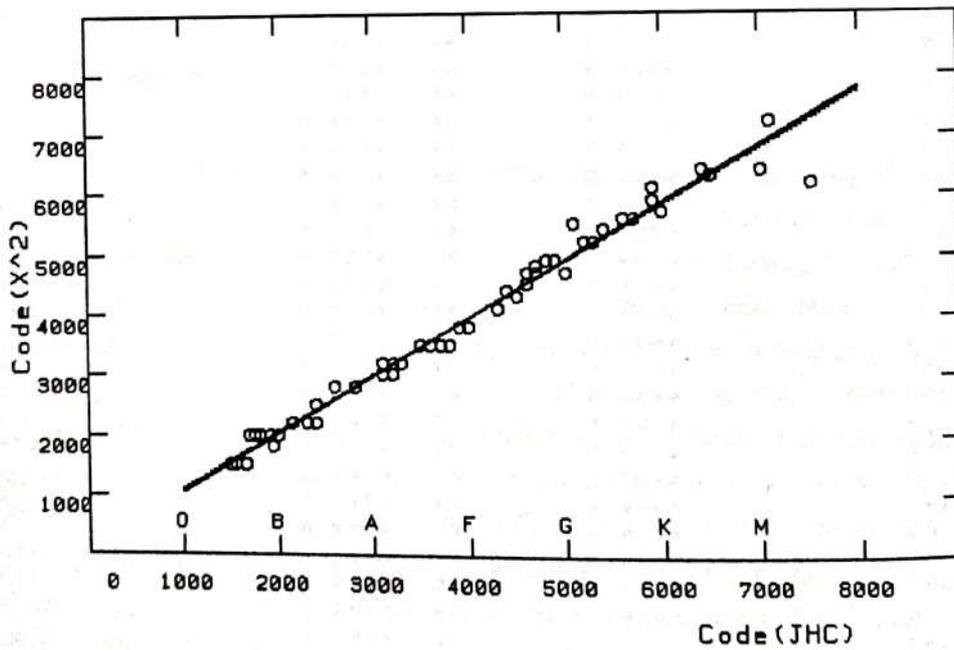
Dari seluruh hasil di atas dapat disimpulkan bahwa kecermatan klasifikasi dengan skema ini adalah 200 unit KODE yang memiliki arti 2 sub-kelas spektrum. Ketidakpastian klasifikasi tampak untuk kelas spektrum akhir (K-M) dan ditunjukkan oleh simpangan yang terjadi pada Gambar 4-4. Dari Gambar 4-3 dan 4-4 dapat disimpulkan bahwa secara umum sekitar 86% dari seluruh spektrum obyek berada dalam lingkungan 1σ .

Tabel 4-2: TABULASI HASIL KLASIFIKASI DENGAN SKEMA MINIMALISASI χ^2 DIBANDINGKAN DENGAN KLASIFIKASI OLEH JACOBY ET AL. (1984), YANG DINOTASIKAN OLEH LABEL JHC.

No	Bintang	JHC		χ^2	KODE(*2) - KODE(JHC)	
		Kel.sp	KODE		Kel.sp	KODE
1	HD242908	..	1509.5	05	1509.5	0.0
2	HD215835	..	1559.5	05	1509.5	-50.0
3	HD12993	..	1659.5	05	1509.5	-150.0
4	HD35619	..	1709.5	B0	2009.5	300.0
5	HD44811	..	1759.5	B0	2009.5	250.0
6	HD242935	..	1809.5	B0	2009.5	200.0
7	HD236894	..	1809.5	B0	2009.5	200.0
8	HD17520	..	1909.5	B0	2009.5	100.0
9	HD12323	..	1909.5	B0	2009.5	100.0
10	BD62649	..	1959.5	08	1809.5	-150.0
11	HD158659	..	2009.5	B0	2009.5	0.0
12	HD237007	..	2009.5	B0	2009.5	0.0
13	HD35215	..	2159.5	B2	2209.5	50.0
14	HD37767	..	2309.5	B2	2209.5	-100.0
15	FEIGE40	..	2409.5	B5	2509.5	100.0
16	HD240344	..	2409.5	B2	2209.5	-200.0
17	HD30584	..	2609.5	B8	2809.5	200.0
18	O1015	..	2809.5	B8	2809.5	0.0
19	HD116608	..	3109.5	A2	3209.5	100.0
20	FEIGE41	..	3109.5	A0	3009.5	-100.0
21	HD124320	..	3209.5	A2	3209.5	0.0
22	FEIGE 28	..	3209.5	A0	3009.5	-200.0
23	HD190785	..	3209.5	A0	3009.5	-200.0
24	HD221741	..	3309.5	A2	3209.5	-100.0
25	HD9547	..	3509.5	A5	3509.5	0.0
26	HD21619	..	3609.5	A5	3509.5	-100.0
27	HD23863	..	3709.5	A5	3509.5	-200.0
28	HD111525	..	3709.5	A5	3509.5	-200.0
29	HD9972	..	3809.5	A5	3509.5	-300.0
30	HD23733	..	3909.5	A8	3809.5	-100.0
31	HD10032	..	4009.5	A8	3809.5	-200.0
32	HZ948	..	4309.5	F1	4109.5	-200.0
33	HD23511	..	4409.5	F4	4409.5	0.0
34	HZ227	..	4509.5	F3	4309.5	-200.0
35	SAO57199	..	4609.5	F5	4509.5	-100.0
36	HD24189	..	4609.5	F7	4709.5	100.0
37	HD5702	..	4709.5	F7	4709.5	0.0
38	HD107132	..	4709.5	F7	4709.5	0.0
39	HD107214	..	4709.5	F8	4809.5	100.0
40	HD6111	..	4809.5	F9	4909.5	100.0
41	HD31084	..	4909.5	F9	4909.5	0.0
42	HD107399	..	4909.5	F9	4909.5	0.0
43	HD28099	..	5009.5	F7	4709.5	-300.0
44	HD17647	..	5109.5	G5	5509.5	400.0
45	HD66171	..	5209.5	G2	5209.5	0.0
46	BD581199	..	5309.5	G2	5209.5	-100.0
47	TRA14	..	5409.5	G4	5409.5	0.0
48	HD22193	..	5609.5	G6	5609.5	0.0
49	HD27685	..	5709.5	G6	5609.5	-100.0
50	HD33278	..	5909.5	K1	6109.5	200.0
51	HD29050	..	5909.5	G9	5909.5	0.0
52	HD23524	..	6009.5	G7	5709.5	-300.0
53	HD5351	..	6409.5	K4	6409.5	0.0
54	SAO76803	..	6509.5	K3	6309.5	-200.0
55	HD260655	..	7009.5	K4	6409.5	-600.0
56	BD63137	..	7109.5	M2	7209.5	100.0
57	Yale1755	..	7509.5	K2	6209.5	-1300.0



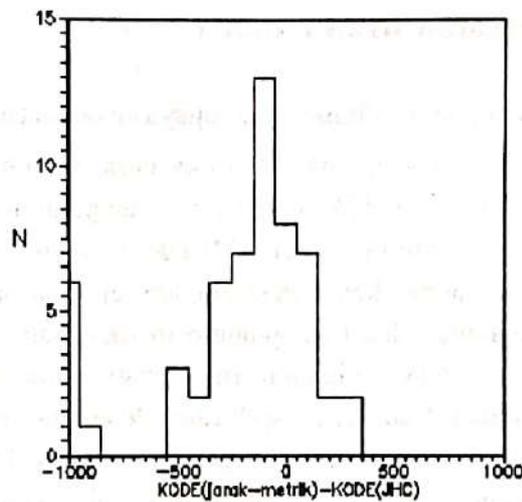
Gambar 4-3 : Distribusi frekuensi selisih KODE kelas spektrum klasifikasi dengan metode minimalisasi χ^2 dan KODE kelas spektrum oleh Jacoby et al. (1984). Garis putus-putus adalah kurva distribusi Normal (Gaussian) yang merupakan *fitting* terhadap distribusi frekuensi.



Gambar 4-4 : Plot korelasi antara KODE kelas spektrum oleh Jacoby et al. (1984) KODE kelas spektrum metode minimalisasi χ^2

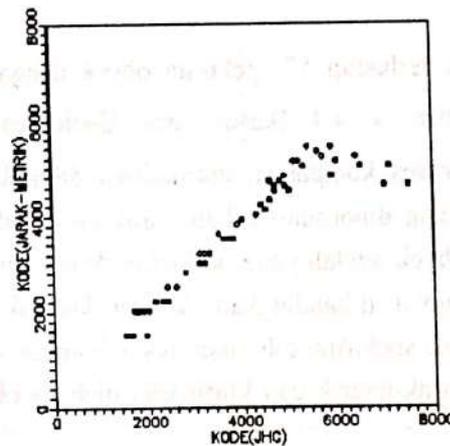
4.3 Jarak-metrik

Komputasi jarak-metrik terhadap 57 spektrum obyek dengan referensi 43 spektrum sintetik dilakukan dengan asumsi $\alpha^2 = 1$ (kasus jarak Euclidian). Tidak seperti halnya dengan metode χ^2 , dalam proses komputasi, normalisasi dilakukan terlebih dahulu, dan dengan mempergunakan fluks yang dinormalisasikan, jarak metrik dihitung. Kelas spektrum yang diberikan pada spektrum obyek adalah yang bertautan dengan nilai jarak-metrik terkecil. Hasil pengklasifikasian selanjutnya dibandingkan dengan klasifikasi oleh Jacoby et al. Distribusi frekuensi selisih KODE spektrum diberikan pada Gambar 4-5, sedang plot korelasi antara kelas spektrum metode jarak-metrik dan klasifikasi oleh Jacoby et al. diberikan pada Gambar 4-6.



Gambar 4-5 : Distribusi frekuensi selisih KODE kelas spektrum metode jarak-metrik dan Jacoby et al. (1984).

Dibandingkan dengan hasil klasifikasi dengan teknik tampak bahwa metode jarak-metrik yang dipergunakan dalam penelitian ini memberikan hasil kelas spektrum dengan ketidakpastian yang lebih besar, atau dengan kata lain kecermatan yang lebih rendah, terutama pada daerah kelas spektrum akhir (kelas G akhir hingga K dan M). Sebaran besar yang tampak disebabkan penerapan bobot yang sama pada seluruh bagian dari spektrum. Masalah ini menjadi serius manakala komputasi dilakukan pada spektrum bintang kelas akhir yang banyak mengandung garis spektral serapan dibandingkan dengan pola kontinunya. Oleh karena itu analisis lebih lanjut tidak dilakukan.



Gambar 4-6 : Plot korelasi KODE kelas spektrum metode jarak-metrik dan Jacoby et al. (1984).

5 DISKUSI DAN PENGEMBANGAN LANJUT

Dalam penelitian ini telah ditunjukkan upaya awal klasifikasi otomatis spektrum digital berdasarkan metode-metode momen statistika citra, minimalisasi χ^2 maupun jarak-metrik. Seluruh upaya dapat dilakukan dengan mempergunakan instrumentasi yang terjangkau oleh sebuah observatorium kecil. Metode momen statistika citra merupakan langkah awal untuk mencari rumpun kelas spektrum dari sejumlah spektrum digital yang akan diklasifikasikan. Secara kuantitatif hasil penggunaan metode statistika citra dapat dipertajam dengan mempergunakan metode minimalisasi. Telah ditunjukkan bahwa ketelitian penggunaan metode ini adalah 2 sub-kelas spektrum. Penelitian ini memperlihatkan bahwa ketelitian tertinggi klasifikasi otomatis berlaku untuk rentang kelas spektrum B hingga G. Sulitnya memisahkan kelas spektrum O disebabkan oleh kendala dalam membangun spektrum sintetik. Dilain pihak, spektrum bintang kelas K dan M menunjukkan dominasi garis-garis spektral yang biasanya tercampur sehingga membentuk pita spektral yang cukup lebar. Metode klasifikasi otomatis yang dibicarakan dalam penelitian ini sangat bersandar kepada definisi yang jelas dari ciri kontinu maupun garis spektral. Dalam penelitian ini penggunaan metode jarak-metrik tidak menunjukkan keberhasilan yang tinggi, mengingat penerapan formula metrik yang masih sederhana asumsinya ($\alpha^2 = 1$). Keterbatasan lain dalam tahap penelitian ini adalah kelas luminositas obyek penelitian yang masih sejenis, yakni kelas deret-utama. Pengembangan lanjut akan diarahkan kepada klasifikasi simultan kelas spektrum maupun kelas luminositasnya.

Prospek penggunaan skema klasifikasi otomatis adalah pada aktivitas survei astronomi dengan teleskop medan lebar seperti teleskop Schmidt dengan prisma di Observatorium Bosscha ITB Lembang. Seperti yang telah ditunjukkan oleh Gulati et al. (1994) klasifikasi otomatis sangat berperan ke depan dalam penentuan parameter fundamental atmosfer bintang termasuk kelimpahan metal serta studi bintang anggota gugus bola maupun terbuka.

Beberapa metode yang masih dipelajari dan akan disempurnakan lebih lanjut berdasarkan kepada analisis jarak metrik antara spektrum obyek dan acuan. Kesesuaian (*similarity*) diperoleh dengan melakukan *cross-correlation* atau memberikan bobot yang bervariasi sepanjang spektrum obyek maupun acuan. Langkah ini lebih mensimulasikan metode klasifikasi visual yang secara tradisional telah dilakukan para astronom.

Metode modern lainnya yang sedang dijajagi untuk digunakan adalah analisis multivariate yang melibatkan metode *principal component analysis*, *cluster analysis* dan *discriminant analysis* dan dapat dikembangkan lebih lanjut ke arah teknik jaringan syaraf buatan.

Dengan semakin sempurna dan meluasnya cakupan model atmosfer yang diproduksi dalam literatur akan memungkinkan sintesis spektrum teoritis dapat diproduksi dengan mudah dan cepat. Kendati dalam pembahasan kali ini masih dibatasi pada kasus komputasi model atmosfer dengan asumsi kondisi kesetimbangan termodinamika lokal (LTE) sehingga aplikatif pada jenis bintang deret-utama, kondisi non-LTE yang lebih realistis dan memiliki cakupan representasi obyek yang lebih luas akan dikembangkan secara lebih komprehensif. *Template* klasifikasi dengan sendirinya mudah dibuat dan dimodifikasi dengan mempergunakan komputer kecil sekalipun. Dilain pihak kemudahan dalam mengakses teleskop dan memperoleh spektrum digital baik secara langsung (dengan detektor elektronik) ataupun tidak langsung (digitasi dengan *scanner*) akan membawa kepada akumulasi data dalam jumlah besar dengan cara yang mudah dan cepat. Proses reduksi maupun analisis sangat dituntut sifat kecepatan dan ketepatannya. Dalam kerangka inilah pengembangan klasifikasi otomatis berbantuan komputer ini akan sangat dibutuhkan.

Ucapan terima kasih

Penelitian ini memperoleh dukungan finansial yang substansial dari Lembaga Penelitian Institut Teknologi Bandung melalui dana SPP/DPP ITB No. Kontrak 174 502 96 tahun 1995/1996. Untuk itu kami ucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya.

Kami juga berterima kasih atas segala sarana komputer, internet dan perpustakaan di Observatorium Bosscha, Departemen Astronomi, FMIPA, ITB yang memungkinkan penelitian ini berjalan dengan baik.

Diskusi dalam forum kolokium Sabtu di Observatorium Bosscha banyak membawa masukan wawasan umum klasifikasi spektrum bintang. Kami mengucapkan terima kasih kepada Ketua Departemen Astronomi dan Kepala Observatorium Bosscha atas dukungan fasilitas maupun forum diskusi. Proses digitasi spektrum tidak mungkin dapat dilakukan tanpa bantuan Drs. Budi Dermawan, M.Sc. (Department of Astronomy, Graduate School, The University of Tokyo). Untuk itu kami sampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya.

Diskusi maupun saran banyak penulis peroleh melalui media E-mail dengan Dr. Richard O. Gray (Department of Physics & Astronomy, Appalachian State University, USA), Dr. R. Hirata, (Department of Astronomy, Kyoto University, Japan) dan Dr. O. Hashimoto (Gunma Astronomical Observatory, Japan). Ucapan terima kasih kami sampaikan *reviewers* atas saran-saran berharga yang membawa perbaikan substansial dalam makalah ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Allen, C.W., 1973. *Astrophysical Quantities*, 3rd ed. (Athlone:Univ. of London)
- Bailer-Jones, C., 1996. *Neural Network Classification of Stellar Spectra*, PhD, Thesis, Univ. of Cambridge.
- Bevington, P.R., 1969. *Data Reduction and Error Analysis for The Physical Sciences* (New York:McGraw-Hill).
- Dodd, R.J. & Legget, S., 1993. *Astrophys. & Sp. Sci.*, 203, 305.
- Gray, D.F., 1992. *The Observation and Analysis of Stellar Photospheres* (Cambridge:Cambridge Univ. Press).
- Gray, R.O. & Corbally, C.J., 1994. *AJ*, 107, 742.
- Griffin, R. & Griffin, R., 1979. *A Photometric Atlas of the Spectrum of Procyon $\lambda\lambda$ 3140-7470 Å* (Ilkley:The Scolar Press).
- Gulati, R.K., Gupta, R., Gothoskar, P., Khobragade, S., 1994. *ApJ*, 426, 340.
- Heck, A., Egret, D., Nobelis, P.H. & Turlot, J.C., 1986. *Ap&SS*, 120, 223.
- von Hippel, T., Storrie-Lombardi, L.J., Storrie-Lombardi, M.C. & Irwin, M.J., 1994. *MNRAS*, 269, 97.
- Ibata, R.A. & Irwin, M.J., 1997. *AJ*, 113, 1865.
- Jacoby, G.H., Hunter, D.A., Christian, C.A., 1984. *ApJS*, 56, 257.
- Jaschek, C., 1978. *Catalogue of Selected Spectral Types in the MK System* (Strasbourg:Centre de Donnes Stellaires).
- Jaschek, C. & Jaschek, M., 1990. *The Classification of Stars* (Cambridge:Cambridge Univ. Press).
- Johnson, H.L. & Morgan, W.W., 1953. *ApJ*, 117, 313.
- Klusch, M. & Napiwotzki, R., 1993. *A&A*, 276, 309.
- Kurucz, R.E., 1992. in *Stellar Populations of Galaxies*, B. Barbuy & A. Renzini (eds.), IAU Symposium, 149, 225.
- Kurtz, M.J., 1984. in *The MK Process and Stellar Classification*, R.F. Garrison (ed.) (Toronto:David Dunlop Obs).
- LaSala, J., 1994. in *The MK Process at 50 Years: A Powerful Tool for Astrophysical Insight*, C.J. Corbally, R.O. Gray & R.F. Garrison (eds.), ASP Conf. Series, 60, 312.
- Moore, C.E., Minnaert, M.G.J. & Houtgast, J., 1966. *The Solar Spectrum, 2935 Å to 8770 Å*, NBS Monograph #61 (Washington D.C.:U.S. Government Printing Office).
- Morgan, W.W., Keenan, P.C. & Kellman, E., 1943. *An Atlas of Stellar Spectra with an Outline of Spectral Classification* (Chicago:Univ. of Chicago Press).
- Penprase, B.E., 1994. in *The MK Process at 50 Years: A Powerful Tool for Astrophysical Insight*, C.J. Corbally, R.O. Gray & R.F. Garrison (eds.), ASP Conf. Series, 60, 325.
- Press, W.H., Teukosky, S.A., Vetterling, W.T. & Flannery, B.P., 1992. *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*, 2nd ed., Cambridge Univ. Press, 603.
- Schmidt-Kaler, Th. 1982. *Bull. CDS*, 23, 1.
- Schmidt-Kaler, Th. 1982. *Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, vol 2b (Berlin:Springer-Verlag), p. 1.
- Silva, David R. & Cornell, Mark E., 1992. *ApJS*, 81, 865.
- Vieira, E.F. & Ponz, J.D., 1995. *A&AS*, 111, 393.
- Weaver, Wm.B. & Torres-Dodgen, V., 1997. *ApJ*, 487, 847.
- Whitney, C.A., 1983. *A&AS*, 51, 443.
- Yamashita, Y., Nariai, K. & Norimoto, Y., 1977. *An Atlas of Representative Stellar Spectra* (Tokyo: Univ.of Tokyo Press).
- Zekl, H., 1983. *A&A*, 108, 380.